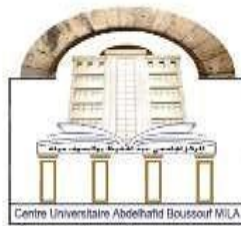


N° Ref:.....



Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf-Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et de l'environnement

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Ecologie et environnement

Spécialité: Protection des Ecosystèmes

Thème:

**Apport des SIG et de la télédétection dans
l'évaluation du risque d'incendie de forêt : Cas des
communes de Terrai Bainen et d'Amira Arrès (Mila)**

❖ **Présenté par :**

Seghir Rahma

❖ **Devant le jury composé de:**

Président : Dr. Laala Ahmed

MCB Centre universitaire de Mila

**Examineur : Dr. REBBAH Abedraouf
Chouaib**

MCB Centre universitaire de Mila

Encadreur : Dr. AOULMIT Farid

MCB Centre Universitaire de Mila

Remerciement

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a donné la force et la volonté et qui a été avec moi à tout moment .Louange à Dieu toujours et à jamais.

*En premier lieu, J'exprime mes profonds remerciements et ma profonde gratitude à mon professeur encadreur **Aoulmit Farid** pour son soutien et l'aide, pour ses bons conseils, et pour ses appréciations sur ce travail .Ses remarques pertinentes et ses suggestions ont sans cesse permis l'amélioration de la qualité de ce mémoire.*

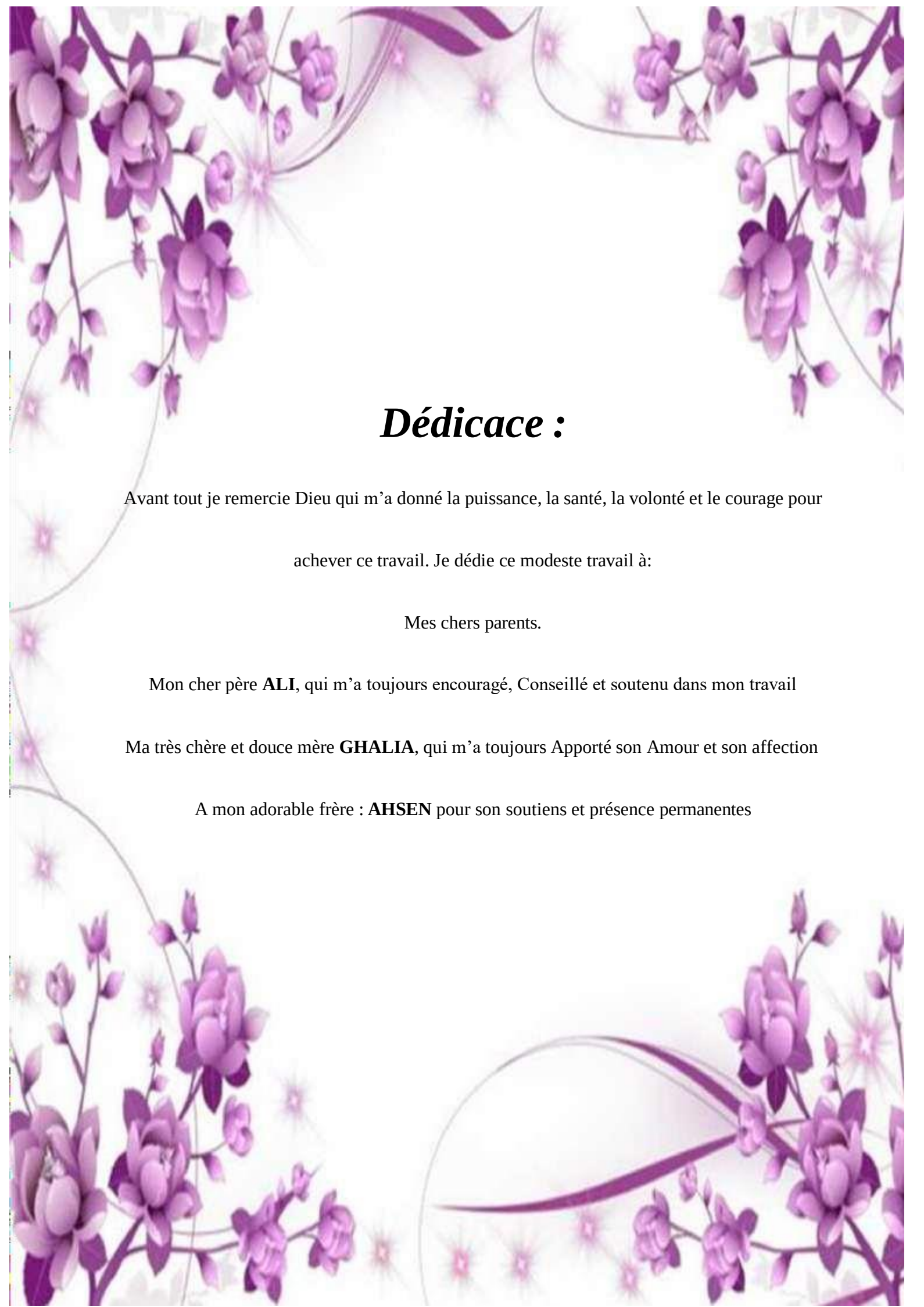
*Monsieur **Rebbah Abedraouf Chouaib**, Enseignant Maitre de conférence au centre universitaire de Mila. Nous adressons nos profonds remerciements à pour avoir accepté de juger mon travail.*

*Monsieur **DR. Laala Ahmed**, Enseignant Maitre de conférence A au centre universitaire de Mila. Je tiens à vous remercier pour présiderle jury de mon mémoire.*

Nous remercie aussi tous les personnes de la conservation des forêts Mila surtout Ms Abd djalil et Mm Manel, pour son réception et pour son aide



Rahma



Dédicace :

Avant tout je remercie Dieu qui m'a donné la puissance, la santé, la volonté et le courage pour
achever ce travail. Je dédie ce modeste travail à:

Mes chers parents.

Mon cher père **ALI**, qui m'a toujours encouragé, Conseillé et soutenu dans mon travail

Ma très chère et douce mère **GHALIA**, qui m'a toujours Apporté son Amour et son affection

A mon adorable frère : **AHSEN** pour son soutiens et présence permanentes

Tables des matières :

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	

INTRODUCTION.....	1
1.1. La flamme	4
1.2. Le feu.....	4
1.3. Le feu et incendie de forêt.....	4
1.4. Différents types de feux de forêts	5
1.4.1. Les feux de sols	5
1.4.2 .Feux de surface	5
1.4.3. Feux de cime.....	6
1.4.4. Feux avec braises.....	6
1.5. Facteurs favorisant et contrôlant les incendies	7
1.5.1. Combustibles végétaux.....	7
1.5.2. Facteurs climatiques	8
1.5.3. Facteurs géologiques	8
1.5.4. Facteurs socio-économiques	9
2. Système d'information géographique (SIG) et Télédétection.....	9
2.1. Système d'information géographique (SIG)	9
2.1.1. Principales fonctions d'un SIG.....	10
2.1.2. Modes de représentation des données géographiques	10
2.2. La Télédétection	11
2.2.1. Domaines d'application de la télédétection.....	11
1. La Couverture forestière en Algérie.....	13
1.1. Région du Nord (Zone côtière méditerranéenne):.....	13
1.2. Région de l'Atlas saharien (Est et Sud-Est).....	13
1.3. Région du Sud (Sahara)	13
1.4. Forêts de montagne et de collines (régions intermédiaires)	14
2. État des ressources forestières en Algérie	14
3. Présentation des forêts de la wilaya de Mila	14
3.1. La couverture forestière Milevienne	15
3.2. Incendies des forêts dans la wilaya de Mila.....	16

1. Présentation de la Zone d'étude	18
1.1. Situation géographique de la forêt de Zouagha et la zone d'étude	18
1.2. Condition climatiques	19
1.2.1. Climat	19
1.2.1.1. La précipitation	19
1.2.1.2. La température	20
1.2.1.3. Les vents	21
1.2.1.4. L'humidité relative	21
1.3. La géologie.....	22
1.4. Les caractéristiques du relief.....	22
1.5. Diversité biologique	23
1.5.1. La végétation	23
1.5.2. La faune	23
1. 6. Analyse temporelle des feux de forêts	24
1.6.1. Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila.....	24
1.6.2. Risque annuel d'incendie	25
1.6.3. Perte annuelle du capital boisé	27
1.6.4. Moyenne annuelle de la superficie brûlée	28
1.6.5. Bilan mensuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila.....	29
1.7. Bilan annuelle des incendies dans la forêt de Zouagha (période 2011-2024).....	30
2. Matériels et méthodes.....	32
2.1. Matériels.....	32
2.1.1. Matériels utilisées dans le bureau	32
2.1.1.1. Un micro ordinateur	32
2.1.1.2. NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources)	32
2.1.1.3. Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE).....	32
2.1.2. Des logiciels	32
2.1.2.1. ArcGIS 10.7	32
2.1.2.2. SNAP	32
2.1.3. Les images satellitaires	32
2.2. Méthodes.....	32
2.2.1. L'indice de combustibilité	34
2.2.2. L'indice d'occupation humaine (IH)	36
2.2.3. L'indice topo morphologique	36
1. Résultat et Discussion	39
1.1. Indice de combustibilité (IC).....	39
1.1.1. La carte de NDVI	39

1.1.2. La carte de BV.....	40
1.1.3. La carte de combustibilité (IC).....	41
1.2. Indice de Topo-morphologie (IM)	42
1.2.1. Carte des pentes.....	42
1.2.2. La carte des expositions (e)	44
1.2.3. Carte de Topo-morphologie (m).....	45
1.2.4. Carte de l'indice topo-morphologique (IM)	47
1.3. Indice d humaine (IH)	48
1.3.1. Carte de l'indice d'occupation humaine (IH)	50
1.4. Indice de risque de feu (IR).....	51
Conclusion générale	55
Références Bibliographiques.....	58
Annexe	64

Liste des figures :

Figure 01: Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila (2011-2021).....	4
Figure 02: Types de feux de forêts selon (Margerit, 1998).....	5
Figure 03: Feux de sol (site 02).....	5
Figure 04: Les feux de surface	6
Figure 5: Les feux de cimes	6
Figure 06: Production de braises par fort vent	7
Figure 07: Effet mécanique de la pente sur le comportement du feu (Arfa, 2008).	9
Figure 08: Les modes de représentation des données géographiques.....	10
Figure 09: Carte de situation forêt domaniales de Mila (CF, 2021).....	15
Figure 10: Répartition du patrimoine forestier selon les essences dans wilaya de Mila. (Boughaba Kh .et al ; 2021)	16
Figure 11: Situation géographique de la zone d'étude forêt de Zouagha (Mila) (CF, 2021)...	18
Figure 12: Localisation de la zone d'étude	19
Figure 13: Précipitations moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024).....	20
Figure 14: température moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024).....	20
Figure 15: vents moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024)	21
Figure 16: Humidité moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024).....	22
Figure 17: Quelques types de plantes forestières (Rahma, 2023)	23
Figure 18: Evolution annuelle du nombre d'incendie de forêt et des superficies brûlées dans la wilaya de Mila (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)	25
Figure 19: Risque annuel d'incendie de chaque commune (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)	26
Figure 20: Perte annuelle du capital boisé des communes de la wilaya de Mila (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)	28
Figure 21: Moyenne annuelle de la superficie brûlée de chaque commune. (LAGGOUNE Houda .2021)	28
Figure 22: Evolution mensuelle du nombre des incendies dans la wilaya de Mila (2017-2021) (LAGGOUNE Houda .2021).....	29
Figure 23: Répartition des superficies brûlées selon les mois (2017-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)	29
Figure 24: Organigramme de l'approche méthodologique.....	34
Figure 25: Carte de NDVI de la zone d'étude.....	40
Figure 26: Carte de biovolume végétale de la zone d'étude	41
Figure 27: La carte de combustibilité de la zone d'étude.....	41
Figure 28: La carte des pentes.....	43
Figure 29: La carte des expositions (e)	44
Figure 30: Carte de Topo-morphologie(m)	46
Figure 31: Carte de l'indice topo-morphologique de la zone d'étude.....	47
Figure 32: La carte d'agglomération et routes de la zone d'étude	48
Figure 33: La carte d'indice de présence humaine (ID) de la zone d'étude.....	49
Figure 34: La carte d'indice de voisinage (IV) de la zone d'étude	49
Figure 35: La carte d'indice d'occupation humaine de la zone d'étude	51
Figure 36: La carte d'indice de risque de feu de la zone d'étude.....	52

Liste des tableaux :

Tableau 01:Principales essences des forêts algériennes (DGF, 2004).	14
Tableau 2: Tableau 02 : Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021).....	24
Tableau 3: Répartition annuelle du risque d'incendie par commune (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021).....	25
Tableau 4:Perte annuelle du capital boisé par commune (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)	27
Tableau 5: Bilan annuelle des incendies dans la forêt de Zouagha (2011-2024) (CF.Mila)....	31
Tableau 6: : Notes de combustibilité des principales espèces dominantes de la végétation méditerranéenne (Source CEMAGREF).....	35
Tableau 7: les classes de l'indice de combustibilité. (Boughaba Kh .et al ; 2021).....	35
Tableau 8: classes de pente (Boughaba Kh .et al ; 2021).....	36
Tableau 9: classes des expositions (Boughaba Kh .et al ; 2021).....	37
Tableau 10: classes de topo morphologie (Boughaba Kh .et al ; 2021).....	37
Tableau 11: Indice de combustibilité (IC).....	42
Tableau 12: Classes de pente	44
Tableau 13: Classes d'exposition	45
Tableau 14: Classes de la topo-morphologie.....	46
Tableau 15: Classes de l'indice topo-morphologique(IM).....	47
Tableau 16: Classes de l'indice d'occupation humaine (IH)	50
Tableau 17:Classes de l'indice de risque de feu	52

Liste des abréviations :

BV	Représente le biovolume de la formation végétale.
CDSE	Copernicus Data Space Ecosystem
DAV	Data Access Viewer
e	l'exposition des versants
E	Représente la note de combustibilité pour les l'ensemble des végétations
ESA	L'Agence spatiale européenne
ESRI	Environmental Systems Research Institute
IC	Indice de combustibilité
ID	indice de présence humaine
IH	Indice d'occupation humaine
IM	Indice topo morphologique
IR	Indice de risque de feu de forêt.
IV	indice de voisinage
m	La topomorphologie
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASAPOWER	NASA Prediction Of World-wide Energy Resources
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index)
p	La pente
SIG	Systèmes d'Information Géographique
SNAP	La plateforme d'application Sentinel

Résumé:

À l'instar des forêts dans le monde entier, la forêt algérienne est soumise à de nombreuses contraintes, dont la plus redoutable reste l'incendie. Sans nul doute, il constitue le principal danger, causant des effets graves et dévastateurs, souvent irréversibles.

Dans ce contexte, les décideurs algériens ont tiré la sonnette d'alarme face à l'urgence de la situation, en mobilisant l'ensemble des services de l'État ayant un lien direct ou indirect avec la gestion forestière. Cela inclut les forces de sécurité, les responsables politiques, les services juridiques, la population ainsi que les ressources financières et les moyens matériels disponibles. En effet, pour atteindre les objectifs fixés par l'État, il est indispensable d'impliquer la communauté scientifique afin d'encadrer le processus et de mettre en place des techniques et des stratégies appropriées pour relever ce défi.

Ce travail a pour objectif d'exploiter les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ainsi que les données de télédétection, afin de créer une base de données interactive permettant une analyse multicritère et une cartographie thématique fine du risque d'incendies de forêt. L'étude porte sur une partie des forêts de Zouagha, située dans les limites administratives des communes de Terrai Bainen et d'Amira Arrès.

Les résultats obtenus, montre que près de 70 % de la zone d'étude est exposée à un risque élevé à très élevé, notamment dans les parties nord et est. Ces zones combinent des facteurs topographiques, végétaux et humains défavorables. Les zones à risque faible ou très faible restent marginales et localisées au sud.

Il est désormais évident que l'utilisation des SIG et de la télédétection constitue un apport précieux et pertinent pour la gestion durable du risque d'incendie de forêt en particulier, et des risques environnementaux en général.

Mots clés : Risque incendies de forêt, SIG, Télédétection, Forêt de Zouagha (Mila).

ملخص:

كما هو الحال بالنسبة للغابات في جميع أنحاء العالم، فإن الغابات الجزائرية تخضع للعديد من القيود، و أخطرها يبقى الحرائق. و لا شك أن هذا يشكل الخطر الرئيسي، ويسبب آثاراً خطيرة ومدمرة، وفي كثير من الأحيان لا يمكن إصلاحها.

وفي هذا السياق، دق صناع القرار الجزائريون ناقوس الخطر حول خطورة الوضع، من خلال تعبئة كل مصالح الدولة التي لها صلة مباشرة أو غير مباشرة بإدارة الغابات. ويشمل ذلك قوات الأمن والزعماء السياسيين والخدمات القانونية والسكان بالإضافة إلى الموارد المالية والمادية المتاحة. وفي الواقع، لتحقيق الأهداف التي حددتها الدولة، من الضروري إشراك المجتمع العلمي من أجل الإشراف على العملية ووضع التقنيات والاستراتيجيات المناسبة لمواجهة هذا التحدي.

يهدف هذا العمل إلى الاستفادة من أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بالإضافة إلى بيانات الاستشعار عن بعد، من أجل إنشاء قاعدة بيانات تفاعلية تسمح بالتحليل متعدد المعايير والرسم الخرائطي الموضوعي الدقيق لمخاطر حرائق الغابات. وتغطي الدراسة جزءاً من غابات زواغة، الواقعة ضمن الحدود الإدارية لبلديتي تيراي باينن وأميرة عريس.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن ما يقرب من 70٪ من منطقة الدراسة معرضة لمخاطر عالية إلى عالية جداً، وخاصة في الأجزاء الشمالية والشرقية. تجمع هذه المناطق بين العوامل الطبوغرافية والنباتية والبشرية غير الملائمة. وتظل المناطق ذات المخاطر المنخفضة أو المنخفضة للغاية هامشية وتقع في الجنوب.

من الواضح الآن أن استخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد يشكل مساهمة قيمة وذات صلة بالإدارة المستدامة لمخاطر حرائق الغابات على وجه الخصوص، والمخاطر البيئية بشكل عام.

الكلمات المفتاحية: مخاطر حرائق الغابات، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، غابة زواغة (ميلة).

Abstract:

Like forests around the world, Algerian forests face numerous challenges, with fire being one of the most serious and threatening. Undoubtedly, it represents the main hazard due to its severe and destructive impacts, which are often irreversible.

In this context, Algerian decision-makers have sounded the alarm in response to the urgency of the situation, mobilizing all state services directly or indirectly related to forest management. This includes security forces, political leaders, legal services, the population, as well as available financial resources and material means. Indeed, to achieve the objectives set by the state, it is essential to involve the scientific community to provide guidance and to develop appropriate techniques and strategies to address this challenge.

This study aims to utilize Geographic Information Systems (GIS) tools and remote sensing data to create an interactive database that allows for multi-criteria analysis and the production of detailed thematic maps of forest fire risks. The study focuses on part of the Zouagha forests, located within the administrative boundaries of the communes of Terrai Bainen and Amira Arrès.

The results show that approximately 70% of the study area is exposed to high to very high fire risk, particularly in the northern and eastern parts. These areas are characterized by unfavourable combinations of topographic, vegetative, and human factors. Areas with low or very low risk are marginal and mainly located in the south.

It has become clear that the use of GIS and remote sensing data provides a valuable and effective contribution to the sustainable management of forest fire risks in particular, and environmental risks in general.

Keywords: Forest fire risk, GIS, Remote sensing, Zouagha forest (Mila).

Introduction

INTRODUCTION

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

En Algérie, comme dans tous les pays du monde, les forêts subissent une immense dégradation chaque année, principalement due aux incendies. Cela a entraîné une destruction massive de l'écosystème forestier, se traduisant par la dégradation des sols, l'altération des paysages et la réduction de la superficie forestière à l'échelle de la planète (**Alexandrian et al.1998**).

Ce problème a poussé la communauté mondiale (politicienne, citoyenne et scientifique) à tirer la sonnette d'alarme afin de le contrôler, en exploitant toutes les ressources matérielles, humaines et scientifiques disponibles. Dans ce contexte, les scientifiques ont pris en charge le développement de méthodes, de techniques et d'équipements dans le but de maîtriser la situation et de trouver des solutions adéquates et durables.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection constituent des outils et des techniques particulièrement efficaces pour la gestion des catastrophes naturelles en général, et de cette problématique en particulier. Ces technologies ont fourni des moyens permettant un contrôle spatiotemporel d'une efficacité avérée. Grâce à ces outils, il est possible de générer facilement des cartographies thématiques détaillées et de proposer des scénarios ainsi que des recommandations adaptées à chaque cas, en tenant compte des spécificités de la région et du pays en général.

Il faut signaler que la télédétection est, tout simplement, l'étude à distance des phénomènes à l'aide de divers outils, tels que les images satellites. Ces images offrent une vue globale et fournissent une grande variété d'informations, ce qui nécessite des techniques capables de les gérer et de les mettre en interaction. Les SIG semblent être particulièrement adaptés pour répondre efficacement à ce type de problématique.

La gestion durable et la lutte contre les incendies de forêt ne peuvent être abordées qu'à travers une cartographie thématique des zones exposées au risque de départ de feu, en s'appuyant sur des outils modernes tels que la télédétection et les SIG (Arfa et al.2009).

Dans la présente étude, nous allons tenter d'évaluer le risque d'incendie des forêts

existant dans les communes de Terrai Bainen et d'Amira Arrès, cette dernière faisant partie de la forêt de Zouagha, qui occupe la partie nord-est de la wilaya de Mila. Pour ce faire, nous exploiterons les outils de la télédétection et les techniques des Systèmes d'Information Géographique (SIG), en appliquant le modèle développé par DAGORNE Y. et DUCHE (1994), qui permet de mettre en interaction plusieurs couches d'informations. Cela nous offrira la possibilité de réaliser une analyse multicritère afin de répondre à la problématique posée précédemment.

Pour réaliser cette étude, notre travail a été subdivisé en trois pôles :

Le premier pôle présente un aperçu bibliographique sur les incendies de forêts ainsi qu'un état des lieux de la couverture forestière en Algérie, en mettant particulièrement l'accent sur celle de la wilaya de Mila, notamment la forêt de Zouagha qui s'étend sur les communes de Terrai Bainen et Amira Arrès.

Le deuxième pôle est consacré à la présentation du matériel, des données utilisées et de la méthodologie appliquée pour atteindre les objectifs de l'étude.

Le troisième pôle porte sur l'application de la modélisation du phénomène étudié, à savoir le risque d'incendie de forêt, l'analyse des résultats obtenus, suivie d'une conclusion accompagnée de recommandations.

Chapitre I

Concepts et définitions

1.1. La flamme :

Selon Coward, H.F. et al. (1952), une flamme peut être déterminée comme un milieu réactionnel caractérisé par la présence des gaz provoquant une énergie haute et occupant volume limité. Ce milieu crée un environnement favorisant des réactions chimiques, des phénomènes de diffusion d'espèces (comme des molécules ou des atomes) et provoquant par conséquent des émissions lumineuses. Autrement dit, la flamme représente une interaction composée par des phénomènes physiques et chimiques dans un espace déterminé.

