

DEPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

N°...../SNV/2019

THÈSE

Présentée par

RAHMANI Souad

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES BIOLOGIQUES

Filière: Sciences Biologiques

Spécialité: Ecosystèmes méditerranéens et géomatique appliquée

THÈME

**ÉTUDE ET CARTOGRAPHIE DU RISQUE DES INCENDIES DE
FORÊTS DANS LA RÉGION DES
AURÈS À L'AIDE DES DONNÉES GÉOMATIQUE**

Soutenue publiquement le **06/06/2022**

DEVANT LE JURY

Président :	SI BACHIR Abdelkrim	<u>Pr. Université Batna 2</u>
Directeur de thèse :	BENMESSAOUD Hassen	<u>Pr. Université Batna 1</u>
Co-directeur :	MOUTAHIR Hassane	<u>Dr. Université Alicante</u>
Examineurs :	BEKDOUCHE Farid	<u>Pr. Université Batna 2</u>
	BEZZALLA Adel	<u>MCA. Université Batna 2</u>
	MOUSTPHAOUI Toufik	<u>MR. C.R.S.T.R. A</u>

Année universitaire : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤١٨

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a permis de m'instruire et d'arriver aussi loin dans les études, qui m'a donné courage et patience pour traverser tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever cette thèse.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans les encouragements d'innombrables amis enseignants et professeurs, Il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenue durant ces longues années. J'espère qu'ils trouveront dans cette thèse la justification de leurs efforts.

Je tiens d'abord à remercier Pr. Hassen BENMESSAOUD, d'avoir accepté de m'encadrer et de m'avoir mis sur la voie de recherche.

Mes sincères remerciements vont aux services de les conservations des forêts de la wilaya de Batna et celle de Khenchela notamment Mr Abida Omar pour leur accueil et pour les données et les informations qu'ils ont pu me fournir et pour faciliter mon travail, également un grand merci aux techniciens et aux cadres de la circonscription des forêts de pour leurs générosité, aide et orientation sur terrain, et surtout pour les informations qu'ils m'ont données et les échanges fructueux à propos des données historiques sur les incendies dans la région d'étude.

Un merci particulier au, Dr Hassane MOUTAHIR chercheur au niveau de département d'écologie à l'université d'Alicante en Espagne pour ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse et pour me permettre d'approfondir mon travail en me faisant profiter de ses grandes connaissances dans le domaine de geomatique.

Pr. Jaime BAEZA BERNA, Professeur au niveaude e département d'écologie à l'université d'Alicante en Espagne et Pr Florent MOUILLOT Chargé de recherche dans le(CRCN IRD) Université de Montpellier en France pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, pour leurs conseils, leur générosité, suggestions et critiques qui m'ont énormément aidé à finaliser ce travail.

Mes respects et mes vifs remerciements vont également aux enseignants notamment Mr Gouaref Kamel et le cadre administratif du département d'écologie et d'environnement que beaucoup d'entre eux me traitaient comme collègue plus qu'une doctorante.

Dédicace

Je dédie cette thèse à toutes les personnes que

J'aime et en particulier :

À mes chers parents, qui m'ont donné un amour illimité, qui m'ont toujours encouragé et supporté jusqu'au bout, tous les mots du monde ne pourront servir pour les remercier de leur soutien moral et matériel.... Je leur dois tout.

À mon mari Ahmed, qui m'a encouragé et soutenu tout au long de mes études

À mon petit ange Youcef Abdelsallam

A la mémoire de mon frère Abdelsallam qui restera à jamais

présent dans mon cœur

A mes sœurs Fairouz et Samia

A mon frère Boubaker

A tous mes enseignants

A mon pays que j'aime l'Algérie

.

Table des Matières

Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
Liste des Abréviations	
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Cadre théorique de l'étude	
I. Incendie de forêts	03
1. Définition de l'incendie.....	04
2. Différents types de feux	04
3. Le comportement de feux de forêts	04
3.1.Eclosion des feux de forêts.....	04
3.2.Propagation des feux.....	05
3.2.1.Facteurs qui influent sur la propagation	06
3.2.1.1.Type de végétation	06
3.2.1.2.Age des arbres	06
3.2.1.3.Densité de la forêt	06
3.2.1.4.Superficie et homogénéité de la forêt.....	07
3.2.1.5.Quantité, propriété et continuité du combustible.....	07
3.2.1.6.Les conditions météorologiques.....	07
3.2.1.7.Les conditions orographiques	07
4. Facteurs des incendies.....	08
4.1. Conditions de formation végétales.....	08
4.2. Facteurs climatiques.....	08

4.3. Facteurs topographiques	09
4.4. Facteurs anthropiques.....	09
5. État des ressources forestières dans la région méditerranéenne	09
6. Feux de forêts en Méditerranée.....	11
7. Causes de feux de forêts dans le Bassin Méditerranéen	11
8. État des ressources forestières en Algérie.....	12
9. Caractéristiques de la forêt algérienne	15
10. Causes de dégradation de la forêt algérienne	16
11. Feux de forêts en Algérie	17
12. Cause des feux de forêts en Algérie	19
13. Impacts des feux de forêt	19
13.1. Sur le milieu naturel	19
13.2. Sur les écosystèmes forestiers	19
13.3. Effets sur la régénération des peuplements	20
13.4. Effets sur le sol.....	20
13.5. Pertes économiques	20
14. État de la recherche dans la région méditerranéenne.....	20
14.1. Recherche sur l'effet de climat sur les incendies	21
14.2. Recherche sur l'inflammabilité et la combustibilité de la végétation	21
14.3. Bilans et statistiques des feux de forêts.....	22
14.4. Feux de forêts et la télédétection	22
15. État de la recherche en Algérie	22
15.1. Recherche sur l'inflammabilité et la combustibilité de la végétation	22
15.2. Bilans et statistiques des feux de forêts	23

15.3. Télédétection et SIG	23
15.4. Feux de forêts et actions anthropiques	24

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

I. Critères de choix de la zone d'étude	25
II. Description géographique de l'Algérie orientale.....	25
II.1. Reliefs	26
II.2. Végétation de l'Algérie orientale	27
II.3. Caractéristiques topographiques	29
II.3.1. Plaines littorales	29
II.3.2. Atlas tellien	29
II.3.3. Bassins intérieurs	30
II.3.4. Hautes plaines	30
II.3.5. Atlas Saharien	30
II.4. Caractéristiques géologiques	30
II.5. Caractéristiques pédologiques	31
II.6. Climat de la zone d'étude	32
II.6.10. Cartes climatiques de la zone d'étude	33
II.6.10.1. Carte des précipitations	33
II.6.10.2. Carte des températures	34
II.6.11. Zones bioclimatiques de l'Est Algérien	35
III. Présentation de la région des Aurès	36
III.1. Principales formations forestières de la zone d'étude	38
III.1.1. Cèdraie pure	38
III.1.2. La cédraie pure	38
III.1.3. La cédraie à Chêne vert	38
III.1.4. La cédraie mixte	39
III.1.5. La pinède	39

III.1.6. Chêne vert	40
III.1.7. Genévriers	40
III.1.8. Genévrier rouge.....	40
III.1.9. Genévrier thurifère	40
III.1.10. Genévrier commun.....	41
III.1.11. Parcours	41
III.3. Cadre climatique et bioclimatique.....	43
III.3.1. Choix de la station de référence	43
III.3.2. Répartition annuelle et mensuelles des précipitations.....	43
III.3.3. Régime pluviométrique saisonnier	45
III.3.4. Températures	46
III.3.5. Synthèse bioclimatique	47
III.3.5.1. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN (1953)	48
III.3.5.2. Système de DEBRACH (1953)	50
III.3.5.3. Indice d'aridité de De Martonne (1926).....	51
III.3.5.4. Indice de sécheresse estivale	52
III.3.5.5. Système d'EMBERGER (1939).....	53

Chapitre III : Cartographie des surfaces brûlées durant la période (1985-2016)

1. Intérêt de la cartographie des zones brûlées	56
2. Méthodes de cartographie les zones brûlées par télédétection	56
2.1. Les approches multi-temporelles	56
2.2. Les approches uni-temporelles	57
3. Les données exploitées et méthodologie	57
3.1. Données satellites LANDSAT	57
3.2. Identification des surfaces brûlées à partir d'archive de LANDSAT	58
3.6. Correction des données LANDSAT	63

4. Résultats et discussion.....	64
4.1. Répartition annuelle des superficies brûlées	64
4.2. Répartition annuelle des superficies brûlées par wilaya	65
4.3. Répartition géographique des superficies brûlées	69
Chapitre IV : Analyse comparative des différents produits satellitaires	
1. Analyse comparative des différents produits satellitaires	72
1.1.Choix des données satellitaires	72
1.1.1. Données MODIS (MCD64A1)	72
1.1.2. Données (Fire_CCI 51)	73
1.1.3. Données FIRECCILT11	73
1.1.4. Données de (DGF)	74
1.2.Prétraitement de données	74
1.3. Assemblage de données	76
2. Résultats et discussion	77
2.1. Analyse de la répartition spatiale des feux de forêts	77
2.2. Analyse de la répartition temporelle des feux	81
2.3. Variations spatiales dans la détection des zones brûlées.....	83
2.4. Corrélations croisées annuelles	84
2.5. Effet de l'occupation du sol sur la détection des zones brûlées.....	86
2.6. Localisation des départs de feux entre 2001 et 2016	88
2.7. Répartition saisonnière du nombre d'incendies	90
Chapitre V: Modélisation du risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès	
1.Modélisation du risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès	92
2. Démarche d'étude	92
2.1. Prétraitement des données	94
2.2. Choix et hiérarchisation des critères.....	95

2.2.1. Indice de combustibilité de la végétation	95
2.2.2. Index topo-morphologique	96
2.2.3. Indice humain	96
3. Prise de décision à critères multiples	97
3.1. Cartographie des sous-critères et attribution de scores	97
3.2. Décisions multicritères	103
3.3. Pondération des critères	103
4. Résultats et discussions	103
4.1. Indice de risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès	106
Conclusion générale et perspectives.....	110
Références bibliographiques.....	113
Annexes.....	163
Résumé	

Liste des tableaux

Tableau 01. Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité.....	09
Tableau 02. Principales essences des forêts algériennes.....	14
Tableau 03. Répartition de la superficie forestière par commune.....	42
Tableau 04. Caractéristiques des stations climatiques.	43
Tableau 05. Répartition moyenne mensuelle et annuelle des précipitations.....	44
Tableau 06. Régime pluviométrique saisonnier des Stations étudiées.....	45
Tableau 07. Températures moyennes mensuelles pour les stations étudiées.....	46
Tableau 08. Amplitudes thermiques maximales et leur moyenne	51
Tableau 09. Classification du climat selon l'indice de De Martonne.	52
Tableau 10. Valeurs de l'indice d'aridité annuel de De Martonne pour les stations étudiées ..	52
Tableau 11. Échelle proposée par Daget et al. (1993).....	53
Tableau 12. Indice de sécheresse pour les stations de références.	53
Tableau 15. Valeurs du Quotient pluviométrique D'EMBERGER.....	53
Tableau 16. Résumé de caractéristiques des produits sélectionnés pour les zones brûlées (BA)	74
Tableau 17. Synthèse des superficies brûlées pour chaque wilaya dans la zone d'étude à partir de la base de données officielle de la DGF et de la base de données LANDSAT.....	84
Tableau 18. Pondération des paramètres utilisés pour déterminer les zones exposées au risque d'incendie.....	102
Tableau 19. Pondération les indices selon l'échelle de Saaty.....	103
Tableau 20. Valeurs de pondération pour les différents critères.	103

Liste des figures

Figure 01. Triangle du feu.....	05
Figure 02. Surface des forêts dans les pays du pourtour de la Méditerranée en 2010	10
Figure.03. Principales formation forestières d'Algérie	13
Figure 04. Carte de répartition des forêts en Algérie	13
Figure 05. Répartition de la superficie forestière par wilaya en Algérie..	15
Figure 06. Évolution annuelle des superficies parcourues par le feu en Algérie (période 1876-2012).....	18
Figure 07. Carte de la localisation géographique de la zone d'étude.....	26
Figure 08. Carte des altitudes de la zone d'étude.....	26
Figure 09. Carte d'occupation de sol de la zone d'étude	28
Figure 10. Carte lithologie de la zone d'étude	32
Figure 11. Carte des précipitations annuelles de la zone d'étude	33
Figure 12. Carte des températures minimales de la zone d'étude.....	34
Figure 13. Carte de températures maximales de la zone d'étude.....	35
Figure 14. Carte des étages bioclimatique de la partie Est d'Algérie..	36
Figure 15. Localisation géographique et limites administratives des Aurès.....	37
Figure 16. Carte d'occupation de la zone d'étude.....	42
Figure 17. Diagramme Ombrothermique de station d'Ain Skhouana.....	48
Figure 18. Diagramme Ombrothermique de station de Bouhmama	48
Figure 19 . Diagramme Ombrothermique de station d'EL Hamma.....	49
Figure 20. Diagramme Ombrothermique de station de Kais.	49
Figure 21. Diagramme Ombrothermique de station de Medina.....	50
Figure 22. Projection des stations étudiées sur le climat gramme d'Emberger.	54
Figure 23. Organigramme de la chaîne de traitement de logiciel BAMS	62
Figure 24. Image illustre une lacune dans les données, comme vu par LS-7 (A et B), l'image a été acquise en 2012. (C) Contours de feu (polygones rouges) à Skikda obtenus à partir du LANDSAT 7 ETM +.....	63
Figure 25. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans la zone d'étude sur une période allant de 1985 à 2016.	64

Figure 26. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas de Jijel, Skikda, El Tarf et de Guelma sur une période allant de 1985 à 2016.	65
Figure 27. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Jijel, Skikda, El Tarf et de Guelma sur une période allant de 1985 à 2016.	66
Figure 28. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas d’Annaba, Souk Ahras, Batna et Khenchela sur une période allant de 1985 à 2016.....	66
Figure 29. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas d’Annaba, Souk Ahras, Batna et Khenchela sur une période allant de 1985 à 2016.....	67
Figure 30. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas de Constantine et de Sétif sur la période allant de 1985 à 2016.....	67
Figure 31. Evolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Constantine et de Sétif sur une période allant de 1985 à 2016	68
Figure 32. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas de Mila et de O.EL Bouaghi sur une période allant de 1985 à 2016.....	68
Figure 33. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Mila et de O.EL Bouaghi sur une période allant de 1985 à 2016.....	69
Figure 34. Carte de cumul des feux passés recensés durant la période de 1985 à 2016 dans l’Est d’Algérie.	70
Figure 35. Exemple de confusion : (1) Sebkha visible sur google earth ; (2) Superposition des polygones de zone brûlée de Fire_CCI (jaune) et de MCD64A1 (gris).....	75
Figure 36. Organigramme de la chaîne de traitement des données.....	77
Figure 37. Carte des surfaces brûlées cumulés dans la zone d’étude selon de la base de données LANDSAT durant la période 2001-2016.....	78
Figure 38. Carte des surfaces brûlées cumulés dans la zone d’étude selon de la base de données MCD64A1 durant la période 2001-2016.	79
Figure 39. Carte des surfaces brûlées cumulés dans la zone d’étude selon de la base de données FIRE_CCI durant la période 2001-2016.	80
Figure 40. Diagramme comparative de l’évolution du nombre d’incendies et des surfaces incendiées dans les différentes wilayas de la zone d’étude selon les quatre bases de données utilisées.....	81
Figure 41. Diagramme comparative d’évolution annuelle des superficies parcourues par les feux dans la partie Est d’Algérie (période 2001-2016) selon les différentes bases de données utilisées.....	82

Figure 42. Corrélacion croisée des surfaces brûlées annuelles entre les bases de données testées et les statistiques nationales de (DGF). Les valeurs représentent R^2 avec des niveaux de signification de 0,001 ***, 0,01 ** et 0,1* .	83
Figure 43. Corrélacion croisée entre toutes les bases de données utilisées de superficies brûlées pour chaque Wilaya	86
Figure 44. Pourcentage de surface brûlée (A) et coefficient de corrélacion R^2 (B) entre DGF (orange), FIRECCILT11 (violet), FIRECCI51 (vert) MCD64A1 (bleu) et LANDSAT, en fonction du taux de couvert forestier et maquis dans chaque wilaya.	87
Figure 45. Fréquence des feux actifs dans la partie orientale d'Algérie durant la période (2001-2016).	89
Figure 46. Fréquence des feux actifs dans la région des Aurès durant la période (2001-2016).	90
Figure 47. Répartition saisonnière de nombres des incendies pour les périodes 2001 à 2016 dans le la zone d'étude.	91
Figure 48. Méthodologie adopté de la modélisation de risque d'incendie dans la région des Aurès.	94
Figure 49. Carte d'occupation du sol de la région des Aurès.	97
Figure 50. Carte d'indice de NDVI de la région des Aurès.	98
Figure 51. Carte d'indice de pente de la région des Aurès.	99
Figure 52. Carte d'indice des expositions de la région des Aurès	100
Figure 53. Carte des Altitudes de la région des Aurès.	101
Figure 54. Carte d'indice de combustibilité de la région des Aurès	104
Figure 55. Carte d'indice topo-morphologique de la région des Aurès	105
Figure 56. Carte d'indice humaine dans la région des Aurès.	106
Figure 95. Carte du risque d'incendie de forêt de la région des Aurès.	107
Figure 96. Diagramme de différents niveaux de risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès	107

Liste des Abréviations

AHP : Analyse Hiérarchique des Processus.

AMC : Analyse Multi Critère.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

BNEDER : Bureau national d'étude et de développement urbain.

CF : Conservation des forêts.

DGF : Direction générale des forêts.

DPAT: Direction de la planification et de l'aménagement.

ETM: Enhanced Thematic Mapper.

FAO: Food and Agriculture Organization.

FAO: Food and Agriculture Organization.

GPS: Global Positioning System.

MNT: Model Numérique de Terrain.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

OLI: Operational Land Imager.

ONM : Office National de Météorologie.

ONM : Office National de Météorologie.

TM : Thematic Mapper.

SIG : Système d'Information Géographique.

MSS : Scanner Multi Spectral.

USGS: United States Geological Survey.

ESA: Agence spatiale européenne.

BAMS: Burned Area Mapping Software.

GEMI: Global Environmental Monitoring Index.

NBR: Normalized Burned Ratio.

MIRBI : Indice bi-spectral dans l'infrarouge moyen.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le feu est un élément difficilement contrôlable. Il constitue la première cause dans la dégradation forestière tant à l'échelle planétaire, locale que régionale, il intervient pour beaucoup dans la modification de notre environnement (Hessas 2005). Ils constituent un problème généralisé et récurrent. Les feux se produisent avec une régularité et une gravité variables dans presque tous les biomes de la Terre (Archibald et al. 2013). La FAO déclare que les incendies détériorent de plus en plus les forêts du monde, détruisant chaque année des millions d'hectares de bois d'œuvre de grande valeur et de produits ligneux.

Dans le bassin méditerranéen, les écosystèmes forestiers sont façonnés par le feu qui est une pratique indissociable de l'agropastoralisme. Ce fléau désastreux est favorisé par les conditions favorables au départ et à la propagation des feux caractérisées par une saison estivale sèche et chaude (Touati et al. 2015). De plus la caractéristique la plus connue de cette forêt est sans aucun doute son extrême combustibilité et sa forte sensibilité au feu. Ce phénomène n'est pas spécifique au bassin Méditerranéen, mais il est particulièrement important et sensible dans cette région, il constitue le type de végétation qui a le plus régressé, sous l'effet de ce phénomène (Hessas 2005), ils affectent de grandes surfaces boisées et causent des dommages écologiques et des pertes économiques considérables (Lampin et al. 2010). Selon la FAO (2007), la pression anthropique est le principal facteur de feux de forêt dans le bassin méditerranéen, au moins 95 % des incendies sont provoqués par l'homme.

Les projections de changement climatique et les modifications estimées du risque d'incendie de forêt dans bassin Méditerranéen pour les décennies à venir (2030-2060) indiquent que l'ensemble de la région d'Afrique du Nord sera parmi les zones les plus touchées du bassin méditerranéen (Ruffault et al. 2020).

En Algérie, comme dans de nombreux autres pays méditerranéens, les zones forestières sont soumises à des incendies récurrents qui sont favorisés par la grande inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes et les conditions climatiques propices aux incendies (Souidi et al. 2015). Les statistiques (superficies incendiées et nombre de foyers) en Algérie servant comme élément d'analyse et fournies annuellement par ces services sont alarmantes pour l'ensemble des zones couvertes par un manteau forestier, et tendent à exacerber le recul des milieux naturels en perpétuelle régression où les pertes économiques dues aux feux de forêts ne sont pas estimées seulement en termes de surfaces brûlées, mais également en termes de perte de production, de dégradation de l'environnement et d'impacts

sociaux. Ces données historiques sur les incendies à long terme, à travers divers bioclimats et conditions socio-économiques contrastées, sont essentielles pour comprendre comment le régime des incendies réagit à ces facteurs (San Miguel-Ayanz et al. 2013), comment ils peuvent évoluer dans le temps (Mouillot et Field. 2005) et comment ils se propagent successivement dans les paysages et affectent le fonctionnement et la gestion des écosystèmes (Avitabile et al. 2013). De ce fait, pour comprendre le fonctionnement actuel des écosystèmes, il faut avoir une meilleure image de l'histoire de leurs perturbations (Yue et al. 2016). Les archives historiques sur les incendies les plus informatives restent les statistiques sur les incendies (Lorsqu'elles existent). En particulier les informations sur les petits incendies à partir de ces informations locales, permet une meilleure description de la source de départ de feu sans laquelle il est difficile de comprendre pourquoi des feux plus importants sont difficiles à interpréter. Cependant, l'utilisation de ces données brutes non contrôlées sur les incendies peut être une source de confusion, ou le nombre d'incendies ont été mal déclarés (Syphard et al. 2016), particulièrement dans le passé, lorsqu'ils étaient déterminés visuellement à partir d'observations sur le terrain, sans protocole normalisé sur la taille minimale des feux. L'hétérogénéité dans le type d'incendies (agricoles, feux de forêt, feux de maquis, et la taille minimale des feux effectivement référencée dans les bases de données peut mener à des estimations contrastées et induire fortement des interprétations erronées par la suite. Les méthodes traditionnelles d'identification des zones brûlées surtout dans les zones forestières vastes qui sont souvent inaccessibles par la route et/ou localisées sur des montagnes de fortes pentes, sont généralement coûteuses et pas forcément très précises. De plus, les méthodes classiques généralement utilisées pour la prévention et la lutte contre les incendies demandent du temps et ne sont pas toujours efficace es au vu de la complexité et de la diversité des écosystèmes forestiers.

Dans ce contexte, l'utilisation de la télédétection par satellite peut contribuer à la gestion des incendies de forêts. Elle permet de réduire le coût et le temps nécessaire à l'évaluation des dégâts après un feu de forêt. De plus, elle fournit périodiquement et automatiquement des informations, sur de très grandes surfaces et sur plusieurs bandes spectrales (Henry 2008). La télédétection par satellite a ouvert beaucoup de portes vers la cartographie et la surveillance du feu sur des échelles importantes. Elle peut être utilisée à trois niveaux dans la gestion du feu : avant, pendant et après. La télédétection avant le feu peut être importante pour la prévention et le contrôle du feu, pendant le feu, elle peut être utilisée pour détecter et surveiller le mouvement du feu à travers le paysage, la télédétection

après feu peut servir à cartographier l'empreinte du feu et évaluer les zones brûlées (Zammit 2008). Ces dernières années, l'utilisation de la télédétection par satellites d'observation de la terre associées aux différents types d'informations liées aux feux de forêts intégrées dans un système d'information géographique, se sont avérées comme une option fiable de suivi des urgences, d'identification des zones à risques et de cartographie de l'étendue des feux (Arfa 2019). Il est devenu un outil incontournable pour la compréhension et le suivi des phénomènes dynamiques comme les feux de forêts et permettent de disposer d'arguments valables pour la prise de décisions. De nombreux chercheurs se sont consacrés à l'étude de détection des feux de végétation par télédétection. Des exemples existent aux niveaux régional (Eva et al, 2003), continental (Koffi et al. 1995) et à l'échelle globale (Boschetti et al. 2002 ; Tansey et al. 2002).

Dans cette perspective, à travers cette étude nous cherchons, à partir de l'utilisation de la télédétection par satellites, à créer une base de données regroupant toutes les couches thématiques relatives aux feux de forêts et, d'autre part, à la modélisation et la cartographie des secteurs exposés au risque feu de forêt pour une utilisation ultérieure par les services de gestion forestière locaux.

Pour traiter cette question, nous nous sommes intéressés au cas de l'Algérie orientale et la région des Aurès, qui caractérisé par des conditions climatiques favorables aux incendies, recèle une importante couverture forestière caractérisée par une grande inflammabilité et une forte concentration de l'habitat.

Pour traiter les différentes questions de cette thèse et eu égard aux éléments du terrain d'étude, nous avons scindé le présent travail en cinq chapitres. Le premier chapitre présent aperçu général sur la problématique des incendies de forêts en Algérie. Le deuxième chapitre, relative à la présentation du terrain d'étude. Le troisième chapitre présente la méthodologie, de la cartographie des surfaces brûlées à partir des images LANDSAT dans la partie orientale d'Algérie pour la période (1985-2016). Le quatrième chapitre, présente une analyse comparative des différents produits satellitaires et le cinquième chapitre présent une modélisation de risque d'incendie dans la région des Aurès.

Chapitre I :
Cadre théorique de l'étude

I- Incendie de forêt

1. Définition de l'incendie

Plusieurs définitions ont été proposées pour définir l'incendie de forêt et parmi elles, celle de Trabaud (1992), qui définit 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.* »

On parle d'incendie de forêt lorsqu'un feu a menacé un massif de plus d'un hectare. Généralement la période la plus propice au feu de forêt est l'été, car aux effets conjugués de la sécheresse, l'augmentation des températures, et la faible teneur en eau des sols, viennent s'ajouter les travaux en forêt (Perriez et al. 2003).

2. Différents types de feux

Selon Collin et Joachim (2006), un feu peut prendre différentes formes selon les caractéristiques de la végétation dans laquelle il se développe :

- **Feux de sol** : brûlent la matière organique contenue dans le sol qui sert de combustible. Ils sont peu virulents, de propagation lente et difficile à éteindre complètement.

- **Feux de surface** : ce sont les strasses basses de la végétation qui servent de combustible. Leur propagation rapide est favorisée par le vent en relief.

- **Feux de cimes** : localisés sur la partie supérieure des arbres, ils libèrent de grandes quantités d'énergie et se propagent très rapidement. Favorisés par le vent et la sécheresse, ils sont difficiles à contrôler.

- **Feux de braises** : Les braises sont produites par des feux de cimes ou pour certaines conditions de vent et de topographie. Ces braises sont transportées à distance et sont alors à l'origine de foyers secondaires. Les grands brandons peuvent brûler longtemps et être transportés très loin (jusqu'à 10 ou 20 Km dans les cas exceptionnels).

3. Comportement de feux de forêts

3.1. Ecllosion des feux de forêts

Selon le type de combustible, les conditions environnantes et le type de facteur à l'origine du déclenchement (naturel ou humain), l'écllosion d'un feu peut être très soudaine ou couvrir plusieurs jours (Meddour 2014). L'inflammabilité des végétaux est leur propriété à s'enflammer lorsqu'ils sont exposés à une source de chaleur, elle varie fortement en fonction de la période de l'année, des conditions climatiques, de l'état de la végétation et de l'intervention humaine, pour qu'il y ait inflammation et combustion, trois facteurs doivent être

réunis, chacun en proportion convenable : un combustible, une source externe de chaleur et de l'oxygène nécessaire pour alimenter le feu : cela s'appelle triangle de feu (Meddour 2014) (Fig.1).

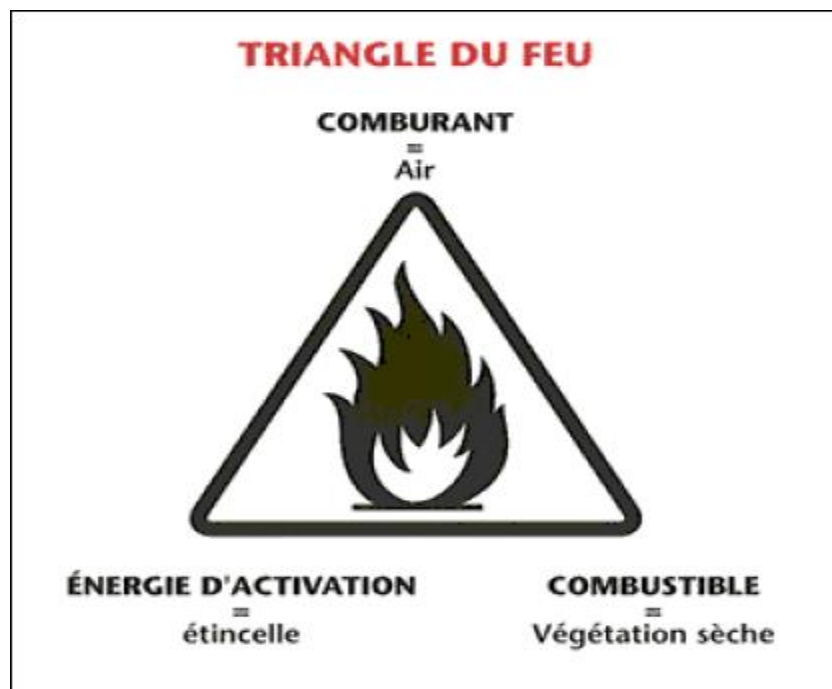


Figure 01. Triangle du feu. Source (Meddour 2014).

Dans le triangle du feu, la végétation forestière constitue le combustible. Par sa composition et sa structure, par sa teneur en eau, elle exigera une température plus ou moins élevée pour s'enflammer, par sa densité et sa répartition sur le terrain (Chautrand 1972). Un comburant est le corps qui provoque et entretient la combustion du combustible. Le plus souvent, le comburant est constitué par l'oxygène présent dans l'air ambiant. La réaction de combustion est alors une oxydation (Carbonnell 2004).

L'inflammation est parfois le fait d'un phénomène naturel, foudre, inflammation spontanée. Elle est plus généralement le fait de l'homme en raison de la dispersion de l'habitat, de la pression touristique, des pratiques agricoles désastreuses (brûlages), d'équipement défectueux (lignes électriques à haute tension, dépôts d'ordures ménagères), d'imprudences (fumeurs) et de malveillance (bergers) (Chautrand 1972).

3.2. Propagation des feux

La propagation de l'incendie va être le plus souvent déterminée par des facteurs naturels, mais des facteurs anthropiques peuvent intervenir. Selon Carbonnell (2004), quels qu'en soient les facteurs, la propagation d'un incendie se décompose en quatre étapes, la

chaleur générée par un incendie va être transportée vers l'avant des flammes selon trois processus :

- La conduction permet la transmission de proche en proche de l'énergie cinétique (produite par le mouvement) ;
- le rayonnement thermique correspond au mode de propagation de l'énergie sous forme d'ondes infrarouges. C'est le principal mode de propagation des incendies ;
- la convection, liée aux mouvements d'air chaud, voit son importance augmenter avec le vent et la pente.

Ce processus peut contribuer au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes et au déclenchement de foyers secondaires (sautes de feu) (Carbonnell, 2004).

3.2.1. Facteurs qui influent sur la propagation

3.2.1.1. Type de végétation

Les résineux sont considérés comme les types les plus touchés par les feux de forêt et cela est dû à plusieurs causes, leur composition chimique qui contient des produits résineux (résine) dans leurs feuillage et bois, ce type de végétation a une capacité de renouvellement du feuillage faible (type de feuillage persistant) (Boumediene 2011). Le Pin est le plus touché par les incendies de forêts vue son inflammabilité, et son développement dans les milieux semi-aride et pratiquement il constitue des peuplements purs, par contre les caducifoliés sont moins touchés par les incendies (Merdas 2007).

3.2.1.2. Age des arbres

Les feux de forêts touchent les zones forestières qui contiennent des jeunes semis et des arbustes et les arbres qui contiennent des branches à ras du sol. Mais pour les arbres plus âgés, la résistance est plus importante vue la formation de couche de liège et l'élagage naturel (Meddour 2013).

3.2.1.3. Densité de la forêt

Les forêts qui ont une densité moyenne ont une bonne résistance aux feux de forêts parce que la densité importante augmente la quantité du combustible (débris et branches morts), pour la densité faible, elle stimule le développement des herbes qui sont inflammable constituant le point de départ des feux (Meddour 2014).

3.2.1.4. Superficie et homogénéité de la forêt

Le danger de l'incendie de forêt augmente avec le taux de la superficie soumise à cet incendie (quantité du combustible), si la forêt contient des espaces différents, oueds, des roches, des cailloux, des lacs la vitesse de propagation de l'incendie va être lente et l'incendie moins dangereux et la lutte contre cet incendie sera plus facile.

3.2.1.5. Quantité, propriété et continuité du combustible

La composition chimique du combustible influe sur la sévérité du feu, les matériaux contenant des produits tels que la résine et certains aromes sont très inflammables. La teneur en eau et le taux d'humidité du combustible ainsi que la température et la continuité du combustible sont des facteurs qui gèrent la propagation des incendies de forêts (Belkaid 2016).

3.2.1.6. Conditions météorologiques

Les périodes de sécheresse et les épisodes de vents forts, sont favorables à l'éclosion des incendies. Ainsi le vent accélère le dessèchement des sols et des végétaux et augmente les risques de mises à part la dispersion d'éléments incandescents et d'arcs électriques et la direction du vent est un autre variable important du climat, puisqu'il détermine largement l'orientation de la propagation du feu, et donc influence la mosaïque de la forêt (Parisien et al. 2004). La chaleur dessèche les végétaux par évaporation et provoque, lors des périodes les plus chaudes, la libération d'essences volatiles, à l'origine de la propagation des flammes. De même, la foudre est à l'origine des départs de feux, notamment en plein cœur des massifs et lors des mois les plus chauds de l'année (Coudour 2015).

3.2.1.7. Conditions orographiques

Dans une zone sans relief, un départ de feu est facilement soumis à l'accélération du vent. En zone de relief irrégulier, la progression du feu est accélérée dans les montées et ralentie dans les descentes, la pente conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et ainsi leur vitesse de propagation (Faleh et al. 2012).

L'exposition a également un rôle indirect sur la progression du feu, car elle conditionne le type de végétation, l'influence des vents et l'ensoleillement. Généralement, les versants sud et sud-ouest présentent les conditions les plus favorables pour une inflammation rapide et pour la propagation des flammes (Jappiot 2000).

4. Facteurs des incendies

Le déclenchement, la propagation et l'intensité des feux de forêts sont liées aux conditions climatiques et topo-morphologiques, au type de la formation végétale et aux facteurs anthropiques (Faleh et al. 2012).

4.1. Conditions de formation végétales

Certaines formations végétales, comme les landes, le maquis et la garrigue, sont plus sujettes que d'autres au feu. Cette prédisposition s'explique par leur différence de composition (principalement la teneur en eau), mais aussi par les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises (Alessio 2004).

4.1.1. Etages de la végétation

- **Litière** : très inflammable, elle est à l'origine d'un grand nombre de départs de feux, difficiles à détecter, car se consumant lentement.
- **Strate herbacée** : d'une grande inflammabilité, le vent peut y propager le feu sur de grandes superficies.
- **Strate des ligneux bas (maquis, garrigue)** : d'inflammabilité moyenne, elle transmet rapidement le feu aux strates supérieures.
- **Strate des ligneux hauts** : rarement à l'origine d'un feu, elle permet cependant la propagation des flammes lorsqu'elle est atteinte ; ce sont les feux de cimes.

4.2. Facteurs climatiques

La période de l'année la plus propice aux feux de forêt est l'été, Les différents paramètres climatiques tels que les précipitations, les températures, l'humidité de l'air, le vent et l'ensoleillement sont influencés sur la teneur en eau des végétaux, ils constituent également les facteurs naturels de l'éclosion (Kouassi 2010). Les précipitations jouent un rôle important dans la teneur en eau des végétaux, leur effet varie selon leur durée, leur période, leur quantité ainsi que les types de combustible, par exemple, une petite quantité d'eau suffit pour ralentir l'inflammabilité des graminées, mais cet effet ne dure pas (Kaiss et al. 2007).

-**Vent** : L'effet du vent sur la propagation d'un feu est lié à sa vitesse et à sa direction, Mais en terme de propagation, l'interaction vent - relief est tout aussi importante (Jappiot 2000).

-**L'humidité** : l'inflammabilité du combustible est influencée par l'humidité. Afin de mieux comprendre cet effet, Margerit (1998) donne le tableau suivant :

Tableau 01. Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité

Humidité relative (%)	Inflammabilité
> 70	Peu de risque
46 – 70	Risque faible
26 – 45	Risque fort
< 25	Risque élevé

Ainsi les effets conjugués de la sécheresse, d'une faible teneur en eau des sols peuvent en effet favoriser l'éclosion d'incendies. Dans les zones les plus propices, des conditions météorologiques particulières (année de sécheresse, accumulation d'arbres au sol après une tempête) peuvent également engendrer, en toute période de l'année, des situations favorables aux départs de feux.

4.3. Facteurs topographiques

L'altitude, la pente, la position géographique, influencent le comportement du feu, la pente conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et ainsi leur vitesse de propagation (Agee 1993). L'orientation des rivières et des chaînes montagneuses ainsi que l'exposition a également un rôle indirect sur la progression du feu, car elle conditionne le type de végétation, l'influence des vents et l'ensoleillement (Agee 1993).

4.4. Facteurs anthropiques

Selon la FAO (2008), la pression anthropique est le principal facteur de feux de forêt dans le bassin méditerranéen, au moins 95 % des incendies sont provoqués par l'homme, les actions humaines les plus fréquentes de feux de forêts sont : l'extraction de produits forestiers non ligneux, le défrichement dû aux activités agricoles, les incendies criminels, la négligence, la chasse, la malveillance (conflit d'occupation du sol, pyromanie...) et les loisirs. Le feu peut également être provoqué par des infrastructures (ligne de transport d'énergie, dépôt d'ordure, ligne de chemin de fer, etc) (FAO 2008).

5. État des ressources forestières dans la région méditerranéenne

La variété d'écosystèmes marins et côtiers procure à la région l'une des faunes et des flores les plus riches du monde et une grande diversité d'habitats. Elle est caractérisée comme une zone de biodiversité exceptionnelle, comportant un nombre important d'espèces endémiques et des niveaux critiques de perte d'habitats (Dernegi 2010).

Les forêts méditerranéennes typiques sont formées par des espèces feuillues (principalement chênes), aussi bien à feuilles persistantes qu'à feuilles caduques, *Quercus*

ilex, *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus pubescens*, *Quercus cerris*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus toza*, *Quercus calliprinos*, *Quercus ithaburensis*, et conifères comme *Pinus halepensis*, *Pinus brutia*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster* et *Juniperus*. La dégradation de ces forêts a produit une végétation à basse densité connue le maquis et la garrigue, là où il n'y a pas de stress hydrique, les forêts de *Quercus robur*, *Quercus petraea*, *Fraxinus sp.*, *Populus alba* et *Pinus nigra* peuvent prospérer (FAO 2013).

Plus de 50 pour cent des surfaces forestières, sont concentrées en Espagne, en France et en Turquie (Fig. 2), les autres terres boisées représentent seulement 3,73 pour cent de la surface totale des terres dans les pays du pourtour de la Méditerranée (FAO 2010).

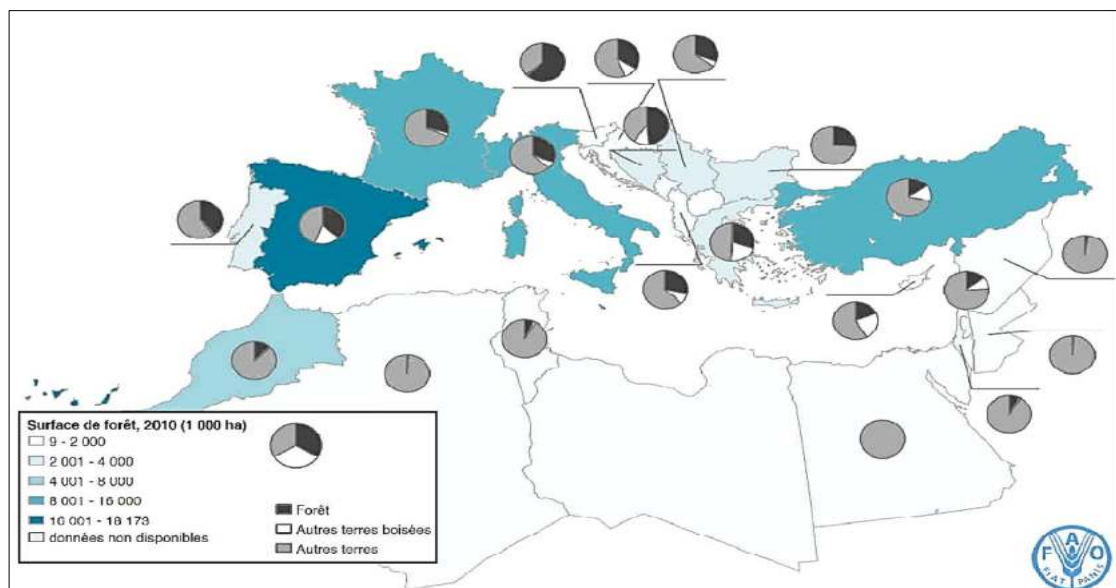


Figure 02. Surface des forêts dans les pays du pourtour de la Méditerranée en 2010 (Source FAO 2010).