1.2. Le feu :

Le feu est un processus complexe impliquant plusieurs paramètres, défini comme étant un dégagement simultané de chaleur, de lumière et de flamme, produit par la combustion vive de certains matériaux (bois, feuilles, tapis herbacé, etc.) (FAO, 2002).

1.3. Le feu et incendie de forêt :

Un feu de forêt est un incendie qui se déclenche et se propage dans un espace boisé, constitué principalement de bois ou de forêts. Autrement dit, les feux de forêt sont classés comme des catastrophes naturelles dévastatrices qui se propagent dans des formations naturelles plus fréquemment de type forestier.

Le terme « **incendie de forêt** » est utilisé lorsque la surface affectée est égale ou supérieure à un hectare, et doit être composée principalement d'arbres et d'arbustes, ou de formations sub-forestières de petite taille (comme des arbres feuillus, des conifères ou des formations mixtes appelées maquis, garrigue ou landes) (DGF, 2014).

En outre, (Trabaud, 1992) a défini l'incendie comme «une combustion qui se développe sans contrôle dans l'espace et dans le temps. L'incendie de forêt s'alimente de tous les combustibles possibles et ainsi se propage jusqu'à l'épuisement de ceux-ci.».



Figure 01: Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila (2011-2021).(site 01)

1.4. Différents types de feux de forêts :

On peut distinguer quatre types principaux de feux de forêts, selon leur mode de propagation, lequel est essentiellement contrôlé par la nature de la végétation, sa structure, ainsi que par les facteurs climatiques (Margerit, 1998).



Figure 02: Types de feux de forêts selon (Margerit, 1998).

1.4. 1. Les feux de sols :

Ce genre de feu est très dangereux, car il est plus difficile à détecter en raison de l'absence presque totale de flammes. Il se propage lentement, principalement dans la litière et l'humus (Megrouche, 2006). Ce type de feu présente un risque dévastateur pour les racines des arbres.



Figure 03: Feux de sol (site 02)

1.4.2 .Feux de surface :

Ce genre de feu est largement répandu et se caractérise par une propagation par rayonnement ou convection, avec une vitesse de propagation plus rapide que celle des feux de sol. Il dégage beaucoup de flammes et de chaleur, et affecte la garrigue ou les landes. En général, il touche la végétation stratifiée de niveau bas, plus précisément la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux. En outre, les feux de surface peuvent provoquer

l'inflammation de la cime des arbres par un saut de flamme d'une branche à l'autre (**Pierre-Yves et al, 2001**).



Figure 04: Les feux de surface. (site 03)

1.4.3. Feux de cime:

Les feux de cime sont très dangereux, largement répandus, et se propagent avec une telle rapidité qu'ils sont difficiles à maîtriser. De plus, ce type de feu libère généralement une grande quantité d'énergie et affecte la partie supérieure des arbres (ligneux hauts), en formant une couronne de feu (**Megrouche, 2006**).



Figure 5: Les feux de cimes.(site 04)

1.4. 4. Feux avec braises:

Les feux avec braises peuvent, le plus souvent, être engendrés par des feux de cime, ou encore par certaines conditions climatiques (comme le vent) ou géographiques (comme la topographie) (**Pierre-Yves et al, 2001**). Le transport de ces braises peut atteindre de longues distances par rapport à la source de feu, allant jusqu'à 10 ou 20 km dans des cas exceptionnels (**Colin et al, 2001**).

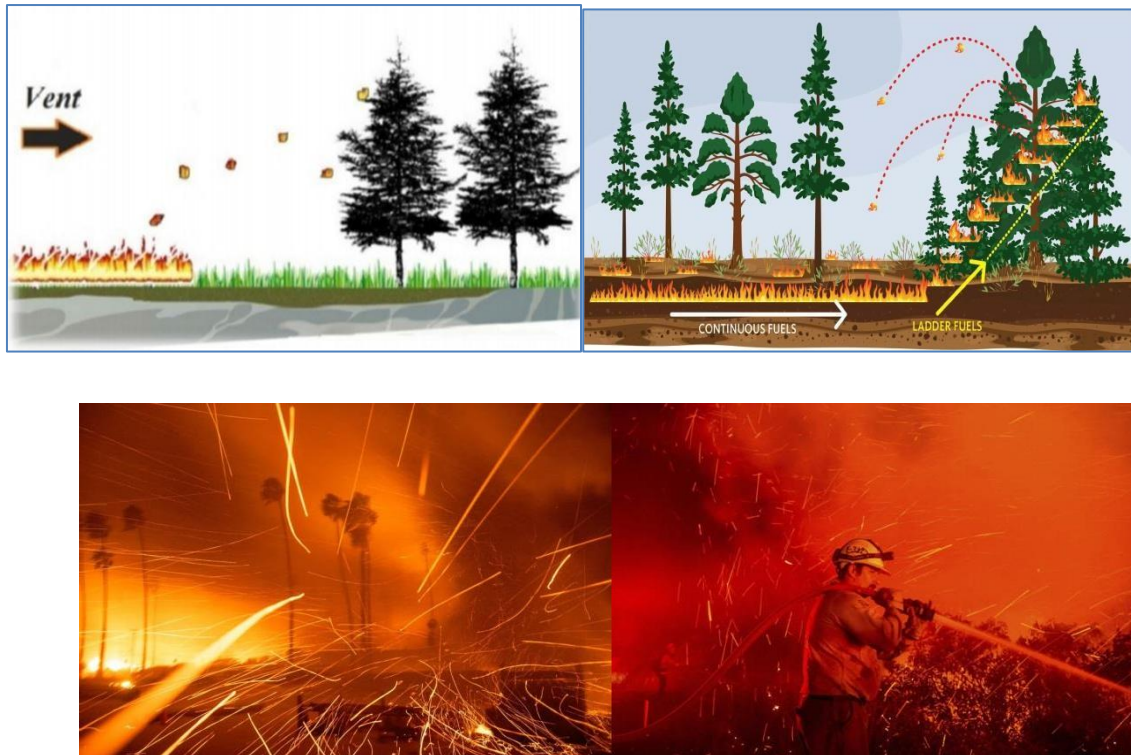


Figure 06: Production de braises par fort vent (Pierre-Yves et al. 2001).

1.5. Facteurs favorisant et contrôlant les incendies :

Dans ce qui suit, nous allons tenter de mettre en lumière les facteurs jouant un rôle essentiel dans le développement et la propagation des incendies, lesquels sont sans doute en étroite relation avec le type de combustibles végétaux, les facteurs climatiques (ou conditions climatiques), ainsi que les facteurs géologiques, plus particulièrement la topographie.

1.5.1. Combustibles végétaux:

Le combustible végétal peut être défini comme un bio-polymère complexe composé de cellulose (40 à 45 %), de lignine (26 à 34 %), d'hémicellulose (7 à 15 %), de composés extractibles (<15 %) et de matières minérales qui produisent des cendres lors de la combustion (Orfao et al., 1999; Weiland et al., 1998). Par ailleurs, les émissions de combustion sont étroitement liées à la composition chimique du combustible ainsi qu'aux conditions de combustion. Ces différentes composantes, qu'elles soient vivantes ou mortes, constituent des éléments combustibles de tailles et de formes variées (Brown, 1970, in Trabaud, 1983).

1.5.2. Facteurs climatiques:

- **Température:** Ce facteur joue un rôle très important, à titre d'exemple, les combustibles exposés au soleil se réchauffent plus rapidement que ceux situés sous un couvert forestier (**Arfa, 2008**).
- **Précipitations:** En particulier les précipitations de type pluie, car elles sont plus fréquemment observées par rapport aux autres types. En fait, si la pluviosité est régulière tout au long de l'année, l'occurrence des incendies et les superficies brûlées seront relativement faibles. En revanche, lorsque la pluviosité est perturbée, avec des périodes sèches prolongées, les feux seront nombreux (**Trabaud, 1970**).
- **Humidité relative:** C'est le rapport de la pression observée de la vapeur d'eau à la pression maximale compatible avec la température de l'air. Elle n'agit pas directement sur le phénomène d'apparition des Feux, mais elle joue un rôle très important sur la teneur en eau des végétaux combustibles (**Trabaud, 1970**).
- **Vitesse et direction du vent:** Sans nul doute, le vent est bel et bien le facteur le plus aggravant dans un incendie de forêt. Il contribue à l'embrasement, à l'accélération, au transport et à la propagation du feu (**Frédéric, 1992**). De plus, le vent favorise le dessèchement des combustibles et le fléchissement de la colonne de convection.

1.5.3. Facteurs géologiques :

La géologie de la région peut influencer les incendies de forêt, notamment à travers la nature du sol, l'hydrogéologie et, plus spécifiquement, la topographie. Cette dernière joue un rôle primordial dans le comportement des feux de forêt, en raison de l'inclinaison des pentes, de leur exposition au soleil et au vent, ainsi que de l'élévation du terrain.

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

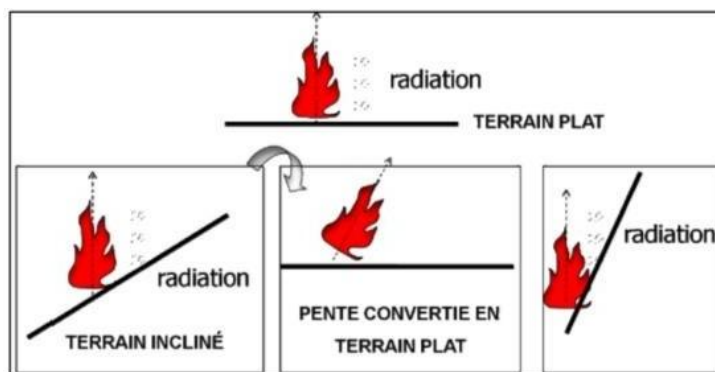


Figure 07: Effet mécanique de la pente sur le comportement du feu (Arfa, 2008).

- **Exposition des pentes:** En effet, l'exposition de la pente au vent et au soleil détermine la quantité de chaleur reçue, en fonction de l'insolation, de la valeur et de la direction des vents, ainsi que de la quantité et du type de combustible **(Arfa, 2008)**.
- **Elévation du terrain :** L'élévation du terrain au-dessus du niveau de la mer influence le comportement des incendies de forêt en agissant sur les conditions météorologiques et la répartition de la végétation **(Arfa, 2008)**.

1.5.4. Facteurs socio-économiques:

Les transformations socio-économiques survenues au cours des dernières décennies ont eu un impact notable sur le risque d'incendie de forêt. Parmi les changements les plus significatifs on peut citer à titre d'exemple le développement de l'interface habitat-forêt, conséquence d'une urbanisation non planifiée, qui a entraîné une augmentation considérable du risque d'incendie.

2. Système d'information géographique (SIG) et Télédétection:

2.1. Système d'information géographique (SIG):

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

2.1.1. Principales fonctions d'un SIG :

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

- ❖ **Abstraction** : Modélisation de la réalité en fonction d'une perspective spécifique du monde.
- ❖ **Acquisition** : Collecte, intégration et échange de données géographiques.
- ❖ **Archivage** : Organisation et conservation de l'information géographique sous format numérique.
- ❖ **Affichage** : Représentation et mise en forme des données, notamment par des cartes.
- ❖ **Analyse** : Analyse spatiale incluant des calculs géométriques des objets et le croisement de données thématiques.

2.1.2. Modes de représentation des données géographiques :

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

- **Mode vecteur**: Les objets sont définis par des points, des arcs ou des polygones, et l'information géographique est représentée de manière à refléter leur perception dans le monde réel (**SITAYEB, 2006**).
- **Mode raster** : Les données sont stockées sous forme de cellules de taille et de forme identiques, servant à représenter l'espace en le découpant de manière régulière (**SITAYEB, 2006**).

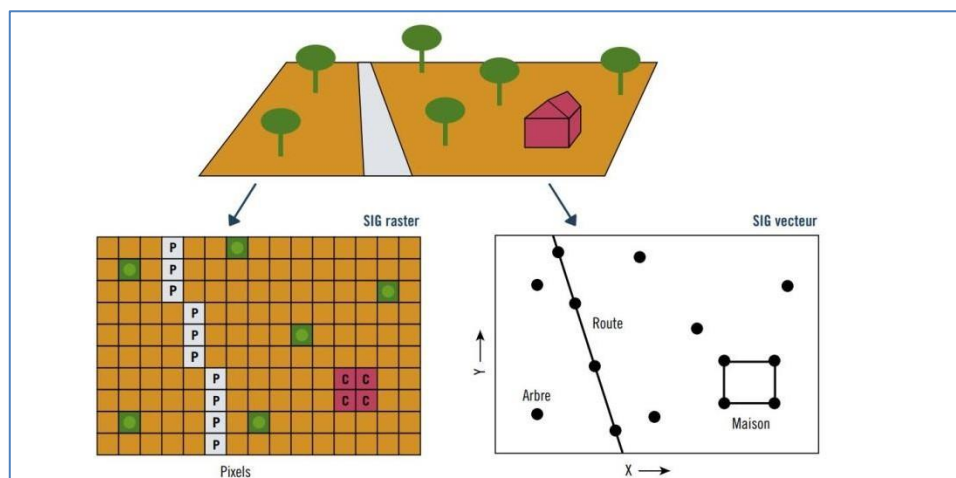


Figure 08: Les modes de représentation des données géographiques (SITAYEB, 2006)

2.2. La Télédétection :

La télédétection est un ensemble de techniques et de moyens permettant d'obtenir des informations sur la surface terrestre (ou d'une autre planète) sans contact direct, par l'acquisition d'images, notamment à l'aide de satellites. Ces données sont collectées à l'aide de capteurs embarqués sur des satellites ou des avions (**CCT, 2018 ; Robert, 2007**).

En effet, la télédétection offre une grande variété d'informations sur la Terre, telles que la couverture végétale, les caractéristiques du relief, la qualité de l'eau, etc.

2.2.1. Domaines d'application de la télédétection:

Dans ce qui suit, nous mettrons en lumière certains domaines qui utilisent la télédétection comme un outil fondamental pour le développement de diverses études ou recherches.

- Géosciences : Géologie, pédologie, géomorphologie...etc.
- Météorologie : Vitesse des vents, précipitations, températures, détection des cyclones, orages...etc.
- Océanographique : Couleur de l'eau, turbidité, hauteur des vagues, courant marine phytoplancton, pollution marine.
- Foresterie : Couverture forestière, santé des forêts, impacts après ouragans...etc.
- Cadastre / urbanisme Couverture du sol, urbanisation, contrôle des autorisations (piscines, zones bâties...).
- Agriculture : Identification des plantations, évaluation de la production...
- Environnement : Etudes d'impact, détection des changements...
- Biologie / écologie : Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...etc.
- Télécommunication : Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...etc.
- Hydrologie : Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycle ...etc.
- Archéologie : Cartographie des sites archéologiques.
- Santé : Prévision des épidémies, relation avec les changements globaux.
- Humanitaire : Pré-alerte de famines : réfugiés (camps).
- Catastrophes environnementales : Feux de forêts, éruptions volcanique, sécheresses, marées noires.
- Changements globaux : Désertification, variation climatiques, compositions de l'atmosphère...etc.

Chapitre II

Contexte de l'étude

1. La couverture forestière en Algérie :

En Algérie, la couverture forestière se concentre principalement dans la région nord, où le climat méditerranéen favorise son développement. Selon (**Mezali ; 2003**), les forêts algériennes s'étendent sur environ 12,5 millions d'hectares, soit près de 13 % de la superficie nationale. En outre, ces forêts se répartissent avec une variance remarquable d'une région à l'autre sur le plan genre et densité. Dans ce qui suit, nous présenterons de manière générale les principales régions où se concentre la couverture forestière:

1.1. Région du Nord (Zone côtière méditerranéenne):

S'étale sur une superficie atteignant environ 90% de la superficie forestière totale de l'Algérie. Ces forêts sont concentrées dans les montagnes de la zone du Tell, qui inclut les massifs de Kabylie, de l'Atlas Tellien, et des Aurès. Dans le coté essence forestière, ces régions marquent la prédominance de pin d'Alep, le pin maritime, le chêne-liège et le cèdre de l'Atlas (notamment dans les montagnes de Kabylie). De plus, il y a noté que les régions forestières majeures sont représentées par ; Tizi-Ouzou, Bejaia, Bouira, Skikda, Jijel, Constantine, Sétif et Médéa.

1.2. Région de l'Atlas saharien (Est et Sud-Est) :

Comparée à la répartition forestière du Nord, cette région présente une couverture beaucoup plus restreinte, représentant environ 5 à 10 % de la superficie forestière totale du pays. On y trouve des formations forestières dispersées, principalement dans les massifs montagneux du Hoggar et du Tassili n'Ajjer. Ces forêts sont peu denses et se caractérisent par une végétation adaptée aux conditions semi-arides. Sur le plan floristique, elles abritent essentiellement des chênes verts, des pins parasols, ainsi que des formations arbustives dominées par des espèces telles que l'arganier et l'acacia.

1.3. Région du Sud (Sahara) :

En effet, dans ces régions, les forêts sont pratiquement absentes. Toutefois, des formations végétales caractéristiques du climat désertique subsistent dans certaines zones bien délimitées, notamment sous forme d'oasis. Ces milieux abritent une végétation adaptée aux conditions climatiques extrêmes, comme de petites formations d'acacias, de palmiers

dattiers ou encore de mimosas, observées notamment dans les oasis du Sahara central et oriental.

1.4. Forêts de montagne et de collines (régions intermédiaires) :

Ces forêts se situent à des altitudes intermédiaires, essentiellement composées de chêne vert, auxquels s'ajoutent parfois le pin parasol et d'autres espèces adaptées aux zones de moyenne altitude.

2. État des ressources forestières en Algérie :

La forêt algérienne est en lutte permanente contre divers agents de dégradation et de déforestation, qui interviennent à plusieurs niveaux. Par ailleurs, elle subit une régression progressive de ses essences principales, souvent remplacées par des formations de maquis et de broussailles (Arfa, 2019). Il convient également de souligner que les forêts algériennes se distinguent par leur grande hétérogénéité et diversité, étroitement liées aux conditions climatiques et géomorphologiques variées du pays. Dans ce qui suit, nous présenterons les principales essences forestières présentes en Algérie (DGF, 2004).

Tableau 01: 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%

3. Présentation des forêts de la wilaya de Mila :

La wilaya de Mila est couverte par une superficie forestière d'environ 33 870 hectares. Les principales essences forestières présentes dans cette région sont : le pin d'Alep,

le chêne-liège, le chêne zéen, le pin pignon, le frêne et l'eucalyptus. Parmi ces essences, le pin d'Alep constitue l'espèce dominante, occupant près de 48,57 % de la superficie forestière totale. Il est particulièrement répandu dans les forêts de Ferdjioua, AïnBeïda, Bouhatem, Mila, Chelghoum Laïd et Tadjanet.

Le chêne-liège, couvre environ 16,73 % de cette superficie et se retrouve notamment dans les forêts de Grarem Gouga, Sidi Merouane, Tassadane El Hadjadj, Tarai Bainen et Amira Arrés. D'autres essences, telles que le chêne zéen, le pin pignon, le frêne et l'eucalyptus, occupent des superficies plus modestes, représentant respectivement environ 1,29 %, 1,77 %, 0,59 % et 0,29 % de la surface forestière totale (**Bendjeddou, 2012**).

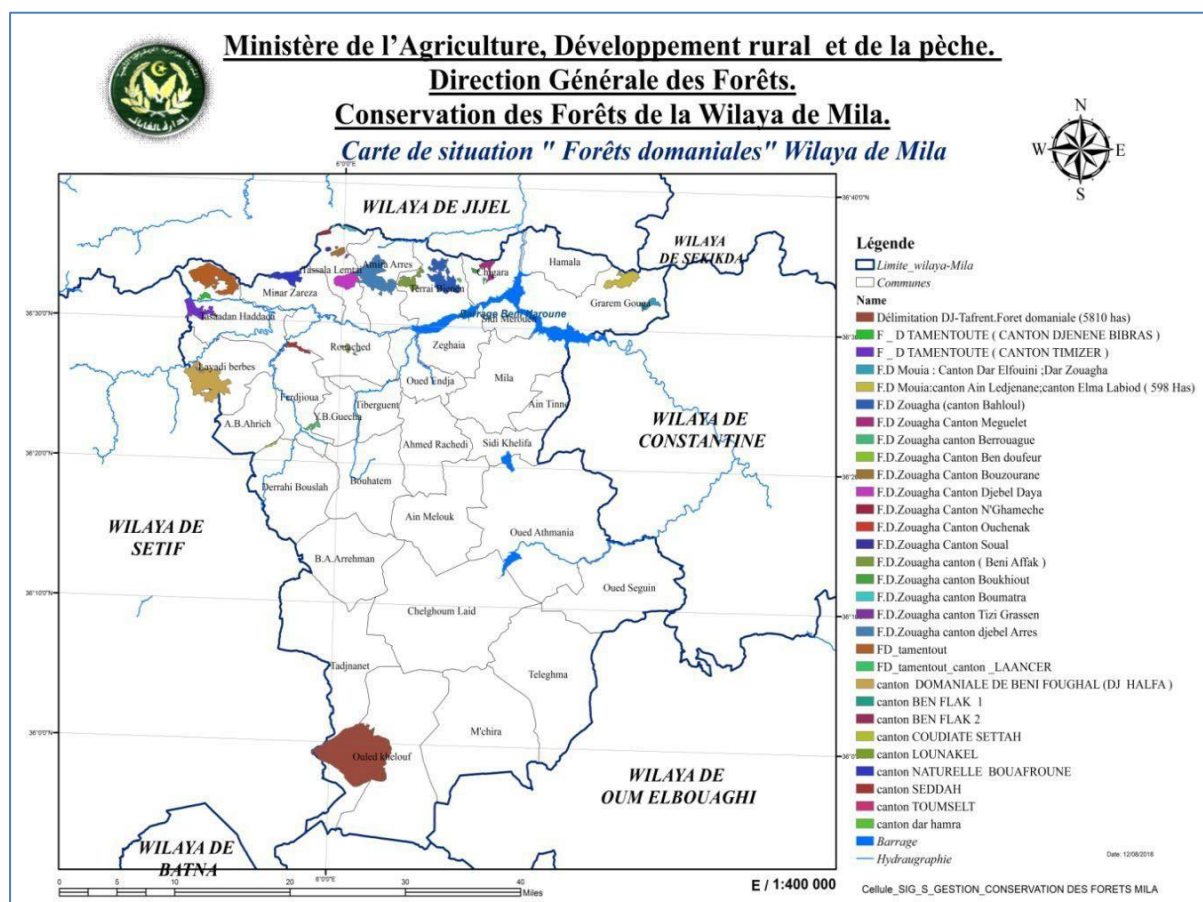


Figure 09: Carte de situation forêt domaniales de Mila (CF, 2021)

3.1. La couverture forestière Miléviennne:

La forêt de Mila distribue selon les domaines suivants :

- ✓ Forêts naturelles ; dominé par le chêne liège et occupe environ 6.762hectares.
- ✓ Reboisements ; dominée pin d'Alep et le cyprès et s'étalent sur une superficie de 18.493hectares.
- ✓ Maquis ; représentés par des maquis de chêne vert et genévrier occupant une superficie de 8.415hectares (**Zouaidia, 2006**).