La surface forestière des pays méditerranéens représente environ 2 pour cent de la surface forestière mondiale (FAO 2015), mais l'importance des forêts méditerranéennes par rapport aux objectifs forestiers mondiaux est bien supérieure à ce que ce chiffre suggère à lui seul. En raison de la biodiversité des forêts méditerranéennes, du fait que la région est l'une des principales zones sensibles au changement climatique dans le monde, ou encore parce que 7 pour cent de la population mondiale vit dans les pays méditerranéens, la région méditerranéenne est déterminante pour atteindre les objectifs mondiaux en matière de forêts (Giorgi 2006).

Les forêts ont toujours jouées un rôle important dans le développement des populations méditerranéennes. Depuis toujours les forêts méditerranéennes ont été exploitées pour leurs différents usages et appréciées pour les multiples biens et services qu'elles assurent à ces populations, cependant, la surexploitation se explique par des impacts négatifs sur

l'environnement et est responsable aujourd'hui de la dégradation des forêts dans de nombreux espaces méditerranéens (Arfa 2019). Ils sont très liés aux activités humaines et le niveau actuel d'endémisme et de biodiversité est le résultat de ces interactions. Toutefois, la pression croissante sur les écosystèmes aura différents impacts. La perte de biodiversité en particulier affectera inévitablement le potentiel économique futur de ces zones (FAO 2020).

6. Feux de forêts en Méditerranée

Les superficies brûlées totales dans les pays méditerranéens peuvent être estimées à environ 600000 ha par an, soit près du double des années 70 où les feux de forêt causent des dommages écologiques et des pertes économiques considérables (Lampin et al. 2011). Toutefois, la tendance observée est beaucoup moins uniforme que pour l'incidence des feux. On constate une aggravation de la situation en Grèce (de 12 000 à 39 000 ha), en Italie (de 43 000 à 118 000 ha), au Maroc (de 2 000 à 3 100 ha), en Espagne (de 50 000 à 208 000 ha) et en ex-Yougoslavie (de 5 000 à 13 000 ha). Au Portugal, la situation s'est également dégradée, même si les statistiques ne démarrent que plus tard (FAO 2008).

En Algérie et à Chypre, on ne décèle aucune tendance à partir des statistiques, mais certaines années présentent un maximum très élevé (par exemple, 1974 à Chypre et 1957, 1958 et 1983, 1993, 1994, 2000, 2007 et 2012 en Algérie (Meddour et Derridj 2012).

7. Causes de feux de forêts dans le Bassin Méditerranéen

Les causes d'incendie de forêt sont diverses et leur répartition varie selon les zones géographiques mais aussi en fonction du temps (Long et al. 2008). Contrairement aux autres parties du monde, où un pourcentage élevé de feux est d'origine naturelle (essentiellement la foudre). Le bassin méditerranéen se caractérise par la prévalence de feux provoqués par l'homme. Les causes naturelles ne représentent qu'un faible pourcentage (de 1 à 5 % en fonction des pays), probablement à cause de l'absence de phénomènes climatiques comme les tempêtes sèches (Alexandrian et al. 1998).

Dans le Bassin Méditerranéen, les incendies sont en grande majorité d'origine humaine, que ce soit par accident, par négligence ou intentionnellement. Cependant, la part des feux dont l'origine reste inconnue est encore importante (Long et al. 2008). Parmi les origines connues, ce sont les causes involontaires (négligence ou accident) qui sont les plus fréquentes dans l'ensemble des pays, hormis la Turquie, où les incendies criminels semblent être la majorité (Canakcioglu 1986).

Les causes accidentelles varient d'un pays à l'autre. Certaines sont liées aux installations fixes (lignes électriques, décharges) et d'autres sont directement associées aux activités humaines (fours à charbon mal réglés, feux non maîtrisés, fumeurs, feux de camp, feux allumés par les bergers). Il semble, toutefois, que ces incendies involontaires soient directement liés aux activités agricoles et forestières : les parties en cause sont principalement les résidents permanents (et rarement les touristes de passage) (Alexandrian et al. 1998).

8. État des ressources forestières en Algérie

L'Algérie présente une grande variété de milieux naturels, grâce notamment à sa position géographique. Sa diversité topo-morphologique a donné naissance à plusieurs types d'habitats. On y trouve des hautes montagnes, des plaines et des hauts plateaux, des dépressions salées (chotts), des lacs et le Sahara.

Les forêts en Algérie constituent un ensemble d'écosystèmes à l'équilibre fragile. Les enjeux qui lui sont liés sont multiples, selon les cas : production économiquement viable de bois, de liège et autres produits forestiers non ligneux, prévention des inondations et de l'érosion, rempart contre la désertification, risque d'incendie, stockage du carbone, préservation et valorisation de la biodiversité, atténuation des effets des changements climatiques, cadre de vie, fonction récréative...etc (Arfa 2019). Ces forêts ont de tout temps été le cadre de nombreuses activités humaines (exploitation de bois et de liège, cueillettes diverses, essartage, chasse, pacage, lieu de promenade, etc).

Selon la direction générale des forêts (DGF, 2010), La superficie du patrimoine forestier national en Algérie a augmenté à 4,1 millions d'hectares actuellement contre trois millions ha en 1962, grâce aux efforts de reboisement et de régénération. A cette superficie, s'ajoute un (1) million ha de terres à vocation forestière dont les procédures d'intégration au domaine forestier national sont en cours, note la DGF dans un communiqué. Les 4,1 millions ha de patrimoine forestier se composent de 1,42 million ha de forêts, de 2,41 million ha de maquis et de 280.000 ha de jeunes reboisements (Fig.3).

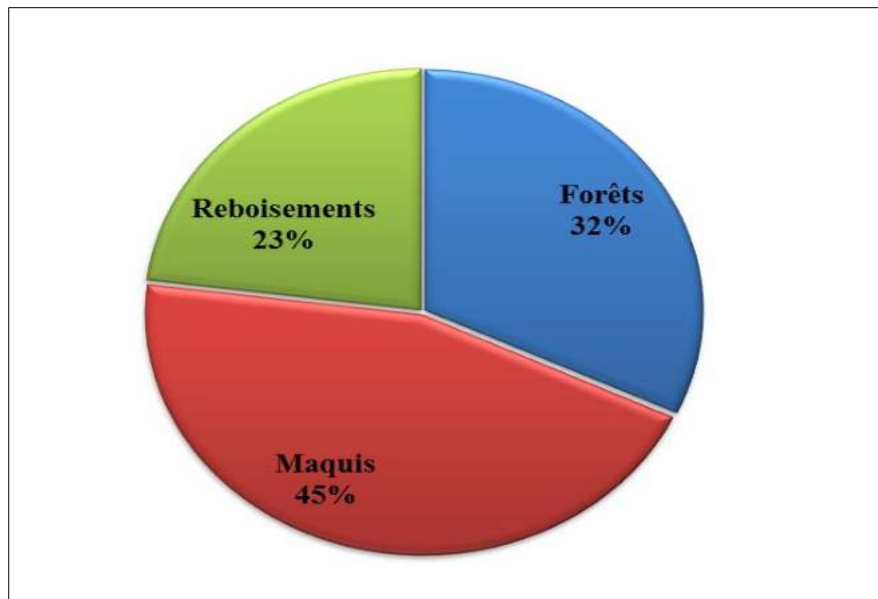


Figure.03. Principales formation forestières d'Algérie.

Comme le démontre la carte ci-après (Fig. 04) de répartition des forêts générée par la direction générale des forêts en 2010, près de 60% des espaces forestiers sont occupés par les maquis, que l'on peut définir comme étant toute végétation ligneuse ne dépassant pas 7 mètres de hauteur (arbustes, arbrisseaux, broussailles...) ; la prédominance des maquis témoigne de l'état de dégradation des forêts algériennes.

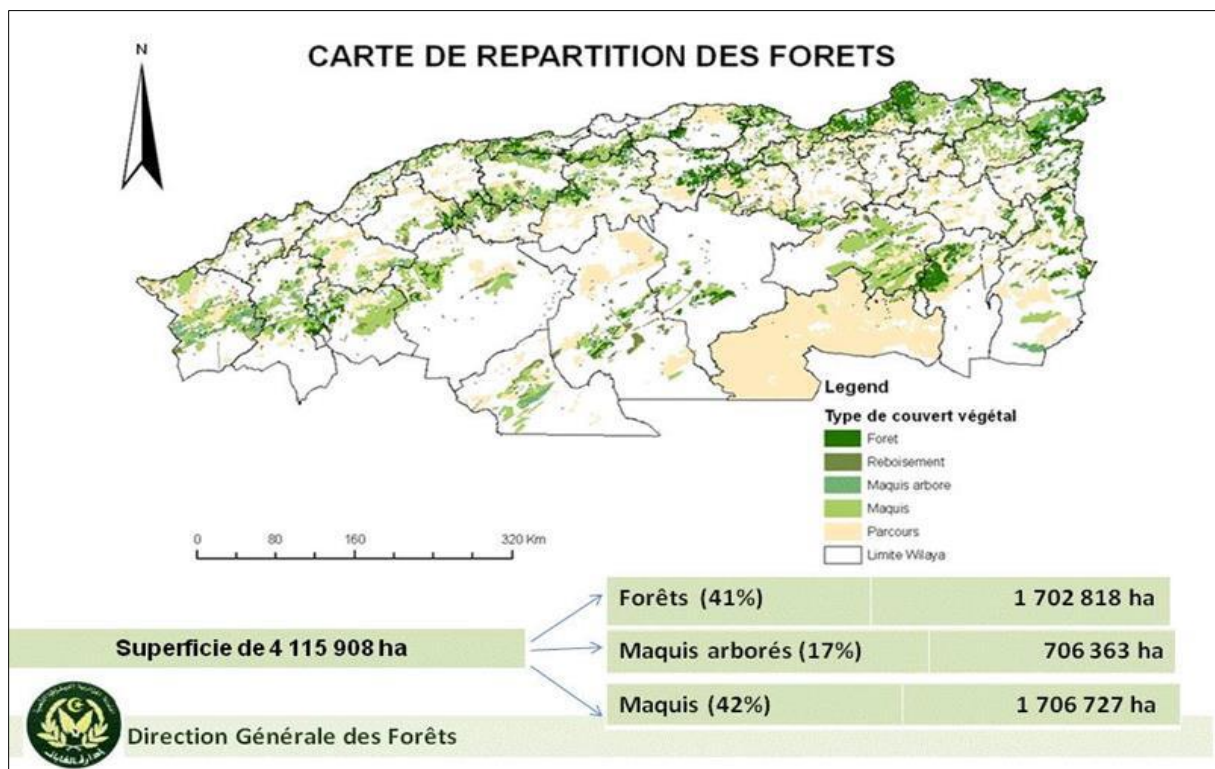


Figure 04. Carte de répartition des forêts en Algérie (Source DGF 2010).

Selon la DGF (2010), les maquis sont répartis en quatre catégories dont la grande partie est de faible densité :

- Maquis clairs : 12.621,18 km² (52% des maquis) ;
- Maquis denses : 4.446,09 km² (18% des maquis) ;
- Maquis arboré clairs : 4.359,40 km² (18% des maquis) ;
- Maquis arborés denses : 2.704,23 km² (12% des maquis)

L'irrégularité des formations forestières naturelles est caractéristique du territoire algérien. En effet, de fortes variations tant en termes d'âge qu'en termes de types de végétation sont présentes au sein d'une même formation où l'on recensera généralement un mélange désordonné de feuillus et de résineux de tout âge et de toute taille. La grande majorité des forêts sont dites de lumière et sont de ce fait caractérisées par des peuplements ouverts avec sous-bois épais.

Les principales espèces d'arbres qui le composent sont le pin d'Alep (69%) et le chêne liège (21%). Sur des superficies moins importantes, l'on retrouve essentiellement le cèdre, le pin maritime, les chênes (Vert, Zeen et Afares), le thuya et l'eucalyptus (Tab. 2).

Tableau 2. Principales essences des forêts algériennes. Source (DGF 2010).

Essences	Superficie (ha)	Taux %
Pin d'Alep (<i>Pinus halepensis</i>)	881.000	21,50%
Chêne liège (<i>Quercus suber</i>)	230.000	5,60%
Chêne vert (<i>Quercus ilex</i>)	108.000	2,60%
Chêne zéen (<i>Quercus canariensis</i>) et Chêne afares (<i>Quercus afares</i>)	48.000	1,20%
Eucalyptus	43.000	1%
Pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>)	31.000	0,80%
Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>)	16.000	0,40%
Autres (Thuya + Genévrier + frêne)	124.000	3%
Reboisement et protection	717.000	17,50%
Maquis et broussailles + vides	1.902.000	46,40%
Total	4.100.000	100%

Sur les 48 wilayas que compte l'Algérie, 40 disposent d'une couverture forestière, les huit Wilayas du Sud sont dépourvues de forêts (Fig. 5). La Wilaya d'El Tarf dispose du taux de couverture forestière le plus élevé (57,51%), alors que pour la Wilaya de Naama le taux de couverture n'est que de 0,36% (Arfa 2019).

La superficie forestière c'est la wilaya de Batna qui dispose de la plus grande superficie avec 314.565 ha, la plus petite superficie revient à la Wilaya d'Alger (5000 ha).

Cette répartition s'explique en grande partie par le climat, en effet les massifs littoraux du Nord-Est, les plus humides, sont aussi les régions les plus forestières. (Arfa 2008). Les 4,1 millions d'hectares de couverture forestière ne représentent qu'un taux de boisement de 10,89% en ne considérant que le nord du pays, et seulement 1,72% si l'on prend en ligne de compte tout le territoire national. Dans les deux cas, cette couverture forestière est nettement insuffisante en comparaison au taux de 25%, mondialement admis (Arfa 2008).

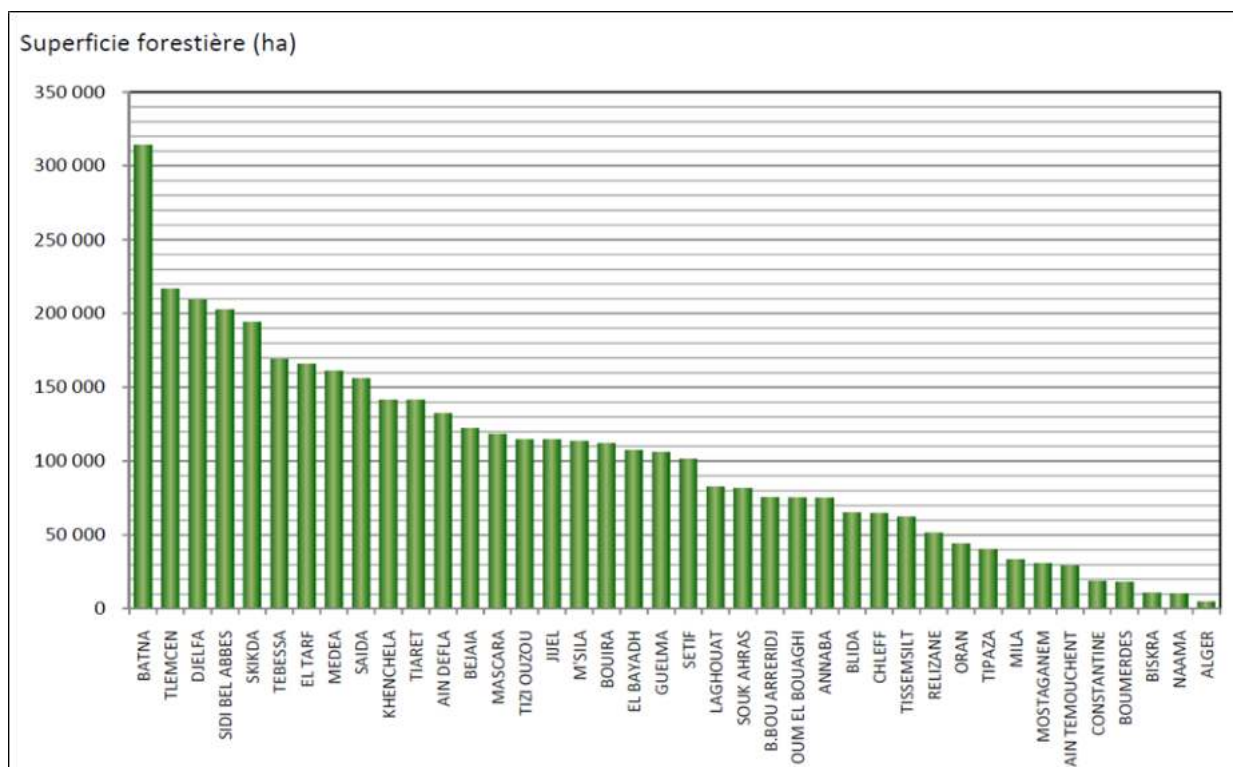


Figure 05. Répartition de la superficie forestière par wilaya en Algérie. Source (Arfa 2008).

9. Caractéristiques de la forêt algérienne

Les forêts et maquis couvrent 4,1 millions d'hectares soit un taux de boisement de 16,4% pour le nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes arides sont également prises en considération. Selon (FOSA 2000), les taux de boisement sont évidemment très insuffisants pour assurer l'équilibre physique et biologique. L'essence prédominante est le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) qui occupe 880.000 ha et se rencontre principalement dans les zones semi arides, le chêne liège (*Quercus suber*) avec 230.000 ha se localise principalement dans le Nord-Est du pays, les chênes zéen (*Quercus canariensis*) et afares (*Quercus afares*) avec 48.000 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie, les cèdres sont éparpillés sur 16.000 ha en îlots discontinus dans le tell central et les Aurès, le pin maritime est naturel dans le Nord-Est du pays et couvre 32.000 ha. Les Eucalyptus introduits

dans le nord et surtout l'est du pays occupent 43.000 ha, ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1.249.000 ha dont 424.000 ha de peuplements artificiels.

Le second groupe, constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride jouent un rôle de protection essentiellement, ne couvre que 219.000 ha. Le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2.603.940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727.000 ha et les maquis et broussailles qui occupent une superficie de 1.876.000 ha.

Les forêts font partie du domaine public de l'Etat. S'ajoutent à ces superficies forestières les nappes d'alfa qui totalisent 2,7 millions d'hectares. La forêt algérienne apparaît comme une formation végétale dont les arbres sont en état de lutte continue contre la sécheresse (plusieurs mois secs consécutifs l'été). Compte tenu de tous les éléments historiques qui la marquent et des pressions qu'exercent sans cesse sur elle, l'homme et son bétail, la forêt semble glisser rapidement sur la voie d'une dégradation progressive des essences principales et de son remplacement par le maquis et les broussailles dont le rôle reste néanmoins extrêmement important pour le contrôle et la fixation des sols en terrain à forte déclivité.

10. Causes de dégradation de la forêt algérienne

La destruction progressive des couverts forestiers est liée à des facteurs anthropiques et ce malgré la réalisation d'importants programmes forestiers.

Selon la DGF (2010), les facteurs ayant contribué à cette situation sont :

- **Désertification** : Le désert avance d'une manière très significative ; les sables envahissent annuellement en moyenne 30.000 ha du couvert végétal et prédisposent ces milieux à la désertification, qui s'accélère à cause de l'aridité du climat et de la dégradation des écosystèmes steppiques. Ce risque demeure inquiétant et menace sérieusement les moindres espaces agricoles de la zone steppique et jusque dans le Nord algérien. L'ensablement des terres engendre un exode des populations sédentaires qui aggrave le phénomène de désertification. Face à ce risque, l'État se mobilise avec la mise en place d'un programme de reboisement d'environ 25.000 ha/an, la construction de nouveaux barrages d'eau et l'encouragement de l'agriculture saharienne.
- **Feux** : de 1981 à 2000, 910.631 ha de couverts forestiers ont brûlé. Malgré les capacités de régénération de la forêt, les feux représentent un véritable fléau auquel

très peu d'espèces peuvent résister. C'est le facteur de dégradation le plus ravageur de la forêt. Il détruit en moyenne, en l'espace de quelques mois seulement (juin à septembre), plus de 36.000 ha de formations ligneuses par an. La moyenne des différents programmes de reboisement depuis 1963 qui est de 26.000 ha/an ne peut équilibrer ces pertes, même si le taux de réussite de ces actions est de 100%, ce qui n'est malheureusement pas le cas.

- **Surpâturage** : la forêt sert de parcours permanent pendant la saison des neiges pour les éleveurs du Nord. Elle est aussi terres de transhumance pour les troupeaux steppiques. On dénombre en forêt 960.000 bovins, 600.000 caprins et 4,2 millions d'ovins. Des études montrent que la charge pastorale est au moins quatre fois supérieure aux capacités d'équilibre.
- **Coupes de bois** : suite à la hausse des prix du bois, les coupes illicites de bois de chauffage, de bois d'œuvre pour la construction et de bois d'ébénisterie sont en augmentation. Ces coupes touchent les arbres ayant les meilleures caractéristiques phénotypiques et génétiques et éliminent les meilleurs porteurs de graines.
- **Tourisme** : le tourisme et les usages récréatifs qui nécessitent l'aménagement de voies de circulations, de stations... augmentent les risques d'incendies et affectent les zones boisées.
- **Défrichements** : les populations montagnardes, privées de surfaces agricoles et marginalisées procèdent à des labours à la lisière des forêts. Ces pratiques, outre qu'elles ont un effet désastreux sur les sols, provoquent des antagonismes permanents entre les riverains et l'administration forestière guidée par un souci de protection des forêts.

11. Feux de forêts en Algérie

Les statistiques des incendies de forêts en Algérie, qui ont commencé vers le milieu du dix-neuvième siècle, indiquent que les incendies étaient déjà un véritable fléau. Vers le 14ème siècle, la surface occupée par la forêt était de 12 millions d'hectares environ (Missoumi et al. 2002). Trois décennies ont été particulièrement désastreuses pour la forêt algérienne, la décennie 1911-1920, qui coïncide avec la première guerre mondiale, la décennie 1951-1960 qui coïncide avec la guerre de libération et la décennie 1991-2000 qui coïncide avec la période du terrorisme (Oldache 2003).

Des forêts où se rencontraient des formations au stade de futaie principalement à base de chêne, de pin, de genévrier et de Thuya. A la fin du 19ème siècle, les formations végétales

couvraient encore environ 5 millions d'hectares, cependant, il restait seulement 3,2 millions d'hectares au début des années 1960, sachant que sur cette surface, il y a plus de 50 % de maquis, garrigue et broussaille, en quelques siècles, la forêt algérienne proprement dite a perdu près de 8 millions d'hectares, soit environ 67 % de la couverture totale (Missoumi et al. 2002).

Les données disponibles en matière d'incendies de forêts en Algérie (Fig.6) montrent que les fréquences annuelles d'incendies sont, en moyenne, en augmentation aussi bien pour la période allant de la deuxième moitié du 19ème siècle jusqu'à la fin de la première guerre mondiale, que pour la période récente qui correspond aux trente dernières années.

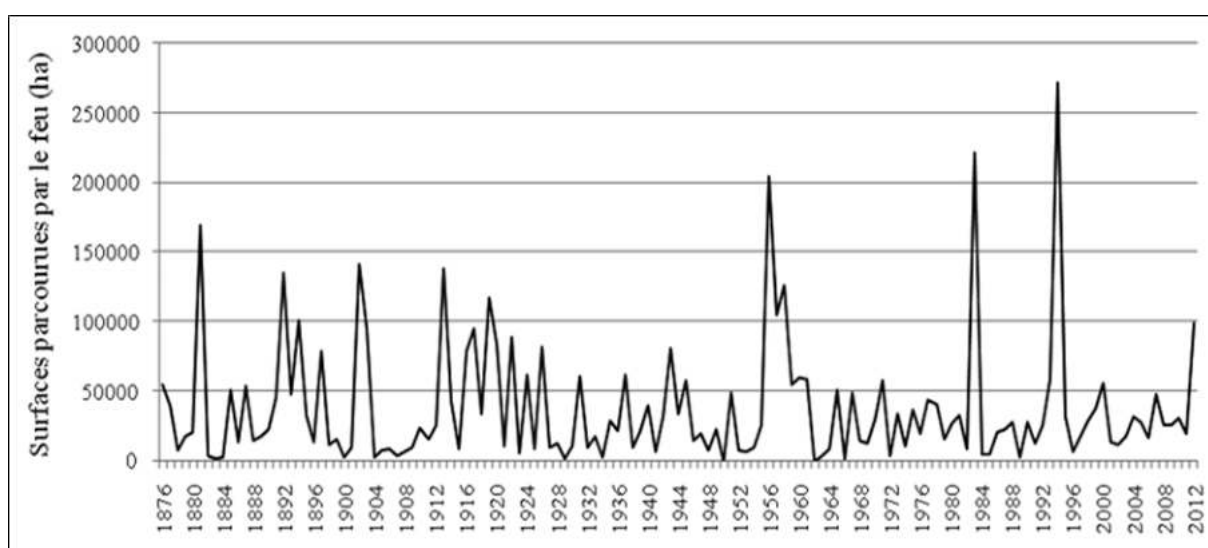


Figure 06. Évolution annuelle des superficies parcourues par le feu en Algérie (période 1876-2012). Source (Meddour et Derridj 2012).

Pour ce qui est des statistiques récentes, la forêt algérienne a perdu 910.640 hectares avec un nombre total d'incendies déclarés de 42.555 incendies durant la période 1985-2010 (Meddour et Derridj 2012), où les pertes économiques dues aux feux de forêts ne sont pas estimées seulement en termes de surfaces brûlées, mais également en termes de perte de production, de dégradation de l'environnement et d'impacts sociaux.

La forêt algérienne est fortement conditionnée par un climat où la sécheresse est un facteur qui freine son évolution. Elle subit de nombreux incendies qui la transforment en maquis et en broussaille. Les conditions climatiques y sont, pour une grande part, responsables des épisodes particulièrement catastrophiques (Meddour et Derridj 2012).

12. Cause des feux de forêts en Algérie

Les statistiques officielles algériennes admettent en effet que 80 % des causes sont inconnues et, pour les 20 % restants sont d'origine connue (d'origine volontaire). Ceci démontre les efforts qui doivent être entrepris pour cerner au mieux les causes des feux de forêts, afin de mieux les connaître et réduire leurs effets.

De plus avec l'extension urbaine, l'interface entre les zones d'habitat et les zones sensibles de forêts se réduit progressivement. Ceci a pour conséquence de limiter les zones tampon à de faibles périmètres, insuffisants pour stopper la propagation d'un feu. Tous ces facteurs anthropiques sont bien sûr aggravés par les facteurs naturels, tels le vent ou la sécheresse. Par ses effets, le feu est un agent de destruction aussi bien pour les hommes et leurs activités, que pour l'environnement car les incendies affectent des territoires où les enjeux humains sont nombreux (Bowman et al. 2017).

13. Impacts des feux de forêt

13.1. Sur le milieu naturel

Selon Colin et al (2001), le passage d'un incendie de forêt perturbe le milieu naturel à plusieurs échelles :

- Le sol peut être touché plus ou moins profondément avec apparition de risques d'érosion et destruction de la faune qu'il abrite.
- Les arbres constituant le peuplement forestier peuvent être atteints au niveau du feuillage, des troncs ou des racines, ce qui les rend ainsi sensibles aux attaques parasitaires.
- L'intensité et la fréquence des feux influent sur la dynamique de reconstitution de la végétation.
- Le feu a un impact souvent durable sur le paysage.
- Les pertes économiques dues au feu sur le milieu naturel sont difficiles à estimer

13.2. Sur les écosystèmes forestiers

Le passage d'un feu se traduit par l'altération plus ou moins poussée d'organes vitaux du végétal, au niveau du feuillage, du tronc et des racines. Il en découle une perte de vigueur de l'arbre pouvant entraîner sa mort.

Le degré d'altération est fonction de la combinaison des dégâts sur les différentes parties de l'arbre (feuillage, tronc, racines), résultant de la nature (feu de surface, feu de cime) et de l'intensité du feu, ainsi que de la sensibilité au feu de l'espèce. Un feu rapide provoque

beaucoup moins de dommages qu'un feu lent (Trabaud 1992). Ainsi le risque phytosanitaire, où l'altération des organes vitaux entraîne l'affaiblissement de l'arbre, qui est beaucoup plus sensible aux attaques parasitaires ou fongiques. Les peuplements brûlés peuvent alors devenir des foyers potentiels de contagion de la végétation voisine (Colin et al. 2001).

13.3. Effets sur la régénération des peuplements

La survie des communautés végétales est variable selon les espèces concernées et l'intensité du feu. Un état des lieux est souhaitable pour estimer les chances d'une reprise naturelle de la végétation (rejet de souche des feuillus, production des semences pour les résineux) et pour envisager, après un diagnostic de site, une diversification de l'occupation du sol.

13.4. Effets sur le sol

Le feu altère les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol par la chaleur qu'il dégage, le déplacement et la transformation des éléments nutritifs qu'il entraîne et par la réduction de la couverture morte qu'il produit (Robitaille 1995). Un incendie ne cause généralement pas d'altération majeure des propriétés physiques du sol. S'il est intense et entraîne une exposition du sol minéral et en réduit la matière organique, il peut affecter la température, la texture, la structure, la densité et l'humidité du sol (Feller 1996).

13.5. Pertes économiques

Les différents éléments qui constituent le coût d'un incendie sont :

- les coûts directs : lutte contre le feu, équipements détruits (habitations, infrastructures, véhicules), forêts détruites.
- les coûts indirects : perte des usages, restauration de la végétation et des paysages, incidence sur l'économie du tourisme et des loisirs.
- Il est très difficile d'évaluer les pertes économiques dues à un incendie, en raison de la difficulté d'appréhender les coûts indirects.

14. État de la recherche dans la région méditerranéenne

Les efforts de la recherche scientifique dans le domaine des incendies de forêts sont orientés vers l'analyse des différentes composantes environnementales qui influent directement ou indirectement sur l'apparition et le développement des incendies, afin d'aboutir à des solutions qui permettent d'endiguer le phénomène de façon durable

Au sein de la région méditerranéenne, la thématique des feux de forêts a été abordée sous plusieurs aspects et dans différents pays, surtout ceux situés sur la rive Nord de la méditerranée, dont les plus importants sont : la France, l'Espagne, la Grèce et l'Italie.

14.1. Recherche sur l'effet de climat sur les incendies

L'effet du climat sur la fréquence des incendies et les surfaces brûlées sur la rive Nord de la méditerranée ont été largement étudiés. On peut citer les travaux de :

- Carrega et Geronimo (2007) ont procédé par interpolation à une spatialisation de la composante météorologique du risque feu de forêt, en temps réel ou a posteriori, à partir d'un réseau de stations automatiques dans les Alpes-Maritimes (sud-est de la France).
- Good et al. (2008) se sont intéressés aux conditions météorologiques associées au risque élevé et extrême de feu de forêt à long et à court terme en Italie et en Grèce.
- Turco et al. (2017) ont travaillé sur le rôle clé de la sécheresse dans la dynamique des feux d'été en Europe méditerranéenne.
- Urbieta et al. (2015) ont étudié l'activité des incendies en fonction de la sévérité saisonnière des incendies et du climat antécédent à des échelles spatiales dans le sud de l'Europe et dans le Pacifique ouest des États-Unis.
- Enfin, l'étude de Belhadj-Khedher et al. (2020) sur les vents sahariens chauds et secs du Sirocco provoquent des incendies extrêmes en Tunisie méditerranéenne (Afrique du Nord).

14.2. Recherche sur l'inflammabilité et la combustibilité de la végétation

- Delabraze et Valette (1974), Alexandrian (1982) et Valette (1990) ont tous travaillé sur l'inflammabilité des espèces et la combustibilité des formations forestières méditerranéennes.
- En 1985 Trabaud a étudié la quantité d'énergie et la puissance potentielle de feu de quelques communautés végétales du sud de la France.
- L'inflammabilité et la sensibilité d'espèces spécifiques comme le pin d'Alep a été étudiée par d'Alexandrian et Rigolot (1992).
- On peut citer aussi les travaux Moro et Valette (1996) sur la teneur en eau de combustibles forestiers méditerranéens.

14.3. Bilans et statistiques des feux de forêts

- Plusieurs auteurs ont réalisé des études statistiques sur les bilans des feux de forêts. Alexandrian et Esnault (1998) et Alexandrian et al. (1999) ont analysé les tendances des feux de forêts et les politiques nationales possédant un impact sur ces feux dans le bassin Méditerranéen.
- Alexandrian en 2008 a présenté un travail sur les statistiques feux de forêts de 1978 à 2008 en France.
- Mol et Küçükosmanoglu (1997) ont étudié les bilans des feux dans les forêts turques entre 1937 et 1995.
- Au Maroc, Assali et Rachdi (2005) ont étudié et analyser les feux de forêts de 1960 à 2004.
- Benjamaa et Abdelmoula (2004) se sont intéressé aux feux de forêts dans la subéraie tunisienne entre 1956 et 1990.

14.4. Feux de forêts et la télédétection

De nombreux travaux sur l'application de la télédétection spatiale ont été recensés au niveau de la région méditerranéenne, on peut citer les travaux suivants :

- Chuvieco et Congalton (1989) ont utilisé les données LANDSAT pour dériver une carte de risque feu des forêts de la côte méditerranéenne espagnole.
- López et al. (1991), Illera et al. (1996) et Calle et al. (1999) ont travaillé sur l'évaluation, l'estimation et la cartographie, du risque feu de forêt en Espagne à grande échelle, au moyen d'images NOAA-AVHRR.
- Gabban et al. (2008) ont évalué le risque feu de forêt dans la région méditerranéenne européenne en comparant les indices satellitaires et météorologiques. L'analyse a été effectuée en tenant compte d'un ensemble de données de 10 ans d'incendie, de données satellitaires et de données météorologiques pour l'Espagne.
- Belhadj-Khedher et al. 2018 ont utilisé les données LANDSAT pour analyser le régime de feux de forêts en Tunis durant ma période (1985–2010).

15. État de la recherche en Algérie

15.1. Recherche sur l'inflammabilité et la combustibilité de la végétation

- Rebai (1982) a analysé la sensibilité au feu des différentes formations végétales dans la wilaya de Mostaganem.

- Megrerouche (2006) a évalué la sensibilité au feu de la végétation de la forêt domaniale de Chettabah, localisée au niveau de la wilaya de Constantine. Les tests d'inflammabilité et de combustibilité ont permis de classer les espèces par ordre croissant selon leur sensibilité au feu et de calculer le risque d'incendie.

15.2. Bilans et statistiques des feux de forêts

Plusieurs études statistiques sur les bilans des feux de forêts en été réalisées en Algérie. Sur le plan national il y a les travaux de :

- Madoui (2002) sur l'historique des feux de forêts, où l'auteur essaie, à partir d'une analyse historique et statistique, de montrer la place du feu dans l'écosystème forestier en Algérie. Il arrive à la conclusion que l'homme, par ses différentes activités a été et est encore la cause principale de tout déclenchement du feu, du fait de ses anciennes habitudes agricoles et pastorales.
- Meddour-Sahar et al. (2008) sur une période de 132 ans (1876-2007), de Arfa et al. (2009) sur l'analyse des feux de forêts et leur impact économique (période 1985-2006)
- Meddour-Sahar et Derridj (2012) sur l'analyse spatiotemporelle des feux de forêts (période 1985-2010).

Sur le plan régional, dans le Nord-Est algérien, on peut citer les travaux de :

- Benderradji et al. (2004) dans les wilayas de Skikda, Annaba et El Tarf (période 1990-2000) d Zouadia (2006) dans les wilayas de Mila, Constantine, Guelma et Souk Ahras (période 1990-2004)
- Merdas (2007) dans les wilayas de Bejaia, Jijel, Sétif et Bordj Bou-Arréridj (1985-2004).

15.3. Télédétection et SIG

De nombreux travaux portant sur l'utilisation de la télédétection et de la géomatique pour la gestion des feux de forêts en Algérie ont été réalisés.

- Missoumi et al. (2002) ont étudié l'apport des SIG pour la prévention des feux dans la forêt domaniale de Kounteidat, wilaya de Sidi Bel Abbès.
- Khader et al. (2009) ont élaboré une carte du risque feu de forêt à l'aide de la géomatique pour la forêt de Nesmoth, située dans la wilaya de Mascara.
- Guettouche et al. (2011) ont réalisé une modélisation et une spatialisation du risque feu de forêt par SIG pour la forêt de Bouzareah à Alger.
- Arfa (2018) a réalisé une étude qui traite de l'espace des risques de feux de forêts au niveau des massifs de la wilaya d'El Tarf, située dans le Nord-est algérien.

15.4. Feux de forêts et actions anthropiques

En Algérie, seuls 2 travaux traitants la question du rôle de l'action anthropique dans les feux de forêts, ont été recensées.

- Le premier est celui de Guerbah (1992) sur les causes originelles et la prévention des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf.
- Le second est celui de Meddour (2014) sur l'analyse du risque, l'étude des causes, l'évaluation du dispositif de défense et des politiques de gestion des feux de forêts en Algérie.

Chapitre II :
Éco-géographie de L'Algérie orientale et
les Aurès

I. Critères de choix de la zone d'étude

Le choix de la partie orientale d'Algérie et la région des Aurès comme une zone d'étude pour l'évaluation de risque d'incendie et la cartographie des feux de forêts est justifiée par plusieurs critères qui donnent une position singulière en Algérie, ces critères sont comme suit :

- La zone d'étude se distingue par ses milieux physiques et naturels très diversifiés allant du système tellien au nord qui plonge vers la mer Méditerranée ; les hautes plaines comprises entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud.
- La zone d'étude se distingue par un couvert végétal varié : les forêts denses et claires, les maquis puis la végétation steppique au sud.
- Les étages bioclimatiques de végétation allant de l'étage aride, semi-arides, subhumide et humide.
- La récurrence des feux de forêts qui touchent la région l'étude.

II. Description géographique de l'Algérie orientale

L'Algérie orientale se compose d'une vaste zone disséquée en montagnes, plaines et bassins. La zone d'étude s'étend de Jijel à l'ouest jusqu'à la frontière Algéro-tunisienne à l'Est et de la mer méditerranée au nord jusqu'à Batna au sud, elle se situe dans le Nord-Est algérien. Elle est limitée, à l'Est par la frontière tunisienne, au Nord par la mer méditerranée, à l'Ouest par une ligne verticale traversant les monts de la kabylie, chott el Hodna et au Sud par une ligne parcourant Ouled djellal et la limite nord de chott Melrhir.

Le territoire se situe entre les parallèles : 37° et 34° de latitude Nord et entre 5° et 9° de longitude Est (Fig. 07), il couvre une superficie totale de 54 088 km² et constituée de 12 unités administratives (Wilaya).

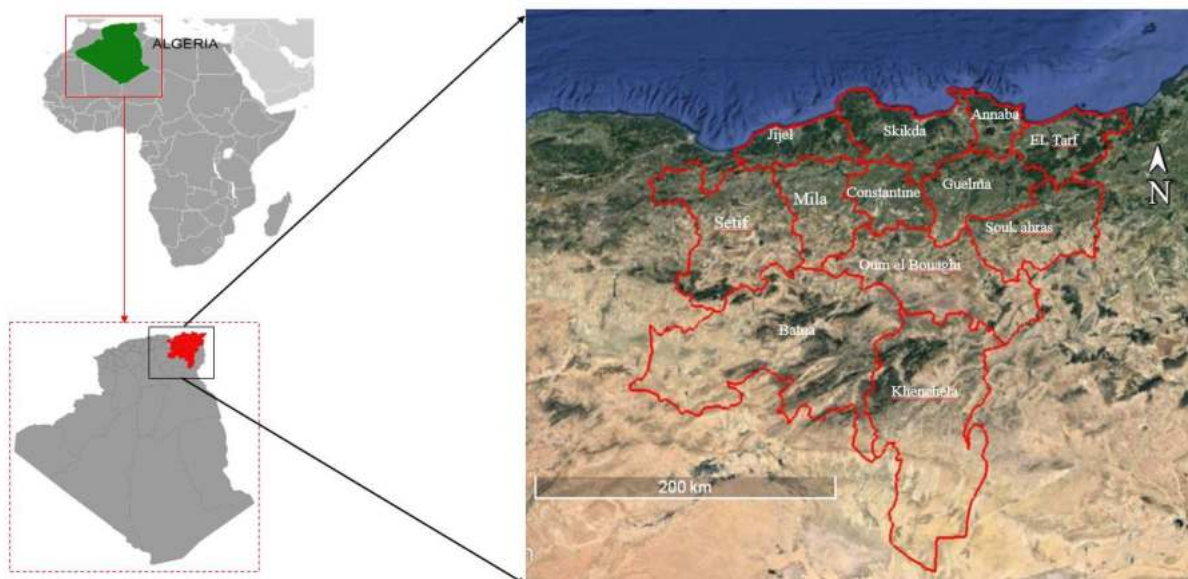


Figure 07. Carte de la localisation géographique de la zone d'étude.

II.1. Reliefs

Le contexte d'étude s'installe sur des pentes comprises entre 0 et 40 % avec une altitude allant de 0 à 2.328 mètres (Fig. 08), le relief du Nord-Est s'organise en une vaste distribution d'éléments parallèles.

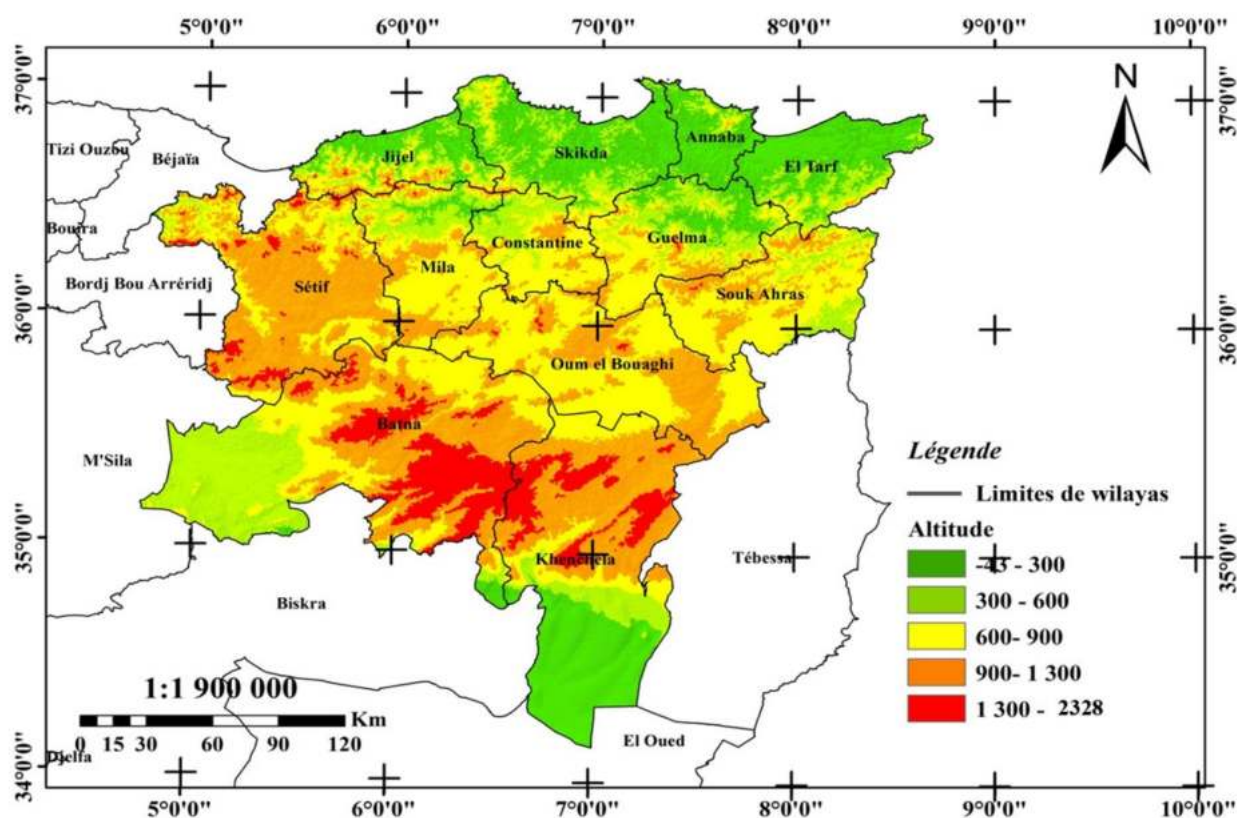


Figure 08. Carte des altitudes de la zone d'étude.

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Le secteur d'étude est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux, et de plaines. On distingue du Nord au Sud et selon l'altitude :

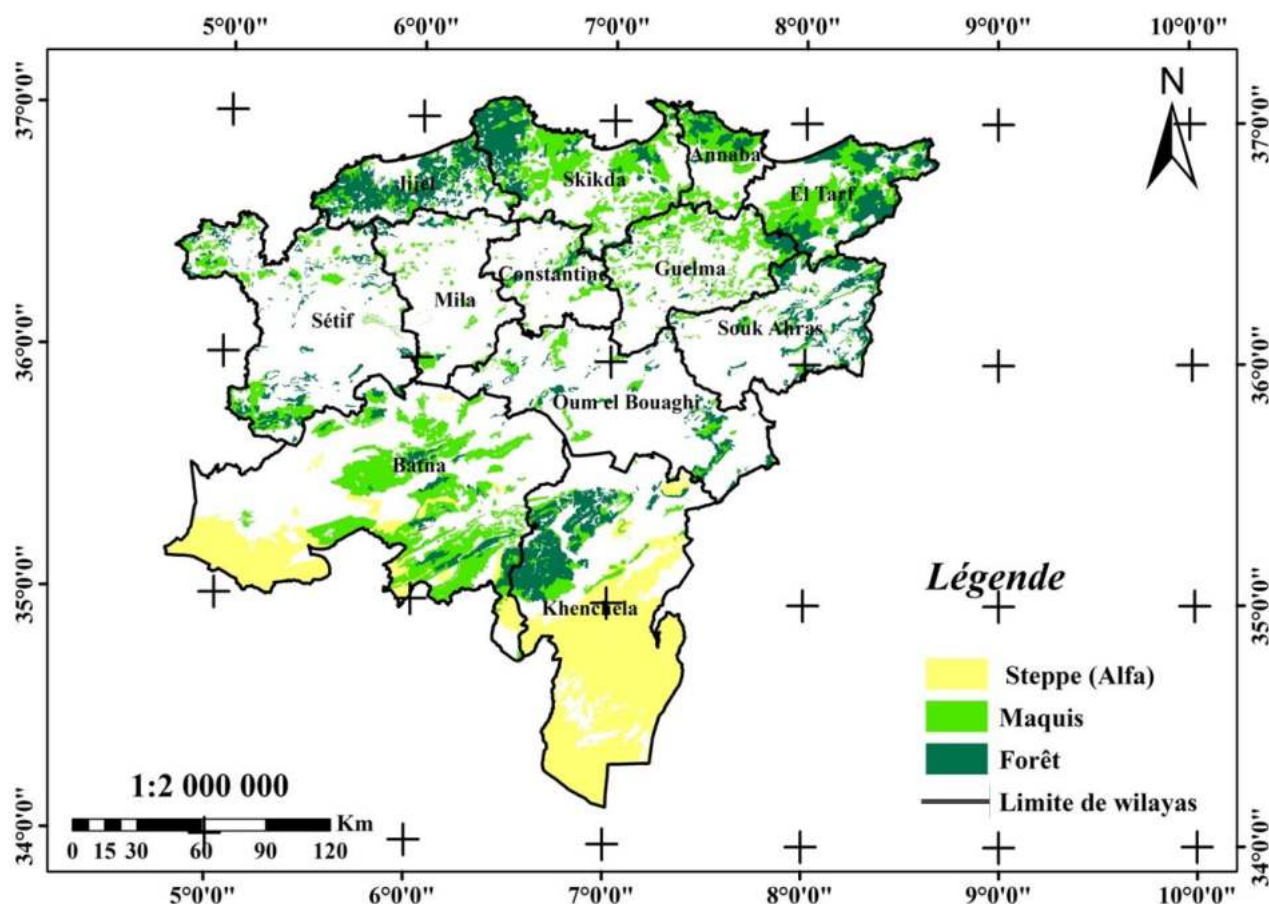
- les plaines littorales qui s'adossent à la première chaîne montagneuse, constituent la frange qui bénéficie directement du climat méditerranéen et de sa régulation thermique ;
- les plaines intérieures sont continentalisées par la première chaîne tellienne ;
- les montagnes : on distingue les chaînes telliennes littorales représentées par les massifs de Collo, Skikda et de l'Edough. Ces massifs bordent la basse plaine d'Annaba où se trouvent les deux plus grandes zones humides d'eau douce : le lac Tonga et le lac Oubeira. Plus au sud, on retrouve les chaînes Telliennes externes constituées par les monts des Babors et les massifs de Petite Kabylie.

Une large plateforme de hautes plaines steppiques est perchée par rapport aux plaines littorales. Cependant, elles sont toujours dominées par l'Atlas Tellien au nord et par l'Atlas Saharien au sud, avec des altitudes plus ou moins importantes entre 800 et 1200 m. Elles sont parsemées de dépressions salées, de chotts et de sebkhas.

Les steppes orientales à l'Est du Hodna, qui sont formées par les Hautes Plainnes du Sud Constantinois où domine le Crétacé de nature calcaire et dolomitique. Ces Hautes Plainnes sont bordées par le Massif des Aurès et des Némémchas.

II.2. Végétation de l'Algérie orientale

La carte d'occupation des sols de notre zone d'étude (Fig. 09) a été obtenue à partir de l'inventaire national généré par la direction générale des forêts en 2010. Il est sous forme de cartes thématiques de classification du couvert végétal pour toutes les différentes unités administratives algériennes. Les forêts et les maquis ne couvrent respectivement que 11% et 15% du total de la zone d'étude, à mesure que l'on s'éloigne de la mer, la surface de la forêt change.



Le secteur d'étude se caractérise par une grande variabilité tant climatique que topographique au relief montagneux engendrent une répartition biogéographique particulière des espèces végétales. La répartition géographique des espèces forestières est conditionnée par leurs exigences édaphique et climatique. Les reliefs, la température et les précipitations régissent la distribution de la végétation dans l'Est algérien. Le chêne liège (*Quercus suber*) est dominant au niveau des régions de l'Est du littoral Algérien, sa dominance s'étend de la région de Jijel jusqu'à la région d'Annaba avec des discontinuités principalement due à la culture maraîchère (Belouahem et al. 2009).

La région des massifs de Collo, de Skikda et de l'Edough borde la basse plaine d'Annaba qui s'ouvre sur la mer méditerranée et où se trouvent les deux plus grandes zones humides d'eau douce, le lac Tonga et le lac Oubeïra. C'est une région humide à subhumide (de 700 à 1000 mm/an) où domine naturellement le chêne-liège, c'est l'espèce dominante de cette région. Elle borde les Hauts Plateaux Algéro-Tunisiens au Sud (Guelma et Souk Ahras), à bioclimat semi-aride à aride (300-700 mm de précipitation/an) où domine *Pinus halepensis* plus ou moins mélangé à chêne zéen, le chêne liège (*Quercus suber*) avec les résineux (*Pinus*

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

maritima), se localisent dans la région de Ouled Attia (Collo, Skikda), les feuillus (*Quercus fagineae*) dans la région de Ouled Hbaba (Skikda), et *Quercus cocciferae* dans la région d'El Kala (Belkaid 2016).

Dans la zone tellienne en particulier le tell maritime, les résineux : pin d'Alep (*Pinus halepensis*), pin maritime (*Pinus maritima*), cèdre (*Cedrus atlantica*) et les feuillus : chêne liège (*Quercus suber*), chêne zeen (*Quercus faginea*), chêne afarès (*Quercus afares*), chêne vert (*Quercus ilex*), constituent les principales essences forestières (Belkaid 2016). Le chêne vert (*Quercus ilex*) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) se rencontre principalement dans la zone semi arides, l'Atlas saharien est considéré comme leur domaine ; ils remontent en l'altitude épousant la configuration de l'Atlas saharien (Belkaid 2016). Les cèdres (*Cedrus atlantica*) sont éparpillés en îlots épars dans le tell central et les Aurès.

Les Hautes Plaines Constantinoises, région à climat continental et Semi-aride ne renferment que quelques lambeaux de broussailles de chêne vert.

II.3. Caractéristiques topographiques

Sur le plan du relief, la région d'étude est composée principalement de cinq grandes unités physiques disposées du Nord au Sud :

II.3.1. Plaines littorales

Elles se présentent sous forme épars le long de la mer méditerranéenne, entrecoupées par quelques monts, leur présence à l'Ouest est plus discrète car peu nombreuses et peu étendus, elles correspondent aux basses vallées des oueds et sont principalement représentées par les plaines de Collo (Oued Guebli), de Skikda (Oued Safsaf) et de Jijel (Oued Djendjen) (Abdelhafid 2014). Par contre, elles ont une présence plus marquée dans la partie Est, où on peut distinguer une large plaine sous forme de croissant qui s'étale sur environ 100 Km autour de Djebel Edough, et qui prend origine depuis la forêt de Guerbes jusqu'à la région de Bouteldja (Belouahem et al. 2009). Leur situation leur confère une exposition favorable aux vents souvent humide du Nord et Nord-ouest.

II.3.2. Atlas tellien

Cette chaîne dédoublée (Tell interne et tell externe) et légèrement parallèle est orientée N-E-S-O. C'est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux s'étendant sous forme de bourrelet de Jijel à l'Ouest jusqu'à la frontière

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Tunisienne à l'Est, les chaînes telliennes littorales sont principalement constituées par les massifs de Collo, Skikda et l'Edough.

Plus au Sud on retrouve les chaînes telliennes externes constituées quant à elle par le massif de petite kabylie (la chaîne des Babors), qui s'étend depuis l'Ouest à la vallée de la Soummam jusqu'à Djendjen et le massif d'El Ouana à l'Est. Les altitudes restent modestes, avec un point culminant à Djebel Babor (2.004 m).

II.3.3. Bassins intérieurs

Sont situés entre les monts de l'Atlas Tellien, ils sont principalement représentés par Guelma et Mila. La région de Mila se caractérise par un relief irrégulier, complexe et profondément parcellisé par un réseau hydrographique dense. Leur altitude moyenne est de 400 m. La région de Guelma située plus à l'Est, est caractérisée quant à elle par un relief généralement montagneux, dont les plus importants sont Djebel Maouana (1.411 m) et Djebel Houara (1.292 m) (Mebarki 2005).

II.3.4. Hautes plaines

Elles se présentent comme une large plateforme compartimentée et s'étendant d'ouest en Est entre les deux alignements, du tell au nord et les monts de Hodna, des Aurès au Sud avec des altitudes plus ou moins importantes entre 800 et 1.200 m, elles sont parsemées de dépressions salées, de chotts et de Sebkhass surtout celle de Ain M'lila, Elles sont topographiquement perchées par rapport aux plaines littorales ou sahariennes (Mebarki 2005).

II.3.5. Atlas Saharien

Il est principalement constitué de massifs volumineux, relativement ouverts, dont les principaux sommets atteignent plus de 2.000 m : Djebel Chelia (2.328 m), Djebel Mahmel (2.321 m) et Bélazma (2.094 m). Ils se caractérisent par des alignements Sud-Ouest - Nord-Est s'étendant sur une soixantaine de Km. Le Sud de la région d'étude comprend la partie nord du chott Melghir (-34 m).

II.4. Caractéristiques géologiques

L'Algérie orientale est constituée de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Il est délimité au sud, par l'Atlas saharien (chaîne alpine) et au centre, par des plates-formes (môle d'Aïn Regada). Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien (Jurassique à Miocène) est une zone complexe constituée de nappes mises en place au

Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs, comme le Hodna (qui est un est un bassin d'avant-fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge Eocène et Oligocène et se poursuit par un Miocène marin) qui s'est installé sur ces nappes (Abdessamed 1981).

Le plateau continental quant à lui est réduit ; les dépôts tertiaires et quaternaires (1.000 à 3.500 m) reposant sur un socle métamorphique. Les Aurès se présentent avec un substrat de grès et de calcaire du crétacé (Abdessamed 1981).

Les bassins du Chott Melhir dans le Sud-Est constantinois, structurés au tertiaire, à remplissage crétacé, ont engendrés et accumulés des hydrocarbures principalement dans le crétacé (Djbel Onk).

II.5. Caractéristiques pédologiques

La répartition des sols au niveau de la région d'étude (Fig. 10) est due essentiellement au climat, la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation et des facteurs biotiques et anthropogènes.

Les sols des régions humides peuvent se définir par leur mode de formation original : entrainement de substances en profondeur sous l'action des eaux d'infiltration. Mais cette migration est conditionnée par la nature de la roche mère, très variable dans le Tell algérien du fait de sa structure plissée d'où une grande variété de sols dont le seul caractère commun est un lessivage plus ou moins poussé (Benchetrit 1956), et qui peuvent être classé en deux grands groupes :

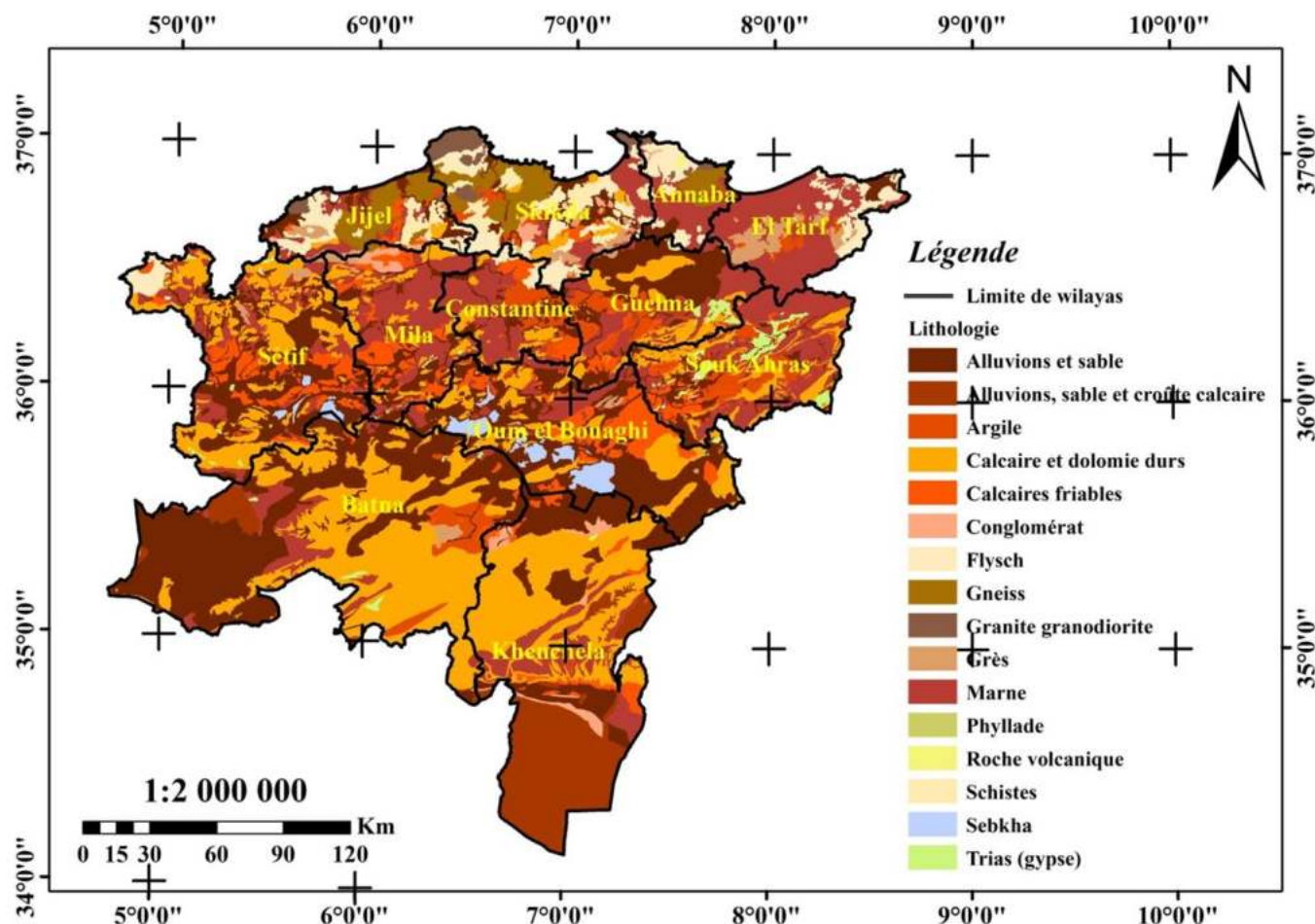
a) Le groupe calcaire comporte tous les sols formés à partir de roches calcaires. Deux types de sols : sols calcaires et sols décalcifiés ;

b) Groupe non-calcaire, qui comporte les sols formés sur roche mère non calcaire. Deux types principaux ; sols insaturés et sols podzoliques (Benchetrit 1956).

Les sols podzoliques se forment dans des conditions d'humidité telles que les sels sont dissous et entraînés en profondeur de même que les colloïdes organiques et minéraux (argile, silice colloïdale) (Benchetrit 1956). D'une façon générale, dans les régions où la pluviosité annuelle est supérieure à 500 mm, les sols podzoliques se forment en Algérie à partir de roches non calcaires produisant des éléments grossiers pauvres en bases ; perméabilité et pluviométrie sont alors suffisantes pour permettre la destruction quasi totale du complexe absorbant (Nedjraoui et Bédrani 2003). Ces sols, très acides, se rencontrent dans les régions Nord de l'Algérie, sur les grès de Numidie, les gneiss et certaines dunes, et supportent normalement de belles forêts d'arbres acidophiles (chênes) avec sous-bois dense de bruyère,

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

de dyss, etc (Benchetrit 1956). Les sols salins (solontchak) profils AC et les sols salins à alcalis (solontchak solonetz) profil A (B) C, ces sols sont généralement profonds et localisés dans les chotts et les sebkhas. Ils sont pauvres en matière organique, leur salinité est chlorurée, sulfatée, sodique et magnésienne (Nedjraoui et Bédrani 2003).



II.6. Climat de la zone d'étude

Le climat est un élément important dans l'étude du milieu, il est à la base de la distribution des végétaux et des animaux. C'est un facteur clé de valorisation des milieux naturels, ce qui nécessite une investigation analytique de ses composantes. L'Algérie présente un climat de type méditerranéen, extra tropical tempéré, caractérisé par une longue période de sécheresse estivale (3 à 4 mois sur le littoral, 5 à 6 mois au niveau des hautes plaines et plus de 6 mois au niveau de l'atlas Saharien), cette caractéristique est due essentiellement à l'influence de trois paramètres conjugués : la mer, le relief et l'altitude.

L'élaboration des cartes climatiques de la zone d'étude est faite en utilisant les données observées par Africlim (Philip et al. 2014) pour la période (1983-2014). Nous avons

extrait les données de 9 stations météorologiques, Jijel, Annaba, EL Tarf, Guelma, Sétif, Batna, Khenchela et Mila. Ces stations sont satisfaisantes, puisqu'elles sont implantées régulièrement sur l'ensemble du territoire d'étude.

II.6.10. Cartes climatiques de la zone d'étude

II.6.10.1. Carte des précipitations

Vue son extension en latitude, le territoire Est algérien présente une variété de zones climatiques, où les pluies sont généralement insuffisantes, irrégulières et inégalement réparties à la fois dans le temps et dans l'espace. Le climat de la zone d'étude est typiquement méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Il se caractérise par un gradient climatique du nord au sud. Précipitations, se produisant principalement entre octobre et mai, avec des précipitations surtout dans la saison froide (hiver), et une sécheresse estivale longue, ils sont variables, plus importante en zones littorales (1.400 mm), la zone tellienne reçoit 400 à 800 mm, les hauts plateaux reçoivent 150 à 400 mm et l'Atlas saharienne reçoivent moins de 150 mm. Les massifs montagneux sont plus arrosés, même au sud, ils reçoivent entre 400 et 800 mm (Fig. 11).

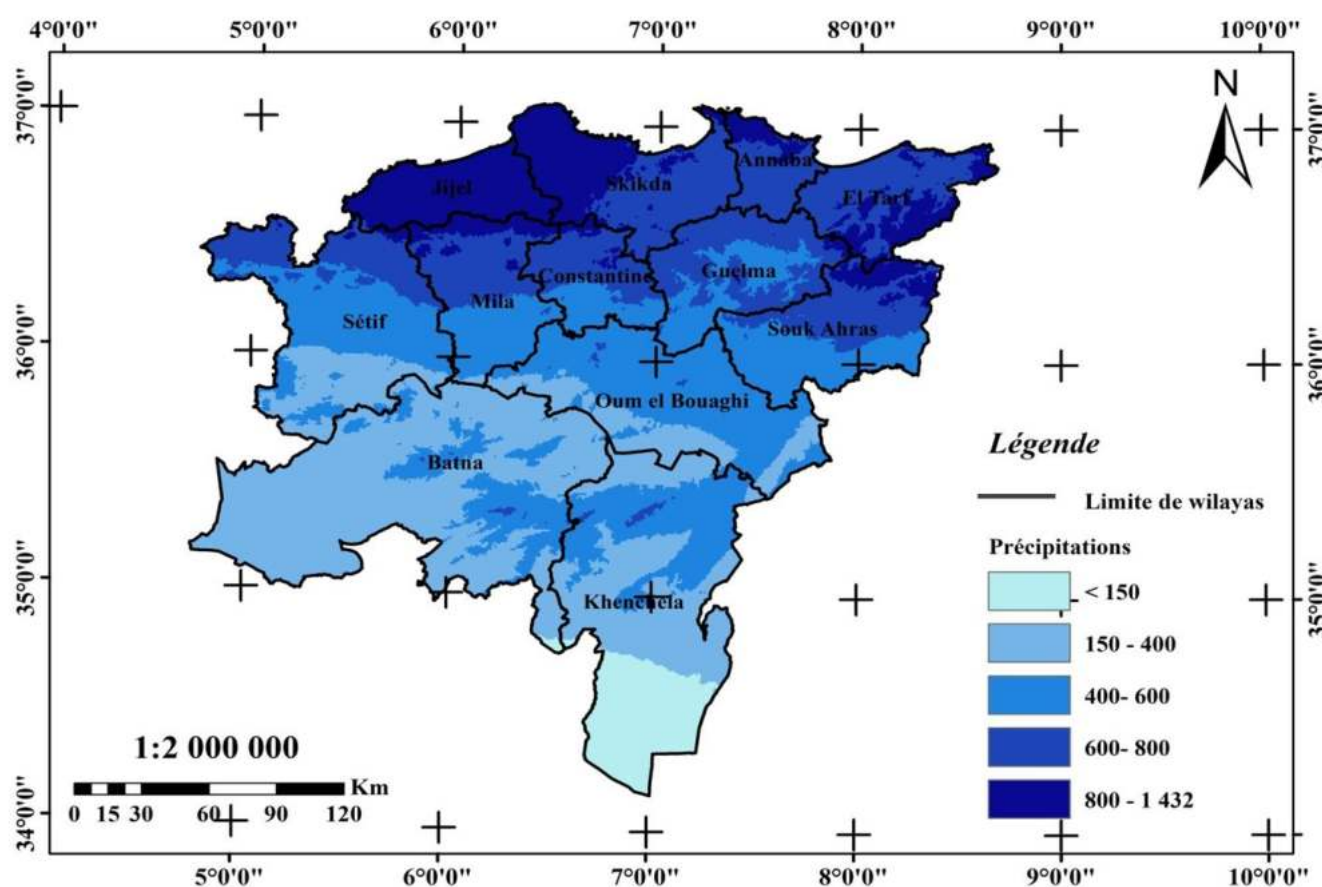
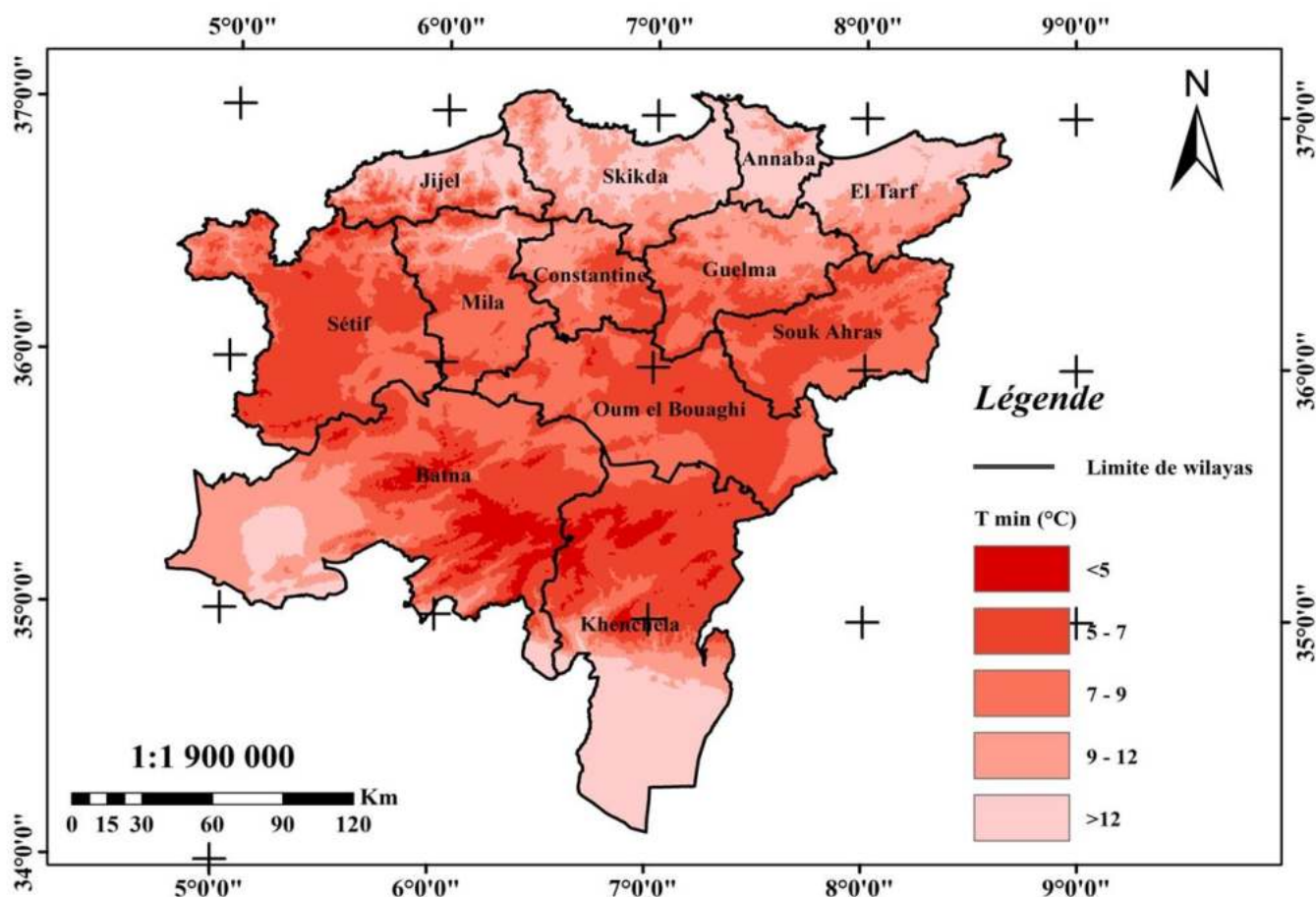


Figure 11. Carte des précipitations annuelles de la zone d'étude.

II.6.10.2. Carte des températures

La zone d'étude présente différents climats du Nord au Sud. Selon les données de l'Africlim 1983-2014 (Philip et al. 2014), les températures de la zone d'étude, sont jugées des sous-ensembles naturels (Littoral, Atlas Tellien, Hauts Plateaux et l'Atlas Saharien).

En hiver, les Hauts plateaux et l'Atlas Saharien sont plus froids que l'Atlas Tellien et le Littoral. Le mois de janvier est le plus froid de l'année, la température moyenne minimale est entre (5 et 7 °C) pour les hauts plateaux, entre (7 -9° C) pour le littoral et l'Atlas Tellien, pour entre (9 -12°C) pour l'Atlas Saharien et (<5°C) pour les massifs montagneux (Fig. 12).



En été, la température avoisine, au mois de Juillet : entre 26 et 30 °C à Littoral et l'Atlas Tellien. Cependant, les températures restent assez voisines. On peut dire qu'en été le climat de l'Atlas Tellien ne se différencie pas fortement de celui des Hauts plateaux. Le mois de juillet est le plus chaud dans l'Atlas Saharien (entre 34 et 40°C) (Fig. 13).

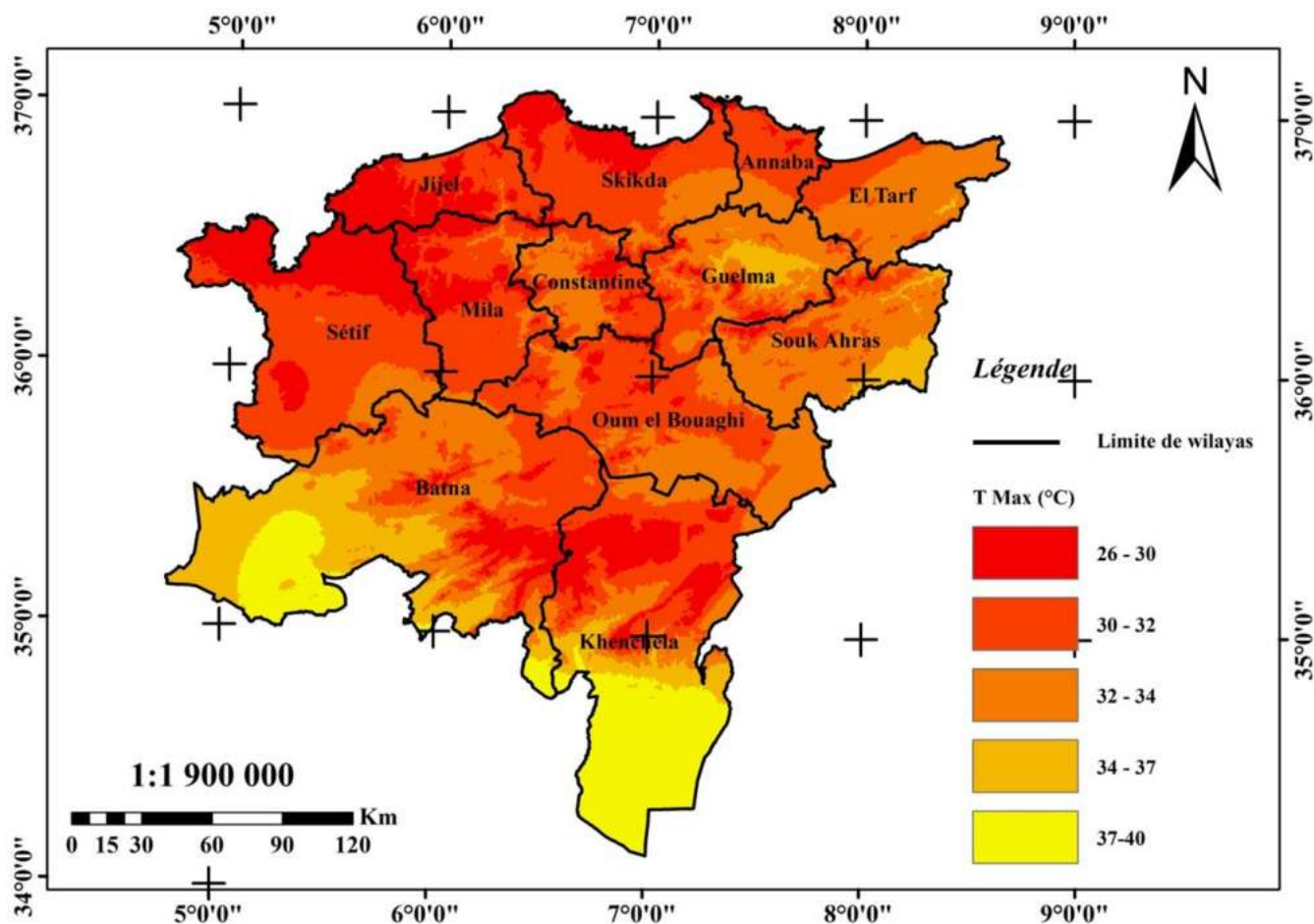


Figure 13. Carte de températures maximales de la zone d'étude.

II.6.11. Zones bioclimatiques de l'Est Algérien

En considérant les critères bioclimatiques, l'Algérie présente tous les bioclimats méditerranéens en allant de l'humide au saharien. Dans le secteur d'étude, on y retrouve les bioclimats méditerranéens depuis l'humide au Nord jusqu'au semi-aride au Sud (Fig.14) :

- Le domaine humide : ce domaine est caractérisé par une pluviométrie supérieure à 900 mm et une forte humidité de l'air, il est caractéristique de la région littorale et il est particulièrement développé dans toute la région de Jijel, le Sud-Est de Skikda et le Nord-Est de Annaba ; une poche est localisée à l'intérieur au niveau de la région de Souk Ahras épousant les monts de la Medjerda.

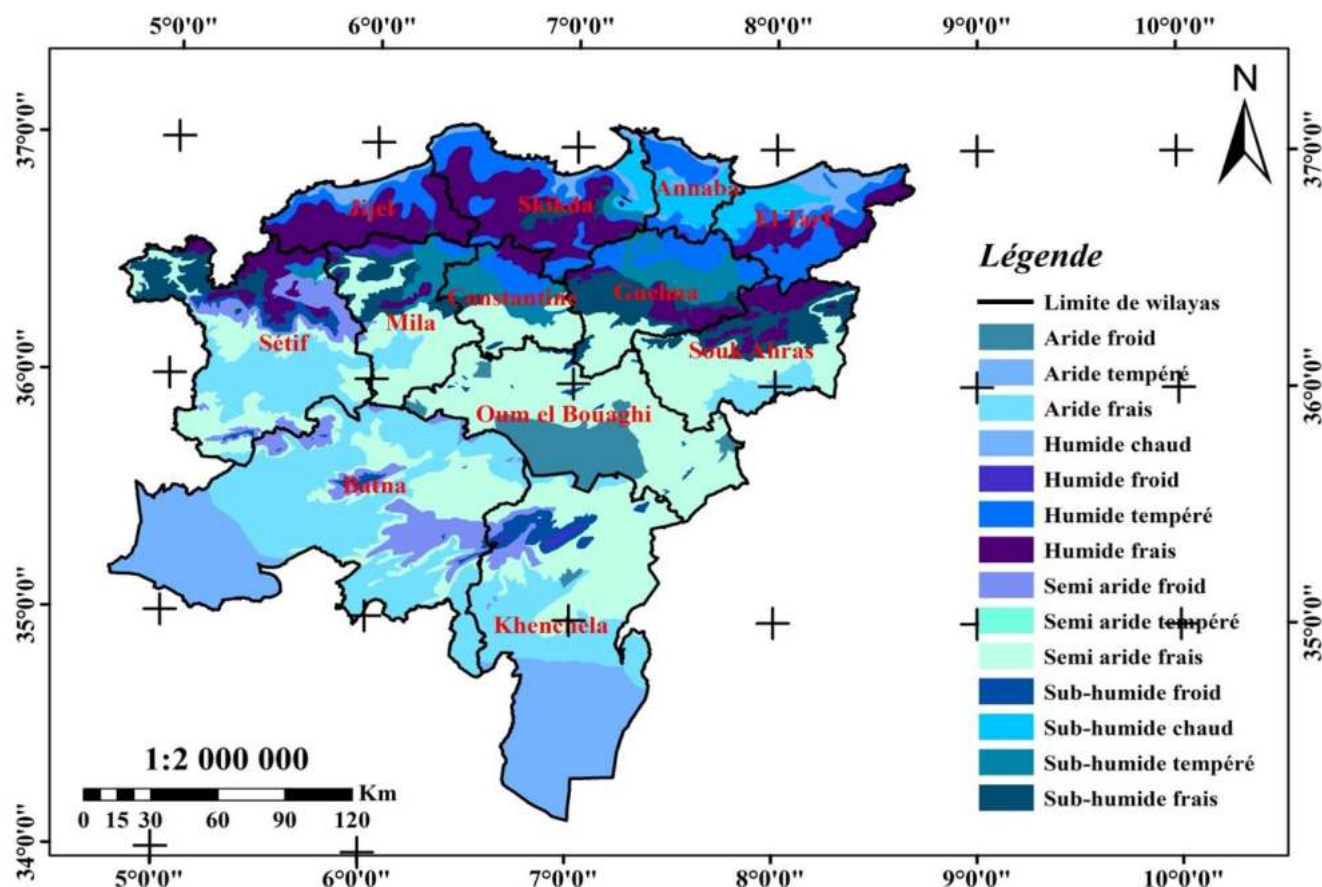
- Le domaine subhumide : il est caractérisé par une pluviométrie supérieure à 600 mm, il est aussi caractéristique de la région littorale où il partage sa dominance avec le domaine humide bien qu'il soit plus développé que ce dernier.

- Le domaine semi-aride : il est caractérisé par une pluviométrie qui fluctue entre 300 mm et 600 mm, il est localisé au niveau des bassins intérieurs du Tell (Mila-Ferdjioua) et est

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

représenté par une poche au niveau de la région de Guelma, il est nettement développé dans les hautes plaines qui le prolongent vers le Sud.

- Le domaine subaride : il est caractérisé par une pluviométrie inférieure à 350 mm, il est représenté par une bande au Sud du piémont de l'Aurès et Nememcha.



III. Présentation de la région des Aurès

En Algérie, les Aurès correspondent à la partie Sud- Est de l'Atlas Saharien, il est connu par ses montagnes et sa forte diversité de paysages : de vastes plaines au nord et au nord-est où prédominent, essentiellement, l'élevage et la céréaliculture ; de belles oasis au sud et au sud-est où prédomine le palmier et la culture maraîchère. Entre les plaines et les oasis se dressent, majestueusement, plusieurs chaînes de montagnes, quasiment dénudées au sud et relativement boisées au nord, dont les points culminants sont : Ras Keltoum (2.328 m) situé au mont du Chélia et El Mahmel (2.321m) (Guedjiba 2012).

La zone d'étude est située géographiquement entre les parallèles 35° 00' et 35° 18' de l'attitude Nord et de 6° 22' et 6° 52' de longitude Est, elle est partagée administrativement entre la Wilaya de Batna et de celle de Khenchela, cette zone est répartie sur 19 communes,

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

regroupant les 9 communes de la Wilaya de Batna et 10 communes dans le territoire de Khenchela, et s'étend sur une superficie de 4003,76 km² (Fig. 15). La zone d'étude est limitée géographiquement :

Au Nord par la Hautes Plaines Semi Arides d'El Madher, Chemora, Timgad et R'Mila
A l'Est par le Dj Djehfa et la plaine des Amamra ;
Au Sud par Massif de Beni Imloul-Khenchela ;
A l'Ouest par la forêt domaniale Aurès qui comprend les communes de Tighanimine Ichemoul, Thniet El abed, Inoughissen, Arris et Foug Toub.