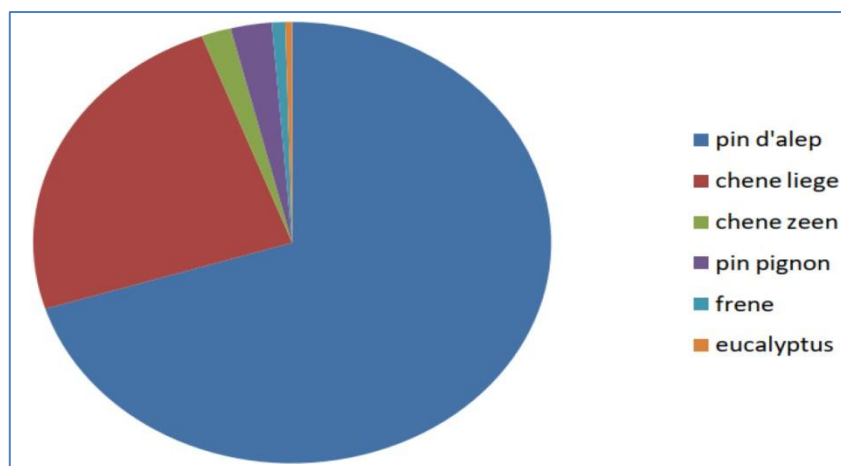


Figure 10: Répartition du patrimoine forestier selon les essences dans wilaya de Mila. (Boughaba Kh .et al ; 2021)

3.2. Incendies des forêts dans la wilaya de Mila

Globalement, sur l'intervalle de 10 ans, depuis l'année de 2011 jusqu'à 2021, l'espace forestière de Mila a enregistré environ 192 de feux soit environ 2009,47hectares. Les années de 2019 et 2020 présentent les années les plus dévastatrices d'une superficie plus de 564 hectares et 480.5 hectares, respectivement. Tandis que, l'année 2013 est l'année où la superficie d'incendiée la plus faible affectant 17 hectares.

Dans ce contexte, nous allons tenter de mettre en lumière les facteurs spatio-temporels et environnementaux qui expliquent la récurrence et la gravité des incendies de forêts dans une région particulièrement touchée par ce phénomène, notamment les communes de Terrai Bainen et d'Amira Arès. L'objectif est de mieux anticiper et gérer ce risque.

Dans ce cadre d'étude, nous avons mobilisé les données de télédétection et les outils des systèmes d'information géographique (SIG) afin d'analyser et de cartographier le risque d'incendie de forêt dans les zones les plus affectées. Cette approche nous a permis d'identifier les zones les plus vulnérables, de déterminer les facteurs potentiels de déclenchement, et de proposer des mesures de prévention et de gestion adaptées au contexte local.

Chapitre III

Matériels et Méthodes

1. Présentation de la Zone d'étude :

1.1. Situation géographique de la forêt de Zouagha et la zone d'étude :

La forêt de Zouagha est située au Nord de la wilaya de Mila. Elle est limitée à l'Est par l'Oued El Kabir, au Sud par les villes de Chigara, Terrai Bainen, Arrés et Tassala Lemtai, en amont du lac Béni Haroune (Grarem Gouga), au Nord la ligne de la crête de la chaîne de Zouagha et la limite entre la wilaya de Jijel et Mila, à l'Ouest par le col de F'Doules. Elle s'étale sur une superficie de 3915,52 ha, et est parfaitement divisée en 5 cantons dont les principaux sont « El Bahloul, Beni Afek, Bouzourane, Djbel Arrés, et Meguelet (DGF 2018).

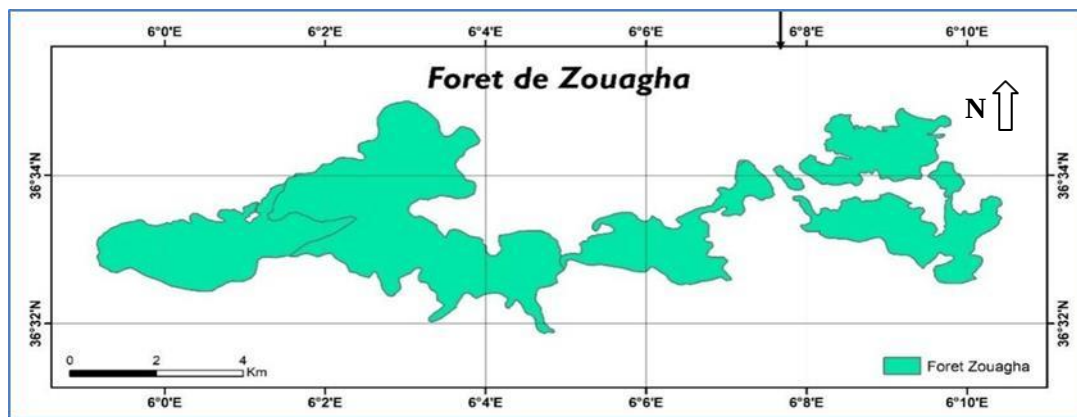


Figure 11: Situation géographique de la zone d'étude forêt de Zouagha (Mila) (CF, 2021).

La zone d'étude fait partie du forêt de Zouagha, occupant les communes d'Amira Arrés et celle de Terrai Bainen. Elle s'est située dans la partie nord de la wilaya de Mila et se caractérise par un relief montagneux complexe. Elle est bordée par les pentes des monts Zouagha, incluant le Djebel El Arbi, et délimitée au sud par le barrage de Beni Haroun.

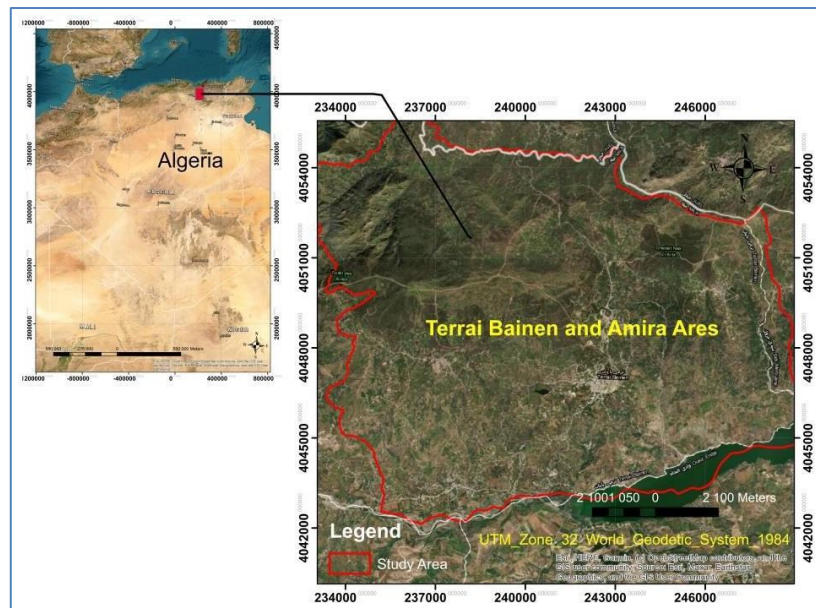


Figure 12: Localisation de la zone d'étude

1.2. Condition climatiques :

1.2.1. Climat :

Toutes les données climatiques sont télécharger à partir de satellite de NASA/POWER (NASA Prediction Of World wide Energy Resources (POWER) | Data Access Viewer (DAV)). Source Résolution native, Dates mensuelles et annuelles (mois / jour / an): 01/01/1990 au 31/12/2024 en LSTLOCATION: Latitude 36.5421 Longitude 6.1176 Élévation de Merra-2: moyenne pour 0,5 x 0,625 degrés Lat / LAL de la région = 567,19 mètres. (site 05)

1.2.1.1. La précipitation :

Ce graphique à barres représente l'évolution des précipitations au cours de la période (2000-2024).

Les précipitations les plus élevées ont été enregistrées en 2003 et les plus faibles en 2024.

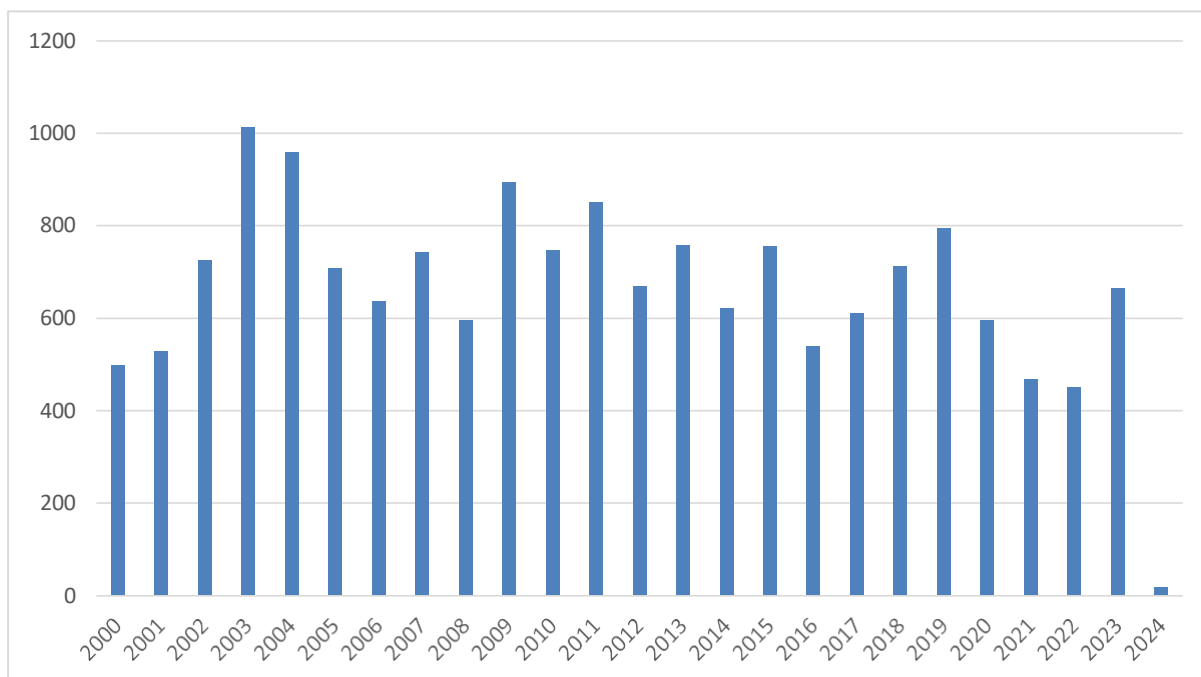


Figure 13: Précipitations moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024)

1.2.1.2. La température :

D'après la courbe qui décrit les variations des températures annuelles (moyennes, Maximales et minimales) de la région de Mila, en remarque que la température maximale est enregistrée durant le l'année de 2022 (18,45 °C), tandis que l'année de 2005 est marqué par des degrés de froid, avec une température minimale (15,57°C).

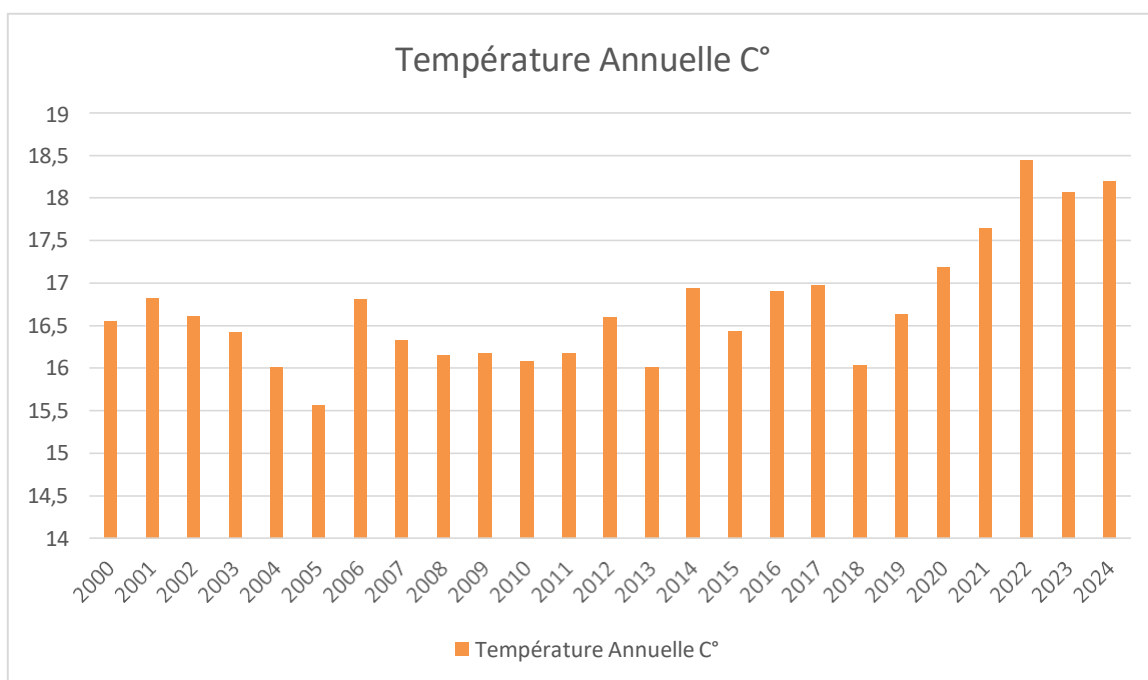


Figure 14: température moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024)

1.2.1.3. Les vents :

Le vent fait partie des éléments les plus caractéristiques du climat au regard de feux de forêt, pouvant induire ainsi une sécheresse (**Seltzer, 1946**).

La Figure 15 montre que la vitesse maximale des vents est de 3,85 enregistrée durant l'année de 2010, alors que la vitesse minimale des vents est de 3,26 caractérisée l'année de 2005

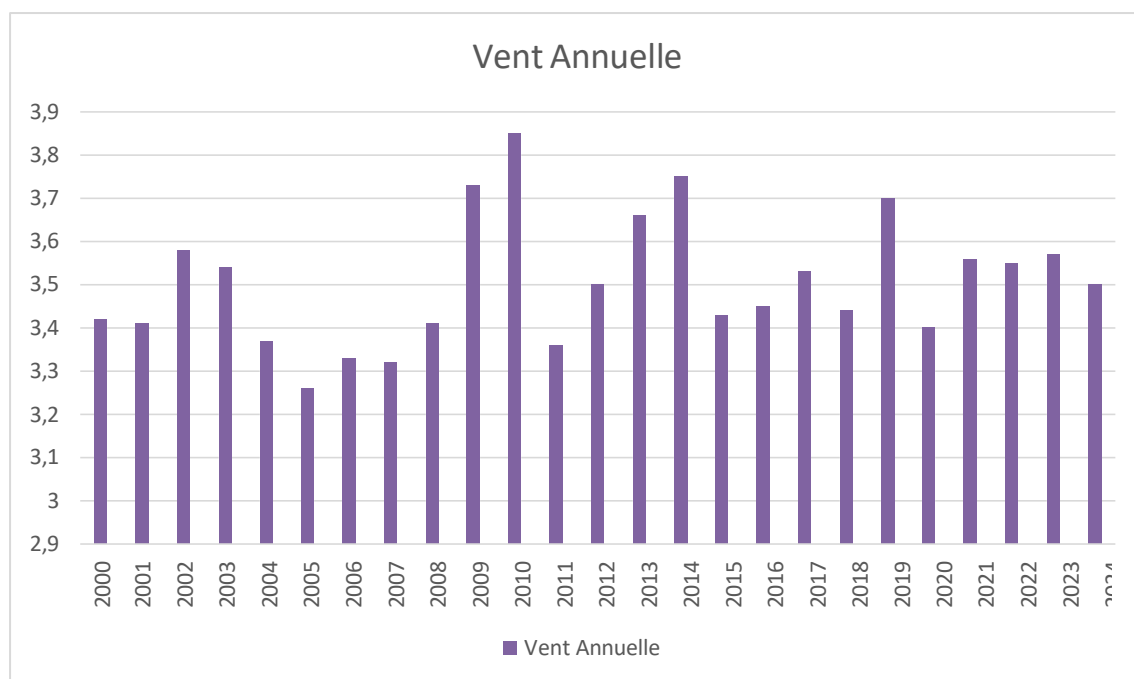


Figure 15: vents moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024)

1.2.1.4. L'humidité relative :

C'est le rapport de la quantité de la vapeur d'eau observée à la température ta quantité de la vapeur maximale d'eau que l'air peut contenir. Elle n'agit pas directement sur le phénomène d'apparition des feux, mais elle joue un rôle très important sur la teneur en eau des végétaux qui influés directement sur la combustibilité (**Trabaud, 1970**).

La Figure 16, décrites plus fortes valeurs d'humidité (8,36) durant l'année de 2003, alors que la plus faible valeur est remarquée à l'année de 2017 avec (7,41)

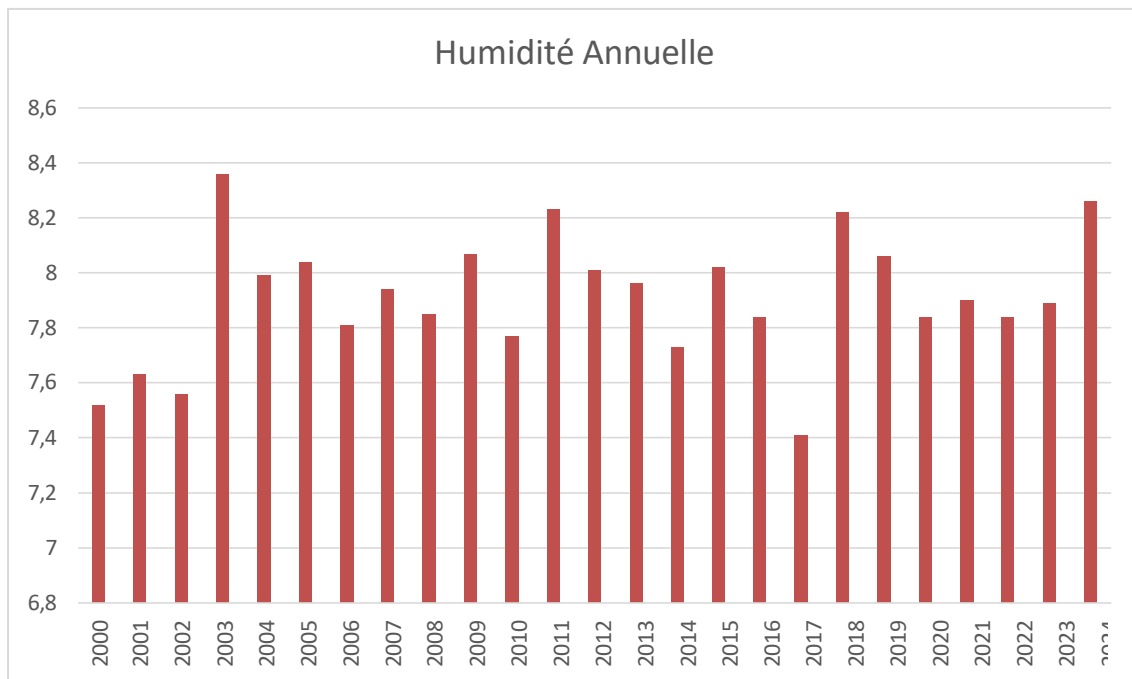


Figure 16: Humidité moyenne annuelle de la wilaya de Mila (2000-2024)

1.3. La géologie :

La géologie de la forêt de Zouagha Mila se caractérise par son interaction avec diverses formations géologiques et l'impact des activités humaines sur sa dynamique écologique. Le contexte géologique de la forêt est influencé par les dépôts sédimentaires environnants et le développement des interfaces entre la nature et l'urbanisation, ce qui a des implications importantes pour la gestion et la conservation des forêts.

La forêt de Zouagha est située dans une région aux formations géologiques diverses, qui influencent les propriétés des sols et la dynamique de la végétation. Les caractéristiques physiques et chimiques des sols de cette zone sont influencées par la géologie sous-jacente, comme le montrent des études menées dans des régions similaires (**Ekpo et Orakwe, 2023**).

Les formations géologiques contribuent à la santé écologique de la forêt, en influençant la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments, essentielles au maintien du couvert forestier.

1.4. Les caractéristiques du relief :

La forêt de Zouagha Mila présente des caractéristiques de relief distinctes qui influencent considérablement sa dynamique écologique et la gestion des risques d'incendie. La topographie de la forêt, notamment son altitude et sa pente, joue un rôle crucial dans la répartition de la végétation et son potentiel de régénération, ainsi que dans l'interaction entre les zones urbaines et les régions forestières (**Bhunja et al., 2012**).

Topographie : Le relief autour de la forêt est marqué par des montagnes et des collines, avec des altitudes variant entre 500 et 600 mètres. Des massifs isolés tels que le djebel Akhel, Boucharef, Ouakissen et le massif d'Ahmed Rachedi émergent dans cette région.

Géologie : La région présente un relief montagneux très désordonné, avec des collines et des piémonts situés au nord-est de la wilaya.

1.5. Diversité biologique :

1.5.1. La végétation :

La forêt de Zouagha dans laquelle la zone d'étude fait partie est constituée essentiellement de peuplements de chêne zéen (*Quercus canariensis*), de chêne afarès (*Quercus afarès*) et de chêne liège (*Quercus suber*).

Selon B.N.E.F (1994), le cortège floristique de la forêt de Zouagha est constitué de :

- Arbousier (*Arbustus unedo*), Bruyère (*Erica arborea*), Calycotome spinosa (*Cytisus spinosus*), Ronce (*Rubus fruticosus*), Cytise (*Laburnum anagyroides*), Pistachier Lentisque (*Pistacia lentiscus*), Myrte (*Myrtus communis*), Asphodèle (*Asphodelus*), Scirpus (*Scirpus sylvaticus*), Oléastre (*Olea europaea*), Frêne (*Fraxinus exelsior*), Aubépine (*Crataegus monogyna*), Retama (*Retama monosperma*).



Figure 17: Quelques types d'arbres forestiers (Rahma, 2023)

1.5.2. La faune :

Les espèces animales rencontrées dans la forêt de Zouagha sont: sanglier, chacal , tourterelle ,perdrix ambra et les oiseaux.

1. 6. Analyse temporelle des feux de forêts :

1.6.1. Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila :

Le tableau 06 et la figure 20 représentent le bilan annuel des incendies de forêts enregistrées au niveau de la wilaya de Mila durant la période (2011-2021) :

Tableau 02 : Bilan annuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)

Années	Nombre de foyers	Superficies brûlées	
		(en ha)	(en %)
2011	11	121	6,02
2012	37	151	7,51
2013	8	17	0,85
2014	16	98,5	4,90
2015	4	207,72	10,34
2016	15	56.5	2,81
2017	17	180	8,96
2018	16	56,25	2,80
2019	16	564	28,07
2020	16	480,5	23,91
2021	5	77	383
Total	161	2009,47	100

On peut noter que l'année 2019 est la plus affectée, avec une superficie brûlée de l'ordre de 564 ha, soit environ 28,07 % de la superficie totale incendiée (2009,47 ha). En revanche, l'année 2013 a enregistré la plus faible superficie touchée par les incendies, estimée à seulement 17 ha, soit 0,85 % de la superficie totale incendiée.