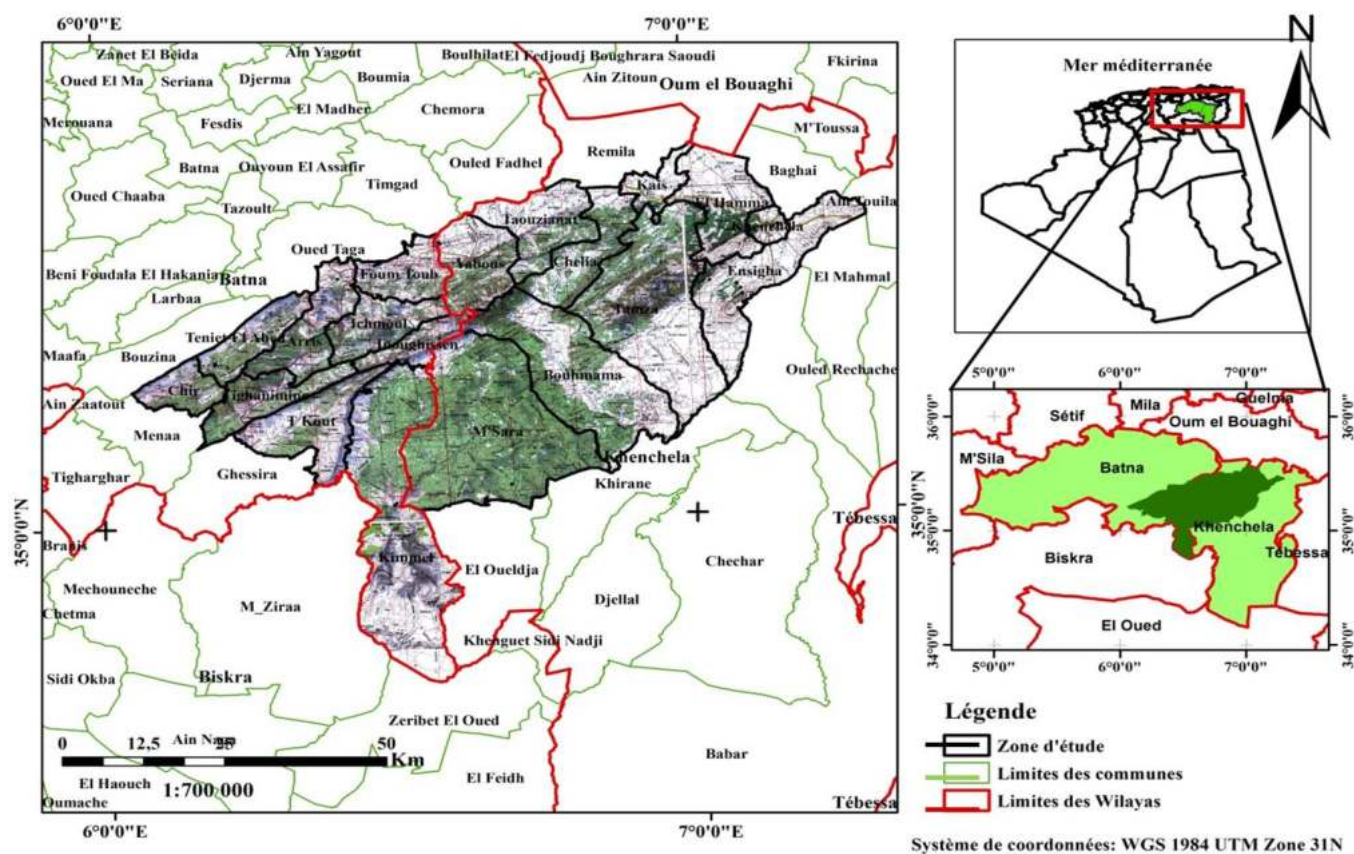


Figure 15. Localisation géographique et limites administratives des Aurès.

La région des Aurès se distingue par trois zones géographiques alliant entre :

- Paysages Telliens : zones de haute montagne bien arrosées et bien boisées, il s'agit d'une partie orientale des Monts des Aurès
- Paysages des Hautes plateaux : localisés dans la partie Nord de la zone d'étude, il s'agit des hautes plaines céréalières semi-arides.
- Paysages Steppiques : ils sont caractérisés par la prédominance de l'activité pastorale, il s'agit des monts totalement dénudés et érodés localisés sur des monts des Némemcha à l'est.

- Paysages Présaharien : localisées dans la région Sud, il s'agit des oasis (Siar, Khirane, EL Ouldja).

III.2. Principales formations forestières de la zone d'étude

III.2.1. Cédraie pure

C'est le domaine du peuplement qui présente l'écosystème le plus remarquable de la zone. Il occupe la plus grande superficie 2.978ha soit 50,61% de la superficie totale. (BNEDER 2010). Il se développe sur les zones de fortes altitudes régnant en maître particulièrement sur le mont de Chelia, où son recouvrement végétal prend l'important lot de la flore d'un taux de 29,80%. Il se cantonne dans la zone sur des grandes étendues prenant sa localisation sur les versants à exposition Nord.

Cette formation forestière conserve sa forme pure sur les sommets liés spécialement à l'étage humide et subhumide. Sur ces hauteurs, le cèdre dans cet état nous le rencontrons à Ouled Yagoub sous forme de grandes taches. Il conserve son allure surtout sur Djebels Aidel. Ce mont constitue avec celui du Chelia la zone du cèdre par excellence.

- Dans le massif du Chelia, la forêt du cèdre est peu représentative. Elle ne peuple que 2.469ha soit (13,65%) de l'ensemble de la superficie forestière.

- Dans le massif d'Ouled Yagoub, Le massif d'Ouled Yagoub prolongeant celui du Chelia s'étend sur le long du tronçon des Aurès orientales, La cédraie occupe la part haute du massif et fait partie du territoire de Douar Tamza de la tribu des Amamaras, il englobe la plus grande partie de la cédraie. Il totalise une superficie de 3.415ha soit environ 19%. Les plus importants des peuplements de ce massif font partie de la série de Chentgouma, elle occupe seule 9%, suivi par les séries de Tamza et Djebel Feraoun respectivement 5,81% et 3,97%.

III.1.3. Cédraie à Chêne vert

Dans ce domaine, le cèdre ne conserve nul par sa forme pure. Il apparaît en tant qu'espèce concurrente avec le chêne vert, bien que cette dernière accroisse seule et fortement à Ouled Yagoub sur une superficie considérable de 591ha soit 10,04% (DGF 2010). Le cèdre et le Chêne vert forment une association, représentée par des taches occupant la zone intermédiaire entre celle des plus hautes altitudes et celle des moyennes altitudes. Elle est prospérée particulièrement sur le mont d'Ouled Yagoub sur les versants

de différentes expositions, couvrant une superficie de 563ha soit 9,56%. Elle constitue par endroit une forêt, dont la densité est claire. La série de Chentgouma reflète nettement l'adaptation de ces deux espèces et est considérée la zone la plus caractéristique.

III.1.4. Cédraie mixte

Avec moins d'importance, ce domaine héberge un cortège floristique observé dans la limite inférieure des cédraies. Il constitue l'ensemble des terres qui évolue sous forme de forêt claire, mêlé de chêne vert, de Genévrier d'oxycedre et de frêne. Il peuple les bas versants en s'étalant sur des étendues d'une superficie globale de 558 ha soit 9,48%. Cette association se rencontre beaucoup plus sur les versants Sud-Ouest de Djebel Chenntgouma.

III.1.5. Pinède

Le massif des Beni-Imloul, avec ses 80.000 hectares couvre plus de 60 % de la réserve forestière des Aurès, le pin d'Alep en est l'espèce dominante (Kherchouche et al. 2011). Le plus important étant la forêt des Beni-Imloul avec une superficie de l'ordre de 50.000 ha où elle forme une belle futaie équienne. Des arbres atteignent des dimensions remarquables de l'ordre de 20 à 25 m. Selon (Abdessemed 1984), cette forêt repose sur des calcaires et des marnes calcaires du Turonien. Au sud du massif le pin d'Alep devient de plus en plus clair pour céder finalement la place au Genévrier rouge (*Juniperus phoenicea*) et là l'alfa (*Stipa tenacissima*).

On retrouve également le pin d'Alep en futaie avec un sous-bois important de Chêne vert dans les forêts des Ouled Yacouh et au Nord du Chélia. Du point de vue altitudinal, le pin d'Alep se cantonne entre 1.200 m et 1.500 m en versant Sud bien qu'il puisse monter jusqu'à 1.700 m (DJ Taourirt 1.734 m, Tafrent 1.705 m etc ...). En versant Nord il s'étale entre 1.000 et 1.300 m en formations pures et se mélange au Chêne vert entre 1.400-1.500 m. Quelques îlots s'infiltrèrent dans la cédraie jusque vers 1700 m (Abdessemed 1984).

Dans les Aurès, le pin d'Alep est très commun. Il forme de beaux peuplements qui occupent de grands massifs, tels celui des Béni-Imloul avec 75 000 hectares et des Ouled-Yakoub de plus de 20 000 hectares, dans cette zone, les potentialités de production de l'espèce sont élevées et sa prédominance nécessite un modèle de culture approprié. (Bentouati et Bariteau 2005). Ce type de formation forestière est assez bien représenté dans la forêt du Chelia. C'est un peuplement de jeunes futaies remarquées aussi en concurrence

dans la composition floristique de cette zone, il est un domaine important après le cèdre puisqu'il est l'unique peuplement qui le succède (Bentouati et Bariteau 2005).

III.1.6. Chêne vert

Le Chêne vert (*Quercus ilex L.*) est une espèce sempervirente de la famille des Fagacées. Le chêne vert est considéré comme l'une des espèces forestières les plus caractéristiques et les plus représentées dans la région méditerranéenne (Penuelas 2007). On retrouve le chêne vert dans tous les massifs particulièrement, à l'Ouled Fedhala, Ouled Yacoub, Chélia, sur des substrats assez variés, sur sols bruns ou bruns calcaires et surtout sur des rendzines plus ou moins dégradées. Partout les formations à chêne vert sont dégradées par le feu, la coupe et le parcours (Abdessemed 1984).

Du point de vue altitudinal, il s'étale de 1000 m à près de 2200 m où on le retrouve cependant à l'état buissonnant. Ce n'est que vers 1500 -1700m qu'il forme de belles futaies, aux basses altitudes, le chêne vert se mélange au genévrier rouge et au pin d'Alep et en altitude avec le cèdre. (Abdessemed 1984).

III.1.7. Genévriers

On retrouve les genévriers suivants : le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), le Genévrier rouge (*Juniperus phoenicea*) le thurifère (*J. thurifera*) et pour mémoire le genévrier commun (*J. communis*) (Goubi 2011). L'oxycèdre ne forme pas de peuplements purs ; on le trouve lié particulièrement au chêne vert, mais également dans les peuplements du pin d'Alep et de cèdre.

III.1.8. Genévrier rouge

Forme soit des peuplements purs, soit se mélange avec le Pin d'Alep. On retrouve le Genévrier rouge en peuplements purs mais souvent assez dégradés avec un sous-bois d'alfa au sud du massif de Beni Imloul entre 800 et 1.100 m d'altitude où il occuperait des surfaces importantes.

III.1.9. Genévrier thurifère

Se localise dans l'Aurès où il constitue la seule station algérienne. Il se retrouve au Dj Mahmel et au Dj Zeflatou où il forme un peuplement très clair sur calcaire entre 2.000 et 2.200 m, on aussi retrouve quelques pieds au Chélia où il se mélange avec le chêne vert et le frêne épineux entre 1.500 et 1.600 m (Beghami 2013).

III.1.10. Genévrier commun

C'est également dans l'Aurès qu'il forme les plus grands peuplements du pays entre 1.900 et 2.150 m au Chélia et Djebel Feraoun sur grès. Le genévrier commun est considéré comme indicateur d'une pluviométrie supérieure à 800 mm (Quézel 1957).

III.1.11. Parcours

Cette unité est largement répandue dans la région Sud. Après les forêts et maquis, elle demeure la plus importante, Il présente en générale sous forme de végétation très dégradée, où englobe toutes les superficies à couvert herbacé, parfois même ligneux bas, les maquis très clairs, bas et très dégradés, présenta des signes de surpâturage très nets ont été également considérés comme terrain de parcours étant donné leur utilisation actuelle. (Benmessaoud 2010).

Du point de vue phytoécologique, Le paysage steppique est dominé par les formations végétales à base de :

- ❖ Steppe à alfa (*Stipa tenacissima*) ;
- ❖ Steppe à armoise (*Artemisia Herba Alba*) ;
- ❖ Steppe à sparte (*Lygeum spartum*) ;
- ❖ Steppe à Halophytes.

Les principales formations forestières de la zone d'étude avec les essences principales par chaque commune sont récénces dans le tableau 03 ci-dessous et la figure 16 présente l'occupation de sol de la zone d'étude.

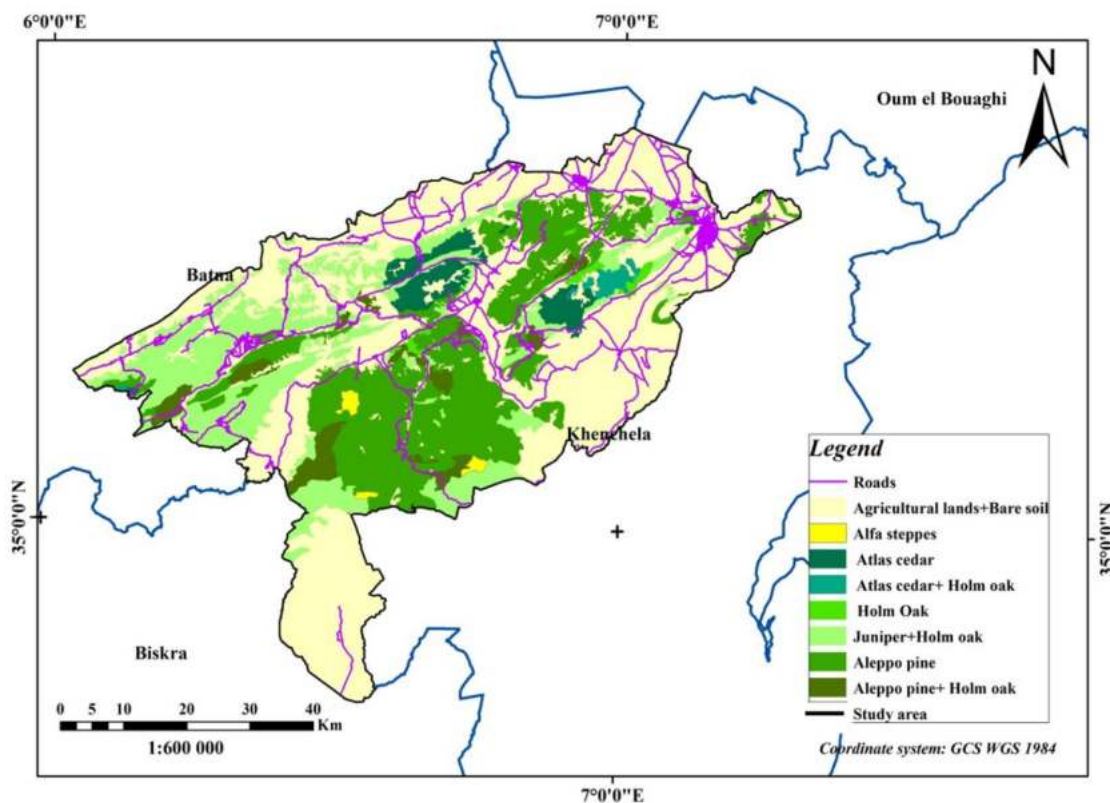


Figure 16. Carte d'occupation de la zone d'étude (Source DGF 2010 modifiée).

Tableau 03. Répartition de la superficie forestière par commune.

Commune	Superficies forestières en (ha)	Essences principales
Khenchela	780	Pin d'Alep + Chêne vert
El-Hamma	3.488	Pin d'Alep + Chêne vert
Ensigna	1.176	Pin d'Alep
Tamza	22.101	Pin d'Alep+ Chêne vert+Cèdre
Kais	792	Pin d'Alep
Taouzient	4.460	Pin d'Alep+ Chêne vert
Bouhmama	26.194	Pin d'Alep+ Chêne vert
Yabous	7.349	Pin d'Alep+ Chêne vert+Cèdre
Chélia	7.305	Pin d'Alep+Chêne vert +Cèdre
M'Sara	44.230	Pin d'Alep+ Chêne vert
T'Kout	4.699,07	Chêne vert
Kimmel	12.196	Pin d'Alep+ Chêne vert
Ichmoul	3.930,126	Pin d'Alep+ Chêne vert
Foum el Toub	1.913,2	Pin d'Alep+ Chêne vert
Inoughissene	712,5	Pin d'Alep+ Chêne vert
Teniet El Abed	4.473,8	Pin d'Alep+ Chêne vert
Tighanimine	10.141,78	Pin d'Alep+ Chêne vert
Arris	4.829,006	Pin d'Alep+ Chêne vert
Chir	/	Pin d'Alep+ Chêne vert+ Cèdre

III.2. Cadre climatique et bioclimatique

L'objectif de cette partie est essentiellement d'établir une étude climatique, et bioclimatique de la région des Aurès sur la base d'une compilation bibliographique qui s'étend de 1969 à 2017 dans les stations de références.

III.2.1. Choix de la station de référence

La caractérisation climatique a été réalisée sur la base de l'analyse des données issues de plusieurs stations météorologiques limitrophes qui sont représentées dans le tableau suivant (04). Ces stations sont satisfaisantes, puisqu'elles sont implantées régulièrement sur l'ensemble de la région des Aurès ; cinq se trouvent à l'intérieur de la zone d'étude et une se trouve à l'extérieur de la zone d'étude.

Tableau 04. Caractéristiques des stations climatiques.

Station	Altitude(m)	Longitude	Latitude	Période d'observation
Ain Skhouna	827	6° 21' 95"	35°44'20"	(ONM) 1989-2017
Bouhmama	1.150	6° 44'	35°29'	(ONM) 1969 - 2014
El Hamma	982,5	7° 50'	35°28'	(ONM) 1994-2017
Kais	945	35° 48'	6° 93'	(ANRH) 1984/2004
Medina (Ichemoul)	1.451	35°32'	6° 52'	(ANRH) 1990/2009
Kantina	1.260	35° 19'	6° 75'	(ANRH) 1992/2006

III.3.2. Répartition moyennes mensuelles et annuelle des précipitations

Dans la zone des Aurès la répartition des précipitations annuelles adopte parfaitement les variations des modelés orographiques, l'augmentation de la moyenne des précipitations est observée avec chaque élévation de l'altitude comme le cas des chaînes montagneuses, les sommets des monts, versant Nord de massif des Aurès où les reliefs impliquent une extrême diversité des aspects climatiques. (Bouzakri 2015). Les moyennes pluviométriques annuelles et mensuelles varient d'une station à une autre.

Le tableau ci –après (05) montre la répartition de la pluviométrie durant les mois enregistrés dans les stations de référence à des périodes différentes.

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Tableau 05. Répartition moyenne mensuelle et annuelle des précipitations. (Unité : mm).

Station	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
Ain Skhouna	31,76	23,74	31,01	36,34	41,71	18,09	6,69	20,79	33,7	24,24	24,42	28,64	321,15
Bouhmama	34,5	40,4	33,1	58,3	52,3	32,5	21,1	21,1	56,3	42,1	40,6	43,5	475,69
El Hamma	46,87	32,27	44,69	45,3	57,29	31,33	16,12	38	59,14	37,56	37,87	38,48	484,92
Kais	35,4	50,1	29,3	31,5	17,1	11,8	41,7	44,4	39,2	63,6	45,4	51,5	461
Medina (Ichemol)	36,9	30,9	41,4	42	44,8	26,9	13,4	30,45	51,6	38,2	41	44	441,58
Kantina (Chélia)	44,8	44,9	41,1	57,7	52,5	38,6	32,5	33	48,8	50,8	42,1	47,8	535

Pour les six stations de référence, les précipitations sont irrégulières durant les mois de l'année. Elles varient d'une station à l'autre selon les données disponibles. D'autre part les moyennes pluviométriques annuelles varient de 321,15 mm/an (Ain Skhouna) à 535 mm/an (Kantina).

La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée au niveau de la station de Kantina, est la plus importante que celle des autres stations, ceci est dû à sa position au niveau du massif des Aurès, par rapport aux autres stations et son altitude qui arrive à 1260 m. Pour la station de Bouhmama, la valeur annuelle enregistrée est de l'ordre de 475,69mm/an, 484,92 mm/an pour la station d'EL Hamma, 461 mm/an pour la station de Kais et 441.58mm/an pour la station de Medina.

La répartition des pluies mensuelles au niveau de la station d'Ain Skhouna passe de 41,71 mm au mois de Mai à 6,69 mm pour le mois de Juillet et Août.

Pour la station de Bouhmama, la pluviosité mensuelle chute de 58,3 en Avril, comme le mois le plus pluvieux ou le maximum des précipitations et à 21,1 mm pour les deux mois Juin et Août comme le minimum des précipitations.

Le mois le plus pluvieux est Septembre avec une moyenne de 59,14mm Pour la station d'EL Hamma. Une augmentation irrégulière des pluies est observée, à partir de mois d'Octobre jusqu'au mois de mai. On assiste, ensuite à une décroissance lente Jusqu'au mois de juillet 16,12 mm, qui est le mois le plus sec.

Pour la station de Kais, le mois d'Octobre est le mois le plus pluvieux avec une moyenne de 63,6 mm, et le mois de Juin est le mois le plus sec avec une moyenne de 11,80 mm.

La station de Medina, la moyenne maximale dépasse 51 mm, elle s'observe au mois de Septembre, par contre la moyenne minimum caractérise le mois de Juillet de 13,4 mm.

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

La station de Bouhmama est la plus pluvieuse, ceci est dû à sa position au niveau du massif des Aurès, par rapport aux autres stations et son altitude qui arrive à 1.260 m, la répartition des pluies mensuelles au niveau de cette station passe de 57 mm au mois de d'Avril à 33 mm pour le mois d'Août.

D'après l'analyse des moyennes mensuelles, on observe que les mois les plus pluvieux diffèrent d'une station à l'autre, mais en générale ils se situent en automne (Septembre, Octobre), ou au printemps pendant les deux mois d'Avril et Mai, et les mois les plus secs sont les mois d'août et Juillet pendant la saison d'été.

III.3.3. Régime pluviométrique saisonnier

Les précipitations saisonnières pour les différentes stations sont reportées dans le tableau 06.

Tableau 06. Régime pluviométrique saisonnier des Stations étudiées.

Stations	Saisons								Type
	Automne		Hiver		Printemps		Eté		
	P (mm)	%	P (mm)	%	P (mm)	%	P (mm)	%	
Ain Skhouna	82,37	26	84,15	26	109,06	34	45,57	14	PHAE
Bouhmama	138,99	29	118,4	25	143,6	30	74,7	16	PAHE
El Hamma	134,57	28	117,62	24	147,28	30	85,45	18	PAHE
Kais	148,2	32	137	30	97,9	17	77,9	21	AHPE
Medina	130,86	30	111,76	25	128,15	29	70,77	16	APHE
Kantina	141,61	26	137,46	26	151,2	28	104,11	20	PAHE

L'analyse du tableau n°06, montre que la saison la plus arrosée est le printemps suivi de l'automne pour les trois (03) stations (Bouhmama, EL Hamma et Kantina), qui sont caractérisées par un régime de précipitation de type PAHE. Dans ce type de régime le maximum de pluviosité est enregistré surtout au printemps ce qui est très profitable pour la végétation du moment qu'il coïncide avec la reprise végétative.

Pour la station (Kais), la répartition saisonnière est marquée par la prédominance des pluies d'automne et d'hiver, donc la saison la plus arrosée est l'automne suivi de l'hiver. Pour la station de Medina, la saison la plus arrosée est l'automne puis le printemps, c'est-à-dire les pluies, les plus importantes, tombent en automne suivies par celles de printemps. Pour la station d'Ain Skhouna, qui se situe à 827 m d'altitude, la saison la plus

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

arrosée est le printemps puis l'hiver. La saison du printemps est la plus pluvieuse dans les stations Ain Skhouna, Bouhmama, El Hamma, et Kantina avec des pourcentages de 34%, 30%, 30% et 28% respectivement. En revanche l'automne est la saison la plus pluvieuse dans les deux stations Kais et Medina. Les pourcentages enregistrés dans ces stations sont : 17% et 29%. Les saisons d'hiver et d'automne restent aussi particulièrement humides. La saison d'été est la moins pluvieuse avec des pourcentages allant de 14% à la station d'Ain Skhouna jusqu'à 21% à la station de Kais

III.3.4. Températures

Les données du tableau 07 illustre les moyennes mensuelles de température dans quelques stations de l'Aurès.

Tableau 07. Températures moyennes mensuelles pour les stations étudiées.

Station	T°C	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Ain skhouna	Moy	6,02	6,98	10,3	13,6	18,79	24,07	27,7	27,03	22,37	17,6	11,21	6,95
	Max	12,1	13,4	16,78	20,3	26,01	31,71	35,7	34,96	29,35	24,2	17,28	12,91
	min	0,1	0,49	2,86	5,74	9,75	14,29	17,1	17,13	14,38	10,1	4,77	1,3
	A	12	12,9	13,92	14,6	16,26	17,42	18,6	17,83	14,97	14,1	12,51	11,61
Bouhmama	Moy	5,2	4,95	7,59	11,3	16,82	20,73	23,7	25,02	20,59	14,5	8,98	5,76
	Max	9,41	9,49	13,74	17,9	24,11	28,57	32,1	32,87	27,9	20,5	14,43	10,11
	min	0,99	0,4	1,43	5,02	9,53	12,88	15,3	17,17	13,28	8,42	3,53	1,41
	A	8,42	9,09	12,31	12,9	14,58	15,69	16,9	15,7	14,62	12,1	10,9	8,7
El Hamma	Moy	6,74	7,01	10,55	13,75	18,43	23,21	26,77	26,05	21,26	15,85	10,98	7,55
	Max	11,16	11,78	16,05	19,79	25,12	30,66	34,75	33,68	27,50	21,63	15,81	12,13
	min	2,31	2,25	5,06	7,72	11,74	15,77	18,79	18,42	15,03	10,06	6,15	2,98
	A	8,85	9,53	11,00	12,06	13,38	14,90	15,95	15,27	12,47	11,56	9,66	9,15
Kais	Moy	9,86	11,3	15,1	21	24,75	25,85	22,3	17,55	11,42	9,05	5,84	5,46
	Max	14,4	16,1	21	27	31,1	33	29,5	24,3	17,2	14,9	9,4	9,79
	min	5,31	6,5	9,21	14,9	18,4	18,7	15,1	10,8	5,63	3,2	2,28	1,13
	A	9,09	9,6	11,79	12,1	12,7	14,3	14,4	13,5	11,57	11,7	7,12	8,66
Medina	Moy	3,29	4,89	8,49	11,2	17	21,9	24	25,8	20,1	13,9	6,99	2,99
	Max	8,12	9,85	13,75	16,7	22,96	28,26	30,1	32,48	26,31	19,6	12,12	7,79
	min	-1,5	-0,1	3,23	5,72	11,04	15,54	17,6	19,12	13,89	8,2	1,86	-1,81
	A	9,66	9,95	10,52	11	11,92	12,72	12,5	13,36	12,42	11,4	10,26	9,6

Max : Température moyenne maximale mensuelle

min : Température moyenne minimale mensuelle

Moy : Température moyenne mensuelle (Moy= Max +min /2)

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

A : Amplitude thermique ($A = \text{Max} - \text{min}$)

Pour la station d'Ain Skhouana, la température moyenne au cours de l'année varie de 16.5 °C. La valeur de la température moyenne la plus basse est enregistrée au mois de Janvier avec 6.02 °c qui est comprise entre ($T_{\text{min}} = 0.1$ °c et $T_{\text{Max}} = 12.13$ °c) soit une amplitude thermique de 12.03 °c. Juillet est le mois le plus chaud de l'année. La température maximale est de 35.69 °C à cette période.

Pour la station de Bouhmama, à l'examen de tableau (20) on remarque que :

- Le mois le plus chaud est le mois de d'Aout avec une moyenne de 25,02°C.
- Le mois le plus froide est le mois de Janvier avec une moyenne de 5,2° C.
- La température moyenne annuelle est de 13° C.

On remarque aussi un écart important entre les températures de l'air entre une saison et une autre où la température moyenne de l'été est de l'été 23,15° C et celle de l'hiver 5,3 °C. Il y aussi une large variation entre les moyennes maximale et minimale des températures dont l'écart est de 20,07 °C.

Pour la station d'EL Hamma, le mois de janvier constitué le mois le plus chaud avec une moyenne de 6,74 °C. Le mois de juillet constitué le mois le plus froid avec une moyenne de 26,77 °C.

La station de Kais, la température moyenne annuelle de la région est de l'ordre de 14.9 °C. La moyenne de minima du mois le plus froid (décembre) est de 1.13°C, celle des maximas du mois le plus chaud (juin) est de 33 °C.

Au niveau de la station de Medina le mois de Janvier est le mois le plus froid (-1.54° C), bien que le mois d'aout soit le mois le plus chaud (32.48°C).

III.3.5. Synthèse bioclimatique

La végétation est la réponse biologique à l'ensemble des facteurs climatiques. Parmi ceux-ci seules les données des températures et des précipitations sont relativement disponibles. En général, les auteurs se basent sur ces deux facteurs pour établir les synthèses bioclimatiques.

III.3.5.1. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN (1953)

Selon le diagramme ombro-thermique de station d'Ain Skhouna (Fig .17), la période de sécheresse débute de juin et se prolonge jusqu' à la mi-septembre et la période humide allant de la mi-septembre jusqu' à juin et les précipitations qui caractérisent cette période sont en mois de Mai de l'ordre 41,71mm.

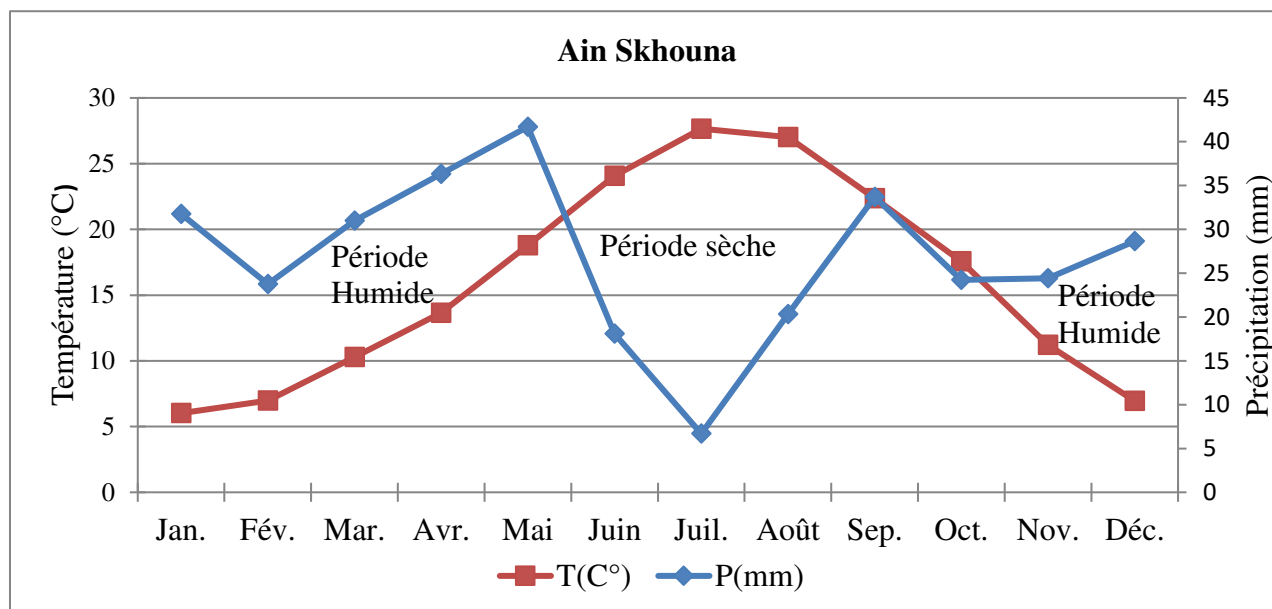


Figure 17. Diagramme Ombrothermique de station d'Ain Skhouna.

L'analyse du diagramme Ombro-thermique la station de Bouhmama (Fig .18) nous permet de distinguer deux saisons d'inégales durées :

- L'une humide plus longue, d'une période de neuf mois et qui commence de mi-aout et se prolonge jusqu' à le mi- mai, elle est caractérisée par une précipitation de l'ordre de 58,25 mm pendant le mois d'avril.
- Une période de sécheresse de trois mois, allant du mi- mai jusqu' à mi-aout, elle coïncide avec la période la plus chaude de l'été.

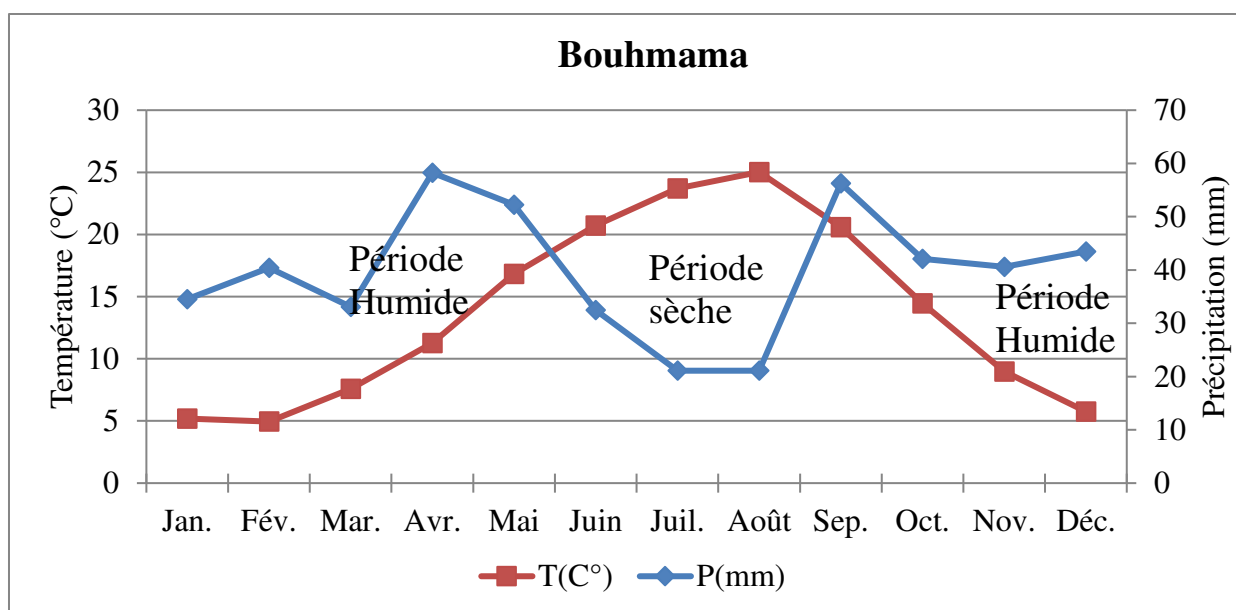


Figure 18. Diagramme Ombrothermique de station de Bouhmama.

Pour la station d'El Hamma (Fig .19), la période humide allant du septembre jusqu' à juin et les précipitations qui caractérisent cette période sont en mois de septembre de l'ordre 59,14mm. La période sèche débute du juin jusqu' à septembre.

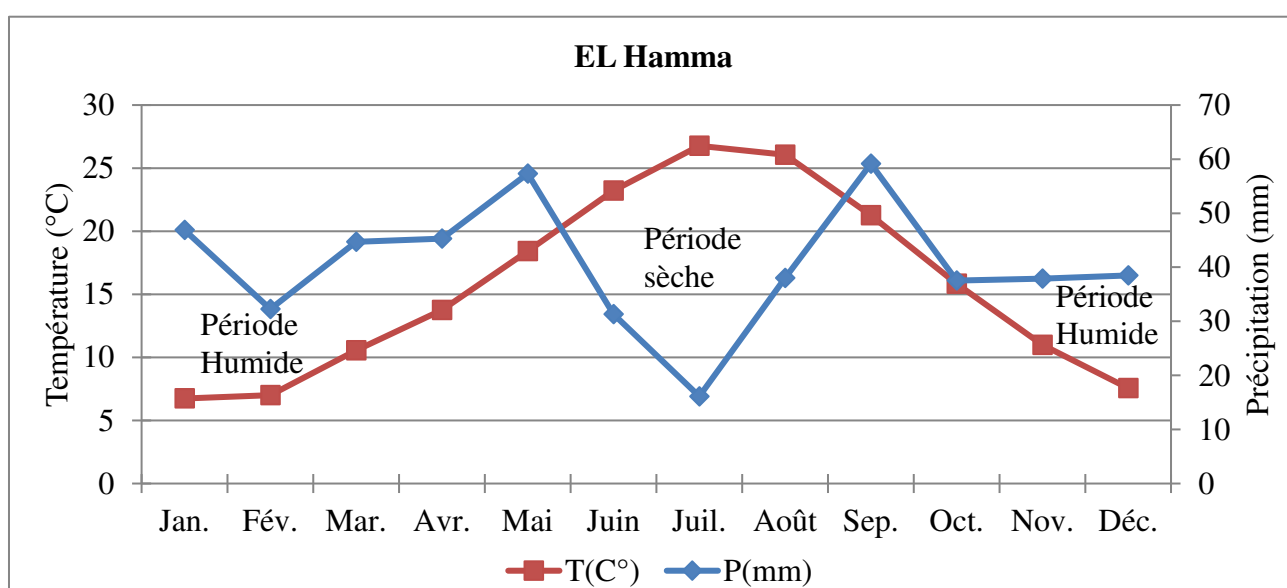


Figure 19. Diagramme Ombrothermique de station d'EL Hamma.

Le diagramme ombrothermique de la station de Kais (Fig.20) montre que la période sèche débute de mi-mars jusqu' à mi-août (plus de 3 mois) et la période humide couvre mi-août jusqu'à mi-mars.

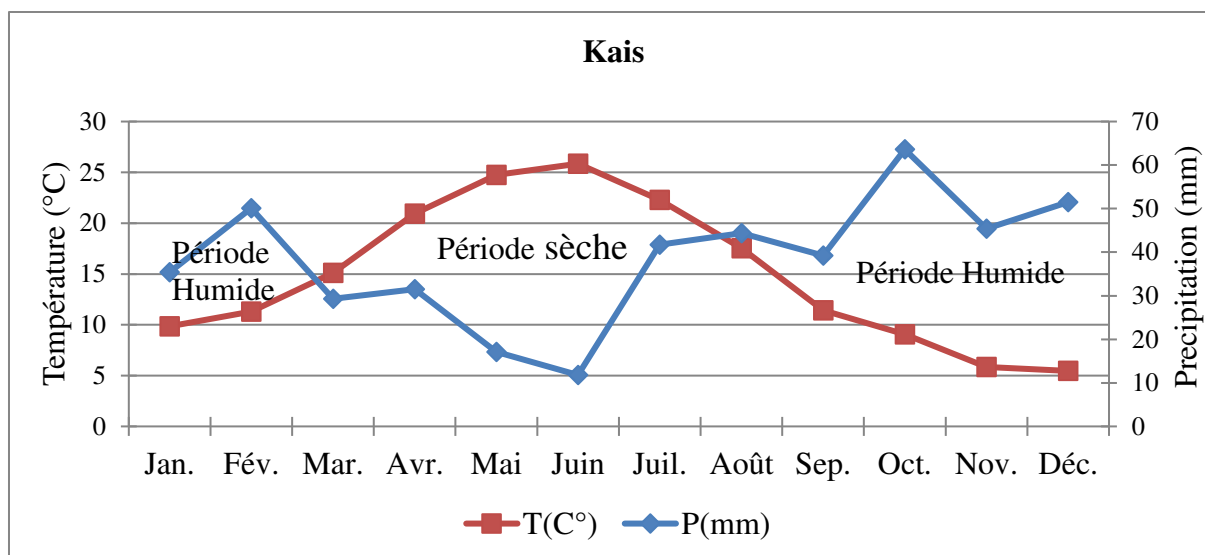


Figure 20. Diagramme Ombrothermique de station de Kais.

Le diagramme ombro-thermique de la station de Medina (Fig. 21) fait apparaître une période de sécheresse climatique qui s'étale de mois de juin jusqu'à la deuxième décennie de mois de septembre. Cette période, confinée certes aux mois d'été.