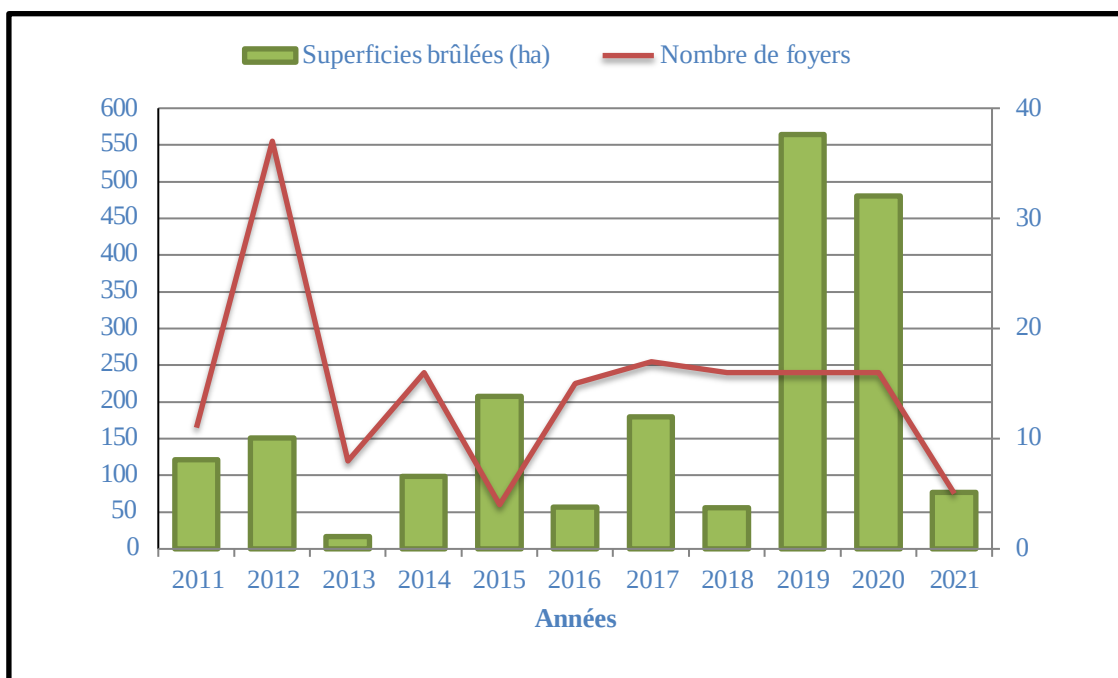


Figure 18: Evolution annuelle du nombre d'incendie de forêt et des superficies brûlées dans la wilaya de Mila (2011-2021).

1.6.2. Risque annuel d'incendie :

la figure 19 et le tableau 03 révèle clairement que la commune de Terrai Bainen est belle et bien exposée à un risque annuel très élevé d'incendie, avec un nombre de foyers estimé à 27,15 pour 10 000 ha par rapport aux autre communes. En revanche, les communes de Bousselah, Chelghoum Laïd, Ahmed Rachdi et Ouled Khlouf sont confrontées à un risque annuel faible.

Tableau 3: Répartition annuelle du risque d'incendie par commune (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)

Communes	Superficie forestière (en ha)	Nombre de foyers par 10000 ha
Rouached	1430	12,71
Grarem	1227,08	5,19
Chigara	1548,28	7,63
Layadi berbes	2404	3,78
Bousselah	908	1,00
Arrés	1382,54	10,52
Bainen	1473,16	27,15

Tassadane	3063	4,75
Ahmed rachedi	1430	0,64
Tassala	1058,30	13,74
Ferdjioua	660	4,13
Teleghma	225	4,04
Beni guecha	640	5,68
Ouled khlouf	6840	0,27
Zeghaia	794	2,29
Minar zareza	105	17,32
Sidi merouane	161	5,65
Tadjnanet	120	7,58
Oued athmania	1082	4,20
Hamala	625	1,45
Chelghoum laid	1960	0,93

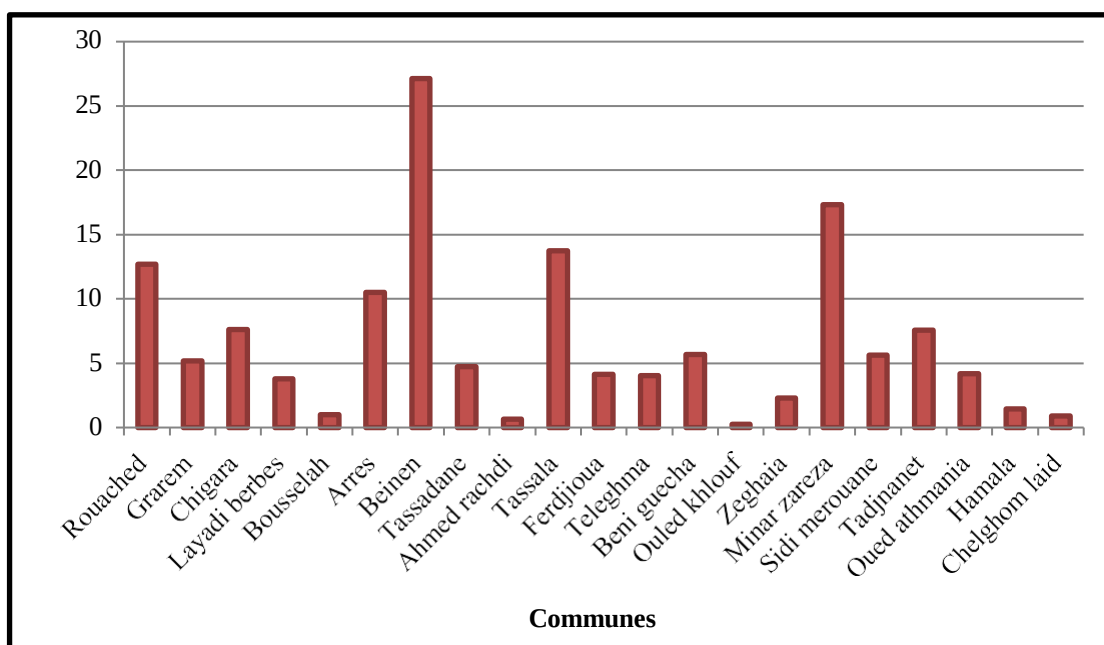


Figure 19: Risque annuel d'incendie de chaque commune (2011-2021).

1.6.3. Perte annuelle du capital boisé :

Selon (Vélez ; 1990), il y a noté que la perte annuelle du capital boisé correspond à la pondération des superficies brûlées, rapportée à 100 hectares de forêt. L'analyse de la figure 20 et du tableau 04 montre que les communes de Tassala, Minar Zareza et Bainen marquent une forte perte annuelle du capital boisé, variant de 2,11 à 2,65 hectares de superficie brûlée pour 100 hectares de forêt. Tandis que, les communes de Hamala, Bousselah, Zeghaia, Tadjnanet et Ahmed Rachdi présentent de faibles pertes annuelles..

Tableau 4:Perte annuelle du capital boisé par commune (2011-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)

Communes	Superficie forestière en (ha)	Perte annuelle (superficie brûlée/100 ha)
Rouached	1430	1,77
Grarem	1227,08	0,65
Chigara	1548,28	1,02
Layadi berbes	2404	0,67
Bousselah	908	0,05
Amira Arrès	1382,54	0,80
Teraï Bainen	1473,16	2,11
Tassadane	3063	0,47
Ahmed rachedi	1430	0,01
Tassala	1058,30	2,65
Ferdjioua	660	0,28
Teleghma	225	0,12
Beni guecha	640	0,53
Ouled khlouf	6840	0,26
Zeghaia	794	0,05
Minar zareza	105	2,12
Sidi merouane	161	0,11
Tadjnanet	120	0,02
Oued athmania	1082	0,17
Hamala	625	0,09
Chelghoum laid	1960	0,19

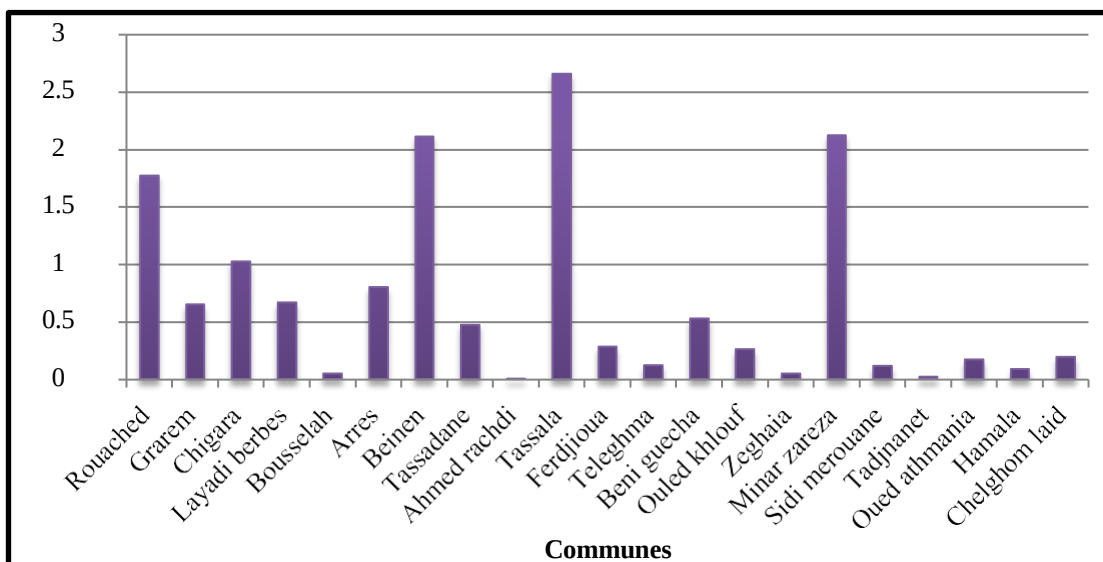


Figure 20: Perte annuelle du capital boisé des communes de la wilaya de Mila (2011- 2021).

1.6.4. Moyenne annuelle de la superficie brûlée :

La plus forte moyenne annuelle de superficie forestière touchée par les incendies est observée dans les communes de Terrai Bainen et de Tassala, avec respectivement 31,09 hectares et 28,09 hectares par an. En revanche, la commune de Tadjanet enregistre la moyenne la plus faible, avec seulement 0,02 hectare par an (voir figure 21).

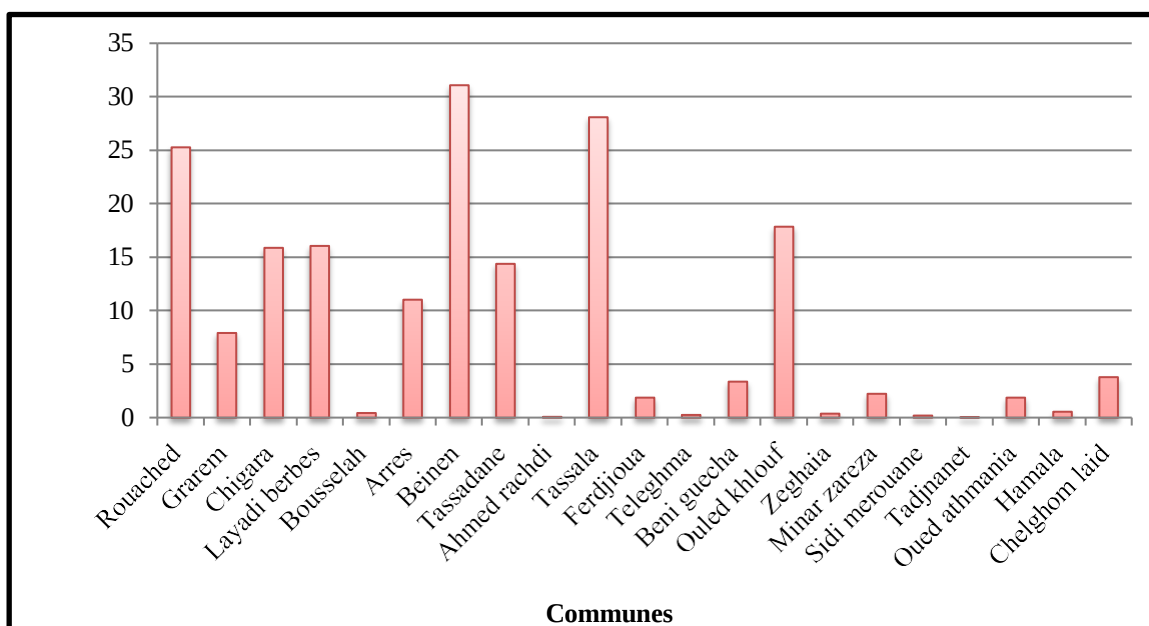


Figure 21: Moyenne annuelle de la superficie brûlée de chaque commune.

1.6.5. Bilan mensuel des incendies de forêts dans la wilaya de Mila :

Les figures en sous dessous montrent clairement que la période allant de juin à octobre correspond aux mois les plus touchés par les incendies. En effet, cette période se caractérise par des conditions météorologiques aggravantes, telles que des hautes degrés de chaleurs, une sécheresse prolongée, la présence de vents chauds intense, ainsi que certaines pratiques humaines intensifiées durant la saison estivale et les vacances. De plus, on peut

dévoiler que le mois de juillet marque le début d'une forte activité incendiaire, avec une occurrence importante : 29 foyers ont été enregistrés par les services forestiers. Il est suivi par le mois d'août, qui compte 23 foyers. En revanche, les mois de juin, septembre et octobre enregistrent un nombre nettement plus réduit de foyers, avec respectivement 8, 5 et 6 cas signalés. Il est à noter que le mois d'août est le plus impacté en termes de superficie brûlée, avec des pertes atteignant 741,5 hectares, soit environ 54,61 % de la superficie totale incendiée durant la période d'étude.

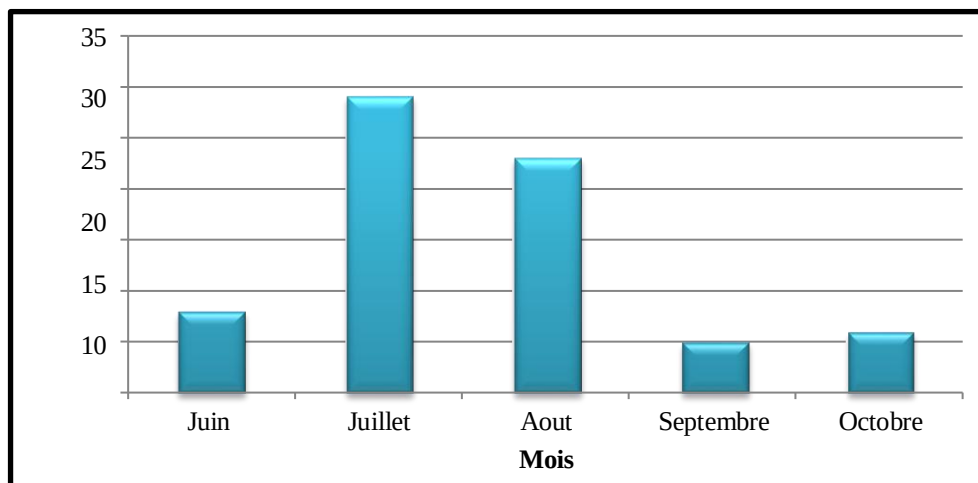


Figure 22: Evolution mensuelle du nombre des incendies dans la wilaya de Mila (2017- 2021)

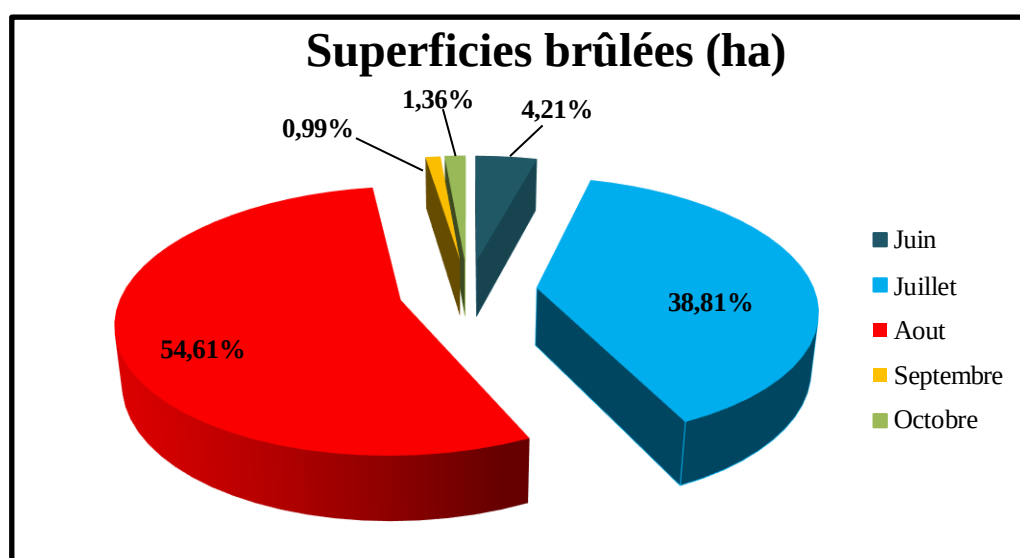


Figure 23: Répartition des superficies brûlées selon les mois (2017-2021). (LAGGOUNE Houda .2021)

1.7. Bilan annuelle des incendies dans la forêt de Zouagha (période 2011-2024) :

Le tableau ci-après montre le bilan annuel des incendies ayant touché la forêt de Zouagha, répartis par commune ou zone géographique, sur la période allant de 2011 à 2024. L'analyse de ces données met en évidence l'importance cruciale de la prise en compte du risque d'incendie dans les politiques de gestion forestière. Une telle approche s'avère essentielle pour limiter les causes de ces sinistres et en atténuer les impacts sur l'habitat humain, le couvert végétal ainsi que sur l'environnement dans son ensemble.

Tableau 5: Bilan annuelle des incendies dans la forêt de Zouagha (2011-2024) (CF.Mila)

Année	Communes	Lieu	Nombre des foyers	Nombre total des foyers en (ha)	Superficie totale en (ha)
2011	Arrés	oued el baoud	1	1	2
	Bainen	FD Zouagha	1	2	3,5
		El Bahloul	1		
		FD Zouagha	1		
2012	Arrés	Ouatyat Ayach	2		
		Oued el baoud	2	6	27
		Aghelmane	1		
	Bainen	Beni akaf	6	17	69
		El Bahloul	11		
	Tassala	Essedari	1	2	9,5
		DJ Daya	1		
2013	Bainen	Beni akaf	1	1	1,5
	Beni Guecha	El Bahloul	9	9	63
		Eskhouana	1	1	1
2014	Tassala	DJ Daya	1	2	21
	Arrés	Essedari	1		
		oued el baoud	1	2	5,5
		Aghelmane	1		
2015	Bainen	El Bahloul	1	1	3
	Tassala	Bouzoran	1	1	4
2016	Arrés	Koubaa	1	1	3
	Bainen	Beni akaf	2		
		Draa Talyane	1	4	8
		Dar Essama	1		
2017	Tassala	Zouagha	2	3	74
		Boudaoud	1		
	Bainen	El Bahloul	3	4	36
		Djaarane	1		
2018	Bainen	Beni Affak	4	4	8
2019	Bainen	Beni Affak	1	1	150
2020	Tassala	Anssa	1		
		Bouzorane	2	4	200,5
		Reb Fdous	1		
	Arrés	Zolat	1		
		Aguelman	1	3	61
		DJ Arrés	1		
2021	Arrés	DJ Arrés	1	1	23
	Arrés	Aguelman	1	1	4
2022	Tassala	Esdari	2	2	10
		Bouזורane	1	1	2
2023	0	0	0	0	0
2024	Bainen	Merdj Tafari	1	1	40

2. Matériels et méthodes:

2.1. Matériels :

2.1.1. Matériels utilisés dans le bureau :

2.1.1.1. Un micro-ordinateur:

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé un micro-ordinateur haut performance équipé d'un processeur Intel Core i7 de 10^e génération.

2.1.1.2. NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources):

Le projet NASA Prediction of World wide Energy Resources (POWER) est une initiative du programme de gestion de l'énergie en sciences appliquées de la Direction des missions scientifiques de la NASA. Il vise à fournir des données fiables et complètes sur les ressources énergétiques mondiales, particulièrement utiles aux secteurs des énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien. **(Chandler et al., 2013).**

2.1.1.3. Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE):

L'écosystème de données Copernicus (CDSE) est une plateforme transformatrice conçue pour améliorer l'accès aux données d'observation de la Terre (OT), facilitant la collaboration entre les différents acteurs et intégrant des API et des normes ouvertes pour prendre en charge diverses applications. Le CDSE favorise une approche fédérée, permettant aux utilisateurs d'accéder aux données, de les traiter et de les visualiser tout en gardant le contrôle de l'intégration et de la confidentialité **(Milčinski et al, 2024).**

2.1.2. Des logiciels :

Les principaux logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont:

2.1.2.1. ArcGIS 10.7:

ArcGIS 10.7 est un système d'information géographique (SIG) complet développé par ESRI, conçu pour faciliter la visualisation, l'analyse et la gestion des données spatiales. Il intègre diverses fonctionnalités permettant l'analyse spatiale avancée, la manipulation des données et la cartographie. **(ESRI, 2010)**

2.1.2.2. SNAP :

SNAP est un logiciel open source développé par l'Agence spatiale européenne (ESA) pour le traitement et l'analyse des données d'observation de la Terre, notamment celles des satellites Sentinel du programme Copernicus. Il prend aussi en charge les données d'autres missions de l'ESA et de satellites tiers.

2.1.3. Les images satellitaires :

Actuellement, les images satellitaires constituent un apport précieux dans le domaine de la cartographie environnementale, en particulier pour la cartographie du couvert végétal. Elles jouent également un rôle essentiel dans la planification et la gestion des ressources naturelles, ainsi que dans la gestion environnementale de manière générale (**Pouchin, 2001**).

Dans cette présente étude, nous avons utilisé deux types d'image satellitaires de satellite Sentinel qui sont ;

❖ **Image satellite 1 (capturée le 20241012) :**

S2B_MSIL2A_20241012T101859_N0511_R065_T32SKF_20241012T161915

❖ **Image satellite 2 (capturée le 20220921):**

S1A_IW_GRDH_1SDV_20220921T173726_20220921T173755_045106_0563E480
11.data)

2.2. Méthodes :

L'Approche méthodologique adoptée consiste l'établissement de la carte de risque incendie fait appel à l'application d'un modèle mis en place par DUCHE et DAGORNE (1993) largement utilisé sur les écosystèmes forestiers de la région méditerranéenne.

Afin d'atteindre l'objectif fixé, le modèle appliqué fait intervenir les trois principaux facteurs pour l'évaluation du risque de feu de forêt à savoir : l'indice de topo morphologie, l'indice de combustible et l'indice d'activités humaines (**Feleh et al, 2012 ; Khader et al, 2009**).

L'indice de risque d'incendie en question a été déduire en appliquant la formule suivante :

$$IR = 5 \times IC + 2 \times IH + IM$$

IR : Indice de risque de feu de forêt.

IC : Indice de combustibilité (facteur lié au combustible).

IH : Indice d'occupation humaine (facteur lié à l'activité humaine).

IM : Indice topo morphologique (facteur lié au topo morphologie du terrain).

La caractérisation de cet indice est basée sur la variabilité spatiale du risque d'incendie dont la détermination est issue des paramètres physiques intervenant dans le modèle choisi.

- $IR > 12$: Risque très fort
- $9 < IR < 12$: Risque fort
- $6 < IR < 9$: Risque moyenne
- $IR < 6$: Risque faible

Le processus de mise en œuvre de cette équation s'est déroulé conformément aux étapes décrites dans l'organigramme ci-dessous.

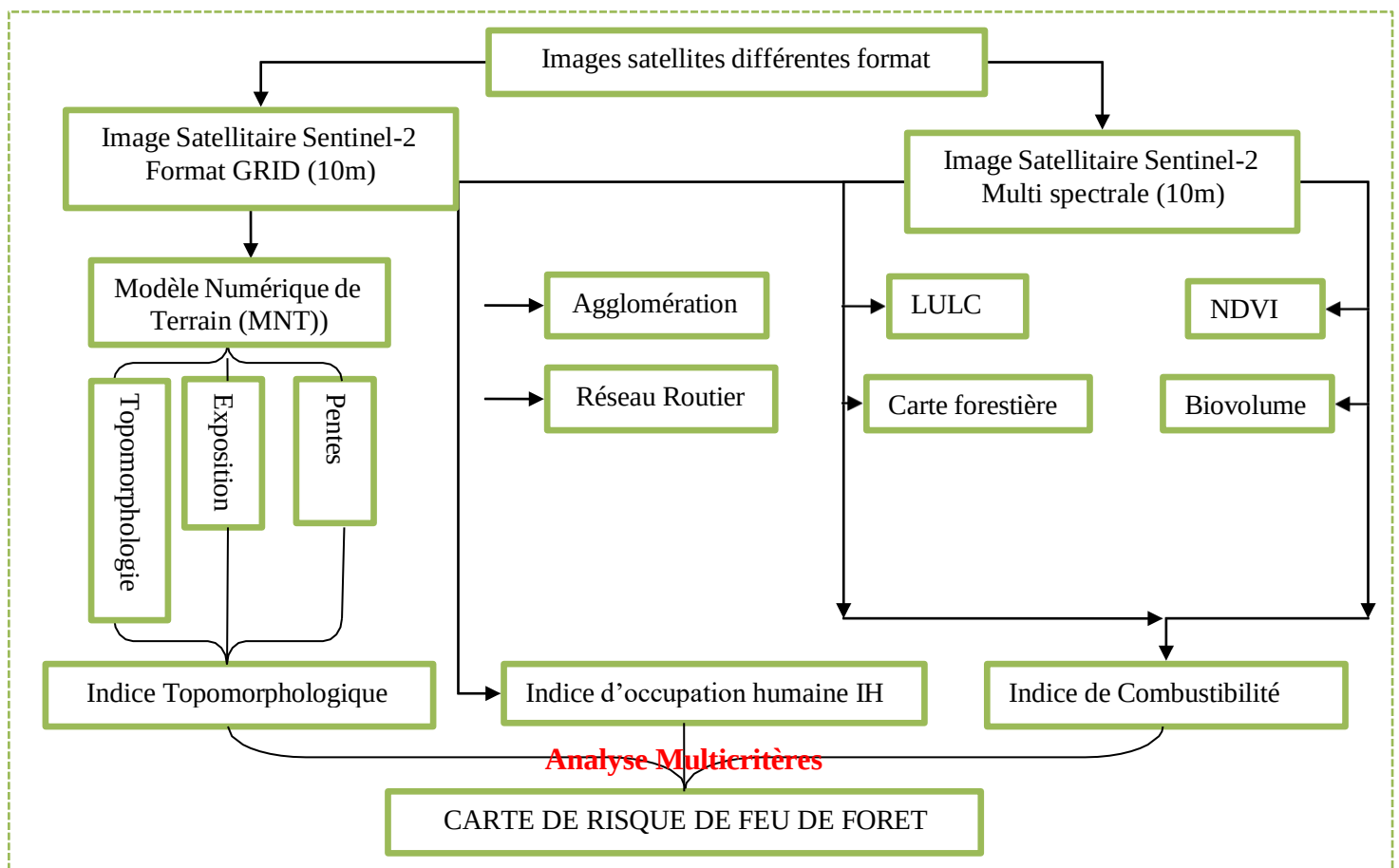


Figure 24:Organigramme de l'approche méthodologique.

2.2.1. L'indice de combustibilité :

Pour évaluer l'indice de combustibilité (IC), la méthode proposée par Mariel (1995) pour estimer la gravité potentielle d'un feu démarrant dans un peuplement forestier déterminé a été Retenue. Cette méthode consiste en la mise au point d'un modèle, empirique, pour pondérer les termes d'une expression mathématique dont les paramètres proviennent d'une description normalisée de la végétation. Le biovolume de la formation végétale est obtenu par addition des taux de recouvrement de des peuplements forestier, l'indice de végétation de différence normalisé NDVI, établie à partir de l'image sentinel 2. On peut traduire le bio – volume par la formule suivante ;

$$\text{BV} = 50 \text{ NDVI} \text{ (Arfa, 2019).}$$

L'indice de combustibilité ou indice d'intensité potentielle du feu adopté est exprimé par la relation suivante:

$$\text{IC} = 39 + 2,3 \text{ BV} \text{ (E- 7,18)}$$

BV : représente le biovolume de la formation végétale.

E : représente la combustibilité moyenne de chaque type de peuplement. Elle est égale à la somme de la note de combustibilité de l'essence prédominant du relevé (E1) et la moyenne des notes de combustibilité des espèces abondantes du relevé (E2).

Tableau 6: Notes de combustibilité des principales espèces dominantes de la végétation méditerranéenne (Source CEMAGREF).

LIGNEUX HAUT			
Arbousier (<i>Arbutus unedo</i>)	5	Châtaignier (<i>Castanea Sativa</i>)	5
Chêne vert (<i>Quercus ilex</i>)	7	Erable (<i>Acer palmatum</i>)	5
Hêtre (<i>Fagus ylvatica</i>)	2	Peuplier (<i>Populus nigra, poplar</i>)	2
Ome (<i>Pinus nigra Am.</i>)	2	Pin noir (<i>Pinus nigra Am.</i>)	7
Pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>)	7	Pin de salzman (<i>Pinus salzmanni</i>)	7
Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	7	Saule (<i>Salix alba, Willow</i>)	2
		Cèdre (<i>Cedrus atlantica</i>)	6
		Epicéa (<i>Picea abies</i>)	6
		Chêne pubescent (<i>Quercus pubescens</i>)	5
		Douglas (<i>- Pseudotsuga menziesii</i>)	6
		Frêne (<i>Fraxinus spp.</i>)	2
		Olivier (<i>Olea europea</i>)	5
		Cyprés (<i>Cupressus macrocarpa</i>)	6
		Noisetier (<i>Corylus avellana</i>)	2
		Pin d'Alep (<i>Pinus halepensis</i>)	7
		Pin pignon (<i>Pinus pinea</i>)	7
		Robinier (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	2
		Sapin (<i>épicéa</i>)	6
LIGNEUX BAS			
Ajonc épineux (<i>Ulex europaeus</i>)	8	Amélanchier (<i>Amelanchier laevis</i>)	3
Bruyère cendrée (<i>Erica cinerea L.</i>)	6	Bruyère à balais (<i>Erica scoparia</i>)	7
Callune (<i>Calluna vulgaris</i>)	6	Ciste blanc (<i>CISTUS albidus</i>)	6
Eglantine (<i>Rosa canina L.</i>)	5	Genet à balais (<i>Cytisus scoparius L.</i>)	5
Genet scorpion (<i>Genista scorpius</i>)	8	Genévrier commun (<i>Juniperus communis</i>)	7
Lavande à large f. (<i>Lavandula litifolia</i>)	5	Chêne kermès (<i>Quercus coccifera</i>)	8
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	5	Ciste de Montpellier (<i>Cistus monspeliensis</i>)	3
Térébinthe (<i>Pistacia terebinthus</i>)	4	Filaria (<i>Phillyrea latifolia</i>)	5
		Bruyère arborescente (<i>Erica arborea</i>)	8
		Buis (<i>Buxus sempervirens</i>)	5
		Ciste à f. de sauge (<i>cistus salvifolius</i>)	3
		Genet d'Espagne (<i>Spartium junceum</i>)	5
		Genévrier oxycèdre (<i>Juniperus oxycedrus</i>)	7
		Pistachier lentisque (<i>Pistacia lentiscus</i>)	4
		Ronces (<i>Rubus fruticosus</i>)	6
		Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	4
		Bruyère multiflore (<i>Erica multiflora L.</i>)	6
		Canne de Provence (<i>arundo donax</i>)	5
		Epine du christ (<i>Paliurus spina-christi</i>)	3
		Genet purgatif (<i>Cytisus purgans</i>)	7
		Lavande stéchade (<i>Lavandula stoechas</i>)	5
		Prunellier (<i>Eriogaster catax</i>)	4
		Stacheline (<i>Stachelina dubia</i>)	3
HERBACEES			
Agrostis	1	Anthyllide (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	1
Brachypode des bois (<i>Brachypodium sylvaticum</i>)	1	Brachypode penné (<i>Brachypodium pinnatum</i>)	1
Canche flexueuse (<i>Deschampsia flexuosa</i>)	1	Dactyle (<i>Dactylis glomerata</i>)	1
Fromental (<i>Arrhenatherum elatius</i>)	1	Inule visqueuse (<i>Inula viscosa</i>)	1
		Aphyllanthe (<i>Aphyllanthes</i>)	1
		Brachypode rameux (<i>Brachypodium ramosum</i>)	1
		Fétuques (<i>Festuca</i>)	1
		Avoine (<i>Avena sativa,</i>)	1
		Brome érigé (<i>Bromus erectus</i>)	1
		Fougère aigle (<i>Pteridium aquilinum</i>)	2

L'indice de combustibilité peut atteindre théoriquement 140. Il est codé en 4 classes. Dans ce tableau présent la répartition des classes de pentes.

Tableau 7: les classes de l'indice de combustibilité. (Boughaba Kh .et al ; 2021)

Classe de l'IC	Note de risque
IC<40	Faible
4≤ IC<50	Modère
50≤ IC<60	Elevé
IC≥60	Très Elevé

2.2.2. L'indice d'occupation humaine (IH)

La présence de la population à proximité des forêts constitue un enjeu majeur, dont l'importance détermine le degré de vulnérabilité du milieu. Il s'agit avant tout de protéger les vies humaines ainsi que les infrastructures. Dans ce contexte, le paramètre anthropique représente le principal facteur pris en compte dans le modèle de l'indice d'activité humaine. Cet indice repose sur l'occupation humaine de l'espace et sur l'intensité de ses activités. Il est dérivé à partir d'une formulation mathématique faisant intervenir deux paramètres :

- L'indice de voisinage (IV), qui exprime l'impact anthropique sur le voisinage immédiat des forêts, dans un rayon de 500 mètres.
- L'indice de présence humaine (ID), qui prend en compte la densité des infrastructures linéaires telles que les routes, pistes et sentiers. En effet, les départs d'incendie sont souvent plus fréquents à proximité de ces éléments.

L'indice d'occupation humaine (IH) est alors calculé comme une combinaison linéaire de ces deux indices, selon la relation suivante :

$$IH = IV + 2ID$$

IV: indice de voisinage.

ID : indice de présence humaine.

2.2.3. L'indice topo morphologique :

Son calcul repose sur la combinaison de trois paramètres topographiques : la pente, l'exposition et la morphologie du relief. L'ensemble de ces paramètres est extrait à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région. Cet indice est exprimé par la relation suivante :

$$IM = 3p + (m \times e)$$

Les tableaux suivants présentent les classes ainsi que les codes attribués à chaque classe pour les trois paramètres de cette équation.

Tableau 8: classes de pente (Boughaba Kh .et al ; 2021)

Classes de pentes	Code
$P < 15\%$	1
$15\% \leq P < 30\%$	2
$30\% \leq P < 60\%$	3
$P \geq 60\%$	4

Tableau 9: classes des expositions (Boughaba Kh .et al ; 2021)

Orientation	code
EST	4
SUD	3
OUEST	2
NORD	1

Tableau 10: classes de topo morphologie (Boughaba Kh .et al ; 2021)

Classe des pentes	Topographie
$P < 3\%$	Plaine
$3\% \leq P < 12,5\%$	Bas piémont
$12,5\% \leq P \leq 25$	Haut piémont
$P > 25\%$	Montagne

Résultat et Discussion

1. Résultat et Discussion :

Il convient de signaler que toutes les données utilisées, notamment les images satellitaires et les cartes élaborées, sont géoréférencées selon le système de coordonnées **UTM, WGS 1984, zone 32**.

1.1. Indice de combustibilité (IC) :

Dans le cadre de cette étude, la méthode d'estimation de l'Indice de Combustibilité (IC) proposée par Mariel (1995) a été adoptée. Le biovolume de la formation végétale, paramètre essentiel dans le calcul de l'IC, a été déterminé à partir de la combinaison du taux de recouvrement des peuplements forestiers et de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). La formule utilisée, telle que décrite par **(Arfa 2019)**, permet une estimation théorique du biovolume pouvant atteindre une valeur maximale de 140. L'équation appliquée est la suivante :

$$BV = 50 \times NDVI$$

1.1.1. La carte de NDVI :

L'indice de végétation par différence normalisée (**NDVI**) est un indicateur dérivé des données de télédétection, basé sur la réflectance du couvert végétal dans les bandes du rouge (RED) et du proche infrarouge (NIR). Il est calculé selon la formule suivante :

$$NDVI = (NIR+RED)/(NIR-RED)$$

Les valeurs du NDVI permettent de qualifier l'état de la végétation, et par conséquent, d'évaluer le potentiel de combustibilité des zones forestières. L'interprétation des valeurs de NDVI dans le contexte du risque d'incendie se fait généralement selon les classes suivantes :

- **NDVI très faible (< 0,1)** : correspond à une végétation morte, sèche ou absente. Ce type de couvert représente un combustible facile, indiquant un **risque d'incendie très élevé**.
- **NDVI faible** : traduit une végétation très clairsemée ou en état de stress hydrique important, associée à un **risque d'incendie élevé**.
- **NDVI modéré** : indique la présence de végétation potentiellement stressée ; dans ce cas, le **risque d'incendie est moyen**.
- **NDVI élevé (> 0,5)** : caractérise une végétation dense, verte et saine, avec une teneur en humidité élevée, traduisant un **risque d'incendie faible**.

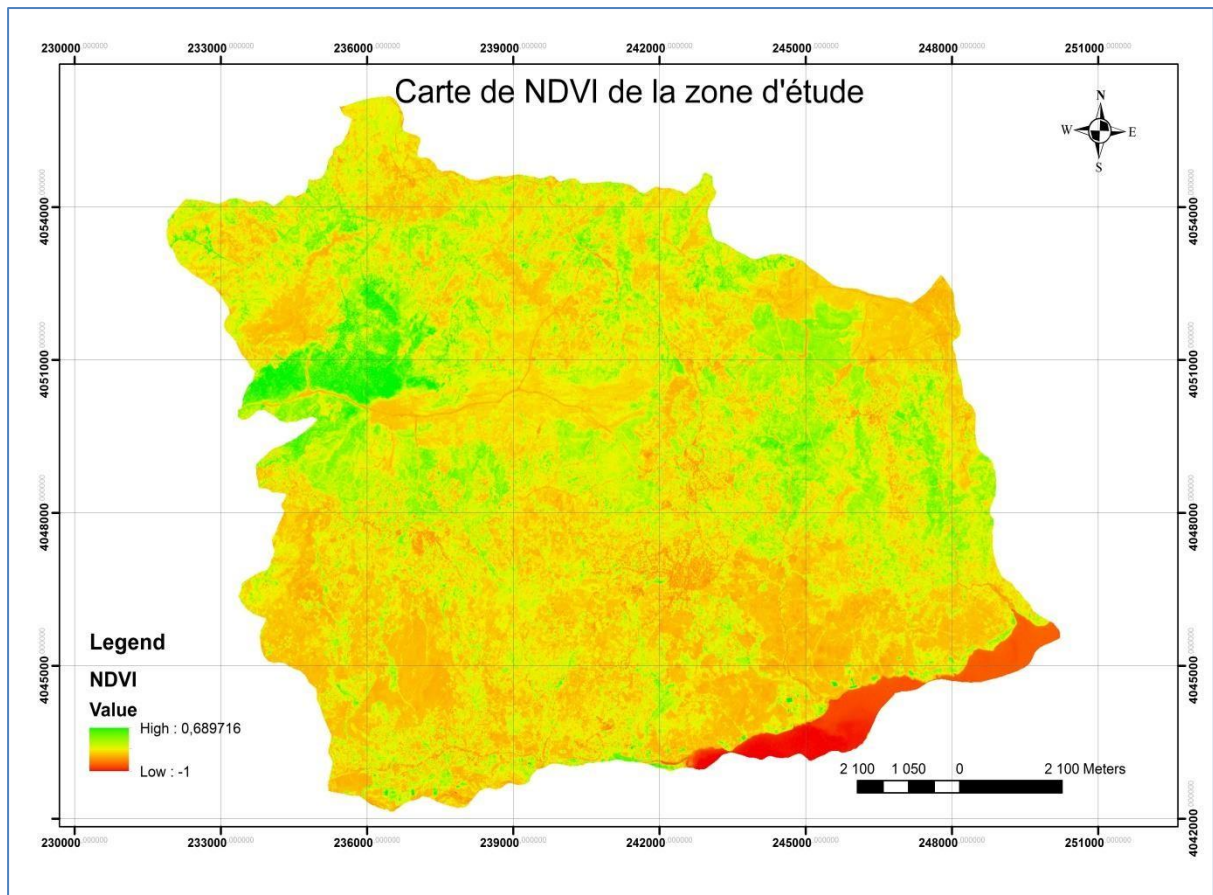


Figure 25: Carte de NDVI de la zone d'étude

1.1.2. La carte de BV :

La carte de biovolume a été élaborée dans RASTER CALCULATOR de logiciel Arc Gis à partir de la formule suivante:

$$\mathbf{BV = (NDVI * 50)}$$

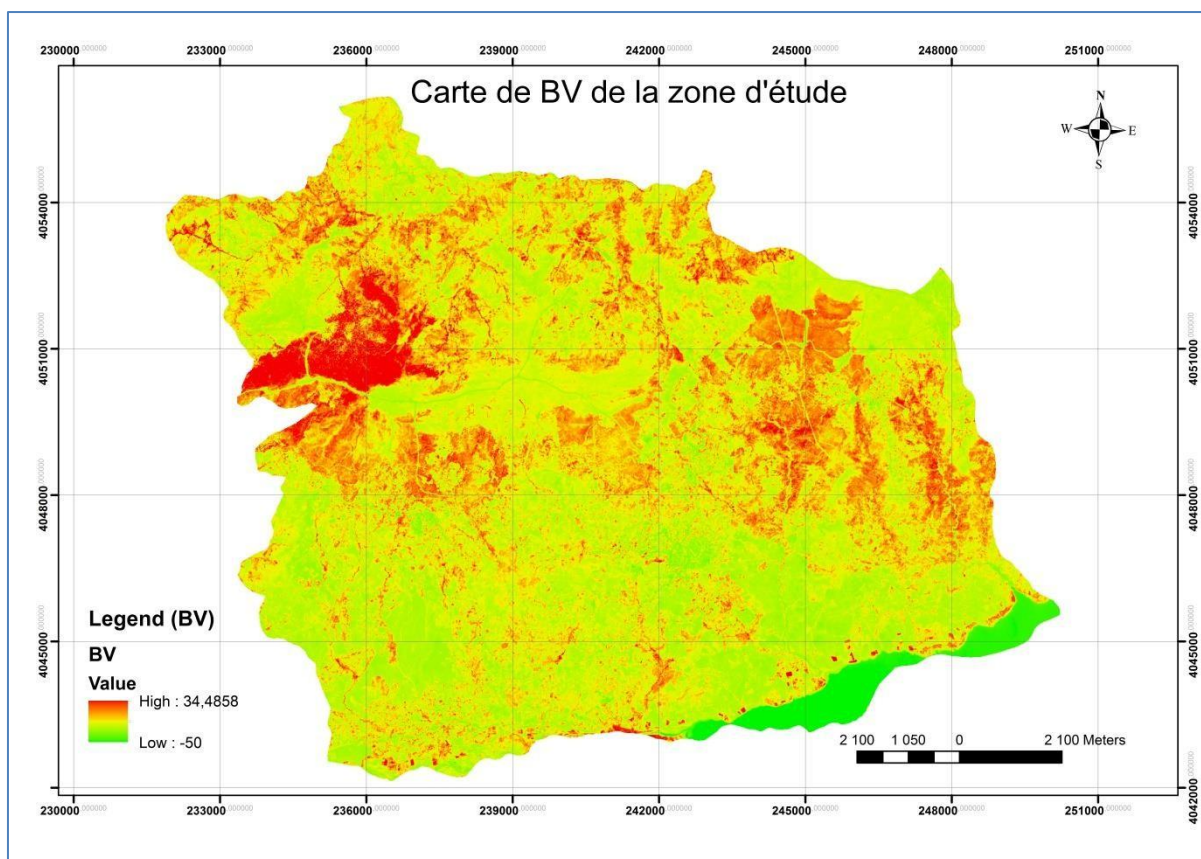


Figure 26: Carte de biovolume végétale de la zone d'étude

1.1.3. La carte de combustibilité (IC) :

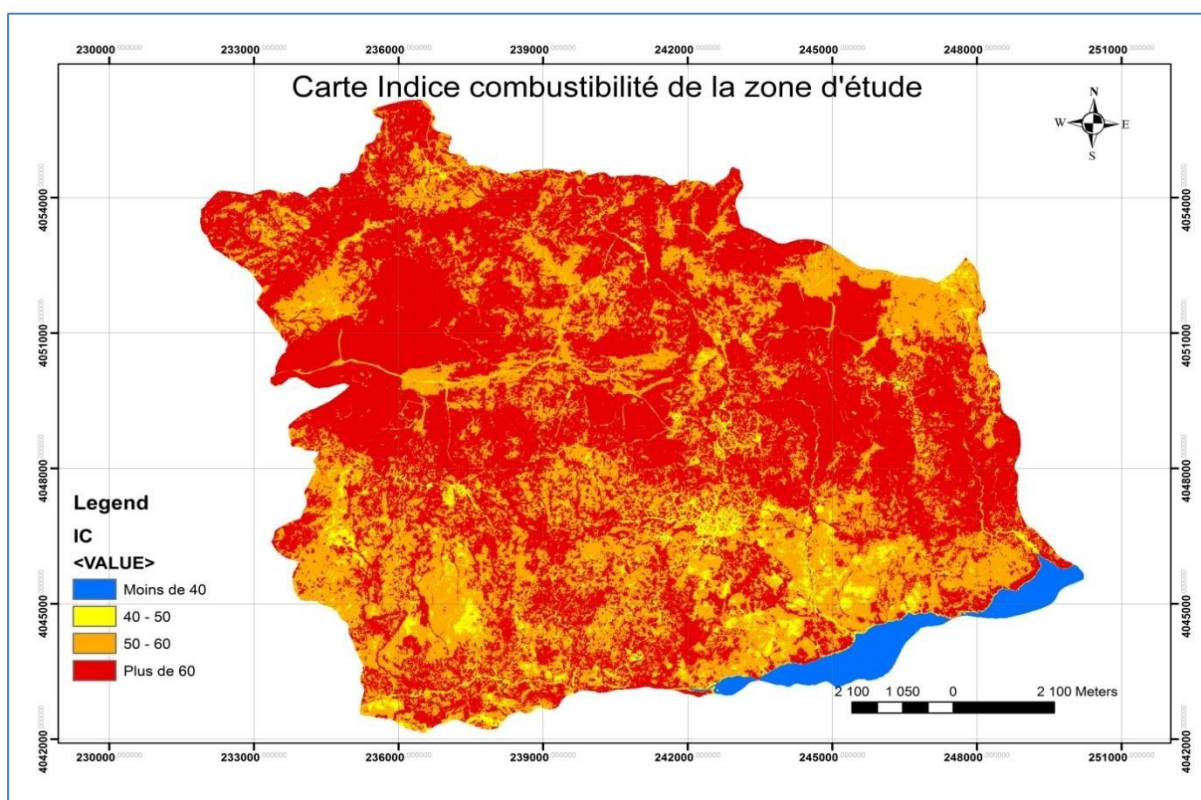


Figure 27: La carte de combustibilité de la zone d'étude

Tableau 11: Indice de combustibilité (IC)

Classe de IC	Note de risque	Superficie en ha	pourcentage%	Indice
IC<40	Faible	3998,50	2,46	1
40≤ IC≤ 50	Modéré	7366,70	4,54	2
40≤ IC≤ 50	Elevé	58696,80	36,15	3
IC≥60	Très Elevé	92327,60	56,85	4
		162389,60	100	

Le tableau 11 présente la répartition des superficies selon les classes de l'Indice de Combustibilité (IC), en hectares et en pourcentage. Ces classes permettent d'évaluer le niveau de risque d'incendie sur la base des caractéristiques du couvert végétal.