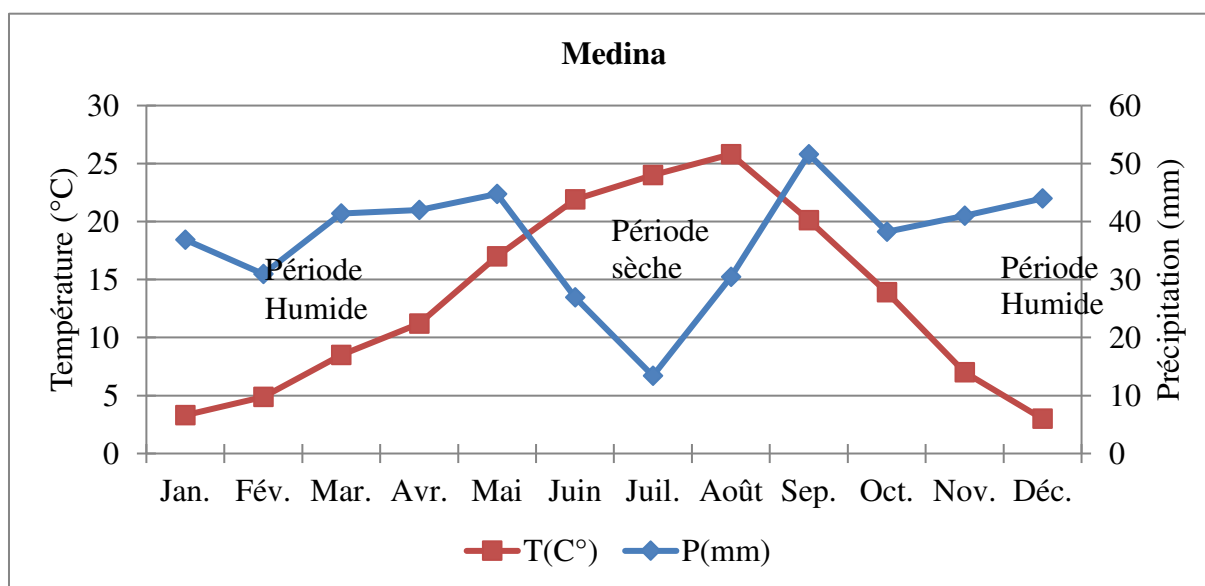


Figure 21. Diagramme Ombrothermique de station de Medina.

III.3.5.2. Système de DEBRACH (1953)

Pour définir un climat, l'auteur s'est basé sur les températures extrêmes. D'après leur amplitude (M-m) et leur moyenne (M+m)/2, il a proposé une classification thermique des climats, en fonction de l'amplitude (M-m) on peut distinguer quatre types de climats :

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

- Climat insulaire : $M-m < 15^{\circ}\text{C}$
- Climat littoral : $15^{\circ}\text{C} < M-m < 25^{\circ}\text{C}$
- Climat semi-continental : $25^{\circ}\text{C} < M-m < 35^{\circ}\text{C}$
- Climat continental : $M-m > 35^{\circ}\text{C}$

En fonction de leur moyenne $(M+m)/2$, on peut distinguer quatre types de climats :

- Climat très froid : $M+m / 2 < 10^{\circ}\text{C}$
- Climat froid : $10 < M+m / 2 < 15^{\circ}\text{C}$
- Climat modéré : $15 < M+m / 2 < 20^{\circ}\text{C}$
- Climat chaud : $20 < M+m / 2 < 25^{\circ}\text{C}$

Nous avons calculé cette amplitude $(M-m)$ et leur moyenne $(M+M/2)$ en faisant la différence entre la moyenne des maxima du mois le plus chaud et la moyenne des minima du mois le plus froid. Les résultats sont reportés dans le tableau 08.

Tableau 08. Amplitudes thermiques maximales et leur moyenne.

Station	m	M	M-m	$(M+m) / 2$
Ain Skhouna	0,1	34,96	34,86	17,5
Bouhmama	0,4	32,87	32,47	16,6
EL Hamma	2,25	33,68	31,43	18,0
Kais	1,13	33	31,87	17,1
Medina	-1,81	32,48	34,29	15,3

Après avoir examiné les données du tableau I. 1, nous remarquons que les cinq stations de références ont un climat semi-continental et modéré. Selon (Papadopoulos et al, 2003) l'amplitude thermique, permet de définir le degré de continentalité d'une région, et plus $(M - m)$ est élevé plus la continentalité est forte.

III.3.5.3. Indice d'aridité de De Martonne (1926)

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par le quotient :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Où : I : indice d'aridité annuelle.

P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm.

T : les températures moyennes annuelles en 0C.

10 : constante : utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé six grands types de macro climats allant des zones désertiques arides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 30$) (Tableau 09).

Tableau 09. Classification du climat selon l'indice de De Martonne.

Valeur d'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi humide
$30 < I < 50$	Humide

L'application de la formule de l'indice de De Martonne sur les données climatique disponible pour les six stations, donne les résultats récapitulés dans le tableau (10) suivant :

Tableau 10. Valeurs de l'indice d'aridité annuel de De Martonne pour les stations étudiées.

Station	P (mm)	T (°C)	I	Type de climat
Ain Skhouna	320,7	16,05	12,31	Semi-aride
Bouhmama	475,69	13,76	20,02	Semi humide
El Hamma	484,92	15,68	18,88	Semi-aride
Kais	461	14,95	18,48	Semi-aride
Medina	441,54	13,38	18,89	Semi-aride

III.3.5.4. Indice de sécheresse estivale

Cet indice dit aussi « d'Emberger – Giacobe ». D'après Daget (Daget 1977) permet de quantifier le degré de sécheresse de la saison estivale. Il est défini comme suit :

$$P = \frac{PE}{M}$$

PE : Total de précipitation moyenne estivale

M : moyenne des maximums du mois le plus chaud.

Daget (Daget 1977) proposé l'échelle de référence suivante (Tableau. 11):

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Tableau 11. Échelle proposée par Daget et al. (1993)

Indice	0	5	7
Eté	Sec	Sub sec	Non sec
Climat	Méditerranéen	Sub méditerranéen	Non méditerranée

Les résultats que nous avons trouvés récapitulés dans le tableau (12) suivant :

Tableau 12. Indice de sécheresse pour les stations de références.

Station	P	M	S
Ain Skhouna	20,3	35,7	0,6
Bouhmama	21,1	32,9	0,6
El Hamma	38,0	34,7	1,1
Kais	44,4	29,5	1,5
Medina	30,5	32,5	0,9

Les stations étudiées se situent entre les zones 0 et 2, soit un indice d'Emberger variant entre 5 et 1, caractéristique de la zone méditerranéenne a été sec.

III.3.5.5. Système d'EMBERGER (1939)

Selon les valeurs du coefficient Q₂, on peut définir cinq ambiances bioclimatiques qui sont :

- Humides pour $Q_2 > 100$;
- Subhumide pour $100 > Q_2 > 50$;
- Semi-arides pour $50 > Q_2 > 25$;
- Arides pour $25 > Q_2 > 10$;
- Désertiques pour $Q_2 < 10$.

Nous avons calculé le quotient pour les cinq stations de références dans la région des Aurès (Tableau. 13).

Tableau 13. Valeurs du Quotient pluviométrique D'EMBERGER.

Station	m	M	P (mm)	Q ₂	Etage bioclimatique
Ain Skhouna	0,1	35,0	321,2	31,7	Semi-aride
Bouhmama	0,4	32,9	475,7	50,6	Subhumide
EL Hamma	2,25	33,7	484,9	53,0	Subhumide
Kais	1,13	33,0	461,0	49,8	Semi-aride
Medina	-1,81	32,5	441,6	44,6	Semi-aride

Chapitre II : Éco-géographie de l'Algérie orientale et les Aurès

Il en résulte dans notre cas que les trois stations de Kais, Medina et Ain Skhouna sont plus sèches que les deux stations de Bouhmama et EL Hamma est plus sèche que la station. La zone d'étude appartient aux deux étages bioclimatiques Semi- aride à hiver frais pour les stations de Ain Skhouna et Kais et à hiver froid pour la station de Medina et à l'étage subhumides à hiver frais pour les deux stations de Bouhmama et EL Hamma (Fig. 22).

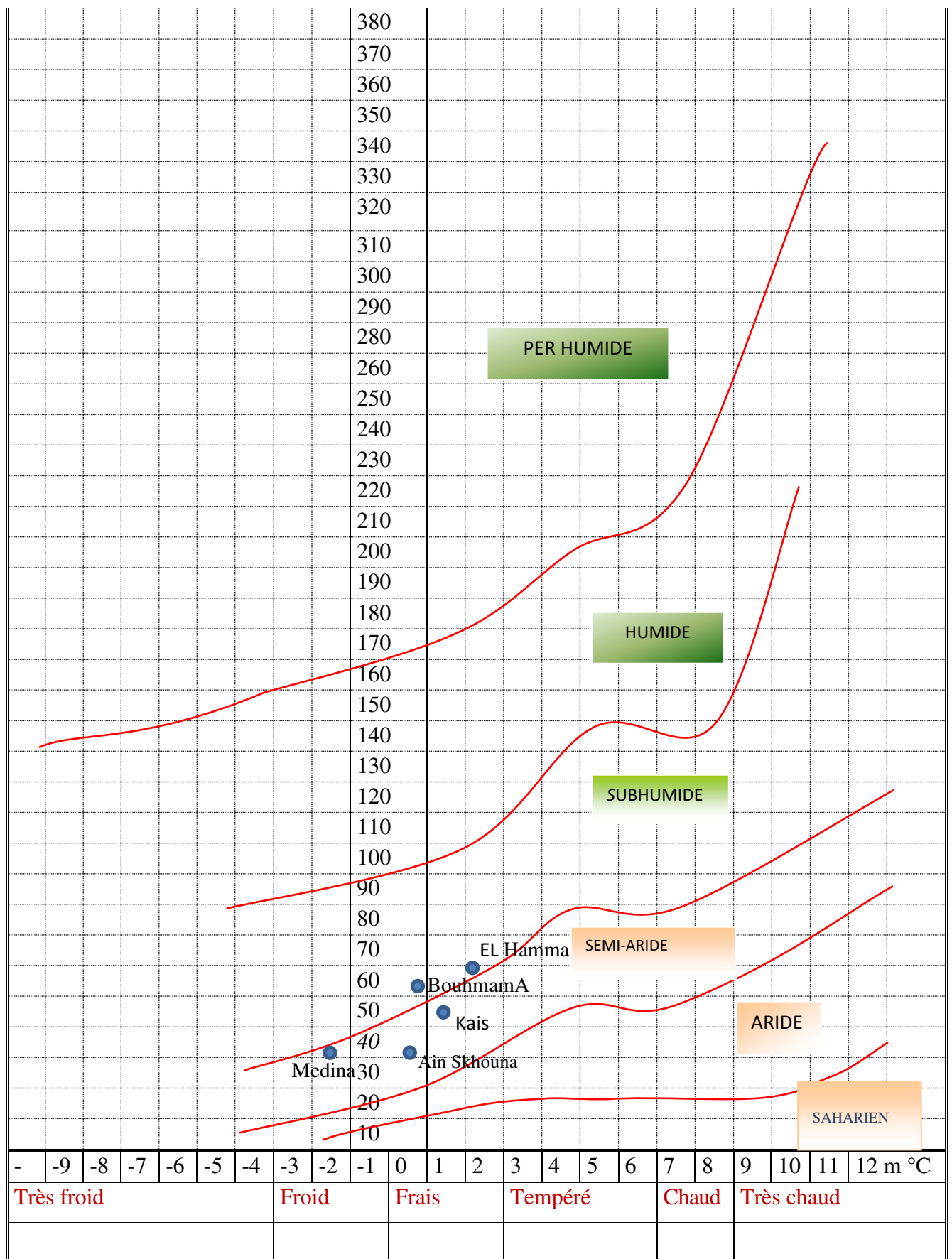


Figure 22. Projection des stations étudiées sur le climat gramme d'Emberger.

Chapitre III :
Cartographie des surfaces brûlées durant
la période (1985-2016)

1. Intérêt de la cartographie des zones brûlées

La cartographie des zones brûlées est un maillon essentiel dans la gestion de la situation post-feu. Elle fournit des renseignements précieux pour tous les acteurs responsables de la gestion de ces territoires (Ministère de l'Agriculture, Conservation des forêts, Inventaire Forestier National, Direction générale des Forêts (DGF), Bureaux d'études etc.).

Son importance réside, d'abord, dans l'inventaire des dégâts afin d'évaluer les pertes écologiques et économiques, cette inventaire permet l'estimation et l'allocation des ressources (matérielles, humaines et financières) nécessaires à la mise en place d'un programme de restauration et de réhabilitation des zones touchées par les feux (Ezzine et al. 2005). Des opérations de reboisement peuvent être envisagées afin de reconstituer la forêt. Elles ne sont pas systématiques, mais permettent de restabiliser le sol et ainsi d'éviter une possible érosion, surtout les régions méditerranéennes sont constituées par des terrains fortement pentus et sont touchées par de fortes pluies en automne (Zammit 2008).

D'autre part, la cartographie des zones brûlées permet la localisation spatiale de la région endommagée. Elle facilite l'analyse des différents facteurs impliqués dans le processus de feu, contribuant ainsi à la compréhension du comportement de l'incendie (qui dépend du combustible, des conditions météorologiques et de la topographie de la région) et aide à l'identification de la cause de l'incendie (Zammit 2008).

2. Méthodes de cartographie par télédétection les zones brûlées

Les méthodes et les techniques utilisées pour la cartographie par télédétection des zones brûlées sont très diversifiées. Les méthodes varient d'un auteur à l'autre en raison de la diversité des types de feux, elle-même liée à la diversité des milieux écologiques (Kana et Etouna 2006). Mais aussi, elles diffèrent en fonction de deux facteurs: le type et le nombre d'images utilisées. Le choix du type et du nombre d'images (bandes spectrales, résolution, couverture spatiale, temps de revisite du satellite, ...) doit prendre en compte les objectifs, les ressources financières, les ressources humaines ainsi que les délais.

Selon Zammit (2008), les méthodes de cartographie de zones brûlées peuvent être divisées en deux catégories : les méthodes multi-temporelles et celles uni-temporelles.

2.1. Approches multi-temporelles

Les méthodes multi-temporelles sont basées sur des techniques de détection de changements, sur les différences des caractéristiques spectrales d'un même objet situé dans des images acquises avant et après le feu. Elles sont généralement basées sur l'analyse d'images satellitaires basse résolution (de l'ordre du kilomètre par exemple, les satellites

NOAA AVHRR, SPOT Végétation et MODIS pour le domaine de l'infrarouge thermique) ou moyenne résolution (de l'ordre de la centaine de mètres pour le domaine du visible et proche infra-rouge par exemple MODIS) (Zammit 2018).

En effet, dans ce cas, le satellite nécessite un temps de revisite très court ainsi qu'une large couverture spatiale ce qui implique une résolution grossière. Cette approche très simpliste consiste à comparer directement certaines bandes spectrales des images acquises avant et après le feu (Hudak et Brockett 2004). En effet, la végétation brûlée réfléchit beaucoup moins dans le domaine de l'infrarouge, cette approche ne donne pas de bons résultats car les deux images peuvent présenter des différences d'illumination et/ou d'angles d'incidence, qui peuvent engendrer des erreurs lors du calcul des variations des valeurs spectrales (Hudak et Brockett 2004).

De nombreuses méthodes sont fondées sur l'analyse de la variation d'indices de végétation entre les images avant-feu et après-feu, acquises par le même satellite afin de tester l'efficacité des indices en fonction des bandes spectrales des différents satellites (Conese et Checcacci 2006). Cependant, la comparaison d'une seule image avant feu avec une seule image après feu peut induire des erreurs si l'une des deux images comporte du "bruit" (nuages ou autres perturbations atmosphériques, ombre des nuages, ...) (Chuvieco et al. 2008).

2.2. Approches uni-temporelles

Cette approche est basée sur l'utilisation de plusieurs images, dans ce cas, les indices de végétation sont très utiles puisqu'ils permettent de mettre en valeur les changements de la végétation et sont moins sensibles aux différences d'illumination des images (Conese et Checcacci 2006). Les méthodes uni-temporelles sont basées sur les différences des signatures spectrales des différents objets présents dans l'image.

3. Données exploitées

a. Données satellites LANDSAT

Les données générées par les capteurs LANDSAT sont très utilisés pour la détection des feux. Ce sont des satellites qui ont une résolution spatiale élevée (de 60m et 15m) et résolution temporelle de 16 à 18 jours. Les domaines spectraux explorés concernent le visible, l'infrarouge proche et moyen ainsi que l'infrarouge thermique. Les premiers satellites LANDSAT ont été lancés en Juillet 1972, comme le MSS (Scanner Multi Spectral). La série des TM (Cartographe thématique- Thematic Mapper) a commencé en Juillet 1982 et sa version amélioré ETM+ (Cartographe thématique amélioré-Enhanced Thematic Mapper Plus) en avril 1999 et la série des OLI a commencé en 18 mars 2013.

Les données LANDSAT MSS, TM, ETM+ et OLI offrent de bonnes possibilités pour la caractérisation des régimes de feu et de leur impact sur la végétation par des moyens de télédétection (Broucke 2009). En effet, des images existent depuis 1975 sur le territoire dans des canaux intéressants pour ce type d'étude.

Pour une étude sur le régime du feu, il faudrait des images avec une régularité mensuelle au minimum, ce type de résolution peut permettre de détecter les surfaces brûlées et faire un suivi de la végétation après un feu. Cette régularité existe pour les images LANDSAT (Broucke 2009).

Les sources de téléchargement des données LANDSAT sont:

- Glovis sur <http://glovis.usgs.gov/>
- Earth Explorer sur <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

4. Identification des surfaces brûlées à partir d'archive de LANDSAT

La capacité des données LANDSAT à fournir des informations sur les cicatrices de brûlures a été largement reconnue dans la littérature scientifique (Hantson et al. 2016 ; Marlon et al. 2016). En raison de sa couverture spatiale (185 x 185 km), de sa haute résolution spatiale (30 mètres pour les bandes réfléchissantes), de ses propriétés multi spectrales (couvrant les régions spectrales les plus importantes pour cartographier la zone brûlée avec une bande dans le proche infrarouge et deux dans l'infrarouge en ondes courtes), la fréquence temporelle adéquate (16 jours) et données équivalentes disponibles depuis 1982 (Hudak et al. 2004), le système LANDSAT est l'un des plus adaptés. Mais là aussi, les méthodes varient d'un auteur à l'autre en raison de la diversité des types de feux, elle-même liée à la diversité des milieux écologiques. Certains auteurs privilégient la classification automatique du canal infrarouge thermique (Ball et Hall. 1965 ; Scholes 1995) ; d'autres procèdent par des classifications supervisées à partir des compositions colorées combinant divers canaux (Arino et Rosaz. 1999 ; Isichei et al. 1995, Youta Happi 1998 ; Bastarrika et al. 2014).

Dans cette étude nous avons utilisé l'outil BAMS (Burned Area Mapping Software) (Bastarrika et al. 2014) pour fournir les contours du feu. Cet outil a été construit à partir d'ArcGIS TM standard. Il est basé sur une série de traitement semi-automatisée en deux phases en calculant plusieurs indices spectraux communément utilisés dans la cartographie des zones brûlées. Les indices spectraux sont parmi les techniques les plus largement utilisées et testées (Kasischke et French 1995; Barbosa et al. 1998; Martín et Chuvieco 1998; Trigg et Flasse 2001; Chuvieco et al. 2005). Parmi ces indices spectraux, le BAMS utilise les indices spectraux suivantes pour la cartographie des zones brûlées :

i. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al. 1973) est l'indice le plus connu en télédétection. Il est très utile pour la surveillance de la végétation à grande échelle puisqu'il est normalisé. Il est calculé à partir des bandes Rouge (R) et Proche Infrarouge (PIR). Cet indice est basé sur la différence de réflectances entre ces deux bandes normalisé (1):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \dots \dots \dots (1)$$

La plupart des satellites permettent de calculer cet indice afin de quantifier la densité et la vigueur de la végétation sur une zone donnée. Le NDVI fournit une valeur entre -1 et +1, une valeur de NDVI nulle indique une faible densité de végétation saine, une valeur proche de 1 indique une grande densité de végétation saine. Les nuages, l'eau, la neige, le sol et les roches ont généralement des valeurs de NDVI proches de 0 (même réflectance dans le Rouge et l'IR).

Le NDVI est l'indice le plus utilisé pour la cartographie des zones brûlées (Kasischke et French 1995). Ainsi, il subit moins l'influence des changements de conditions d'illumination, de pentes de terrain et d'angle d'incidence de la visée satellitaire. Cependant, de nombreux auteurs (Pereira 1999; Chuvieco et al. 2002) ont montré ses limites en ce qui concerne la cartographie de zones brûlées, notamment pour la végétation éparses des régions méditerranéennes (le NDVI est affecté par la réflectance du sol).

ii. GEMI (Global Environmental Monitoring Index)

Le GEMI (Global Environmental Monitoring Index) (Pinty et Verstraete 1992) est un indice de végétation non linéaire pour la surveillance de l'environnement mondial à partir de l'imagerie satellitaire. Cet indice a été spécifiquement conçu pour réduire les effets relatifs des perturbations atmosphériques indésirables, tout en conservant les informations sur le couvert végétal. C'est similaire au NDVI, mais il est moins sensible aux effets atmosphériques et plus pertinent pour la détection de zones brûlées que le NDVI (Pereira 1999). Cet indice varie approximativement entre 0 et + 1 sur les zones continentales, une valeur de GEMI nulle indique une faible densité de végétation saine, une valeur proche de 1 indique une grande densité de végétation saine. Cet indice est calculé par la formule suivante (2) :

$$GEMI = n(1 - 0.25n) - \frac{P1 - 0.125}{1 - P1} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

$$n = \frac{2(p^2(PIR) - p^2rouge) + 1.5P(PIR) + 0.5 Prouge}{P(PIR) + Prouge + 0.5}$$

iii. NBR (Normalized Burnd Ratio)

Le rapport de combustion normalisé (Normalized Burnd Ratio, NBR) (Key et Benson 1996) est un indice conçu pour mettre en évidence les zones brûlées dans les grandes zones d'incendie. La formule est similaire à celle de l'indice de végétation NDVI, à la différence près qu'elle combine l'utilisation des longueurs d'ondes dans le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge à ondes courtes (MIR).

Une végétation saine présente une réflectance très élevée dans le proche infrarouge et une faible réflectance dans la partie MIR du spectre. Contrairement à ce que l'on voit dans les zones dévastées par le feu. Une valeur NBR élevée indique une végétation saine, tandis qu'une valeur basse indique un sol nu et des zones récemment brûlées et les zones non brûlées sont normalement attribuées à des valeurs proches de zéro. (Keeley 2009). Le NBR est exprimé par la formule suivante (3) :

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \dots \dots \dots (3)$$

iv. MIRBI (Mid Infrared Burn Index)

L'indice bi-spectral dans l'infrarouge moyen (MIRBI) (Trigg et Flasse 2001) a été spécifiquement développé en tant qu'indice spectralement optimal, bien qu'il ait été principalement utilisé pour distinguer les pixels brûlés et non brûlés dans les écosystèmes de savane et de parcours (Smith et al. 2007 ; Sparks et al. 2015). Dans l'ensemble, MIRBI était le meilleur indice pour distinguer les pixels brûlés et non brûlés et il pourrait être un indice utile pour distinguer différents niveaux de sévérité des incendies dans les écosystèmes forestiers (McCarley et al. 2018). Le MIRBI est exprimé par la formule suivante (4) :

$$MIRBI = 10LMIR - 9.8 SMIR + 2 \dots \dots \dots (4)$$

Où : LMIR : La bande (7)

SMIR : La bande (6)

v. Burnt Area Index for MODIS (BAIM)

Le BAIM (Martín et al, 2005) est également défini comme l'inverse de la distance euclidienne entre la valeur de réflectivité de chaque pixel de l'image et la valeur du point de convergence dans un espace spectral adapté aux possibilités offertes par le capteur MODIS. En ce sens, dans la formulation de l'indice, la réflectivité de la bande rouge est remplacée par l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), qui est en principe plus approprié pour la discrimination des zones brûlées par rapport aux autres bandes (Triggy et Flasse 2001 ; Martín et al. 2005).

Ce nouvel indice a été développé par Martín (2005), en utilisant le proche infrarouge et SWIR (bandes 2 et 7), qui s'est avéré sensible à la discrimination des zones brûlées (Martín et al. 2005). L'indice BAIM est basé sur la formule suivante (5) :

$$BAIM = \frac{1}{(pcICR - pICR)^2 + (pcSWIR - pSWIR)^2} \dots \dots \dots (5)$$

Où : pc (ICR) : valeurs de la bande proche infrarouge (pc (ICR) = 0,04)

Pc (SWIR) : valeurs de la bande infrarouge à ondes courtes (pc (SWIR) = 0,2)

Le BAMS dispose de deux options de traitement (Fig.23) pour une paire de scènes LANDSAT (l'une considérée avant le feu et l'autre après le feu) et une autre étape qui crée préalablement des composites temporels à partir d'un ensemble de scènes LANDSAT (maximisation de l'NDVI pour l'état avant le feu et maximisation du NBR pour l'état après le feu) (Bastarrika et al. 2014). Il utilise en fait une stratégie en deux phases visant à équilibrer les erreurs de commission et d'omission en utilisant des critères stricts dans la première phase (conservatrice), pour identifier les pixels de départ et appliquer un critère plus flexible dans la deuxième phase pour cartographier progressivement la zone brûlée jusqu'à ce que toute la zone brûlée soit capturée.

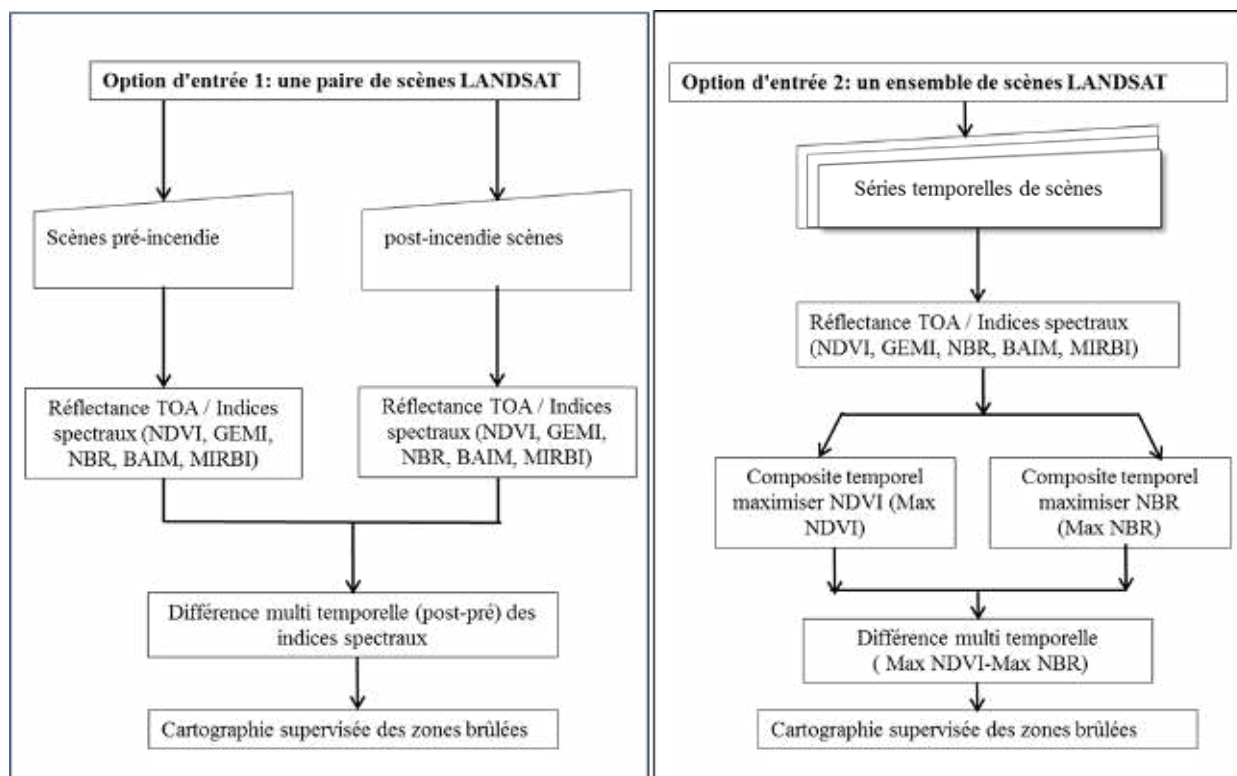


Figure 23. Organigramme de la chaîne de traitement de logiciel BAMS.

Pour nous assurer que la plupart des incendies étaient effectivement enregistrés dans la base de données et pour évaluer la fiabilité des surfaces brûlées référencées, nous avons traité des séries chronologiques des images satellites LANDSAT-5 et LANDSAT-7 pour la période 1985-2016. Au total, six scènes ont été traitées, et pour chaque scène, toutes les images LANDSAT disponibles ont été utilisées, à l'exception de celles couvertes par des nuages ou correspondant à des dates où aucun incendie n'était prévu.

Le nombre d'images LANDSAT disponibles était de 558 (Path / Row 192/35), 586 (Path / Row 193/34), 594 (Path / Row 193/35), 589 (Path / Row 193/36), 592 (Path / Row 194/34) et 595 images (Path / Row 194/35).

Pour le prétraitement et le traitement des données, nous avons utilisé : Un logiciel statistique (Le R) pour réaliser les calculs et les estimations des surfaces brûlées,

La mise en œuvre de la méthodologie décrite ci-haut s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Une élimination de toutes les images couvertes par des nuages ou correspondant à des dates où aucun incendie n'était prévu.
- Une élimination des surfaces brûlées sur les terres agricoles.
- Un calcul des surfaces brûlées par an à l'échelle nationale puis à l'échelle régionale ;

- Une vérification des résultats.

3.5. Correction des données LANDSAT

Les images satellite LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) constituent une source de données importante liées aux incendies. Cependant, l'échec du SLC a sérieusement limité les applications scientifiques des données ETM+ puisque le correcteur de ligne de balayage (SLC) a échoué définitivement le 31 mai 2003. Depuis cette date l'instrument ETM+ fournit des données dégradées, Il manque environ 22% des données d'image dans chaque scène (Chen et al. 2012).

En revanche, LANDSAT 5 a collecté avec succès des données depuis son lancement en 1984 jusqu'aux pannes du système de communication en novembre 2011, et a finalement été mis hors service en 2012. En raison de non disponibilité des images LANDSAT 5 en 2012, nous avons utilisé des images LANDSAT 7 ce qui laisse de grandes lacunes lors de la détection de la zone brûlée en 2012 en raison de la défectuosité du capteur Landsat7 (Fig.24).

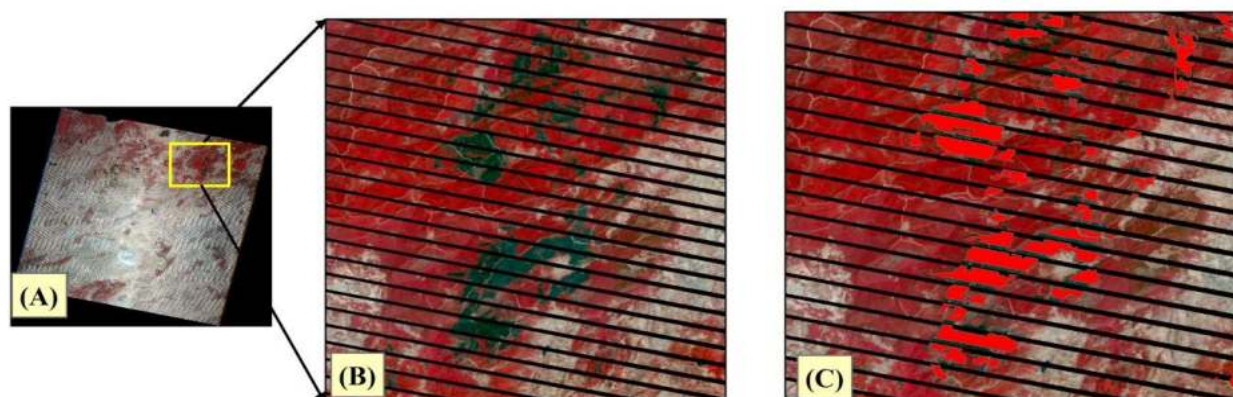


Figure 24. Image illustre une lacune dans les données, comme vu par LS-7 (A et B), l'image a été acquise en 2012. (C) Contours de feu (polygones rouges) à Skikda obtenus à partir du LANDSAT 7 ETM+.

Nous avons récupéré ces informations manquantes dans l'image satellitaire par la délimitation des contours des existants dans la région endommagée de manière manuelle par remplir le voisinage des contours des surfaces brûlées manquants.

4. Résultats et discussion

4.1. Répartition annuelle des superficies brûlées

L'approche adoptée dans cette étude a permis de cartographier les surfaces affectées par les feux depuis 1985. Les incendies d'une superficie supérieure à 5 ha ont pu être détectés. Pour chaque polygone d'incendie, nous avons identifié le lieu (Wilaya, commune et secteur de la carte administrative de l'Algérie), localisation géographique et l'année de l'incendie

Selon les résultats obtenus, chaque année les incendies ravagent des étendues considérables de forêts dans la région d'étude, mais la surface brûlée fluctue d'une année à une autre (Fig.25).

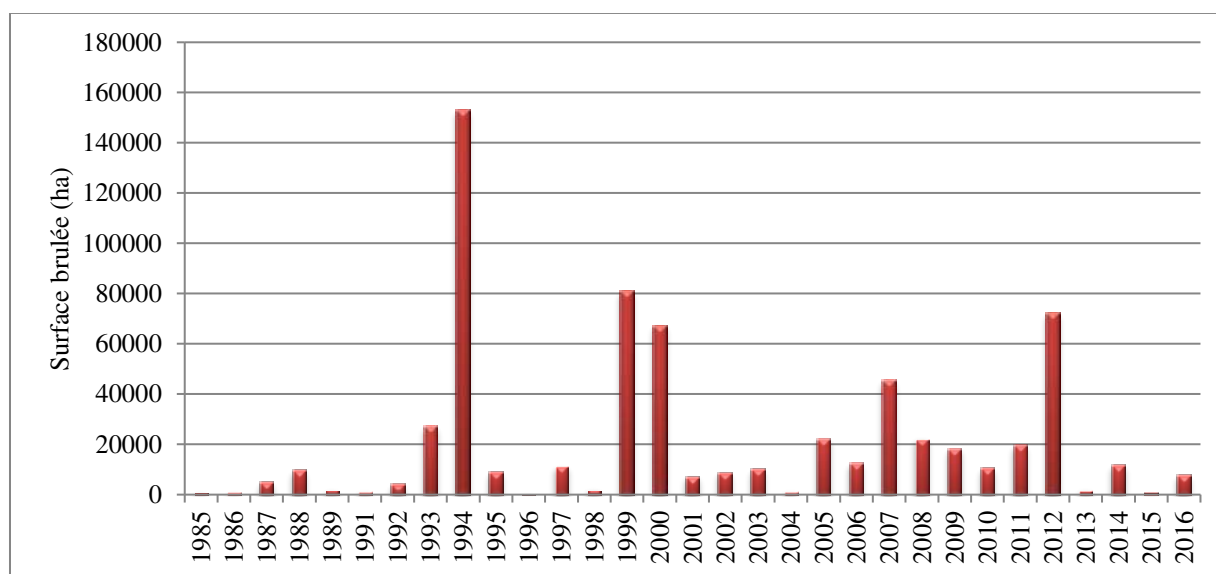


Figure 25. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans la zone d'étude sur une période allant de 1985 à 2016.

Statistiquement, la surface touchée par les feux couvre une superficie de 647.291,1 ha soit 38,7% de la surface forestière totale de la zone d'étude durant la période allant de 1985 à 2016 avec une moyenne de 20.880,34 ha/an. Les pics enregistrés sont ceux des années 1994, 1999, 2000 et 2012, avec respectivement 152.985 ha, 80.953,2 ha, 67.135,7ha et 72008ha incendiés, durant ces années, la surface brûlée est supérieure à cette moyenne. Ce sont les années qui ont été les plus destructrices pour les forêts de l'Est algérien, où pas moins de 418.533,8 ha brûlé avec une moyenne de (83.706,76 ha), soit la moitié de la surface totale brûlée durant la période d'étude. Les causes de ces feux exceptionnels, est liée à les conditions climatiques exceptionnelles de l'été durant ces années ont largement contribué au bilan dramatique. En effet, l'Algérie a connu une période de sécheresse durant les années 1980, où le déficit hydrique a atteint des niveaux critiques et l'année 1994 a été particulièrement sèche (Meddour et Derridj 2008).

Toutefois, les conditions climatiques de la période estivale ne peuvent à elles seules expliquer le phénomène, elles sont certes un facteur favorable ou aggravant mais ne constituent pas la seule raison principale de cette augmentation, à cela s'ajoutent les événements politiques qui ont secoué le pays au début des années 1990, et qui sont de manière indirecte, responsables de l'embrasement des massifs forestiers (Bekdouche 2010). Aussi, le phénomène des feux de forêts est aggravé par la progression de l'habitat rural qui favorise le mitage en plus de l'ancrage culturel de la pratique du feu dans les milieux de pâture.

4.2. Répartition annuelle des superficies brûlées par wilaya

L'analyse de l'historique des incendies des forêts pour la même période d'étude pour chaque année dans chaque wilaya, fait ressortir une grande variabilité interannuelle en termes de superficies forestières affectées par les feux de forêts. Ces statistiques présentent des fluctuations différentes entre les wilayas de l'Est algérien.

La wilaya de Skikda représente à elle seule 23% des superficies brûlées dans la région d'étude, avec 148.652,10 ha et une moyenne de 4.795,2 ha chaque année. Les superficies brûlées dans les wilayas d'El Tarf, Jijel et Guelma totalisent respectivement 21%, 16% et 10% du total de la région, avec une moyenne de 4.301,5ha, 3.365,4ha et 2.092,2ha chaque année (Fig. 26 et 27).

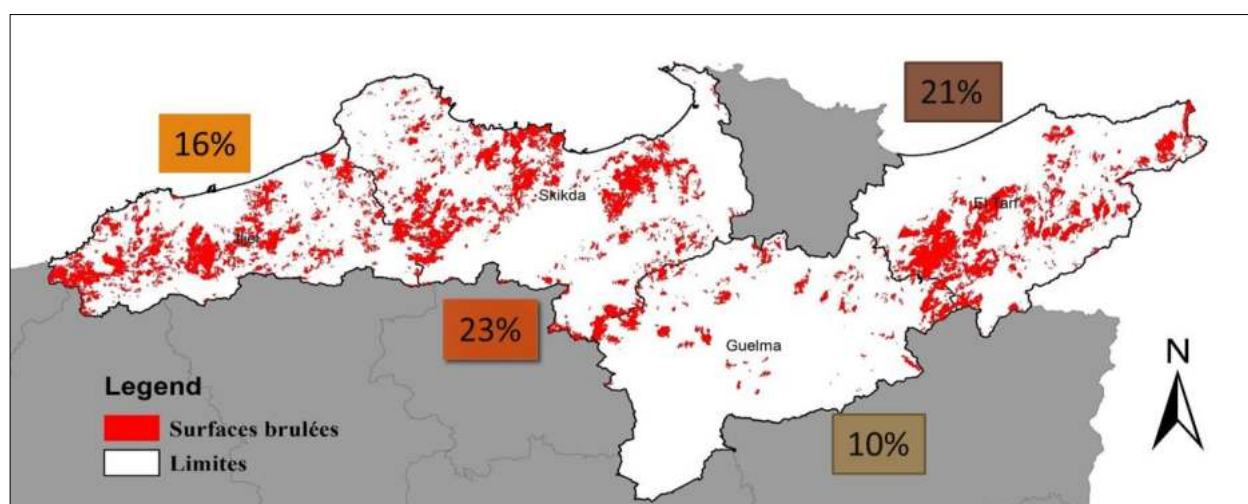


Figure 26. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas de Jijel, Skikda, El Tarf et de Guelma sur une période allant de 1985 à 2016.

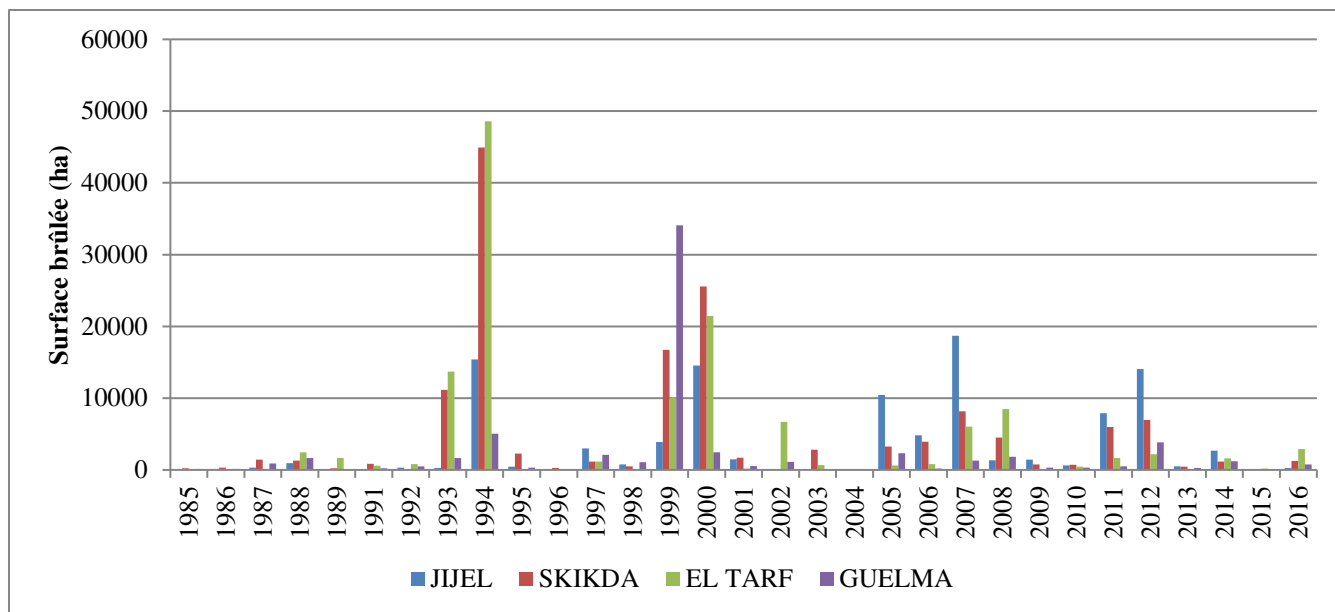


Figure 27. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Jijel, Skikda, El Tarf et de Guelma sur une période allant de 1985 à 2016.

Les superficies brûlées par les incendies (Fig. 28 et 29) pour la wilaya de :

- Annaba présente 54.069, 60 ha brûlés soit 8% de la surface totale brûlée dans la zone d'étude avec une moyenne de 1.744,18 ha chaque année.
- Batna présente 39.988,80 ha brûlés soit 6% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 1.289, 96 ha chaque année.
- Khenchela présente 34.947,20 ha brûlés soit 5% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 1.127, 33 ha chaque année.
- Souk Ahras présente 29.279,50 ha brûlés soit 5% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 944,50 ha chaque année.

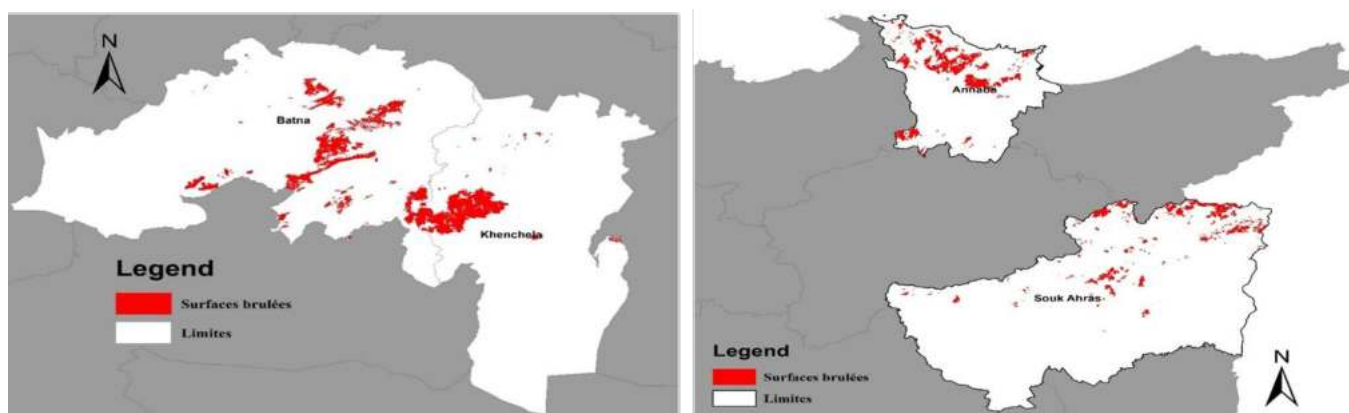


Figure 28. Carte des surfaces brûlées cumulé dans les wilayas d'Annaba, Souk Ahras, Batna et Khenchela sur une période allant de 1985 à 2016.

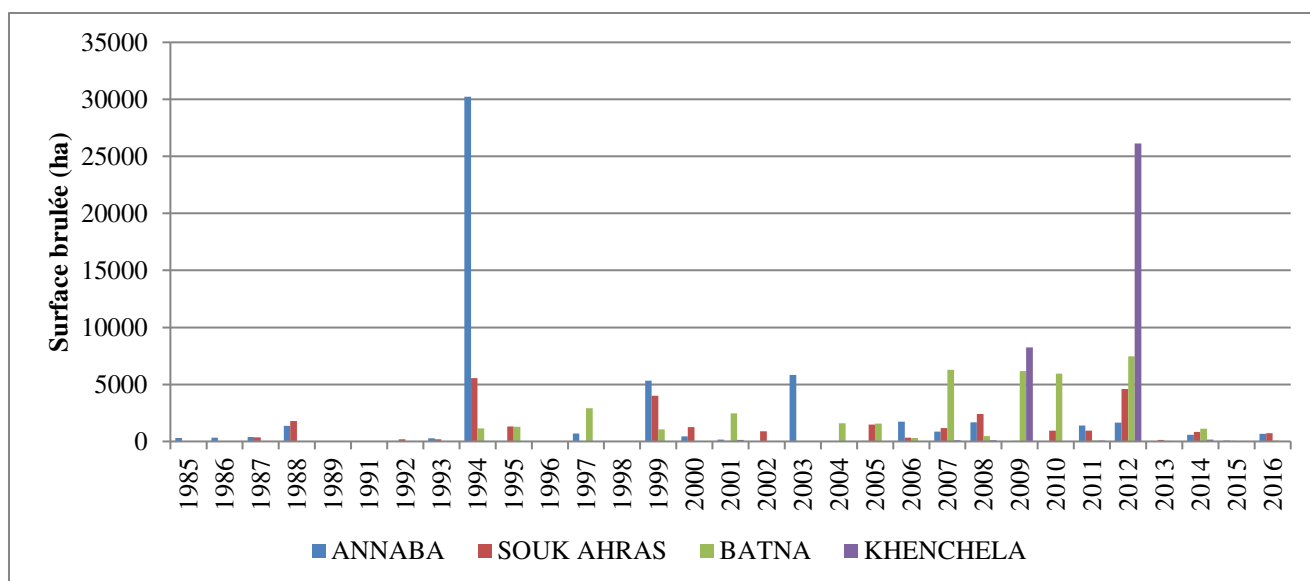


Figure 29. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas d’Annaba, Souk Ahras, Batna et Khenchela sur une période allant de 1985 à 2016.

Les incendies de forêts dans les deux wilayas de Constantine et Sétif affectant respectivement une superficie de 20.280,30 ha et 14.319,20 ha soit 3% et 2% de la surface totale brûlées dans la zone d’étude avec une moyenne de 654,20 ha et 461,91ha chacune (Fig. 30 et 31).

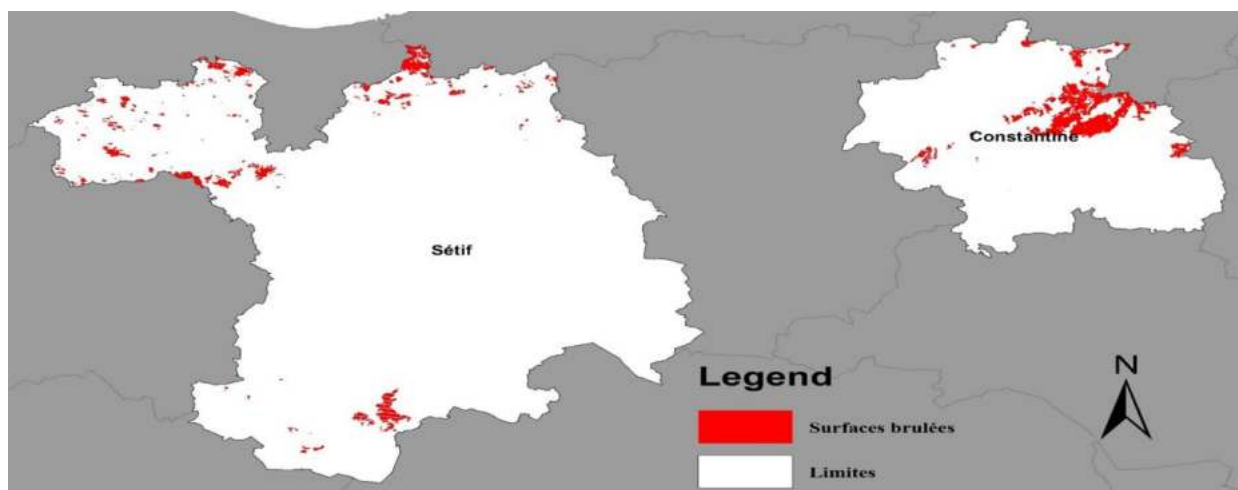


Figure 30. Carte des surfaces brûlées cumulés dans les wilayas de Constantine et de Sétif sur la période allant de 1985 à 2016.

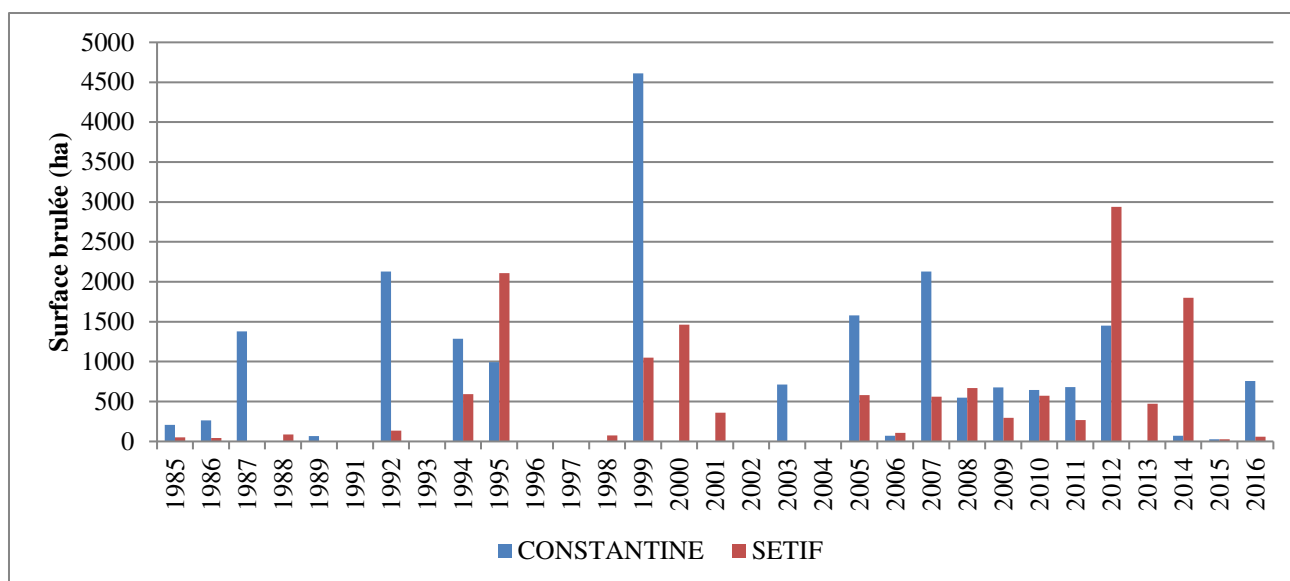


Figure 31. Evolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Constantine et de Sétif sur une période allant de 1985 à 2016.

Les deux autres wilayas Mila et O.EL Bouaghi présentent la plus faible valeur en termes de superficie brûlée avec un pourcentage de 0.3% chacune avec une moyenne de 63,96 ha et 40,04 ha chaque année (Fig.32 et 33).

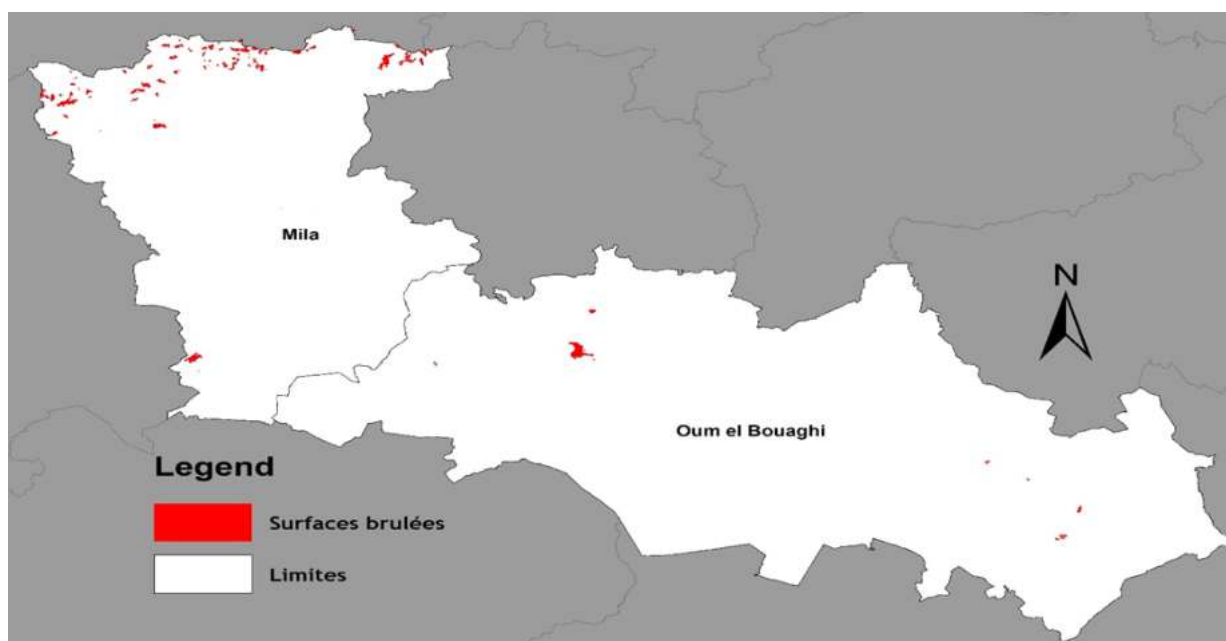


Figure 32. Carte des surfaces brûlées cumuléés dans les wilayas de Mila et de O.EL Bouaghi sur une période allant de 1985 à 2016.

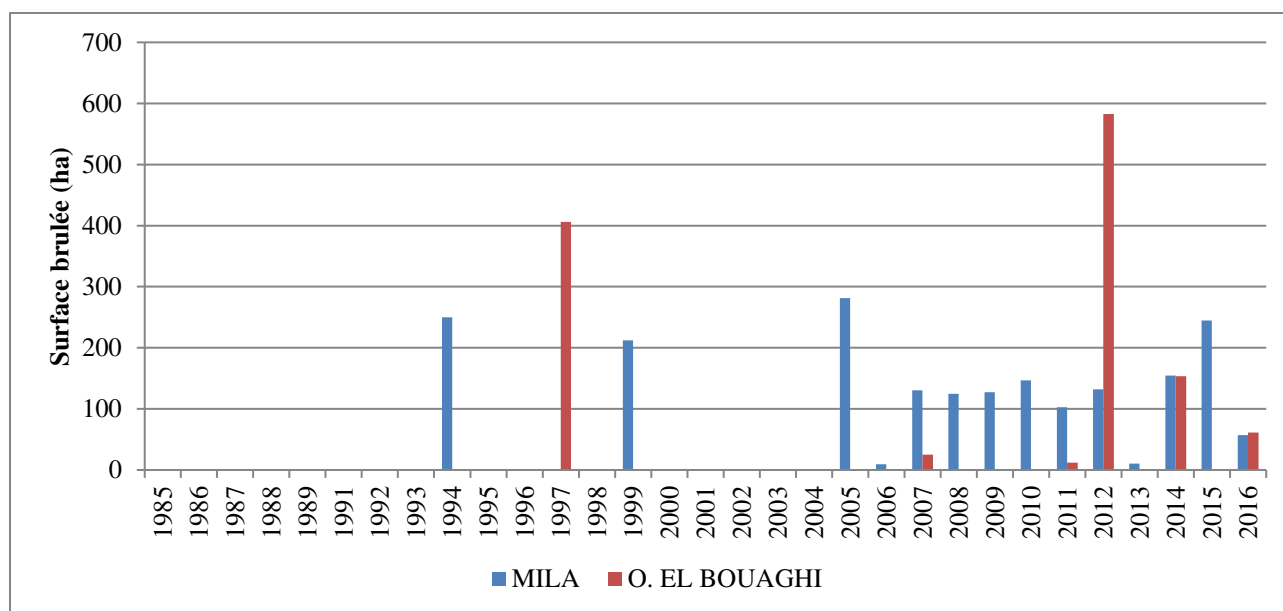


Figure 33. Évolution annuelle des superficies brûlées en ha dans les wilayas de Mila et de O.EL Bouaghi sur une période allant de 1985 à 2016.

La région Nord-Est d'Algérie est la plus touchée avec 70% puis vient la région Centre-Est en seconde position avec 24 %. La région Sud-Ouest se classe la dernière avec 6%. Ceci s'explique par l'importance des massifs forestiers suivant que l'on se déplace du Nord-Ouest vers le Nord-Est du pays (Arfa et al. 2019). Ces forêts sont les plus fréquemment dévastées. En effet, la saison estivale, longue et sèche, avec des températures élevées et une humidité relative de l'air basse, est particulièrement propice aux incendies, de plus, la végétation hautement combustible et la topographie accidentée facilitent la propagation des feux (Bekdouche et al. 2007). Le développement incontrôlé des activités agricoles et touristiques, la pression exercée par les riverains sur la forêt, ainsi que l'utilisation croissante des forêts pour des activités récréatives sont à l'origine de la plupart des grands incendies et mettent en danger les vies humaines et les ressources naturelles.

4.2. Répartition géographique des superficies brûlées

La répartition spatiale des surfaces brûlées souligne la sévérité et l'étalement des feux de forêts dans la zone d'étude (Fig. 34).

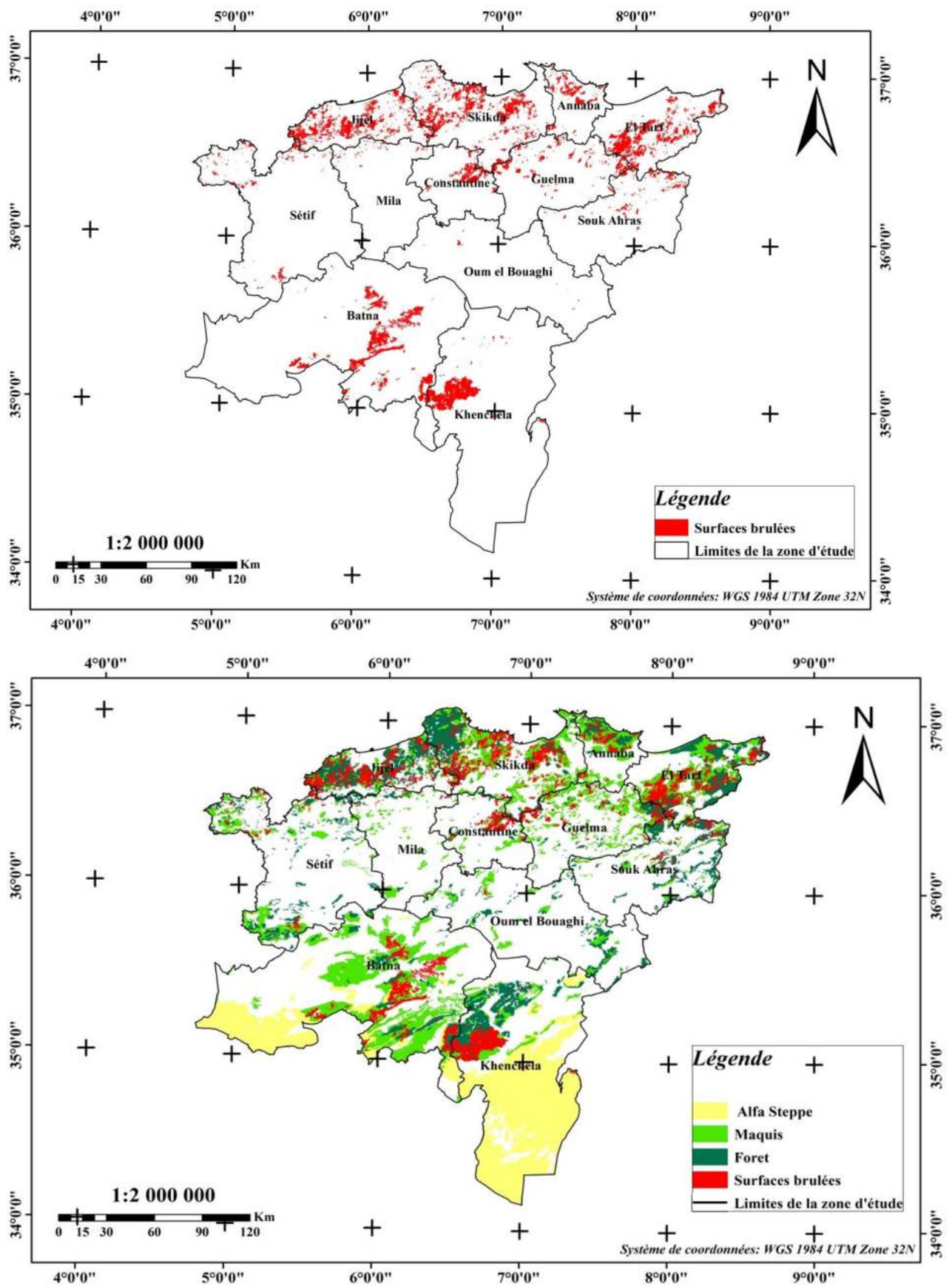


Figure 34. Carte de cumul des feux passés recensés durant la période de 1985 à 2016 dans l'Est d'Algérie.

L'analyse de cette figure permet de constater que les départs de feu sont répartis presque partout dans les forêts de deux parties nord et sud de la zone d'étude avec une concentration dans les parties Nord et Nord-est avec quelque grande taches dans la région des Aurès. Ces régions se caractérisent par une forêt essentiellement de lumière, irrégulière, avec des peuplements feuillus ou résineux le plus souvent ouverts formés d'arbres de toutes tailles et de tous âges en mélange. Parfois désordonné présence d'un épais sous-bois composé d'un grand nombre d'espèces secondaires limitant la visibilité et l'accessibilité et favorisant la propagation des feux, faiblesse du rendement moyen en volume ligneux, existence d'un surpâturage important (surtout dans les subéraies) et empiétement sur les surfaces forestières par les populations riveraines.

De plus, les contraintes climatiques sont moins sévères, ce qui entraîne une production importante de biomasse sous la forme d'un sous-bois riche, diversifié, éminemment xérophile et thermophile, et surtout très combustible. Sur le plan économique, ce sous-bois n'est pas valorisé et peut constituer des foyers de départ de feu, particulièrement dans les formations à pin d'Alep, ainsi que les subéraies a sous étage dense, éminemment xérophile et thermophile, c'est dans ces formations que le problème des incendies se pose avec acuité. Aussi, la forte présence d'espèces facilement inflammables et la présence permanente de riverains et de leurs troupeaux sont aussi des facteurs intervenants surtout dans le déclenchement des incendies.

Chapitre IV :
Analyse comparative des différents
produits satellitaires

1. Analyse comparative des différents produits satellitaires

Ce chapitre présente une démarche d'étude utilisée pour la comparaison entre différents données satellites pour la détection d'incendies de forêts, en se basant sur deux produits globaux BA et AF dérivées par MODIS MCD64A1, Fire_CCI de l'ESA et la base donnée des feux de forêts de la direction générale des forêts (DGF).

1.1.Choix des données satellitaires

Les données correspondant à la détection des surfaces brûlées, sont issues d'algorithmes complexes calculés sur les canaux bruts. Il est possible mais coûteux en temps de réaliser ses calculs à partir de canaux bruts, ainsi que l'ensemble des opérations de correction et d'ajustement des données nécessaires pour obtenir des informations rigoureuses scientifiquement (Broucke 2010). D'autant qu'il est possible de récupérer directement des produits exécutés de détection de feux actifs et de zones brûlées, les deux types de satellites privilégiés pour cette détection sont NOAA-AVHRR et MODIS-Terra/Aqua. Ils sont utilisés parce qu'ils ont une fréquence inférieure à 24h, ce qui permet d'avoir un suivi journalier avec une résolution modérée (de l'ordre du kilomètre). Pour cette étude nous avons choisi les données acquis par le satellite MODIS-Terra.

1.1.1. Données MODIS (MCD64A1)

Le MCD64 A1 est le dernier produit de la série de produits MODIS des surfaces brûlées. Il a été adopté comme le produit standard MODIS pour les zones brûlées de la collection 6, il est basé sur une approche hybride qui exploite à la fois le potentiel des feux et des données de passage de réflectance de surface 500 m (Fornacca et al. 2017). Des indices de végétation sensible aux brûlures est calculé à partir de séries chronologiques MODIS utilisant les canaux infrarouges à ondes courtes, et des seuils dynamiques sont appliqués pour détecter les changements spectraux persistants (Fornacca et al. 2017). Ensuite, les cartes des feux actifs cumulés sont utilisées pour générer des fonctions de densité de probabilité régionale pour la classification des pixels brûlés et non brûlés. Vous trouverez plus d'informations et une description complète de l'algorithme dans (Giglio et al. 2009).

Le MCD64A1 présente une amélioration générale de la détection des zones brûlées par rapport aux collections précédentes. En particulier, une détection nettement meilleure des petits feux, et l'adaptabilité aux différentes conditions régionales dans de différents écosystèmes sont parmi les principaux aspects positifs de ce produit. Nous avons utilisé des données mensuels

(MCD64A1 GeoTIFF) couvrant la période de 2001 à 2016, coupés à la mesure de la zone d'étude et re-projetés à la zone UTM locale, en conservant la taille de pixel de 500 m.

Pour maximiser la probabilité de détection, nous avons conservé les pixels brûlés ayant des niveaux de détection à la fois élevés et faibles, mais nous avons exclu les pixels d'incendie qui sont mappés sur des zones agricoles, comme recommandé dans la documentation du produit (<https://www.esa-fire-cci.org/>).

1.1.2. Données (Fire_CCI 51)

Le produit MODIS Fire_cci (FireCCI51) de l'ESA fournit des cartes des zones brûlées, développées et adaptées pour être utilisées par les modélisateurs du climat, de la végétation et de l'atmosphère, ainsi que par les chercheurs ou les gestionnaires du feu qui s'intéressent aux modèles historiques des incendies. Ces produits couvrent la période 2001-2019. Il offre des informations de réflectance de surface dans les bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) avec une résolution spatiale de 250 m. La description de l'algorithme utilisée pour cette version se trouve dans le document de base théorique de l'algorithme (Lizundia-Loiola et al. 2018) et dans (Lizundia-Loiola et al. 2020). Les détails du programme ESA-CCI sont disponibles sur ce site web <https://www.esa-fire-cci.org/>.

Nous avons téléchargé les données mensuelles de Fire_CCI sur une période qui s'étend de 2001 à 2016. La re-projection, et les opérations de masquage de la couverture terrestre ont été effectuées, et les mêmes règles spatiales que le MCD64A1.

1.1.3. Données FIRECCILT11

FIRECCILT11 fournit les superficies brûlées mensuelles à une grosse résolution de (25 km²) à partir des capteurs AVHRR depuis 1982, à l'exception de l'année 1994 où des données manquent (Lizundia-Loiola et al. 2020). Ce produit a été produit en utilisant un indice synthétique de surface brûlée. Cet indice comprenait la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge. Ce produit a également été utilisé pour estimer les proportions brûlées de chaque pixel LTDR.

Tous les traitements de données utilisés dans cette comparaison ont été effectués en utilisant R et des techniques de géo-traitement dans le logiciel ARCGIS. Les caractéristiques de principales données satellites utilisés sont résumées dans le (Tab.16).

Tableau 16. Résumé de caractéristiques des produits sélectionnés pour les zones brûlées (BA).

Production	Satellite	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Algorithme	Référence
The Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7 ETM+	30 m	16 jours	1985-2016	Using BAMS software	(Bastarika et al. 2014)
Landsat 5 Thematic Mapper (TM) and	Landsat 5 TM					
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	LANDSAT 8 OLI					
Fire_CCI	Envisat-MERIS and MODISAqua & Terra	250m	Journalier (Terra: jour; Aqua: nuit)	2001-2019	Hybrid algorithm using AF hotspots and multi-temporal changes in reflectance	(Alonso-Canas et Chuvieco. 2015)
MCD64A1	MODIS Aqua & Terra	500 m	Journalier (Terra: jour; Aqua: nuit)	2001-2019	Hybrid algorithm using AF hotspots and dynamic threshold over multi temporal spectral indices changes	(Giglio et al. 2009)

1.1.4. Données de (DGF)

Nous avons utilisé la base de données sur les incendies des services forestiers algériens (Direction Générale des Forêts, référencée DGF) disponible depuis 1985 sous forme numérique. La DGF fournit des rapports annuels sur les incendies, où chaque incendie est référencé par sa superficie brûlée (en ha), l'année de détection de l'incendie. Des informations supplémentaires sur le type de végétation touché sont également fournies. Les données sont récoltées à partir des observations sur le terrain par les forestiers locaux afin d'estimer la superficie brûlée et le type de végétation affecté. Les données sont enregistrées sous forme de tableaux annuels.

1.2. Prétraitement de données

L'analyse des différentes données utilisées se concentre sur la période 2001-2016, qui a été choisie car c'est la période disponible commune entre toutes les données utilisées. La précision de détection des zones brûlées de chaque produit a été considérée individuellement. Pour la période évaluée, on a constaté des erreurs de commission, estimée à 25 % pour le produit Fire_CCI et à 40 % pour le produit MCD64A1. L'analyse de la taille des pixels a montré une

grosse erreur de commissions dues à la confusion entre les surfaces brûlées et les autres perturbations.

La cartographie des zones brûlées à l'aide de MODIS est un travail complexe : les zones brûlées peuvent être confondues avec d'autres phénomènes en raison de la similarité de la signature spectrale entre les classes, qui varie en fonction de facteurs tels que le comportement du feu, les propriétés de la surface avant le feu (Pereira et al. 1999). Dans la région d'étude, les deux produits (MCD64A1 et Fire_CC) ont identifié quelques lacs (Sebkha) comme étant des zones brûlées (Fig. 35), en raison de confondre les zones brûlées avec les zones très humides et les surfaces d'eau qui ont des réponses spectrales très similaires. En plus, les zones à faible végétation ont souvent été cartographiées comme brûlées, très présentes dans des milieux hétérogènes caractérisés par un couvert végétal épars, ce qui crée des erreurs de commission lors de la détection des zones brûlées.

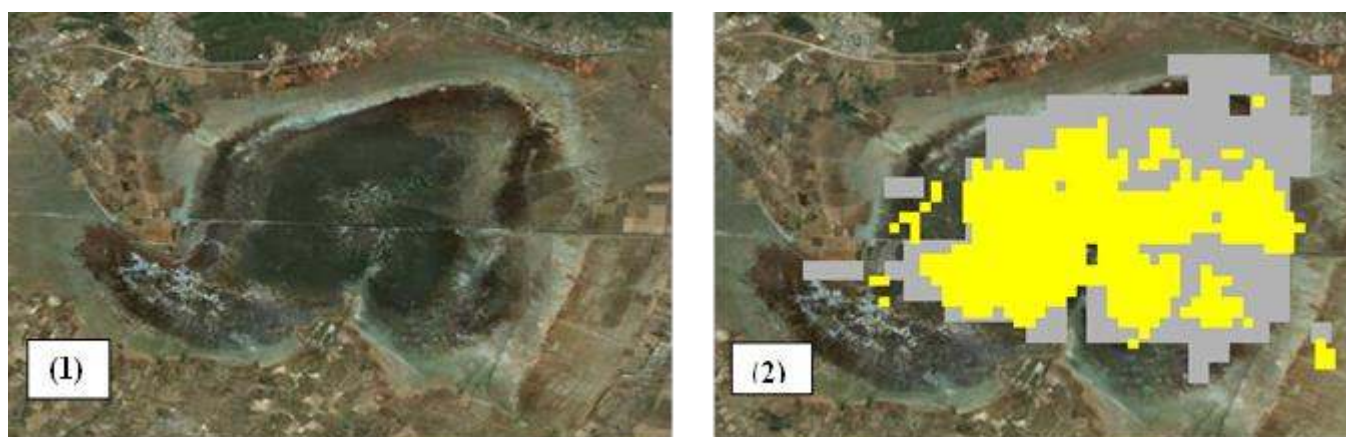


Figure 35. Exemple de confusion : (1) Sebkha visible sur google earth ; (2) Superposition des polygones de zone brûlée de Fire_CCI (jaune) et de MCD64A1 (gris).

Les erreurs d'omission sont généralement localisées sur certains bords des zones brûlées qui présentent des caractéristiques spectrales assez proches de la végétation plus saine, mais atteinte par la sécheresse. Un masque de couverture terrestre a été appliqué pour exclure ces zones et des zones brûlées sur les terres agricoles.

Dans la méthode de masquage que nous proposons, nous avons essayé de minimiser des erreurs d'omission et de commission, éliminer les confusions entre les classes de surfaces brûlées et les autres classes de couverture terrestre de la zone d'étude, et la maximisation des pixels valides (bien classés). Le masque a été appliqué à l'aide d'une carte d'occupation de sol qui a été extrait de l'inventaire forestier algérien.

1.3.Assemblage de données

Pour le prétraitement et le traitement des données, nous avons utilisé :

- ✓ Un logiciel statistique (R) pour réaliser les estimations des surfaces brûlées de chaque base de données ;
- ✓ Un logiciel de traitement des données décompressées (ARCGIS 10.1).
- ✓ Un logiciel de tableur (Excel) pour réaliser les représentations graphiques.

La mise en œuvre de la méthodologie s'est basée sur les étapes suivantes :

- ✓ Une application d'un masque sur les images de deux produits MODIS pour minimiser les erreurs de commission et éliminer les confusions entre les classes de surfaces brûlées et les autres classes de couverture terrestre de la zone d'étude ;
- ✓ Un calcul des surfaces brûlées par an à l'échelle de la zone d'étude puis à l'échelle de wilaya ;
- ✓ Une vérification des résultats.
- ✓ Une corrélation entre les statistiques de différentes données satellites testées et celles de DGF;
- ✓ Croisement SIG des couches de hot-spots de la base MCD14ML et des différents polygones de feux dans la base LANDSAT pour fournir les dates manquantes des incendies identifiés dans la base de données LANDSAT et de DGF.

L'organigramme ci-dessous (Fig. 36) présente les étapes de traitement de données utilisées dans cette étude pour évaluer la fiabilité des zones brûlées détectées par LANDSAT

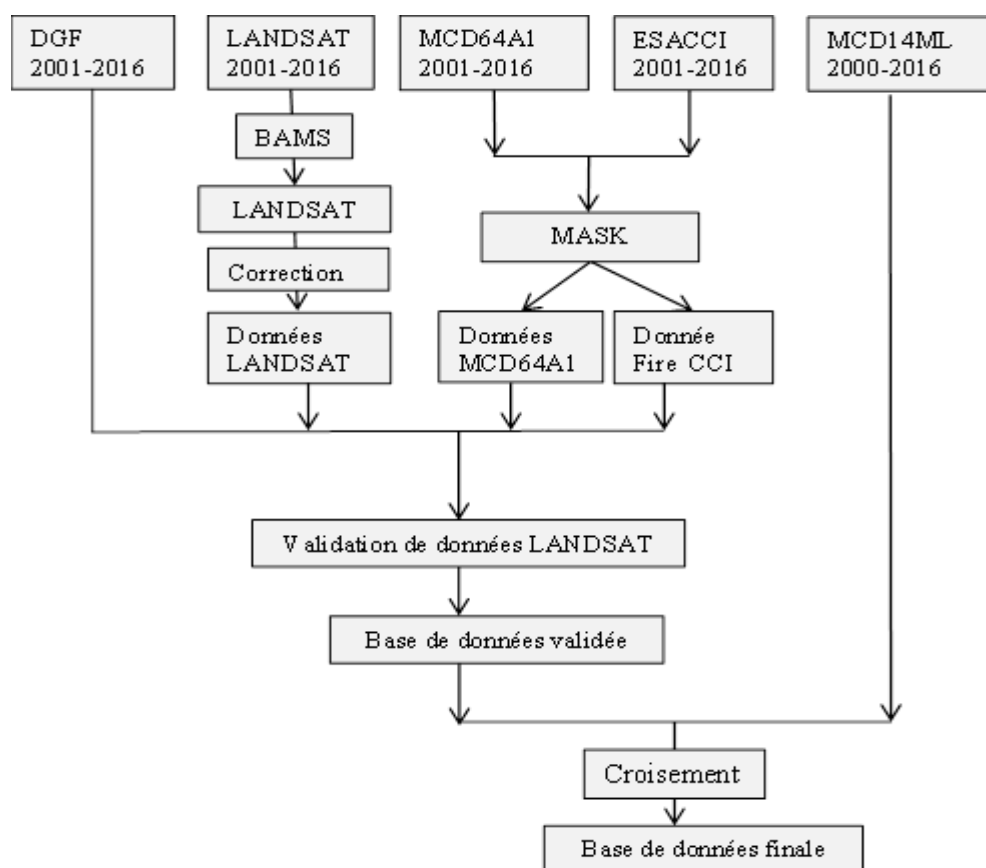


Figure 36. Organigramme de la chaîne de traitement des données.

2. Résultats et discussion

2.1. Analyse de la répartition spatiale des feux de forêts

Spatialement, l'analyse comparative des résultats obtenus à partir des différents produits testés laisse apparaître une superposition quasi parfaite des superficies brûlées au niveau de la zone d'étude. (Les figures 37, 38 et 39) représentent la cartographie des surfaces brûlées à partir de LANDSAT, MCD64A1 et FIRECCI51 sur l'ensemble de la région de l'Est algérien sur la période 2001-2016. Tous les capteurs s'accordent sur une distribution prédominante des incendies dans la partie côtière nord de la zone d'étude, avec quelques grandes taches d'incendie dans la partie sud (Les Aurès).

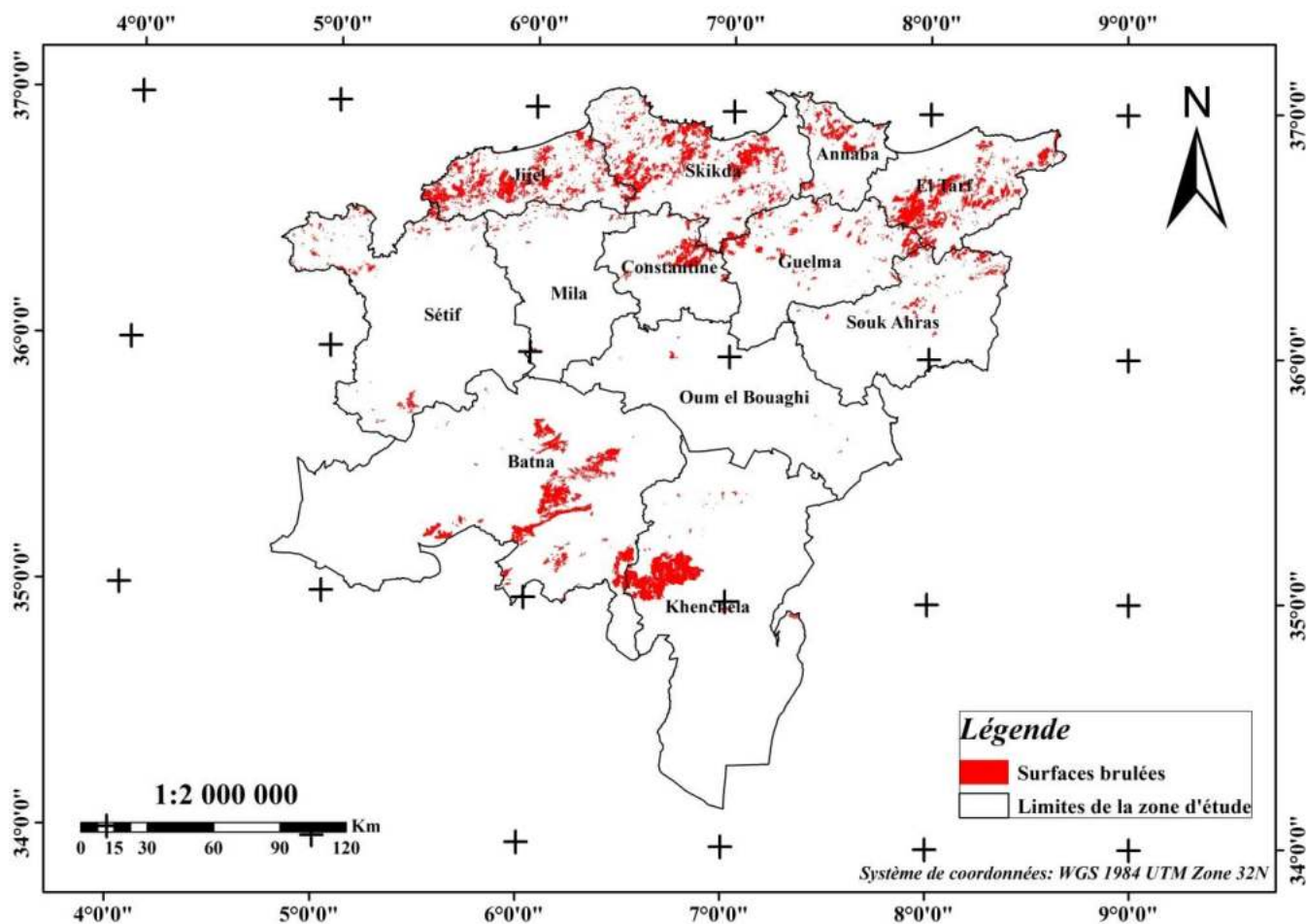


Figure 37. Carte des surfaces brûlées cumulés dans la zone d'étude selon de la base de données LANDSAT durant la période 2001-2016.