- ❖ **Risque très élevé** ($IC \geq 60$) : **La classe dominante**, qui représente environ **56,85** % de la superficie totale, **met en évidence un niveau de danger extrême** en ce qui concerne la propagation des incendies. Cette situation souligne l'urgence de mettre en place des **mesures préventives et des stratégies efficaces de gestion du risque**.
- ❖ **Risque élevé** ($50 \leq IC < 60$) : environ de **36,15** %, cette classe occupe également une part importante du territoire. Elle nécessite une **vigilance constante**, surtout en été.
- ❖ **Risque modéré** ($40 \leq IC < 50$) : Représente une **superficie réduite** environ **4,54** %, correspondant à des zones intermédiaires où des incendies peuvent survenir sous certaines conditions.
- ❖ **Risque faible** ($IC < 40$) : N'occupe que **2,46** % de la superficie totale, soit **3 998,50 ha**.

1.2. Indice de Topo-morphologie (IM) :

A partir du model numérique du terrain (MNT), la carte des pentes, la carte de l'exposition des versants de la zone d'étude ainsi que la carte topomorphologique ont été élaboré. Ces cartes ont été utilisées pour calculer l'Indice Topomorphologique (IM)

Cet indice est exprimé par la relation suivante (**AOUDA Said et al**) :

$$IM = 3p + (m + e).$$

1.2.1. Carte des pentes :

La pente est un facteur déterminant dans la propagation du feu car il remodifie L'inclinaison du terrain influence directement le comportement du feu, notamment l'orientation de la flamme par rapport au sol, ce qui favorise la propagation ascendante du

feu. En effet, les incendies se propagent plus rapidement sur les pentes fortes, où la chaleur rayonne plus efficacement vers le combustible situé en amont. La carte des pentes obtenue a été reclassée en quatre classes, en fonction du degré d'influence de chaque catégorie sur la propagation du feu.

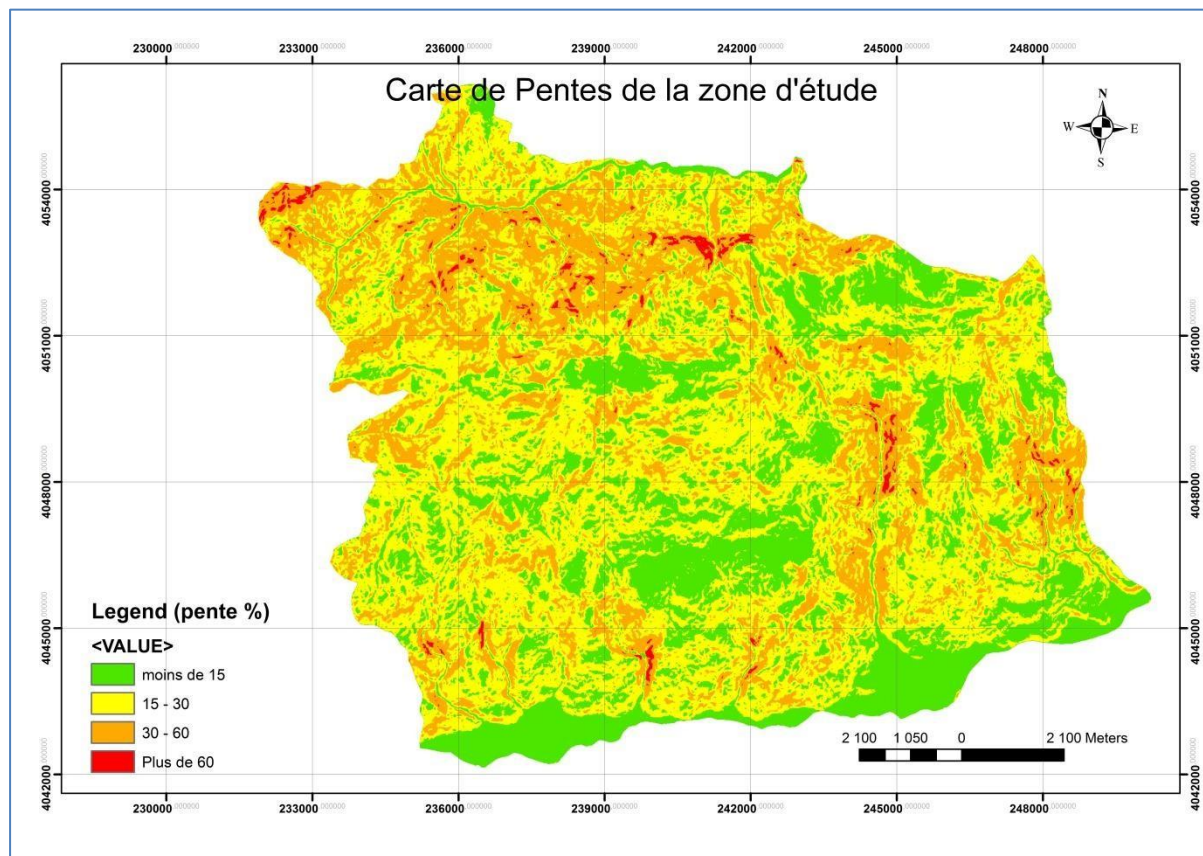


Figure 28: La carte des pentes

Le tableau ci-dessous présente la répartition des superficies en fonction des classes de pente, Cette variable topographique joue un rôle essentiel dans le comportement du feu, notamment dans la vitesse et la direction de sa propagation.

- ❖ **Pentes modérées (15–30%)** : Elles couvrent la plus grande part de la zone d'étude avec 47,45 % de la superficie totale. Ces pentes favorisent la propagation des flammes vers l'amont, notamment. Ces zones nécessitant une gestion rationnelle du risque.
- ❖ **Pentes faibles (<15%)** : Représentant 27,32 %, elles sont généralement moins favorables à la propagation rapide du feu.
- ❖ **Pentes fortes (30–60%)** : Avec 24,31 % de la superficie, ces zones présentent un risque élevé, car la montée rapide des flammes y est favorisée.
- ❖ **Pentes très fortes (>60%)** : avec une superficie réduite et très localisées (0,92 %), ces zones sont extrêmement sensibles à une propagation accélérée du feu.

Tableau 12: Classes de pente

Classes de pentes	Superficie en ha	Pourcentage %	Indice
P < 15%	44359,90	27,32	1
15 % ≤ P < 30%	77055,70	47,45	2
30 % ≤ P < 60%	39472,20	24,31	3
>60	1501,80	0,92	4
	162389,60	100	

1.2.2. La carte des expositions (e) :

L'exposition traduit la situation du versant par rapport aux vents dominants et à l'ensoleillement. La carte est reclassée en 5 classes en fonction de leur influence (Tableau13, Figure 36).

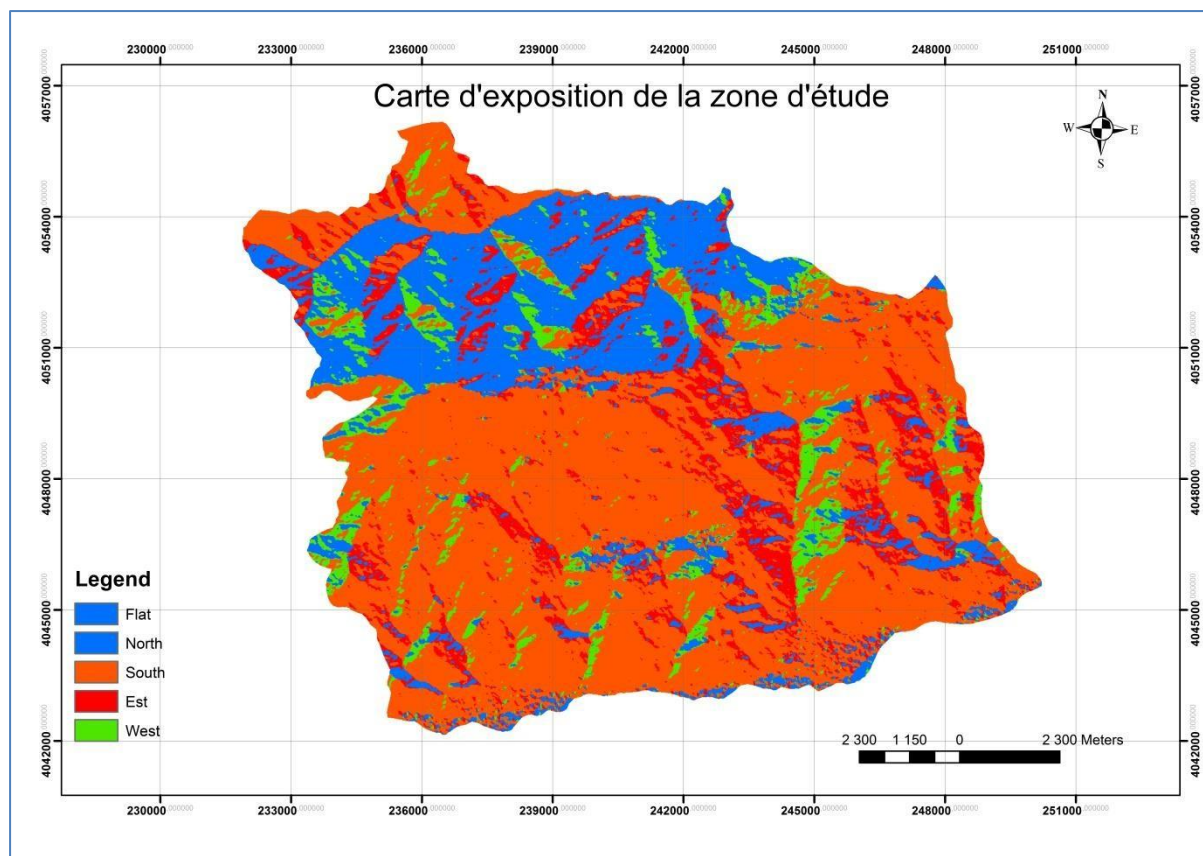


Figure 29:La carte des expositions (e)

Tableau 13: Classes d'exposition

expositions	Superficie en ha	Pourcentage %	Indice
Flat	12120500	0,57	1
Nord	35283,70	21,73	2
Sud	94236,30	58,03	3
Est	19819,80	12,21	4
West	12120,50	7,46	5
	162389,60	100	

On remarque la forte dominance des expositions pour les versants sud (58,03 %), montrant des zones bien exposée au soleil et aux vents d'été, avec des risques accrus d'évaporation et d'incendie en période chaude. Les versants nord occupent 21,73 % de la surface, offrant des conditions plus fraîches et humides. Les expositions est (12,21 %) et ouest (7,46 %) sont modérément représentées, tandis que les zones planes sont très limitées (0,57 %).

1.2.3. Carte de Topo-morphologie (m) :

Une carte topo-morphologique mis en interaction la topographie (altitude, pentes) et la morphologie (formes des terrains) pour représenter les structures du paysage. Elle sert à identifier les différentes formes de relief (vallées, plateaux, pentes, etc.), comprendre leur origine (fluviale, tectonique, érosive...) et constituer un support d'aide à l'aménagement du territoire, à l'évaluation des risques naturels, à l'étude géologique ou environnementale.

La position sur le versant, ou la topo-morphologie (m), permet de pondérer l'intensité du feu en fonction du relief. Cette carte a été obtenue en combinant les informations issues du modèle numérique de terrain, telles que les valeurs de pente et d'altitude.

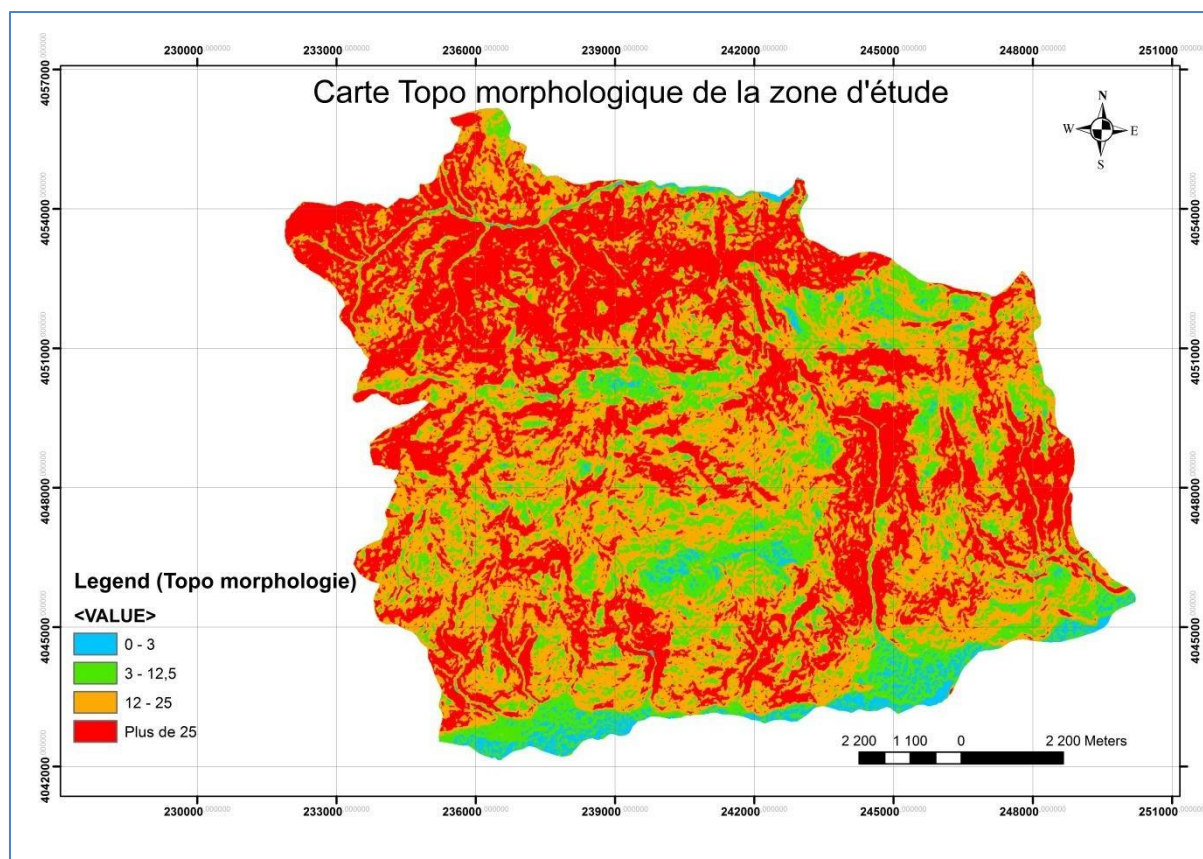


Figure 30: Carte de Topo-morphologie(m)

Tableau 14: Classes de la topo-morphologie

Classe des pentes	Topographie	Superficie en ha	Pourcentage %	Indice
P < 3%	Plaine	4970,50	3,06%	1
3% ≤ P < 12,5%	Bas piémont	27583,30	16,99%	2
12,5% ≤ P ≤ 25%	Haut piémont	66825,50	41,15%	3
P > 25%	Montagne	63010,30	38,80%	4
		162389,60	100%	

La zone d'étude est dominée par des terrains présentant des pentes moyennes à fortes, avec 41,15 % en haut piémont et 38,80 % en zone montagneuse. En revanche, les zones de plaine (3,06 %) et de bas piémont (16,99 %) occupent une superficie plus restreinte. Il en ressort que le relief est globalement accidenté, ce qui suggère que l'aléa incendie peut être particulièrement accentué dans la quasi-totalité de la zone d'étude.

1.2.4. Carte de l'indice topo-morphologique (IM) :

La génération de la carte de l'indice topo-morphologique résulte de l'application de l'équation mathématique présentée ci-dessous, en intégrant les cartes issues des étapes précédentes.

$$IM = 3p + (m + e).$$

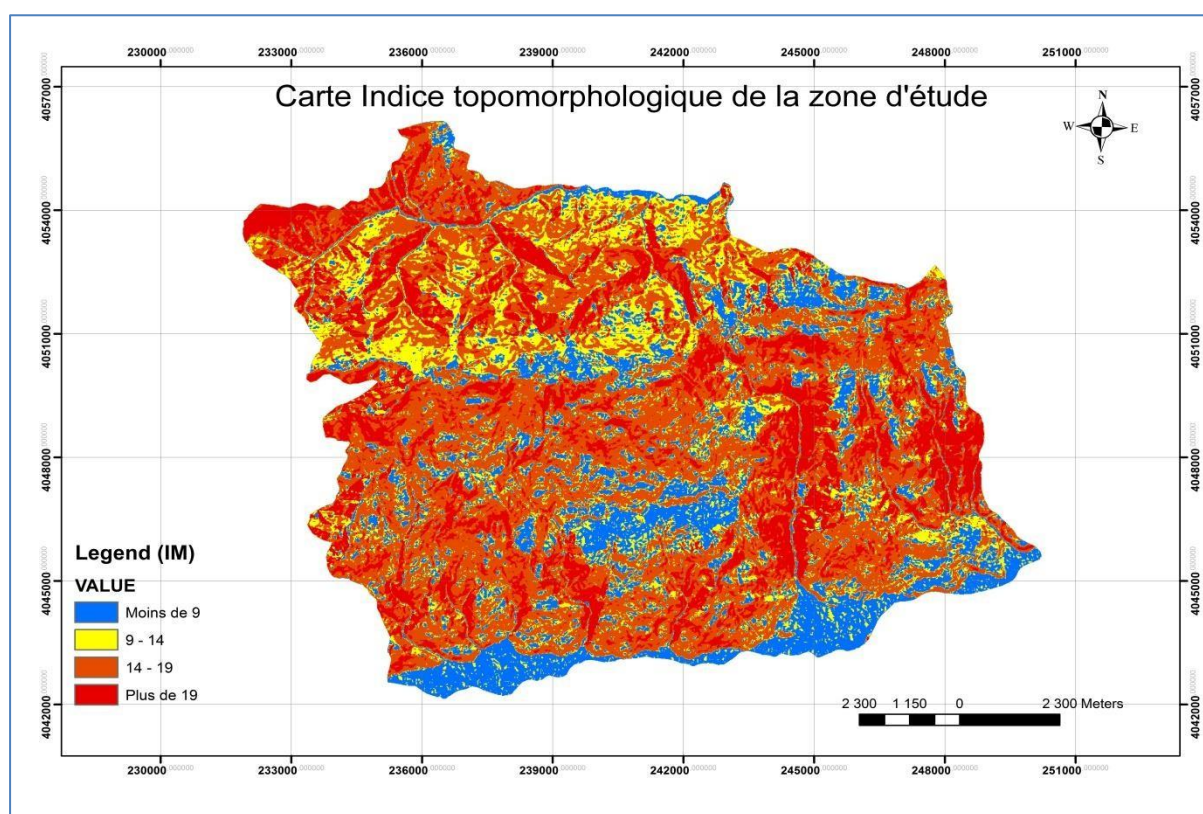


Figure 31: Carte de l'indice topo-morphologique de la zone d'étude

Tableau 15: Classes de l'indice topo-morphologique(IM)

Classes de IM	Signification	Superficie en ha	Pourcentage %	Indice
IM < 9	Peu favorable	28814,50	17,74%	1
9<IM<14	Moyenne favorable	27799,30	17,12%	2
14<IM<19	Favorable	70879,70	43,65%	3
IM > 19	Très favorable	34896,10	21,49%	4
		162389,60	100%	

D'après les résultats obtenus, nous avons trouvé que la majorité de la zone d'étude (environ 65 %) est classée comme favorable ou très favorable selon l'indice IM, indiquant un fort potentiel ou risque. En revanche, soit environ 35 % de la surface totale de la zone d'étude moins favorable.

1.3. Indice d humaine (IH) :

En général, l'être humain constitue bien un danger potentiel, mais ses causes restent souvent non identifiées, notamment pour éviter d'attribuer la responsabilité des dégâts et des coûts associés. Selon l'étude statistique de **(Robin J.G. 2006)**, il existe une corrélation nette entre le nombre d'incendies et la proximité des routes ou des habitations.

Pour cartographier l'impact de l'activité humaine sur le risque d'incendie, nous avons téléchargé des images satellite Sentinel avec une résolution de 10 mètres. À partir de ces images, nous avons automatiquement extrait les informations relatives aux routes, chemins et zones habitées. L'indice d'occupation humaine est obtenu en combinant deux cartes : la proximité aux routes et la proximité aux agglomérations **(AOUDA Said et al.)**.

Il convient également de signaler qu'après les enquêtes menées auprès des autorités locales et des directions de la protection des forêts dans la zone d'étude, nous avons constaté que tout éloignement ou rapprochement à moins de **500 mètres** des forêts peut constituer un danger potentiel.