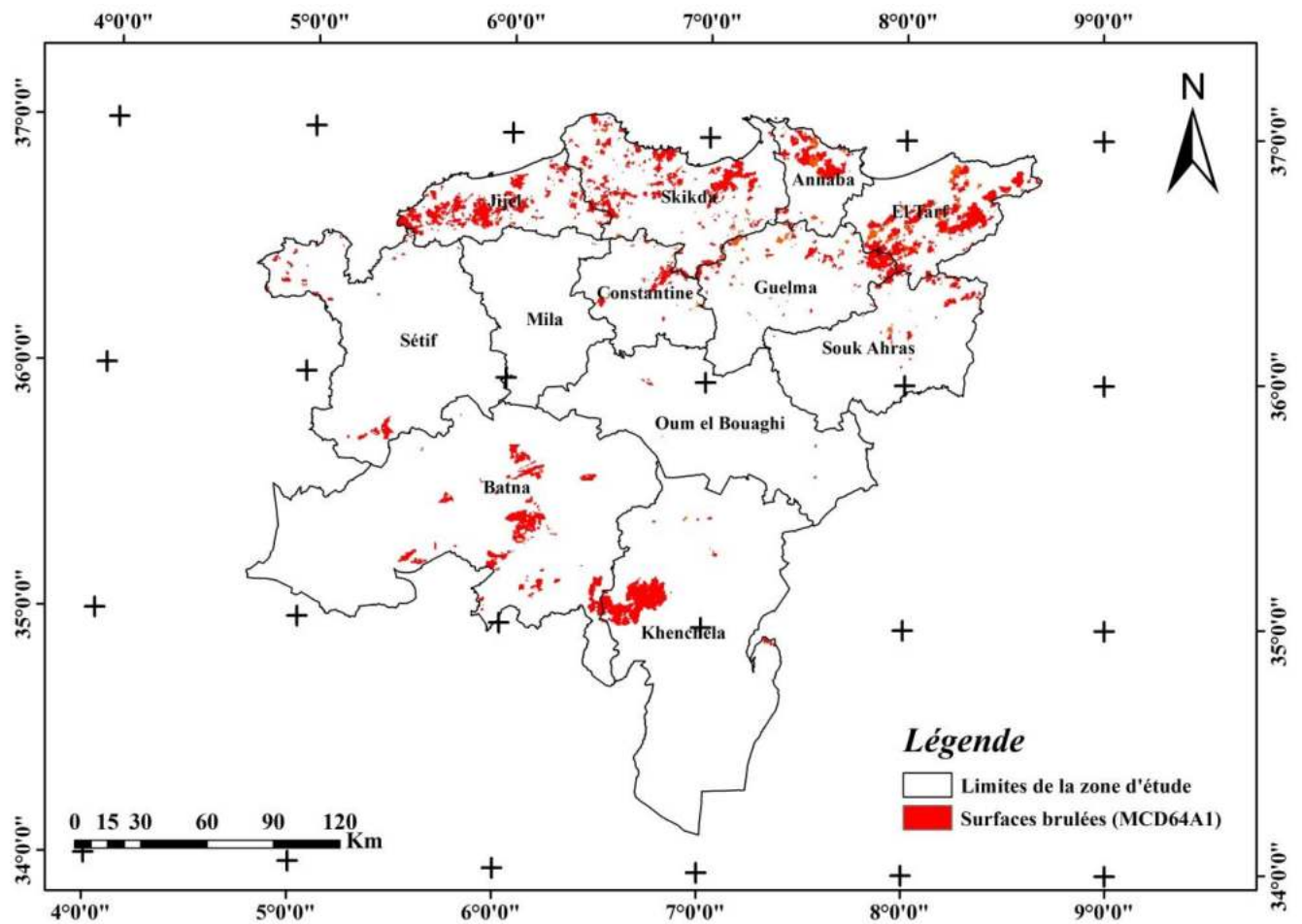


Figure 38. Carte des surfaces brûlées cumulés dans la zone d'étude selon de la base de données MCD64A1 durant la période 2001-2016.

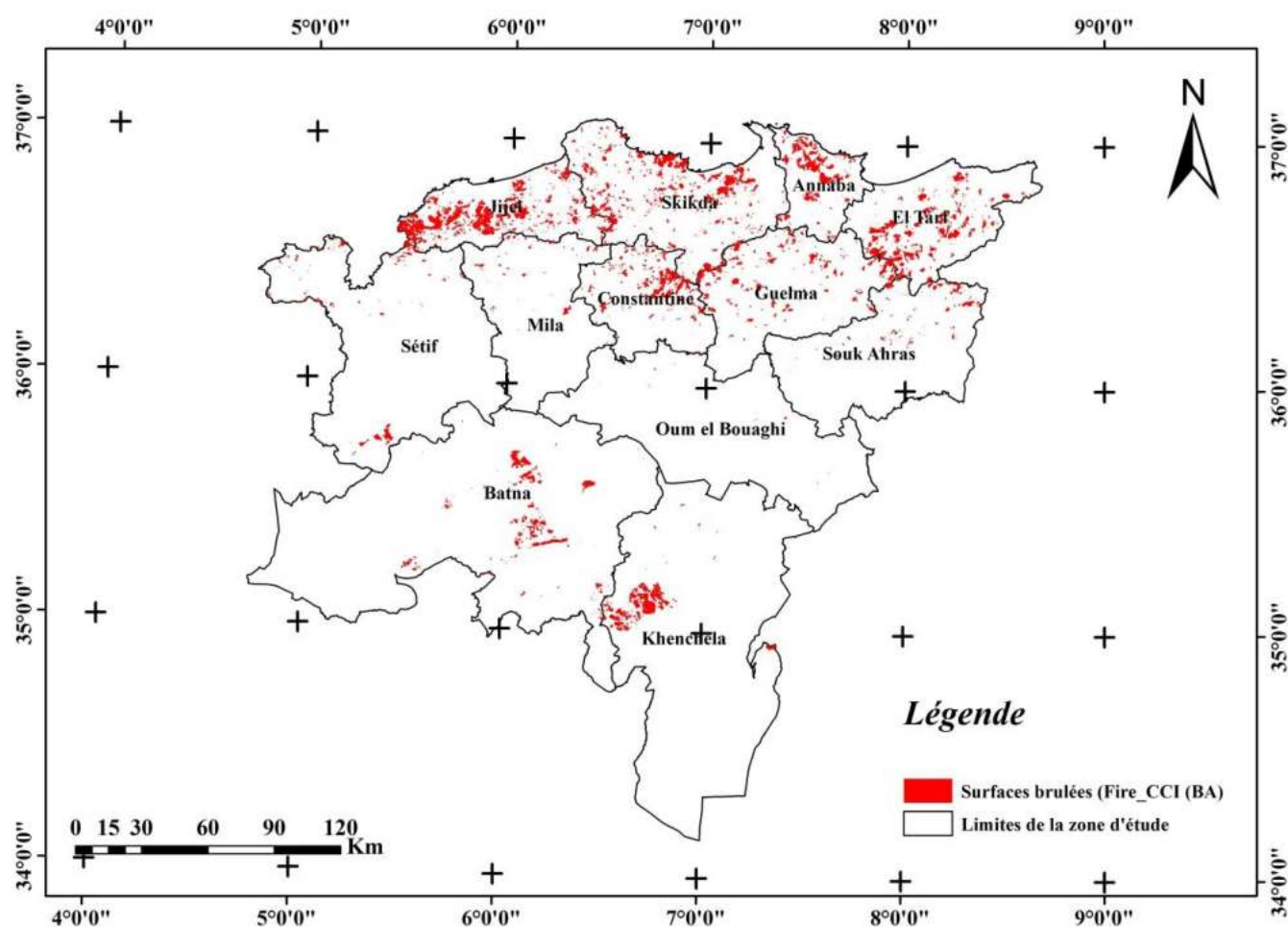


Figure 39. Carte des surfaces brûlées cumulé dans la zone d'étude selon de la base de données FIRE_CCI durant la période 2001-2016.

En termes de répartition géographique des superficies touchées (Fig. 40), dans les différentes cartographies on note que les feux de forêts se concentrent surtout dans les wilayas littorales du Nord-est algérien, de Jijel à El Tarf et les régions de l'oriental de la zone d'études (Guelma et Soukahras). Ces régions arrivent en première place avec 9.369 départs de feu et une surface de 88.304,5 ha brûlés. Correspondant à des wilayas très boisées et accidentées, avec une forte densité de population et un manque de terres pour l'urbanisation. Suivi du Sud et sud-ouest (la région des Aurès et Sétif) avec 1.401 départs de feu touchant 29.895,8 ha et une concentration dans les forêts de Belzma et Beni Imloul, suivi par la partie centrale (Constantine, Mila et Om.Bouaghi) avec 853 départs de feux et une surface de 9.778,5 ha incendiés, elle est caractérisée par une faible fréquence de feux ou bien de feux de petite taille, correspondant à des wilayas à faible densité de végétation.

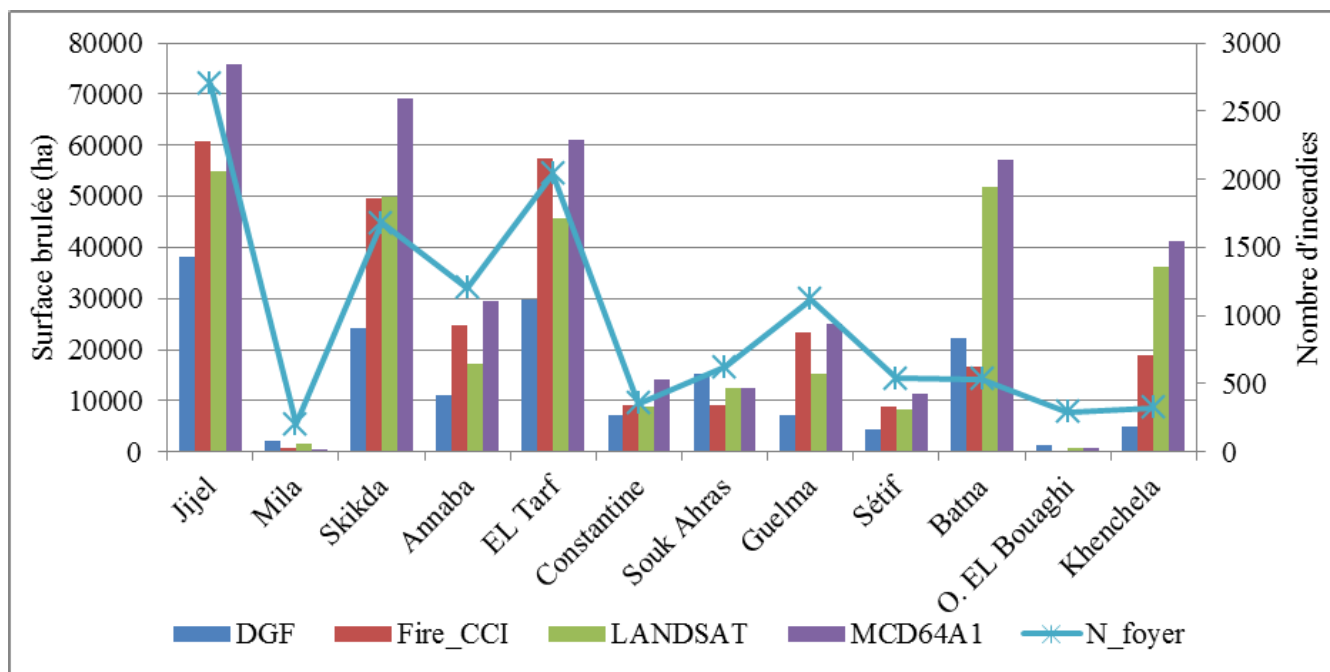


Figure 40. Diagramme comparative de l'évolution du nombre d'incendies et des surfaces incendiées dans les différentes wilayas de la zone d'étude selon les quatre bases de données utilisées.

Cette comparaison a rapporté de précision du détection des zones brûlées plus élevées par les produits Fire_CCI, MCD64A1 et LANDSAT sur la couvert forestier dense, par contre, dans les régions caractériser par une couverture végétale presque faible ou clairsemée, la plupart des zones brûlées ont été détectées par les données LANDSAT.

2.2. Analyse de la répartition temporelle des feux de forêts

Dans la base de données de la DGF, la surface brûlée annuelle moyenne était de 9.315 ha.an-1 entre 2003 et 2016, avec les plus grandes surfaces brûlées en 2007, 2008, 2012 avec plus de 30.000 ha pour chacune d'entre elles. Une surface brûlée annuelle moyenne de 18.954 ha.an-1 a été détectée par LANDSAT, 14 360 ha.an-1 ont été enregistrés dans le produit Fire_CCI et 24.878 ha.an-1 dans MCD64A1.

Les plus grandes surfaces brûlées ont été 2007, 2008 et 2012 dans tous les capteurs, avec respectivement 20.000, 16.000 et 35.000 ha pour DGF, 51.000, 21.000, 48.000 pour FIRECCI51, 62.000, 23.000, 64.000 pour LANDSAT et 79.000, 51.000 97.000 ha pour MCD64A1. FIRECCILT11, avec une résolution plus grossière, a détecté en moyenne plus de zones brûlées (24.000 ha.an-1), avec les plus grandes zones brûlées en 2005, 2007, 2010, 2012, 2014. Les pics de surface brûlée n'ont atteint que 35.000 ha et 43.000 ha en 2007 et 2012, une valeur supérieure à celle du DGF mais inférieure à celle de tous les autres capteurs (Fig.41).

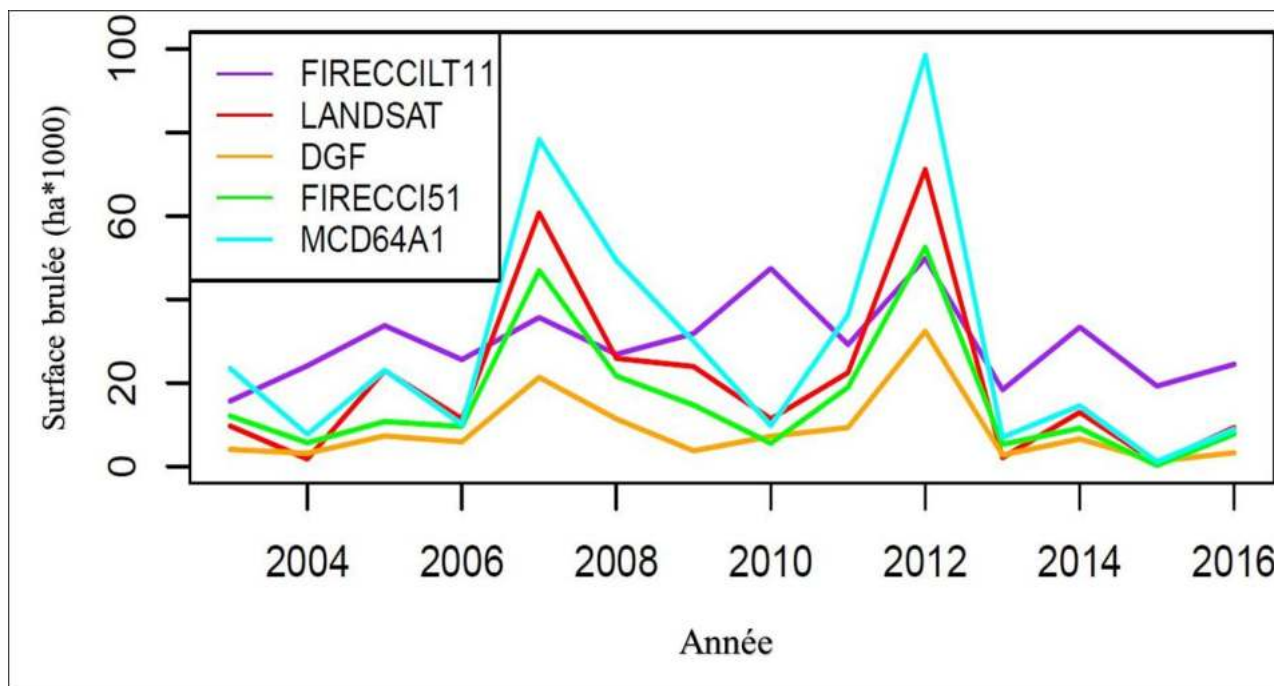


Figure 41. Diagramme comparative d'évolution annuelle des superficies parcourues par les feux dans la partie Est d'Algérie (période 2001-2016) selon les différentes bases de données utilisées.

Selon les résultats obtenus, le produit MCD64A1 détecte plus de surfaces brûlées surestimées que le Fire CCI et le LANDSAT. Alors que le produit Fire_CCI a détecté la surface la plus faible. Le produit MCD64A1 détecte plus de 400.000 ha de zones brûlées pendant la période d'étude par rapport au produit Fire_CCI qui détecte plus de 240.000 ha, alors que les données LANDSAT en détecte plus de 300.000 ha.

La récapitulative de la corrélation croisée entre les données de DGF et celle des données satellites testés pour chaque produit sont présentées dans la (Fig. 42). Cette corrélation croisée entre les surfaces brûlées entre les capteurs sur l'ensemble de la région d'étude montre que, la base de données LANDSAT était le mieux corrélé à MCD64A1 ($R^2=0.92^{***}$), suivi par DGF ($R^2=0.89^{***}$) et FIRECCI51 ($R^2=0.88^{***}$), la corrélation avec FIRECCILT11 était plus faible ($R^2=0.68^{**}$) mais toujours très significative. Donc les données satellitaires étaient plus corrélées à LANDSAT qu'à DGF.

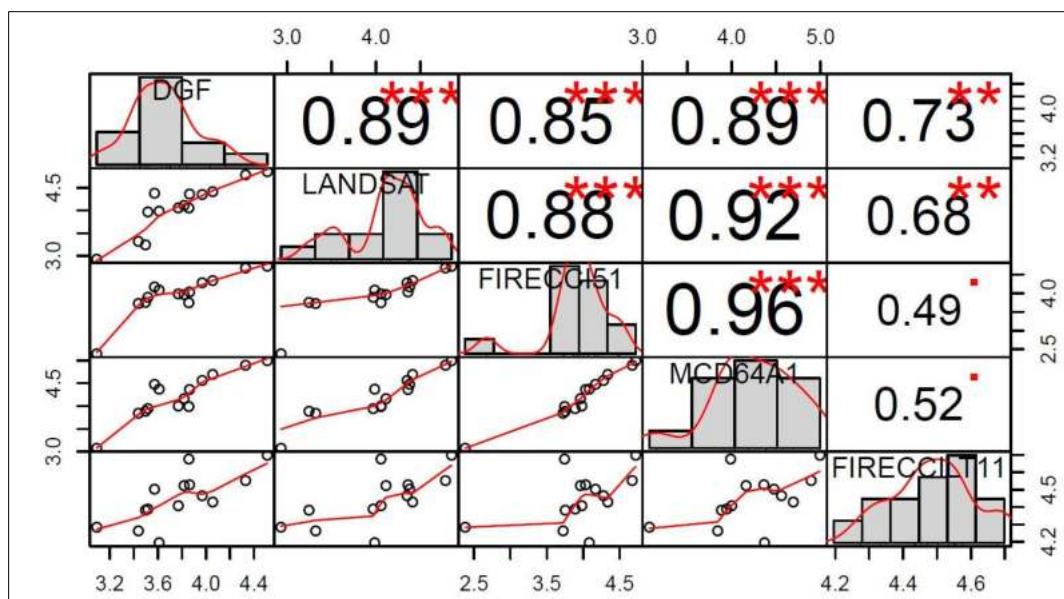


Figure 42. Corrélation croisée des surfaces brûlées annuelles entre les bases de données testées et les statistiques nationales de (DGF). Les valeurs représentent R^2 avec des niveaux de signification de 0,001 ***, 0,01 ** et 0,1*.

2.3. Variations spatiales dans la détection des zones brûlées dans la région

Nous avons cherché à savoir si l'évaluation générale de la détection des zones brûlées sur l'ensemble de la région variait spatialement à travers le gradient climatique algérien. Le tableau (17) résume les statistiques des surfaces brûlées obtenues à partir des données Landsat et celle de DGF pour chaque wilaya. Les surfaces brûlées varient entre 2445 ha à Oum Bouaghi et 68 833 ha à Skikda. Le rapport DGF/ LANDAT varie entre 28% et 628%, et illustrant la grande variabilité de la cohérence entre les deux bases de données. Ce résultat est trouvé à Tunis (Belhadj et al. 2018) qui indique également une forte sous-estimation dans les statistiques nationale tunisienne.

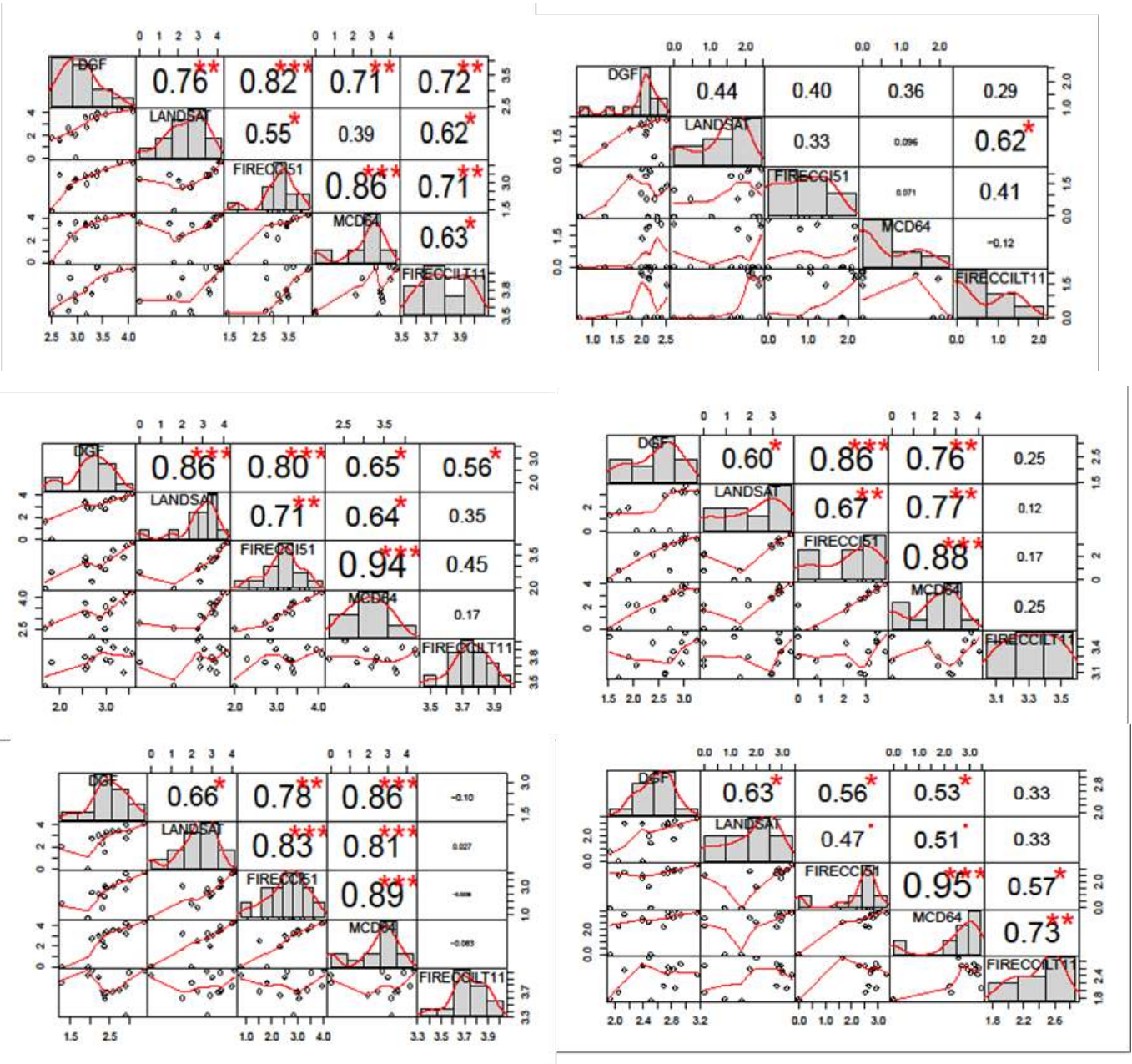
Tableau 17. Synthèse des superficies brûlées pour chaque wilaya dans la zone d'étude à partir de la base de données officielle de la DGF (Direction Générale des Forêts) et de la base de données LANDSAT. Le ratio LANDSAT/DGF représente l'erreur dans les données officielles.

Wilaya	DGF (ha)	LANDSAT (ha)	LANDSAT /DGF
Jijel	60,078	81.287	135%
Mila	7,730	2.186	28%
Skikda	68,833	140.941	205%
Annaba	44,337	57.351	129%
EL Tarf	56,257	151.093	269%
Constantine	18,089	23.235	128%
Souk-Ahras	46,072	42.996	93%
Guelma	20,799	45.289	218%
Setif	6,476	14.935	231%
Batna	29,929	58.930	197%
Oum-Bouaghi	2,445	1.034	42%
Khenchela	5,860	37.213	635%

2.4. Corrélations croisées annuelles

Les corrélations croisées annuelles entre les données de chaque capteur sont présentées dans la Fig. 43. Pour la plupart des wilayas, la surface brûlée dans les données de LANDSAT est corrélée aux autres bases de données avec $R^2 > 0.5$. FIRECCI51 était la base de données le mieux corrélée à LANDSAT pour 7 wilayas, alors que 5 wilayas pour MCD64A1.

En moyenne, FIRECCILT11 a été le moins corrélé à LANDSAT, mais a quand même surpassé les autres capteurs dans 3 wilayas. FIRECCI51 a été le plus cohérent dans les corrélations avec LANDSAT avec une corrélation entre 0.33 et 0.86, alors que les corrélations avec MCD64A1 varient entre 0.06 et 0.92 et les corrélations de FIRECCILT11 varient entre 0.007 et 0.79. Les données DGF étaient les mieux corrélées à LANDSAT dans 6 wilayas, suivies par FIRECCI51 dans 4 wilayas et MCD64A1 dans 3 wilayas.



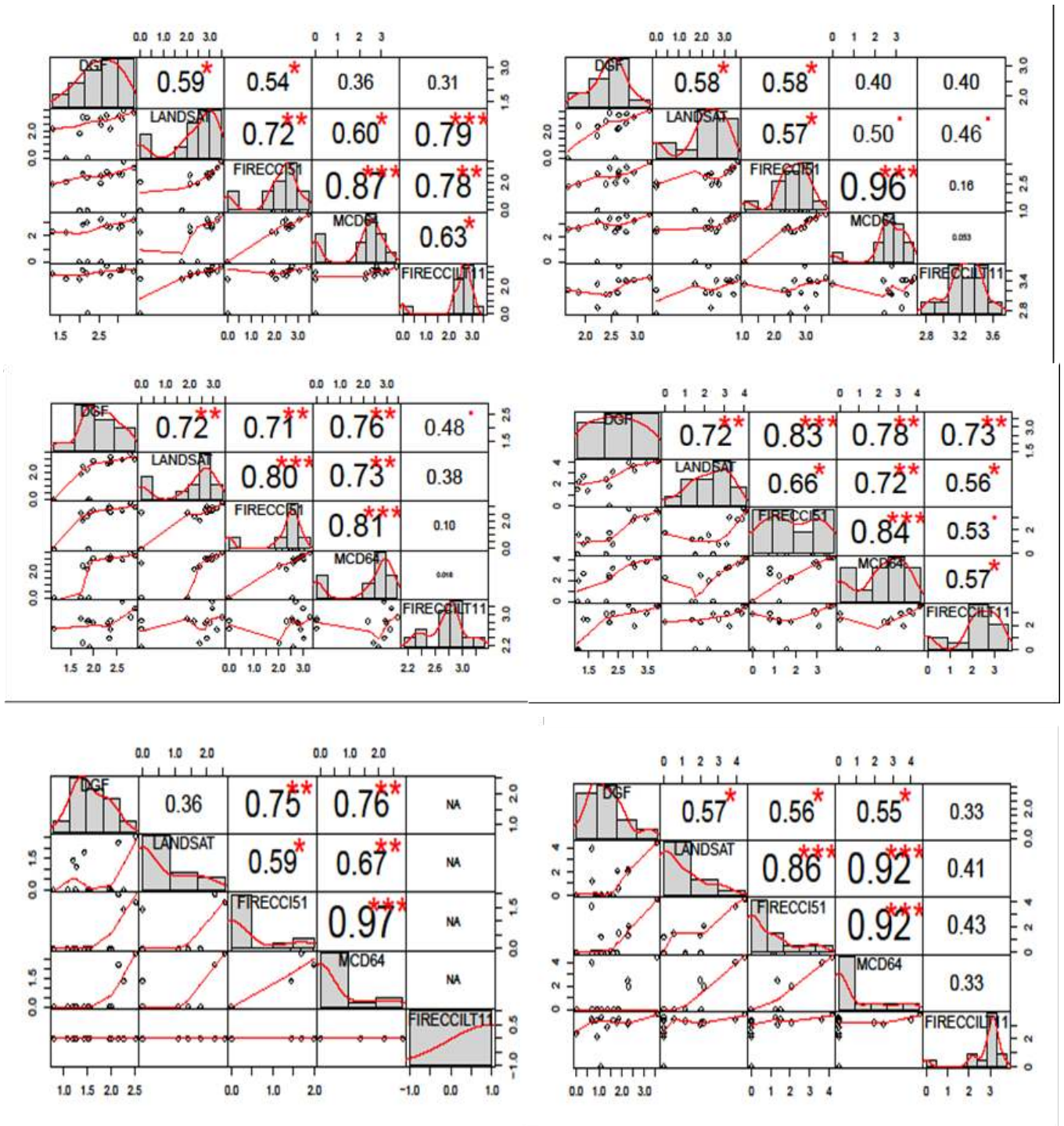


Figure 43. Corrélation croisée entre toutes les bases de données utilisées de superficies brûlées pour chaque Willaya.

2.5.Effet de l'occupation du sol sur la détection des zones brûlées

Afin d'aller plus loin dans l'étude des variations régionales des performances des capteurs pour détecter les zones brûlées dans la zone d'étude, nous avons tracé les relations entre le taux de couverture des forêts/maquis avec le pourcentage des zones brûlées par rapport

à la base de données LANDSAT (Fig. 44A) et le coefficient de corrélation R^2 entre les surfaces brûlées identifiées par chaque du capteur et le LANDSAT (Fig. 44B).

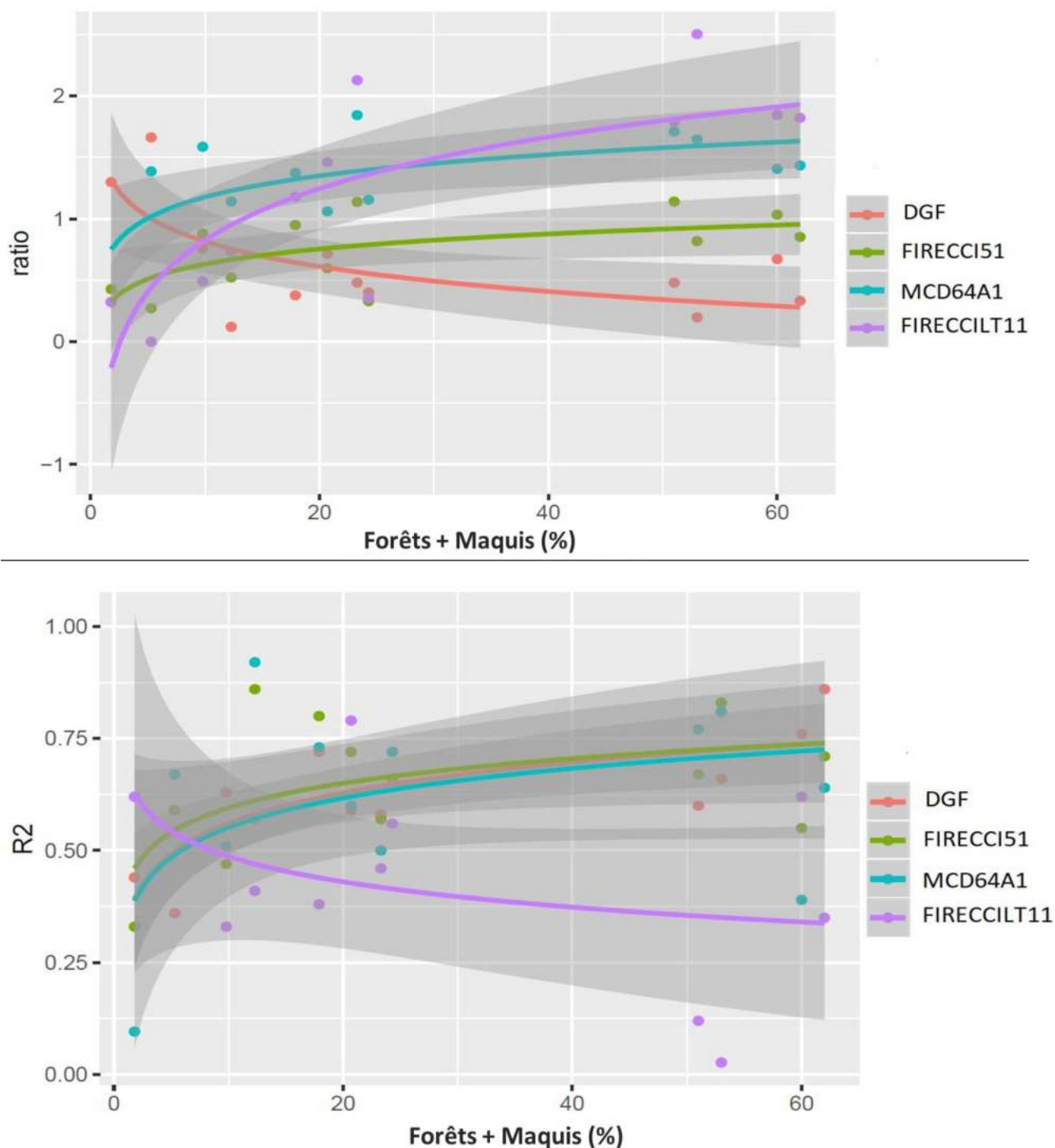


Figure 44. Pourcentage de surface brûlée (A) et coefficient de corrélation R^2 (B) entre DGF (orange), FIRECCILT11 (violet), FIRECCI51 (vert) MCD64A1 (bleu) et LANDSAT, en fonction du taux de couvert forestier et maquis dans chaque wilaya.

Nous observons un rapport croissant avec la couverture des forêts/maquis pour tous les bases de données avec des valeurs inférieures à 1 pour les maquis et supérieures à 1 pour les forêts denses avec FIRECCILT11 suggérant une sous-estimation de la couverture maquis (valeur variante entre 0,05 et 0,6) et une surestimation de la couverture forêt (ratio variant entre 1,5 et 2,5). Cette tendance est également observée, pour FIRECCI51, le rapport le plus élevé étant de 1 pour la couverture dense et entre 0,3 et 0,8 pour la couverture maquis. Ce rapport est plus stable pour la couverture des forêts/maquis pour MCD64A1 variant entre 1,1 et 1,6. Les estimations des surfaces brûlées de la DGF suivent une courbe inversée, avec une surestimation dans les maquis (ratio variant de 1,3 à 1,7) et une sous-estimation des forêts (valeur variant de 0,1 à 0,7), car les données étaient dispersées entre plusieurs institutions comme la direction générale des forêts, de l'Agriculture, la protection civile, la conservation des forêts,Etc. Elles n'étaient pas classifiées d'une manière homogène et organisée et ne fournissaient pas les mêmes informations pour un incendie donné, en particulier, dans le passé lorsqu'ils ont été visuellement déduits des observations sur le terrain, sans protocole standardisé sur la taille minimale du feu.

En ce qui concerne les coefficients de corrélation, nous observons une corrélation croissante avec la couverture (forêt/maquis) pour FIRECCI51, MCD64A1 et DGF avec des réponses très variables entre 0,1 et 0,65 pour les maquis et entre 0,3 et 0,92 pour les forêts. Ce schéma est inversé pour FIRECCILT11 avec des corrélations décroissantes en fonction du couvert végétal variant de 0,3 à 0,65 pour les maquis et de 0,02 à 0,78 pour les forêts denses.

2.6. Localisation des départs de feux entre 2001 et 2016

Etant donné qu'aucune carte concernant les départs de feux n'est disponible dans la zone d'étude, nous avons entrepris de les localiser à partir des archives disponibles dérivé par le MODIS collection MCD14ML 5 disponible depuis 2001. Les erreurs liées à la localisation des points de départ de feux ont été référencées comme variant entre 90 m et 2200 m pour l'incertitude spatiale (Hantson et al. 2013), et 70% des déclenchements ont été estimés avec moins de 12 h pour l'incertitude temporelle (Benali et al. 2016).

Le croisement SIG des couches de localisation des feux actifs et des différentes formations végétales au niveau de la zone d'étude permet d'obtenir la carte de la localisation spatiale de tous les départs de feux (figure 45). Durant la période 2001-2016, 21.039 départs de feux ont été enregistrés au niveau de la zone d'étude.

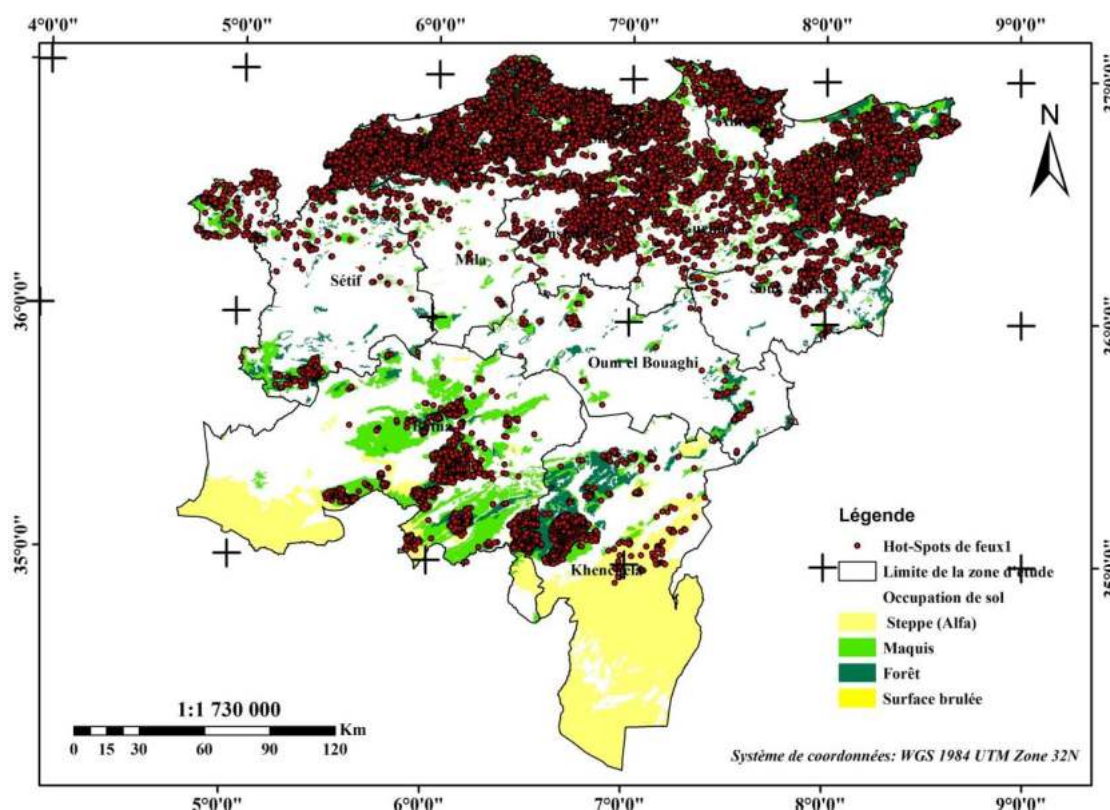


Figure 45. Fréquence des feux actifs dans la partie orientale d'Algérie durant la période (2001-2016).

Pour la région des Aurès la fréquence des incendies varie considérablement d'une commune à l'autre (Fig.46), la commune de M'sara enregistre le nombre de feux de forêts le plus élevés et la surface brûlée la plus grande sur les communes étudiées de la région des Aurès avec un pourcentage de 42,8 %. On note que les feux de forêts se concentrent surtout dans les forêts de Beni Imloul.