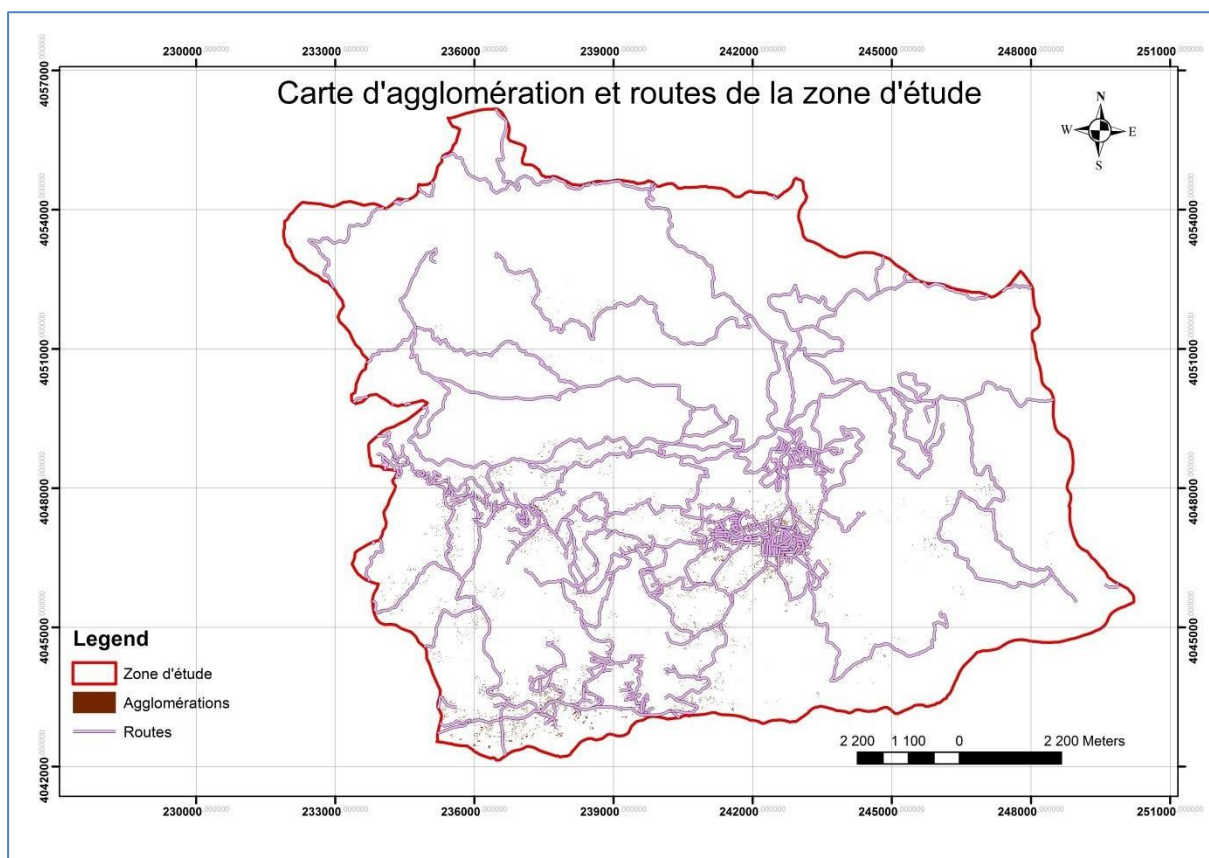


Figure 32: La carte d'agglomération et routes de la zone d'étude

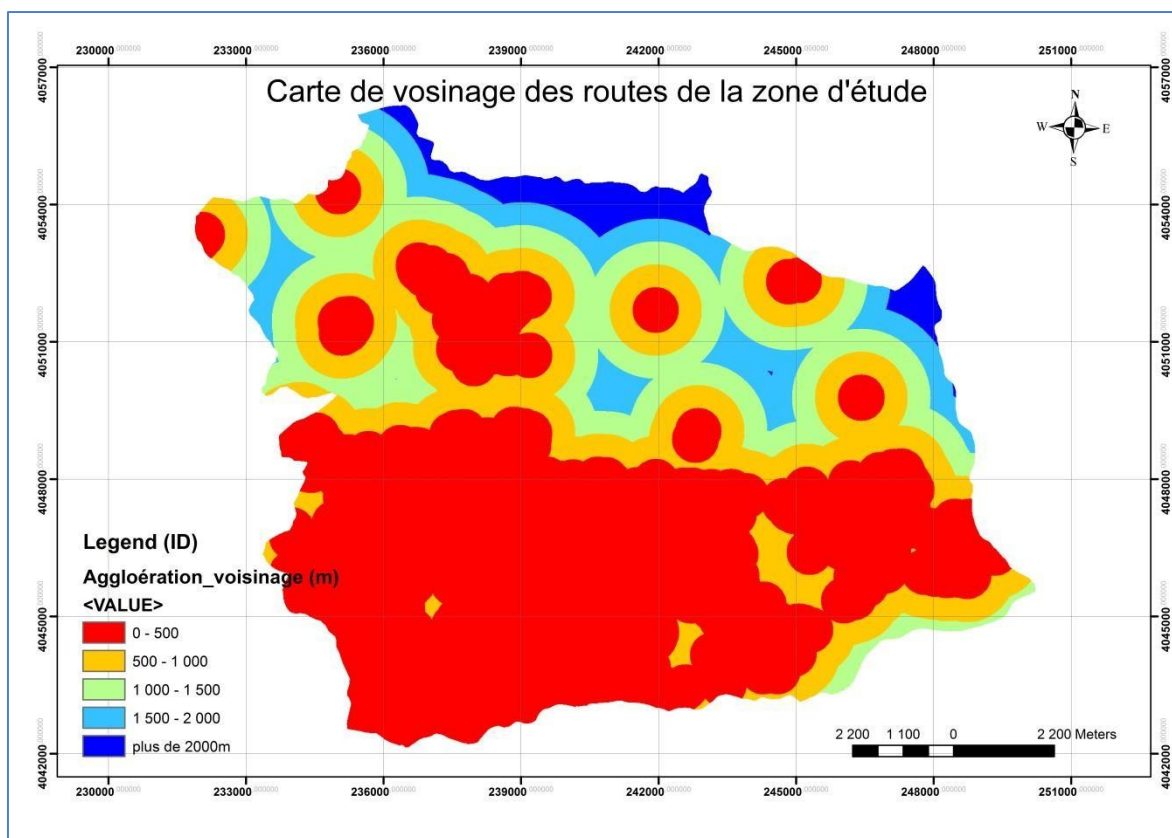


Figure 33: La carte d'indice de présence humaine (ID) de la zone d'étude

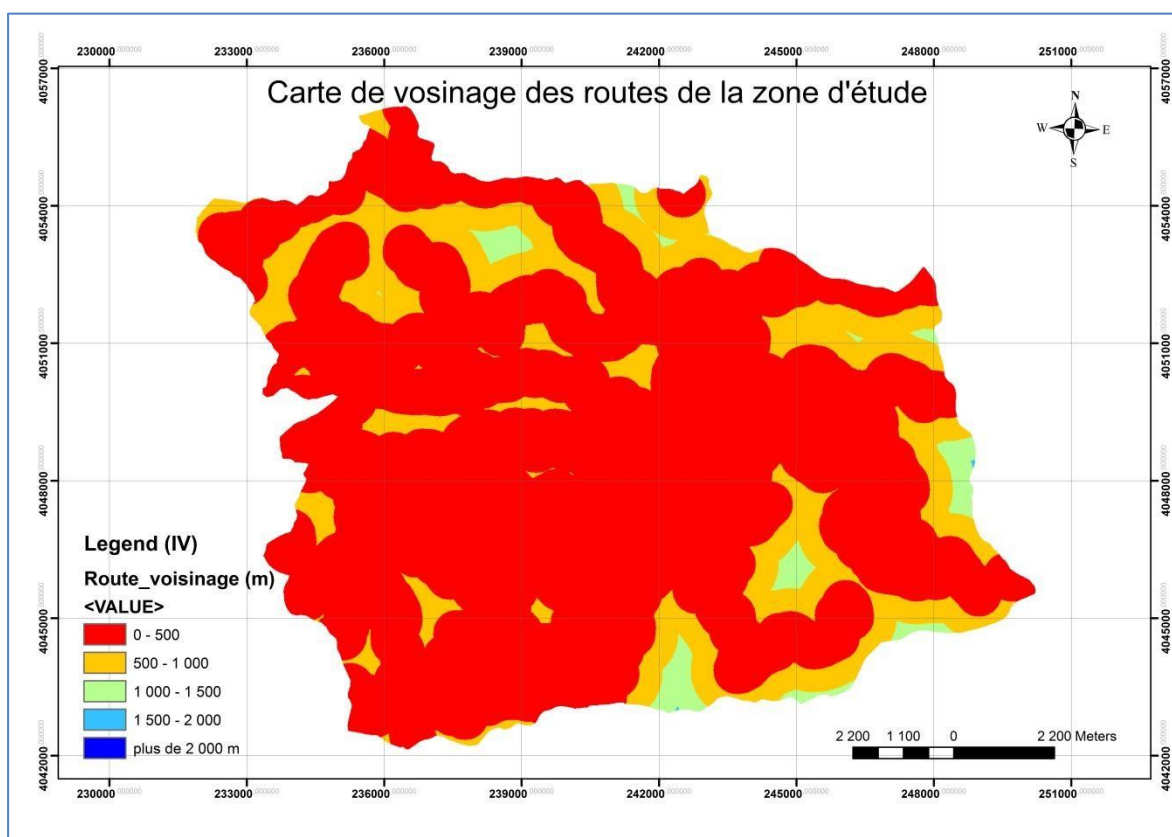


Figure 34: La carte d'indice de voisinage (IV) de la zone d'étude

1.3.1. Carte de l'indice d'occupation humaine (IH):

À partir des étapes précédentes et des résultats obtenus, l'indice d'occupation humaine a été extrait en utilisant l'équation mentionnée ci-dessous, appliquée via l'outil **Raster Calculator** intégré dans ArcGIS 10.7 (**AOUDA Said et al.**).

La classe d'occupation humaine la plus représentée est celle à forte densité, couvrant 43,84 % de la zone d'étude, indiquant une forte pression anthropique. À l'inverse, les zones à faible occupation représentent 28,04 %. Les classes moyennes couvrent ensemble environ 28 % de la superficie. Ainsi, plus de 70 % de la zone présente une occupation humaine moyenne à élever, ce qui peut accroître le risque d'incendie.

$$IH = IV + 2ID$$

Tableau 16: Classes de l'indice d'occupation humaine (IH)

IH	Superficie en ha	Pourcentage %	Indice
1	45537,20	28,04%	1
2	26884,40	16,56%	2
3	18778,20	11,56%	3
4	71189,80	43,84%	4
	162389,60	100%	

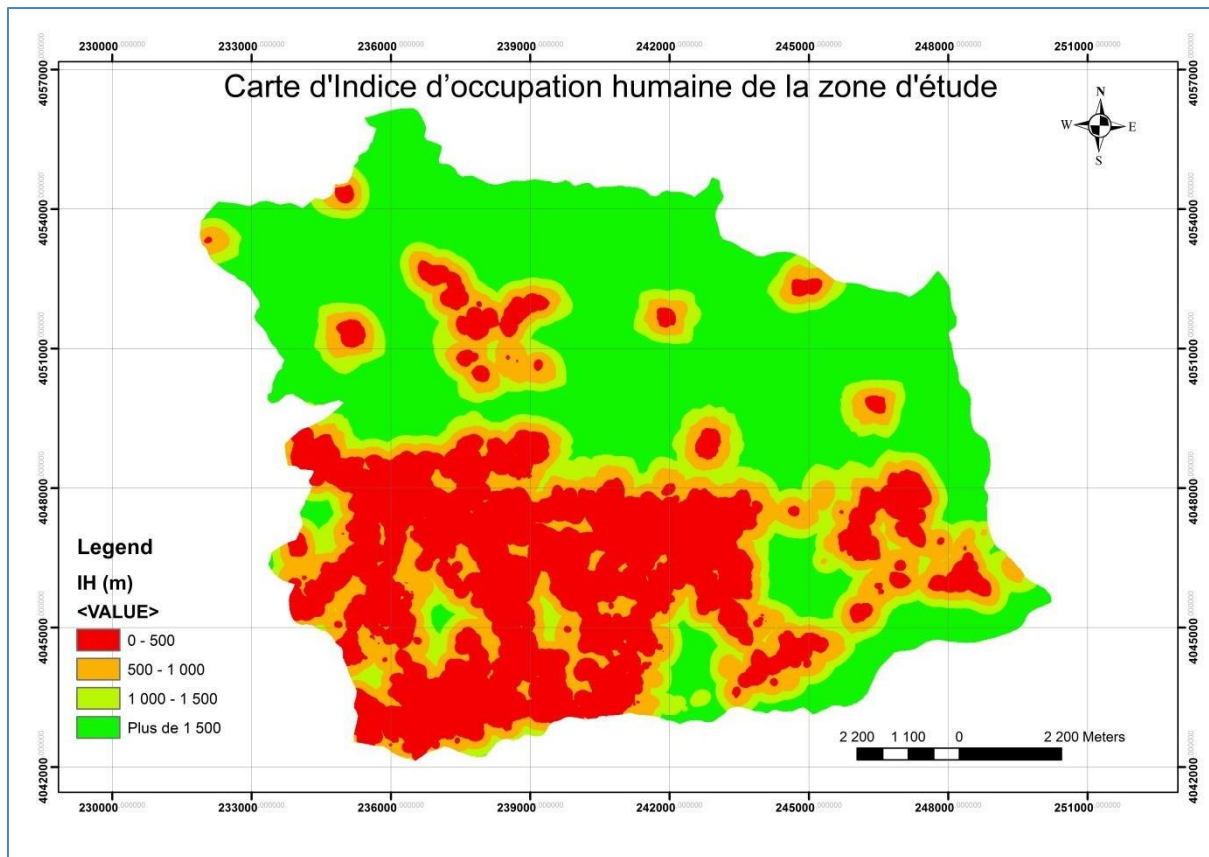


Figure 35: La carte d'indice d'occupation humaine de la zone d'étude

1.4. Indice de risque de feu (IR) :

Pour élaborer la carte de l'indice de risque de feu, trois cartes thématiques ont été superposées à l'aide du logiciel ArcGIS, à savoir : la carte de l'indice topomorphologique, celle de l'indice de combustibilité, et celle de l'indice d'occupation humaine (Fig. 34). Le calcul de l'indice de risque (IR) a été réalisé en appliquant la formule suivante :

$$\text{IR} = 5 \times \text{IC} + 2 \times \text{IH} + \text{IM}$$

Où ;

IR ; représente l'indice de risque de feu de forêt,

IC ; représente l'indice de combustibilité,

IH ; l'indice d'occupation humaine,

IM ; représente l'indice topomorphologique.

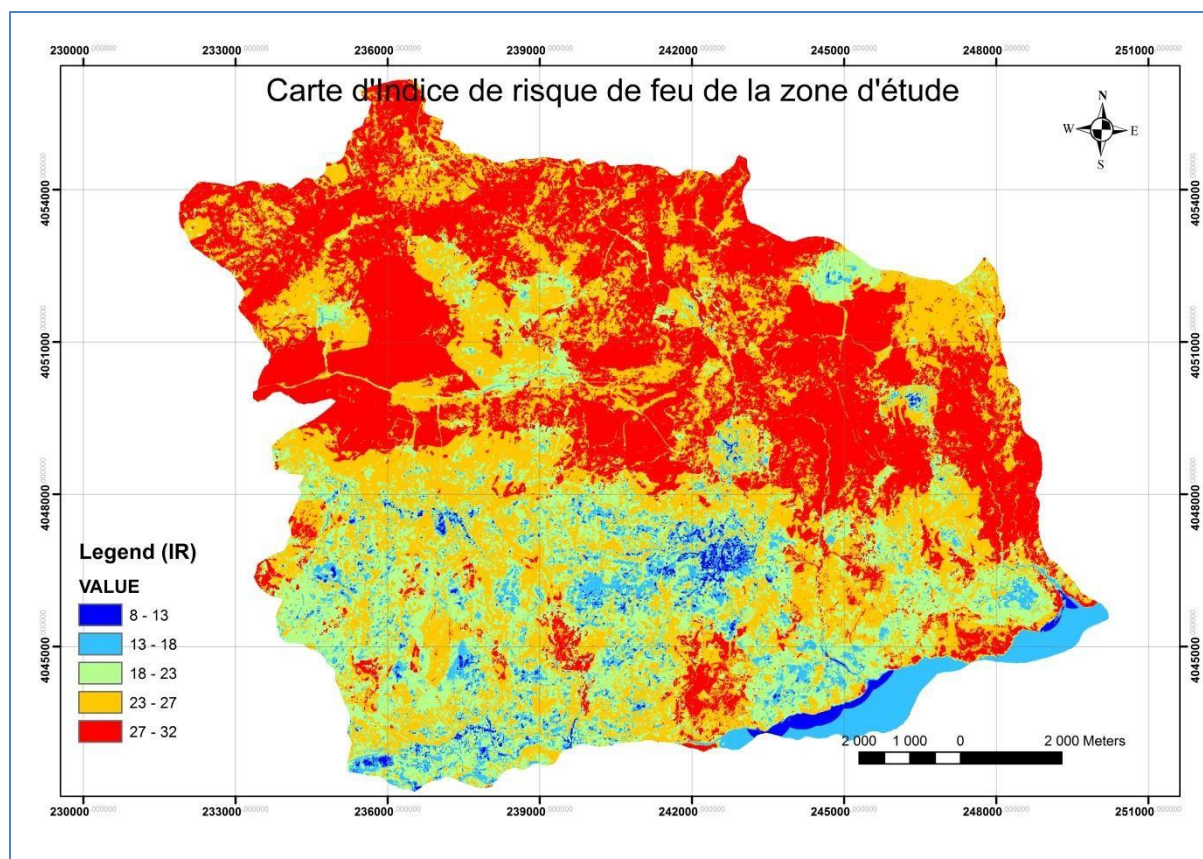


Figure 36: La carte d'indice de risque de feu de la zone d'étude

Tableau 17: Classes de l'indice de risque de feu

Classe de l'IR	Signification	Superficie (ha)	Pourcentage%	Indice
8 < IR < 13	Très faible	2030,50	1,25%	1
13 < IR < 18	Faible	12138,70	7,48%	2
18 < IR < 23	Moyenne	34571,60	21,29%	3
23 < IR < 27	Elevé	55566,40	34,22%	4
27 < IR < 32	Très élevé	58082,40	35,77%	5
		162389,60	100%	

Les résultats obtenus (tableau de la répartition spatiale des différentes classes de l'indice de risque d'incendie (IR) et la carte de (IR)) de la zone d'étude, montrent une classification en cinq niveaux de risque, allant de très faible à très élevé ;

Risque très faible ($8 < IR < 13$) : il couvre une superficie de 2 030,50 ha, soit seulement 1,25 % de la zone totale, et se répartit essentiellement dans l'extrême sud et sud-ouest de la zone d'étude. Ces superficies se caractérisent par des conditions topographiques, une végétation et une occupation humaine peu favorables au déclenchement ou à la

Propagation des incendies.

Risque faible ($13 < IR < 18$) : il couvre 12 138,70 ha, soit 7,48 % de la superficie. Ces zones présentent un risque modéré, mais restent globalement peu sensibles aux incendies. Se répartit essentiellement dans l'extrême sud de la zone d'étude

Risque moyen ($18 < IR < 23$) : il s'étend sur une superficie de 34 571,60 ha, représentant 21,29 % de la zone d'étude. Ces zones peuvent être affectées par un risque notable d'incendie, résultant de l'interaction de facteurs modérément favorables au développement des feux, tels qu'une végétation dense et combustible, des pentes accentuées et une influence anthropique significative. Elle se localise principalement dans le sud-ouest de la zone d'étude, de manière modérée dans le sud-est, et de façon plus limitée dans le nord.

Risque élevé ($23 < IR < 27$) : Elle couvre une superficie de 55 566,40 ha, soit environ 34,22 % de la zone d'étude. Cette forte susceptibilité aux incendies doit être considérée comme une priorité dans toute planification future de la gestion de ce risque. Nous avons constaté, d'après la carte de l'IR, que la quasi-totalité de la zone d'étude est exposée à un risque élevé d'incendie, avec une répartition relativement homogène.

Risque très élevé ($27 < IR < 32$) : Ces zones couvrent une superficie de 58 082,40 ha, soit 35,77 % de la superficie totale. Elles représentent les secteurs les plus critiques, où le risque d'incendie est maximal en raison d'une combinaison défavorable de facteurs naturels et anthropiques. Il y a noté que cette classe de risque prédomine dans la partie septentrionale et orientale de la zone d'étude.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'incendie de forêt demeure un risque majeur dans le monde entier, notamment en Algérie. Il a des conséquences graves sur l'économie, la vie humaine, l'écosystème et l'environnement en général. Ainsi, la lutte contre ce fléau représente un défi mondial pour l'ensemble de l'humanité, y compris pour l'Algérie.

La mise en place de techniques, de systèmes, de stratégies et de mesures de sécurité est devenue une exigence incontournable pour se préparer à affronter ce risque. Dans la présente étude, nous avons tenté de mettre en synergie les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les données de télédétection, afin de cartographier le risque d'incendie de forêt couvrant les territoires des communes de Terrai Bainen et d'Amira Arrès, qui font partie de la célèbre forêt de Zouagha.

Dans ce cadre, nous avons utilisé une équation mathématique développée par les chercheurs Duche et Dagorne en 1993. Cette équation nous a permis de mener une analyse multicritère, en intégrant différents plans d'information dérivés des données de télédétection notamment des images satellites Sentinel ainsi que diverses données téléchargées depuis les plateformes de la NASA. Cette démarche a été réalisée en exploitant les modules avancés des logiciels ArcGIS et SNAP, ce qui nous a permis d'atteindre les objectifs définis dans cette recherche.

Les résultats obtenus montrent clairement que la zone d'étude est bien classifiée selon les niveaux de gravité du risque d'incendie de forêt, sur la base des paramètres définis par l'équation mentionnée. Environ 70 % de la superficie totale de la zone est exposée à un risque très élevé, ce qui exige une intervention immédiate en matière de planification des mesures de sécurité, notamment pendant la période estivale où les conditions climatiques aggravent fortement la situation et favorisent le déclenchement des incendies.

Par ailleurs, les résultats obtenus constituent une base de données interactive, capable de répondre à plusieurs questions liées à la gestion du risque en situation de crise. Ils peuvent ainsi aider les planificateurs et les autorités locales à élaborer des scénarios d'intervention afin d'être prêts à gérer efficacement une éventuelle crise.

Enfin, ces résultats peuvent servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités locales, notamment en matière de lutte contre les incendies de forêt et plus largement dans le domaine de la gestion environnementale.

En conclusion, nous recommandons l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des données de télédétection comme des moyens efficaces, offrant

une valeur ajoutée considérable pour toutes les études liées aux risques et à la gestion de l'environnement, en particulier dans les régions difficilement accessibles ou souffrant d'un manque de données disponibles et diversifiées.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- Aouda S et Mahdi Y (2023).** indice de risque d'incendie de forêts à l'aide du sig dans la wilaya de skikda, algérie, Université Mostafa Ben Boulaid de Batna-2-, Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers, Département Géographie et Aménagement du Territoire, Batna, Algérie, 66-74p.
- Alexandrian, D ; Esnault, F et Calabri, G., (1998).** Analyse de des tendances des feux en méditerranée et des causes sous-jacentes liées aux politiques. Rapport de F.A.O sur les politiques publiques concernant les feux de forêt. Rome (Italie). Algérie, 90 p.
- Arfa A., (2008).** Les incendies de forêts en Algérie: stratégies de prévention et plans de gestion, Mémoire de Magister en écologie et environnement, université Mentouri Constantine, Algérie 123p.
- Arfa A.M.T., (2019).** Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique D'aide à la gestion des Feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf. Thèse de doctorat en Ecologie et Environnement. Université Mentouri Constantine, Algérie 230p.
- 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 305p.
- Bendjeddou R., Benserenda O., (2012).** Contribution à l'étude des incendies de forêts au niveau de la wilaya de Mila. Mémoire de fin d'étude en biologie végétale et animale. Université de Jijel Algérie. 104p.
- Bhunis GS, Samanta S, Pal DK., (2012).** Assessment of ground-water potential zone in paschim midinipur district, west Bengal-a meso-scale study using GIS and remote sensing approach. J Environ Earth Sci 5(2):41-59.
- Boukerker H., (2016).** Le foret algérien face aux feux : proposition d'un dispositif de prévention et de lutte. Journal Algérien des Régions Arides (JARA), n° 13,73p.
- Boughaba K , Boussioud A (2021).** Cartographie de risque feu de forêt dans la région de Mila. Mémoire de fin d'étude en Protection Des Ecosystèmes.P9-P53
- CF. (2021).** Conservation des forêts Mila.
- Chandler, M.A., L.E. Sohl, J.A. Jonas, H.J. Dowsett, and M. Kelley, (2013):** Simulations of the mid-Pliocene Warm Period using two versions of the NASA/GISS ModelE2-R Coupled Model. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 517-531, doi:10.5194/gmd-6-517-2013.
- Colin P.Y., Jappiot M., Mariel A., Lampin C. & Veillon S., (2001).** Protection des forêts contre l'incendie. Edit. FAO/C.E.M.A.G.R.E.F. Cahier FAO Conservation n°36. 149 p.
- Denègre J, Salgé F., (1996):** Les systèmes d'information géographiques. Paris, PUF. Que saisje ? N° 3122; 127 p. Denègre J., Salgé F., 1996: Les systèmes d'information

géographiques. Paris, PUF. Que saisje ? N° 3122; 127 p.

DGF., (2004). Direction Générale des Forêts. Programme d'Action National sur la lutte contre la Désertification, 104p.

DGF (2014). Direction Générale des Forêts. Bilan des incendies élaborés par la Direction générale des forêts.

DGF(2018). Direction Générale des Forêts, fiche signalétique de la forêt domaniale de Zouagha.

Dowsett, and M. Kelley, (2013): Simulations of the mid-Pliocene Warm Period using two version of the NASA/GISS ModelE2-R Coupled Model. *Geosci . Model Dev.*, **6**, 517-531, doi:10.5194 /gmd-6-517-2013 .

DGF., (2004). Direction Générale des Forêts. Programme d'Action National sur la lutte contre la Désertification, 104p.

DGF 2014. Direction Générale des Forêts. Bilan des incendies élaborés par la Direction générale des forêts.

A. Ekpo, L. Orakwe, E. Nwanna, D. Anizoba, C. Nwachukwu., (2021). Determination of Soil Erodibility (K) Factor Derived from Different Geologic Formations of Akwa Ibom State, Department of Agricultural & Bioresources Engineering, Faculty of Engineering, Nnamdi Azikiwe University, Awka, Anambra State, NIGERIA.

Faleh, A., & Lakhouaja, H. (2012). Sig, télédétection et évaluation de risque d'incendie de forets «exemple du massif forestier khezana (province de Chaouene)». *Papales de géographia*, (55-56), 37-48p.

FAO, (2002). Communautés en flamme : actes d'une conférence internationale sur la participation des communautés à la lutte contre les incendies. Bureau régional de la FAO pour l'Asie et la pacifique, publication 2002/25. ISBN 974- 7946- 29-7 .

Frederic J., (1992). Modélisation du comportement du feu, influence de la pente et de la charge d'une litière d'aiguilles de pin maritime., Document PIF9205. Avignon. 29p.

Khader, M., Benabdeli, K., Mederbal, K., Fekir, Y., Gueddim, R., & Mekous, B. (2009). Etude du risque incendie à l'aide de la géomantique : cas de la forêt de Nesmoth (Algérie). *Época II* (20). (10-39)p.

LAGGOUNE Houda. (2021) .Analyse des incendies des forêts de la wilaya de Mila. Protection des Ecosystèmes. Université de Mila.P36-P49.

Lahaye S., (2018). Comprendre les grands feux de forêt pour lutter en sécurité. Systèmes Intégrés, Environnement et Biodiversité. Thèse de doctorat. Université de recherche Paris Sciences et Lettres École doctorale de l'EPHE – ED 472. 85p.

Lilioriente M., (1996). Micoflora y patologiadelalcornoque (*Quercus suber*. L.).M.A.P.A; Madrid, 32.

Margerit J., (1998). Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts. Thèse Doct. Inst. National polytechnique de lorraine. Nancy. France. 260p.

MARMONNIER, P. (2002) : L'information géographique. ENSG/CERSIG ,11p.

Meddour-Sahar, O., (2014). Les feux de Forêts en Algérie : Analyse du risque, étude des causes, évaluation du dispositif de défense et des politiques de gestion. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

Megrouche R., (2006). Sensibilité de la végétation forestière aux incendies, cas de forêt domaniale de chattabah-ainsmara- Constantine. Mémoire de magistère en Ecologie et Environnement. Université Mentouri Constantine, Algérie 157p.

MEZALI M. (2003) : Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3e session du forum des Nations Unis sur les forêts, 9 pages.

Milcinski, G., Musial, J., Leszczenski, J., Clarijs, D., and de la Mar, J.,(2024): Copernicus Data Space Ecosystem - Platform That Enables Federated Earth Observation Services and Applications, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024.

Orfao, J.J.M. ; Antunes, F.G.A.; Figueiredo, J.L. (1999), Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model. Fuel, Vol.78, 349-346p.

Pierre-Yves Colin., Marielle Jappiot., Anne Mariel.,(2001) "Protection des forêts contre L'incendie : Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen", cahier FAO Conservation 36,.

Pouchin T., (2001). Cours de télédétection. Université le havre. France.p44.

Rahma. (2023).Rapport de stage de la Forêt de Zouagha. université de Mila p 07.

Robert A. Schowengerdt. (2007) « Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing », Academic Press is an imprint of Elsevier, University of Arizona, USA.

Robin J.G., Carrega P., Fox D., (2006). Modelling fire ignition in the Alpes-Maritimes Department , France.Acomparison .Vth International Forest Fire Conference. Coimbra (Portugal). Novembre 2006. Forest Fire Research &Wildlanf Fire Safety . Cd-Rom. Millpress, Rotterdam.

Seltzer A., (1946). Le climat de l'Algérie. Inst. Météo. Phys. glob. Université Algérie, 419 p.

SITAYEB, T. (2006) : Thèse, Application de la géomatique dans l'étude de la dynamique de la végétation dans la plaine de la Macta. Thèse de magistère, centre universitaire de Mascara. **Soudani. K. (2005)**. introduction général à la télédétection cours en ligne Fac des sciences .

d'Orsay-Univ paris Sud XI.

Trabaud, L., (1970). Le comportement du feu dans les incendies de forêts. Extrait de la revue technique du feu. PP 103, 15p.

Trabaud L., (1980). Impact biologique et écologique des feux de végétations sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des garrigues de Bas-Languedoc. thèse doctorat état sciences, Univ. Scie. Tech. du Languedoc, Montpellier, p 288.

Trabaud. L.(1983). Prévention et prévision des incendies : Etude d'un cas concret.

Trabaud L., 1992: Les feux de forêts : mécanismes, comportement et environnement. Éditions France- Sélection, 278p.

UNIGE (2004), peduzzi (2009): Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, vol. 9, n° 4, p. 1149-1159.P05.

Velez R., (1990). Les incendies de forêt dans la région méditerranéenne : panorama régional. Unasylva 162, vol. 41, p. 3-9.

Velez R., (1996). La sylviculture préventive des incendies en Espagne. Revue Mapping n° 29, 3-6p.

Weiland, J.J. ; Guyonnet, R.; Gibert, R. (1998) Analyse de la pyrolyse ménagée du bois par couplage TG-DSC-IRTF. J.Therm. Anal., Vol.51, 265-274, 1388-61.

Zouaidia H., (2006). Bilan des incendies des forêts cas de Mila Constantine Guelma et souk – Ahras. Mémoire de magistère en Ecologie et Environnement. Université Mentouri Constantine, Algérie 126p .

Site web:

- (1) <https://www.aa.com.tr/fr/monde/lalg%C3%A9rie-lutte-contre-92-feux-de-for%C3%AAt-et-%C3%A9voque-des-preuves-sur-leur-origine-criminelle-/2332797>.
- (2) [https://www.lalsace.fr/amp/environnement/2021/08/20/les-incendies-monstres-dans-levar un-carnage-pour-les-animaux](https://www.lalsace.fr/amp/environnement/2021/08/20/les-incendies-monstres-dans-levar-un-carnage-pour-les-animaux).
- (3) <https://www.acadienouvelle.com/actualites/2023/06/11/des-risques-normaux-dincendies-de-foret-au-n-b-cet-ete/>.
- (4) <https://www.ontario.ca/fr/page/comportement-des-feux-de-foret>.
- (5) <https://power.larc.nasa.gov>
- (6) Le correcteur français le plus précis au monde ; <https://www.reverso.net/orthographe/correcteur-francais/>
- (7) Correcteur d'orthographe et de grammaire (chat GPT) <https://chatgpt.com/g/g-4k5GD7QLN-correcteur-d-orthographe-et-de-grammaire>
- (8) Correcteur anglais à base d'IA <https://www.reverso.net/orthographe/correcteur-anglais/>

Annexe

Annexe:

Précipitation:

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
2000	39.00	24.14	30.66	23.68	115.21	49.74	0.50	12.86	59.85	50.12	35.79	57.48	499.03
2001	156.06	56.24	19.60	31.99	63.47	0.71	2.12	3.87	85.79	25.20	48.55	35.56	529.16
2002	31.19	56.80	26.35	44.51	23.21	4.24	35.60	101.55	28.83	34.47	194.76	144.49	726.00
2003	275.00	74.35	37.99	148.80	53.07	15.89	6.51	9.19	88.33	83.72	27.68	193.15	1013.68
2004	91.85	15.98	69.20	88.54	110.26	51.17	3.46	22.76	44.09	30.58	220.89	209.96	958.74
2005	102.30	118.05	51.11	93.91	5.49	21.40	13.09	38.56	50.24	36.67	59.17	118.73	708.72
2006	112.12	87.55	43.59	47.87	73.42	15.60	6.54	14.52	41.66	20.43	27.36	146.10	636.76
2007	17.25	54.64	162.49	89.28	32.60	22.62	8.06	14.02	81.60	71.34	77.70	112.01	743.61
2008	21.68	20.98	86.22	31.49	119.13	14.40	19.69	23.68	72.92	48.30	63.94	73.75	596.18
2009	174.72	42.41	60.79	169.65	83.55	0.82	4.12	30.06	154.69	56.49	50.18	68.22	895.70
2010	99.64	51.72	67.56	83.95	66.29	18.33	3.39	11.97	40.43	95.66	154.43	53.39	746.76
2011	36.78	165.54	58.51	92.48	81.61	41.70	12.34	17.62	28.04	155.09	64.59	97.29	851.59
2012	64.78	151.14	73.69	109.64	17.95	12.67	7.79	25.72	60.71	60.34	51.97	34.32	670.72
2013	93.68	118.72	57.41	45.63	46.17	7.90	13.18	58.98	72.81	44.09	147.39	52.05	758.01
2014	71.79	52.95	136.13	7.94	52.12	32.41	3.31	4.30	18.31	30.05	35.80	175.41	620.52
2015	149.42	156.87	108.56	8.12	31.05	13.21	7.38	41.65	52.60	102.82	84.16	0.25	756.09
2016	63.58	49.94	118.10	83.19	53.00	5.32	4.34	0.84	32.32	31.44	72.66	23.98	538.71
2017	175.61	41.98	2.11	42.51	11.26	35.27	2.67	2.78	24.45	32.68	141.78	97.59	610.69
2018	27.38	83.29	124.47	86.79	95.96	17.13	1.99	35.36	28.64	144.17	40.19	27.13	712.50
2019	172.69	62.97	92.60	41.01	73.91	2.81	4.77	45.19	62.90	80.45	103.63	50.65	793.58
2020	28.24	0.25	121.82	55.33	18.54	16.77	4.24	13.65	55.16	50.24	89.57	142.67	596.48
2021	51.59	12.90	61.06	41.37	69.17	8.36	0.38	24.63	18.81	33.08	90.90	55.00	467.25
2022	49.77	30.51	60.77	65.15	44.35	1.83	3.74	10.42	51.88	36.91	74.97	19.28	449.58
2023	76.48	18.95	18.52	18.44	165.66	99.57	3.03	5.62	5.61	2.92	150.64	99.14	664.58
2024	46.96	144.20	22.67	34.98	37.07	7.25	0.70	24.63	54.64	34.60	38.39	74.31	17.25

Vent

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
2000	2.72	3.31	3.08	4.28	3.09	2.99	3.43	3.23	3.03	3.49	3.97	4.38	3.42
2001	4.55	3.87	4.09	3.86	3.20	3.41	3.21	3.01	2.70	2.78	3.14	3.13	3.41
2002	2.98	3.47	3.48	3.83	3.47	3.17	3.31	2.89	3.13	3.53	5.23	4.46	3.58
2003	4.96	3.79	3.02	3.67	3.01	2.88	3.08	3.03	3.15	3.53	3.57	4.78	3.54
2004	4.16	3.61	3.53	3.78	3.52	2.80	2.97	2.92	3.04	3.08	3.35	3.68	3.37
2005	3.67	4.04	3.41	3.87	2.95	2.83	2.88	3.17	2.65	2.65	3.38	3.61	3.26
2006	3.58	3.61	4.39	3.41	2.98	3.17	2.92	3.10	2.99	3.28	3.31	3.17	3.33
2007	2.80	3.99	4.01	3.25	3.35	3.21	3.13	3.34	2.98	3.11	3.34	3.38	3.32
2008	3.19	2.85	4.22	3.72	3.35	3.00	3.11	3.01	2.98	3.00	4.36	4.08	3.41
2009	4.51	4.69	4.03	3.69	3.20	2.97	3.09	3.01	3.00	3.68	3.96	4.92	3.73
2010	4.47	5.05	3.77	3.36	3.59	3.00	3.15	3.22	3.32	4.02	4.53	4.69	3.85
2011	3.14	4.10	3.51	3.39	3.26	2.85	3.15	3.21	2.87	3.33	3.68	3.86	3.36
2012	3.68	3.97	3.33	3.86	2.93	2.99	3.18	3.32	3.54	3.59	3.72	3.95	3.50

2013	4.84	4.42	4.97	3.63	3.52	3.13	3.02	3.25	2.75	2.95	4.37	3.09	3.66
2014	4.55	4.13	4.20	3.78	3.24	3.40	3.26	3.26	2.99	3.40	4.25	4.51	3.75
2015	4.26	4.93	4.00	2.97	3.75	3.12	2.97	2.83	3.40	3.60	2.90	2.49	3.43
2016	3.86	4.39	4.23	3.54	3.71	3.04	3.21	3.16	2.81	3.03	3.45	2.92	3.45
2017	4.21	4.23	3.54	3.34	3.13	3.28	3.32	3.20	3.30	2.70	4.08	4.00	3.53
2018	3.84	3.70	5.11	3.23	3.37	3.00	2.90	2.57	2.83	3.99	3.84	2.94	3.44
2019	4.86	3.74	3.36	3.46	3.65	3.34	3.19	3.12	2.80	3.41	5.02	4.44	3.70
2020	3.03	2.99	4.03	3.16	3.29	3.28	3.23	3.54	3.16	3.29	3.41	4.38	3.40
2021	4.66	4.32	2.96	3.31	3.18	3.01	3.34	3.33	3.18	3.12	4.00	4.25	3.56
2022	3.42	3.49	3.47	3.86	3.72	3.26	3.35	3.29	3.53	2.84	4.46	3.87	3.55
2023	3.83	3.09	3.90	3.57	3.55	3.06	3.51	3.38	3.24	3.53	4.35	3.79	3.57
2024	3.76	4.52	4.13	3.38	3.33	3.38	3.26	3.03	3.14	3.24	3.16	3.65	3.50

Température :

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
2000	5,81	8,7	11,61	14,6	20,39	22,2	26,75	27,37	22,4	16,23	12,5	10,14	16,55
2001	8,55	7,9	14,06	13,3	17,57	23,8	27,12	27,17	22,1	20,97	11,9	7,42	16,82
2002	7,39	9,5	11,7	14,3	18,85	25,2	25,72	24,83	21,3	18,29	12,5	9,72	16,61
2003	7,07	6,6	10,59	14,2	17,61	24,5	27,96	28,1	21,6	18,45	12,5	7,77	16,42
2004	7,63	9,4	11,02	12,5	15,49	21,6	25,74	27,23	22,4	20,14	10,8	8,31	16,02
2005	5,43	5	10,34	13,3	18,98	23,3	26,48	24,69	21,6	18,33	12,2	7,28	15,57
2006	5,81	7,1	11,19	15,6	20,49	24	27,01	25,15	22,3	20,19	13,7	9,18	16,81
2007	9,03	9,8	10,2	13,8	18,14	23,3	26,7	26,68	22	17,24	11	8,12	16,33
2008	8,17	9,1	10,55	14,5	18,26	21,5	26,96	26,78	22,5	17,69	10,7	7,23	16,15
2009	7,68	7	10,06	11,7	18,59	23,1	28,45	26,78	21	16,45	13	10,35	16,18
2010	8,31	9,3	11,18	14,5	16,24	21,3	26,55	26,21	21,8	17,44	11,7	8,61	16,09
2011	8,04	7,7	10,44	15	17,48	21,5	26,06	26,75	22,9	17,05	12,5	8,81	16,18
2012	7,47	4,8	10,92	13,4	17,85	25,2	26,97	28,99	22,2	18,73	13,7	8,98	16,6
2013	7,87	6,7	11,63	14,4	16,51	20,8	26,38	25,41	21,7	20,84	11,5	8,33	16,01
2014	8,56	9,3	9,53	14,6	17,52	22,6	25,61	27,15	25,4	19,7	14,8	8,51	16,94
2015	7,39	6,4	10,4	14,5	18,82	22,4	27,63	26,65	22,4	18,04	12,6	9,94	16,44
2016	9,64	9,9	10,17	15	18,07	22,9	26,43	25,41	22,1	19,97	13,4	10,06	16,91
2017	6,13	9,9	12,02	14,3	20,38	25	28,35	29,09	22,2	17,33	11,5	7,47	16,97
2018	8,37	6,7	10,75	14,4	16,26	21,5	27,24	24,77	23,5	16,87	12,2	9,81	16,03
2019	6,77	7,9	10,79	13,3	15,92	25,3	28,21	27,87	23	18,66	11,3	10,54	16,63
2020	8,15	11	11,69	15,4	20,29	22,9	27,09	28,13	21,8	16,5	14,2	9,04	17,19
2021	8,19	11	11,05	14,3	19,38	24,8	28,86	29,77	25,7	17,53	11,8	9,28	17,64
2022	7,71	9,6	11,43	14,2	19,94	27,7	29,05	28,23	25,2	20,97	14,8	12,58	18,45
2023	7,66	8,8	12,86	15,7	16,88	23	31,13	27,76	25,7	22,19	14,9	10,37	18,07
2024	9,91	10	13,08	14,7	19,56	25,3	28,82	28,27	22,8	20,76	15,7	9,26	18,2

Humidité :

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
2000	4,74	5,4	6,01	6,41	9,31	10,1	9,58	8,74	9,84	8,32	6,35	5,49	7,52
2001	5,23	5,1	6,49	6,54	8,21	8,13	9,18	9,61	11,1	9,58	7,05	5,39	7,63
2002	4,89	5,3	5,95	6,35	7,17	7,67	10,08	11,4	10,3	8,04	7,05	6,48	7,56
2003	5,69	5,2	6,24	7,79	9,26	10,9	10,83	10,58	11,4	9,58	7,03	5,69	8,36
2004	5,88	5,8	6,4	6,91	8,03	10,3	10,66	11	9,69	8,09	7,11	6,06	7,99
2005	4,91	4,8	6,41	7,63	8,91	10,5	10,82	10,46	10,4	9,25	6,9	5,49	8,04
2006	4,94	5,3	6,17	7,48	9,9	8,71	9,77	10,75	9,31	8,11	7,17	6,07	7,81
2007	5,67	6,1	6,02	7,66	8,35	9,98	9,39	10,1	10,2	9,38	6,56	5,9	7,94
2008	5,61	5,6	6,03	6,66	8,72	9,52	10,6	10,5	10,1	9,08	6,16	5,53	7,85
2009	5,81	5,1	5,95	6,71	8,79	9,34	10,59	11,43	11	8,99	6,67	6,44	8,07
2010	5,74	5,8	6,17	7,74	7,69	9,57	9,91	10,13	10,1	7,87	7,09	5,48	7,77
2011	5,54	5,5	6,29	7,86	8,81	10,3	11,17	10,2	10,7	8,86	7,38	6,12	8,23
2012	5,66	4,8	6,1	7,46	8,73	10,6	10,86	9,5	10	8,85	7,66	5,87	8,01
2013	5,59	5,1	6,44	7,11	8,01	8,3	10,47	10,1	11,6	9,87	6,95	5,93	7,96
2014	5,6	5,7	6,16	7,05	7,91	9,3	9,21	10,48	10,1	8,5	6,75	5,92	7,73
2015	5,47	5,2	6,13	7,28	8,27	9,17	9,79	11,55	10,8	9,33	7,46	5,81	8,02
2016	5,86	5,8	5,82	7,56	8,02	9,4	9,28	9,43	10,1	9,39	6,87	6,58	7,84
2017	5,02	5,8	6,04	6,64	8,02	9,73	9,05	9,61	9,24	8,01	6,19	5,54	7,41
2018	5,58	5,2	6,21	7,51	8,9	9,79	10,33	11,84	11,3	8,97	6,7	6,25	8,22
2019	5,52	5,2	5,98	7,06	7,71	9,5	10,19	11,85	11,7	9,07	6,68	6,26	8,06
2020	5,34	5,6	6,47	7,75	8,41	9,07	9,65	9,74	10,9	7,61	7,42	6,17	7,84
2021	5,76	5,8	5,99	7,11	8,85	10,4	9,45	9,74	10,6	8,38	7,03	5,8	7,9
2022	5,1	5,6	6,17	6,8	8,43	8,99	10,14	10,06	10,6	8,64	7,06	6,5	7,84
2023	5,31	5,1	5,88	6,28	8,59	11,4	10,79	10,05	9,51	7,85	7,48	6,39	7,89
2024	5,86	6,1	6,34	6,96	8,52	9,72	9,94	10,73	11,4	9,64	8,2	5,7	8,26