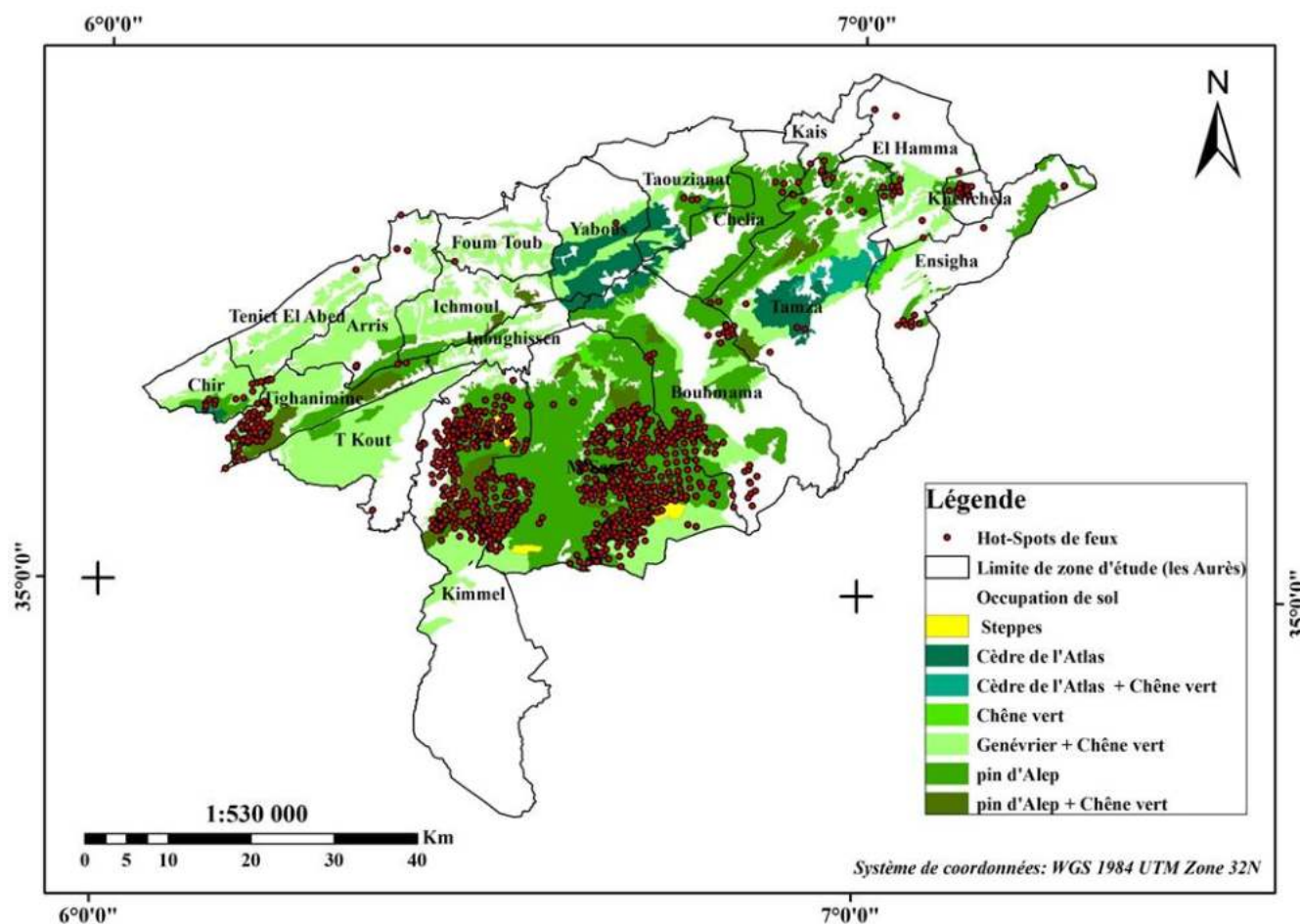


Figure 46. Fréquence des feux actifs dans la région des Aurès durant la période (2001-2016).

2.7. Répartition saisonnière du nombre d'incendies

La fréquence mensuelle des feux au cours des 15 années (2001-2016) évolue durant une période de 5 mois, de juin à octobre (Fig. 47). Cette période coïncide avec la saison sèche favorisant ainsi le développement des feux de forêts. C'est durant le mois le plus chaud et le plus sec de l'année (août) que l'on enregistre le plus grand nombre de foyers avec 9500 départs de feux, soit 47%. Les feux s'étendant aussi partiellement en juin et octobre avec respectivement 1203 et 1483 incendies en moyenne par an avec une incertitude accrue au printemps.

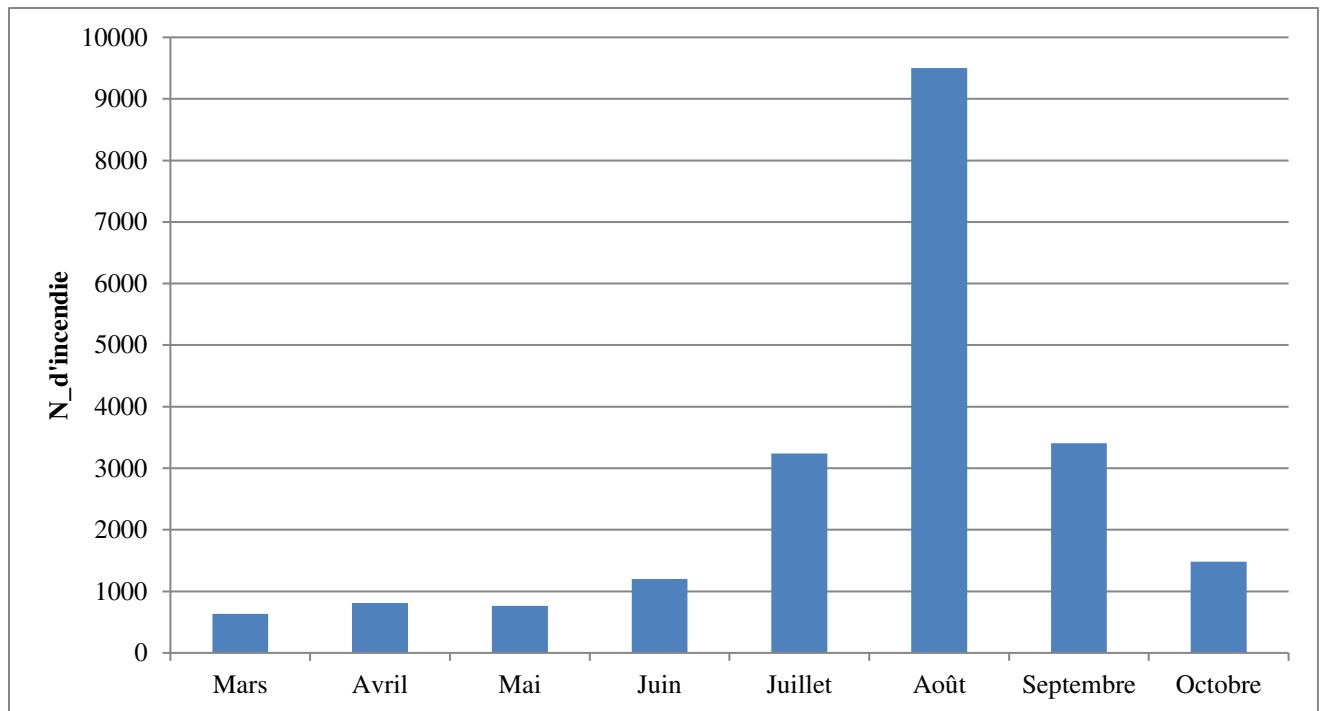


Figure 47. Répartition saisonnière de nombres des incendies pour les périodes 2001 à 2016 dans le la zone d'étude.

Chapitre V :

Modélisation du risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès

1. Modélisation du risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès

Les méthodes classiques généralement utilisées dans la région des Aurès pour la prévention et la lutte contre les incendies demandent du temps et ne sont pas toujours efficaces au vu de la complexité et de la diversité des écosystèmes forestiers. Dans ce contexte, la modélisation de risque de feux de forêts permet d'une part de minimiser les pertes économiques, d'orienter et d'optimiser, dans le court et le moyen terme, les moyens d'investissement, notamment les infrastructures, les équipements et les opérations d'aménagement anti-feu en milieu forestier (Assali et al. 2016) et d'autre part, pour aider les gestionnaires dans leurs actions de prévention, d'intervention et leurs actions de planification territoriale pour identification des zones les plus exposées au risque d'incendies.

Diverses méthodes peuvent être mises en œuvre afin de modéliser et de modéliser le risque. Elles varient en fonction des objectifs, des moyens et des différentes formes de modélisation utilisées. Dans notre étude, le processus de hiérarchie analytique (AHP) intégré aux systèmes d'information géographique (SIG) a été utilisé pour modéliser et cartographier le risque d'incendie de forêt dans la région des Aures. L'étude a été réalisée en tenant compte des paramètres objectifs qui peuvent influencer la vulnérabilité aux incendies de forêt, tels que les paramètres écologiques (la combustibilité des formations végétales), les paramètres stationnels (pente, exposition et topo-morphologie) et les facteurs anthropiques. Le processus de hiérarchie analytique (AHP), introduit par Saaty (1977), est une méthode qui fournit une technique basée sur un modèle mathématique pour l'analyse de scénarios complexes et qui est sophistiquée dans sa simplicité. Cette technique est devenue très efficace pour aider les décideurs à analyser et structurer un large éventail de problèmes (Golden et al. 1989).

Selon les chercheurs (Dagorne et al. 1994 ; Erten et al. 2004 ; Adab et al. 2013 ; Assali et al. 2016), la modélisation du risque d'incendie de forêt intègre trois sous-indices, il s'agit : la topo-morphologie, la combustibilité et le facteur anthropique en tant que paramètres auxquels des pondérations ont été attribuées en fonction de l'influence de chaque paramètre sur le risque d'incendie de forêt.

2. Démarche d'étude

L'approche adoptée pour cette étude est basée sur l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) et du processus de hiérarchie analytique (AHP) pour estimer les zones à risque d'incendie de forêt dans la région d'Aurès. Le processus de hiérarchie analytique (AHP) décompose un processus MCDM complexe en un système de hiérarchies. L'étape finale de l'AHP traite de la structure d'une matrice $m \times n$ (où m est le

nombre de alternatives et n est le nombre de paramètres). La matrice est construite en utilisant l'importance relative des alternatives en fonction de chaque critère.

La méthode (AHP) traite de problèmes complexes qui exigent la considération de plusieurs critères/alternatives simultanément, sa capacité à incorporer les données et les jugements des experts dans le modèle de manière logique, à fournir une échelle pour mesurer les éléments intangibles et une méthode d'établissement des priorités pour traiter l'interdépendance des éléments dans un système permettant la révision des jugements dans un court terme (Saaty 1977). Cette méthodologie est capable de fragmenter une situation complexe et non structurée en ses éléments composants, d'organiser ces éléments dans un ordre hiérarchique (critères, sous-critères, alternatives, etc.) d'attribuer des valeurs numériques de 1 à 9 aux décisions relatives à l'importance de chaque critère sur la base de ses caractéristiques de synthétiser les décisions pour déterminer les priorités globales des critères/sous-critères/alternatives (Saaty 1977).

L'objectif de la présente étude est de proposer une méthodologie basée sur les recherches précédemment présentées en matière de modélisation et de cartographie du risque d'incendie de forêt. En déterminant les trois principaux critères liés aux incendies de forêt : la topographie, la végétation et le facteur humain, en utilisant des paramètres et des indices de risques liés aux incendies adaptés aux zones méditerranéennes semi-arides et subhumides d'Afrique du Nord, avec l'utilisation de la pondération de l'expertise en gestion des terres, du processus de hiérarchie analytique (AHP) et du SIG (Fig. 48).

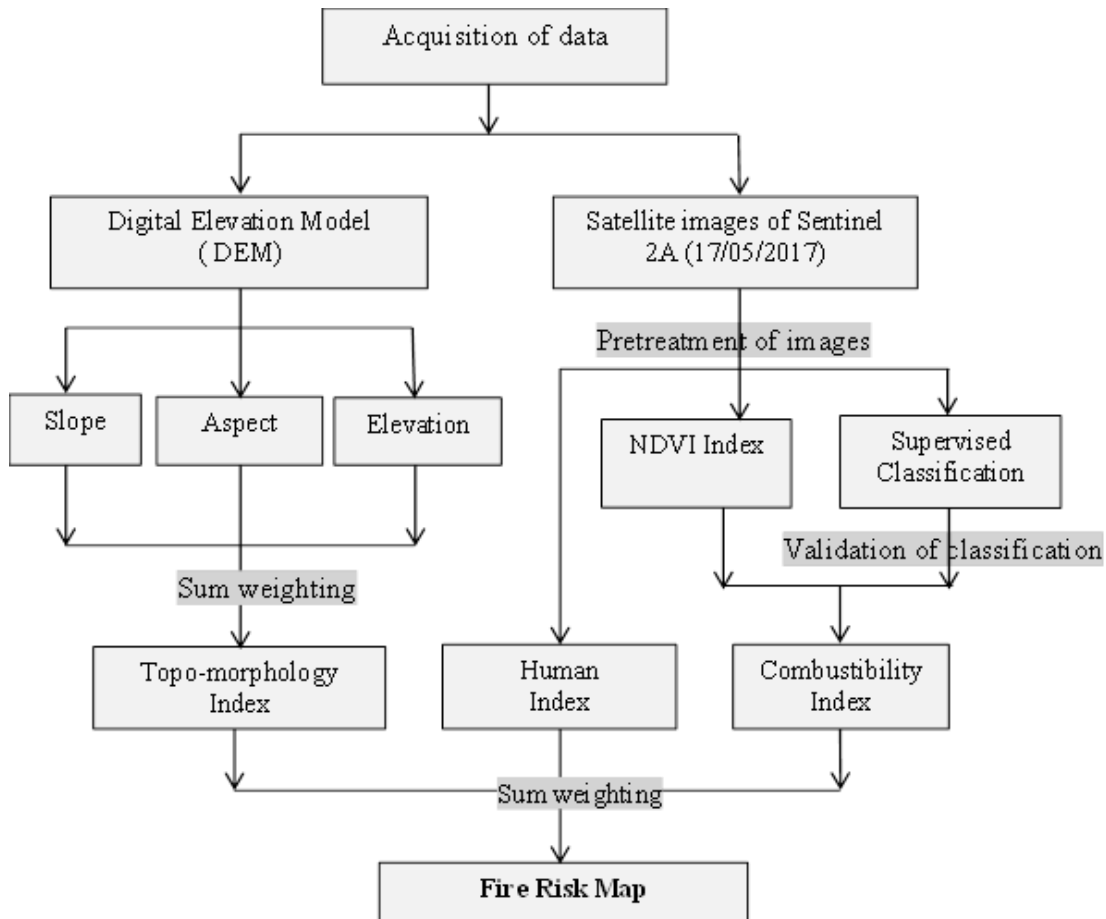


Figure 48. Méthodologie adopté de la modélisation de risque d'incendie dans la région des Aurès.

2.1. Prétraitement des données

La première étape du prétraitement des données d'images est la délimitation de la zone d'étude après la mosaïque de 2 scènes, ainsi que la correction atmosphérique des images. La seconde étape consiste à produire une carte thématique montrant la distribution des classes de végétation dans la zone d'étude en utilisant la méthode de classification supervisée avec le logiciel ENVI 5.1.

Les classes ont été déterminées sur la base des caractéristiques spectrales des objets géographiques, et validées par les informations relevées dans la zone d'étude. Ces informations sont résumées de manière essentielle dans la description des formations végétales, et en relevant leurs coordonnées géographiques GPS (Global Positioning System). En utilisant le programme Google Earth, des points d'échantillonnage supplémentaires ont été pris pour les lieux difficiles d'accès.

2.2. Choix et hiérarchisation des critères

L'élaboration de modèle finale de risque passe en général par plusieurs étapes :

- Définition et analyse des paramètres influençant l'éclosion et la propagation d'un feu.
- Constitution d'un indice de risque traduisant la contribution d'un ou plusieurs paramètres au risque d'incendie.
- Estimation du niveau de risque : les résultats obtenus à partir des indices de risque sont classifiés en niveaux de risque.

Dans le cas de cette étude, trois critères ont été choisis dans notre analyse (AHP), la topomorphologie, la combustibilité de la végétation et le facteur anthropique. Ces critères ont été extraits des données du satellite sentinelle et du modèle numérique d'élévation (MNT) et ont été calculés en utilisant les outils d'analyse spatiale du SIG.

2.2.1. Indice de combustibilité de la végétation

La combustibilité correspond à la capacité de la végétation à propager le feu, et à libérer des quantités de chaleur plus ou moins importantes lors de la combustion, en fonction de la structure et des espèces végétales dominantes de la forêt (Faleh et al. 2012). La combustibilité est la propriété qu'a un végétal ou un ensemble de végétaux à propager le feu. Cette notion intervient à une échelle plus grande que l'inflammabilité; en effet la combustibilité caractérise plutôt une formation végétale entière avec les différentes strates qui la composent. Les paramètres souvent utilisés pour décrire la combustibilité sont de deux ordres:

- la puissance du front de flamme,
- la vitesse de propagation du front (Valette 1990).

L'analyse des variations de la combustibilité permet de hiérarchiser les espèces entre elles selon ce critère et de suivre l'évolution de l'indice du risque d'éclosion d'incendies que présentent les principales espèces en tenant compte de leur place respective dans les différentes formations forestières (Valette 1990).

L'indice de combustibilité ou l'indice d'intensité potentielle du feu a été estimé par la formule ci-dessous (Equation1), qui a été proposée par (Mariel 1995).

$$IC = 39 + 0.23 BV (E1 + E2 - 7.18) \dots \dots \dots (1)$$

Où :

BV : Biovolume de la formation végétale ;

E1 : Note de combustibilité pour les cimes d'arbres dominants ;

E2 : Notes de combustibilité pour les plantes ligneuses ou herbacées dominantes.

Dans cette étude, le calcul de la combustibilité est basé sur la combinaison de la classification de la végétation dominante de la zone d'étude en utilisant l'outil de classification supervisée (maximum likeli-hood) sur le logiciel Arc GIS 10.2.2, et les quantités de biomasse combustible qui sont estimées à partir de la différence normalisée de l'indice de végétation (NDVI) en utilisant l'outil de calcul raster sur ArcGIS. Le NDVI est défini comme la différence entre la réflectance du rouge et de l'infrarouge proche (NIR) divisée par leur somme (Tucker 1979), et il est calculé à partir de ces valeurs individuelles comme suit (Equation 2) :

$$NDVI = \frac{(PIR-R)}{(PIR+R)} \dots\dots\dots (2)$$

Cette étape de calcul de la combustibilité a été réalisée à partir de deux images satellites récentes prises le 17 juin 2017 par le nouveau satellite SENTINEL2A, acquis en saison sèche, où l'on peut distinguer les différents types de couverture terrestre. Le satellite est fournir d'images multi-spectrales à hautes résolution (10 m) avec 13 bandes spectrales, et sa large couverture (290 km).

2.2.2. Index topo-morphologique

La topographie est également l'un des principaux facteurs qui influencent la propagation d'un incendie de forêt. La pente détermine l'inclinaison des flammes et donc leur vitesse de propagation (Merdas 2007). L'exposition a également un rôle indirect dans la progression de l'incendie, car elle détermine le type de végétation, l'influence des vents et le rayonnement solaire (Baara 2014). L'indice topo-morphologique est donc calculé par la combinaison de ces trois paramètres physiques, la pente, l'exposition et l'altitude, et ces trois composantes ont été extraites du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude.

2.2.3. Indice humain

Le facteur anthropique est l'un des principaux facteurs qui aggravent la propagation de l'incendie. L'indice humain est lié à l'occupation et à l'activité humaine, cet indice a été réalisé en calculant l'indice de la NDBI normalisée par différence développée par (Zha et al. 2003). Le développement de l'indice NDBI a été basé sur la réponse spectrale unique des terrains bâtis qui ont une réflectance plus forte dans la gamme des longueurs d'onde SWIR (moyen infrarouge) et dans la gamme des longueurs d'onde NIR (proche infrarouge). Cet indice a été exprimé par la formule suivante (équation 3) :

$$NDBI = \frac{(SWIR-NIR)}{(SWIR+NIR)} \dots\dots\dots (2)$$

Les valeurs de l'indice de constitution des écarts normalisés se situent entre -1 et +1. Les valeurs négatives de l'INDB représentent les masses d'eau, tandis que les valeurs plus élevées représentent les zones bâties. La valeur de l'IBDN pour la végétation est faible (Zha et al. 2003).

3. Prise de décision à critères multiples

3.2. Cartographie des sous-critères et attribution de scores

Dans un premier temps, tous les indices et paramètres ont été cartographiés pour former des couches de sous-critères qui intégrant dans la modélisation finale du risque d'incendie de forêt (Fig. 49, 50, 51, 52 et 53).

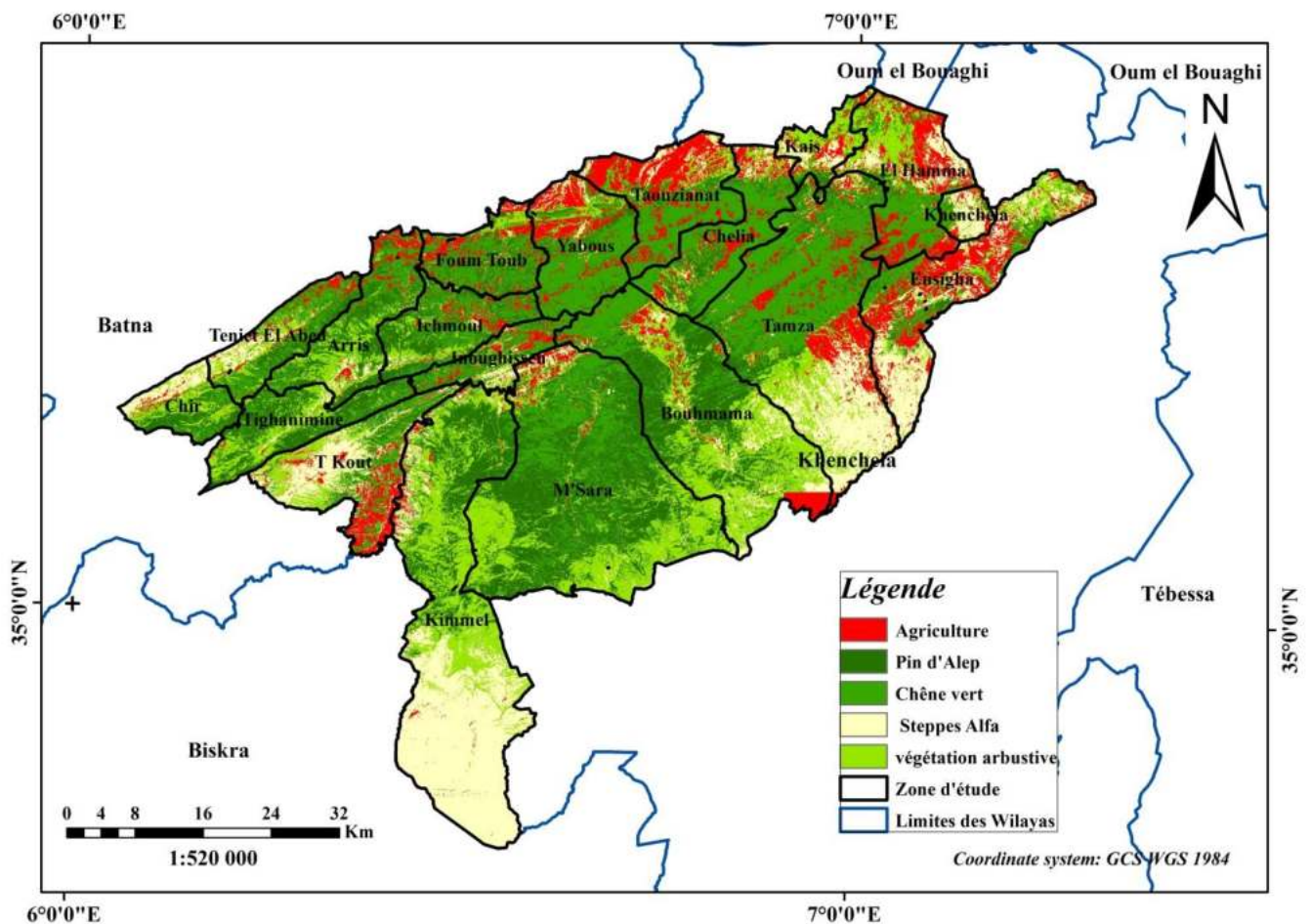


Figure 49. Carte d'occupation du sol de la région des Aurès.

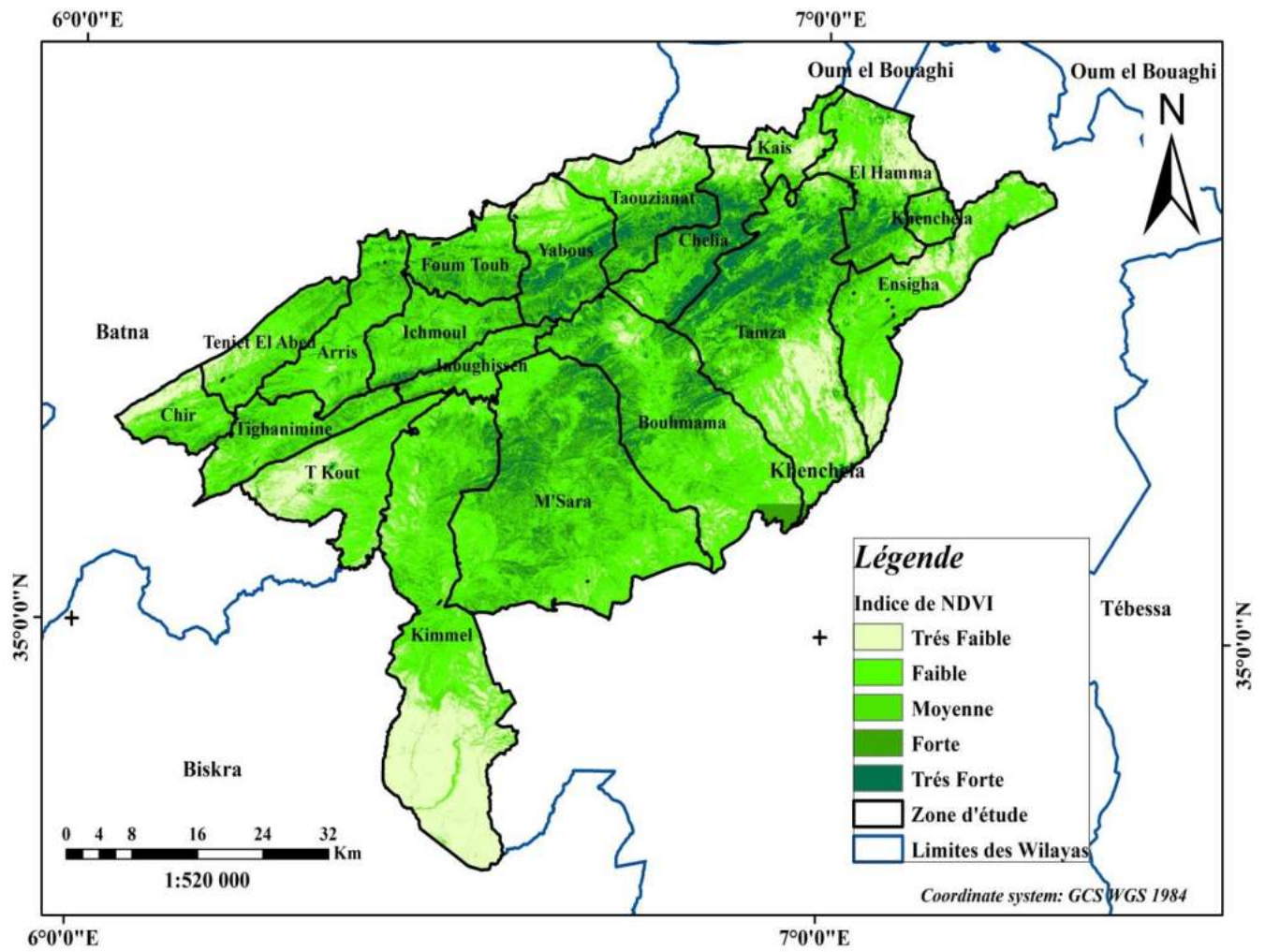


Figure 50. Carte d'indice de NDVI de la région des Aurès.

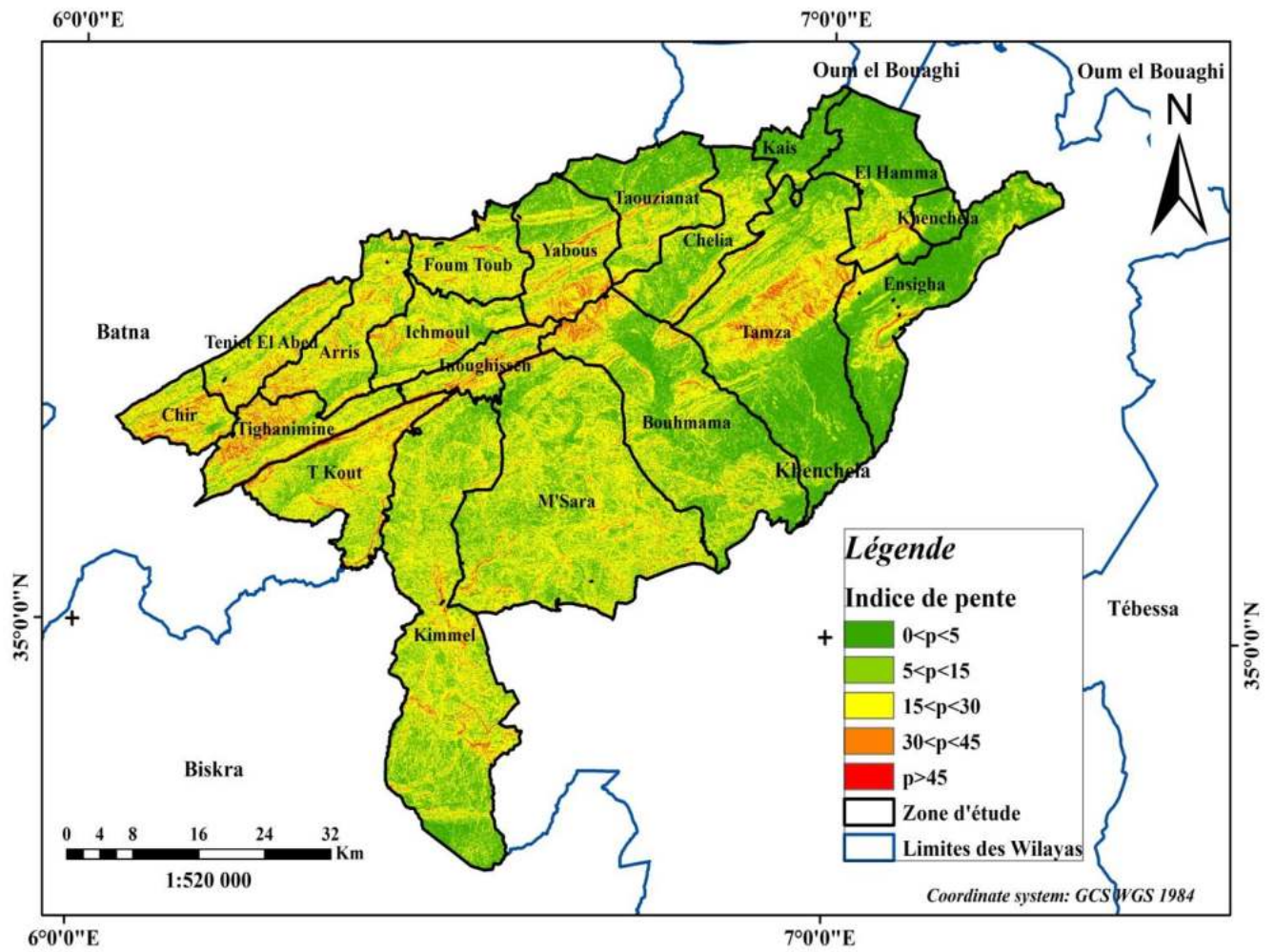


Figure 51. Carte d'indice de pente de la région des Aurès.

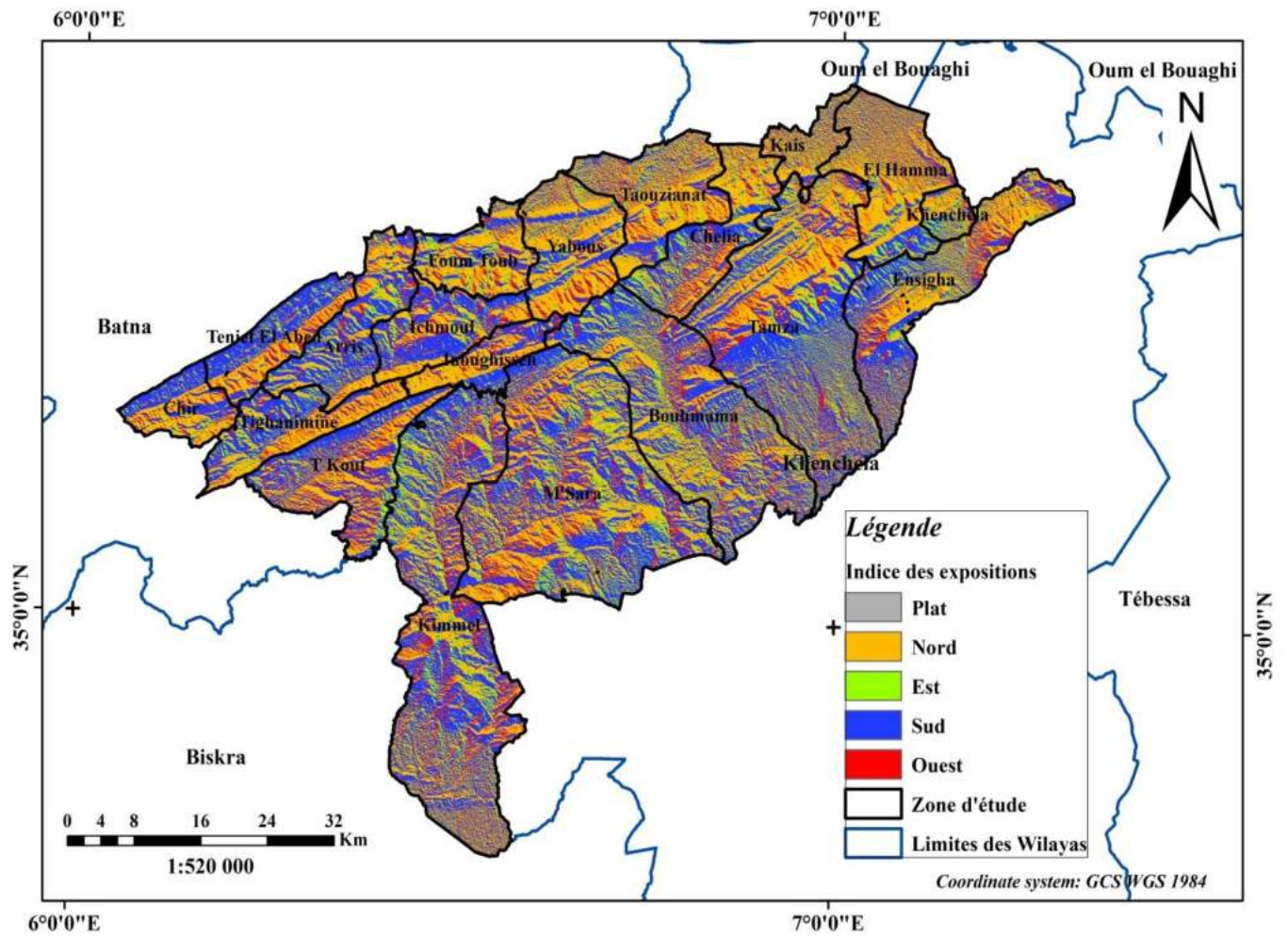


Figure 52. Carte d'indice des expositions de la région des Aurès.

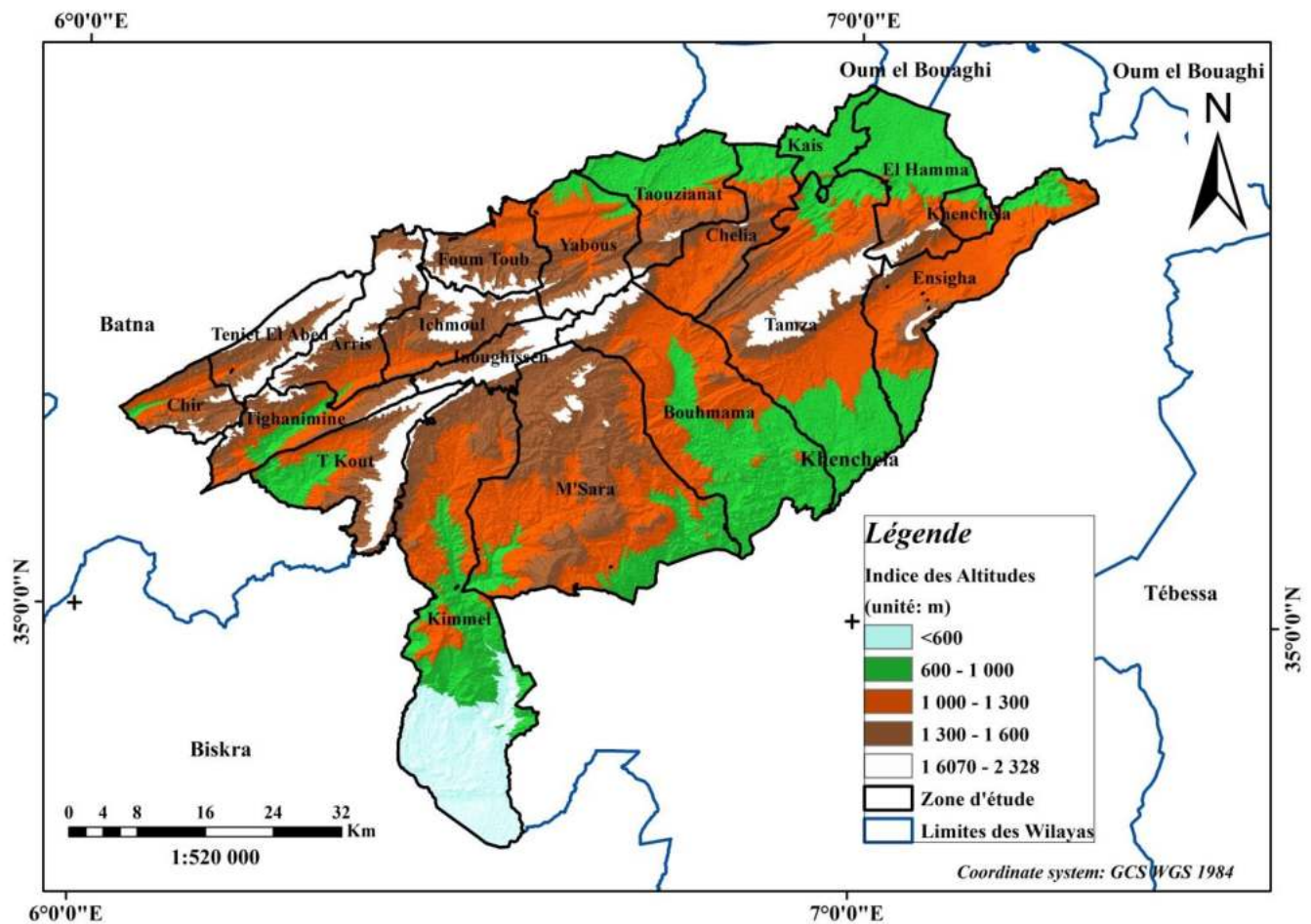


Figure 53. Carte des Altitudes de la région des Aurès.

L'étape suivante consiste à reclasser chaque couche de sous-critères en intervalles de valeurs à l'aide de l'outil de reclassification ArcGIS (Tab. 18). Ensuite, des scores de 1 à 5 ont été attribués à chaque classe selon le degré d'intensité de chaque classe sur le risque, où 1 représente une classe de valeur favorable.

Tableau 18. Pondération des paramètres utilisés pour déterminer les zones exposées au risque d'incendie.

Factors	Parameters and indices	Values	Scores
Topo-Morphology	slope	Very Low	1
		Low (P<15%)	2
		Medium (15<P< 30%)	3
		High (30<P< 45%)	4
		Very high (P>45%)	5
	Aspect	Dish	1
North		2	
East		3	
South		4	
West		5	
Topo-morphology	Plain (P <3%)	1	
	Low piedmont (3< P <12.5%)	2	
	Medium piedmont (12.5< P <25%)	3	
	High piedmont (25< P <35%)	4	
	Mountain (P> 35%)	5	
Combustibility	land use	Agriculture	1
		Alfa steppe	2
		Herbaceous vegetation	3
		Holm oak	4
		Aleppo pine	5
	NDVI	Very Low	1
		Low	2
		medium	3
		High	4
		Very high	5
Anthropogenic	Human index	Very low	1
		Low	2
		Medium	3
		High	4
		Very high	5

3.3. Décisions multicritères

La méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP) fournit des poids standardisés dont la somme est égale à "1". La méthode est basée sur une série de comparaisons par paires de ces critères à partir de la construction d'une matrice carrée prenant en compte l'importance relative d'un critère par rapport à un autre pour l'établissement de ces critères en utilisant l'échelle de Saaty (Tab. 19).

Tableau 19. Pondération les indices selon l'échelle de Saaty.

Criterion	Combustibility	Topo-morphology	Anthropogenic
Combustibility	1	3	5
Topo-morphology	1/3	1	3
Anthropogenic	1/5	1/3	1

3.4. Pondération des critères

Pour estimer le coefficient de pondération, il faut calculer le vecteur propre (Vp) de la matrice de comparaison par paires, les valeurs de ces vecteurs propres (Vp) sont déterminées en calculant leur moyenne géométrique pour chaque critère et le coefficient de pondération pour chaque critère est déterminé en standardisant le vecteur propre en divisant chaque vecteur propre par leur somme et à condition que la somme des coefficients de pondération soit égale à 1 (Tab. 20).

Tableau 20. Valeurs de pondération pour les différents critères.

Criterion	Weight
Combustibility	0.63334572
Topo-morphology	0.26049796
Anthropogenic	0.10615632
Total	1

L'étape finale consiste à calculer un ratio de cohérence (RC) pour mesurer la cohérence des résultats des décisions par rapport à de grands échantillons de décisions purement aléatoires. Saaty suggère que si ce ratio dépasse 0,1, l'ensemble des décisions peut être trop incohérent et peu fiable. Et si CR est égal à 0, cela signifie que les décisions sont parfaitement cohérentes (Saaty 1977). Le ratio de cohérence (CR) dans cette étude est égal à 0,09.

4. Résultats et discussions

Sous indices de décision ont été rassemblés en trois critères principales, la combustibilité, la topo-morphologie et l'indice humain ont été établis (Fig. 54, 55 et 56) par la

méthode de la somme pondérée en fonction de leurs poids. Chaque couche de critère standardisée a été multipliée par son coefficient de pondération correspondant.

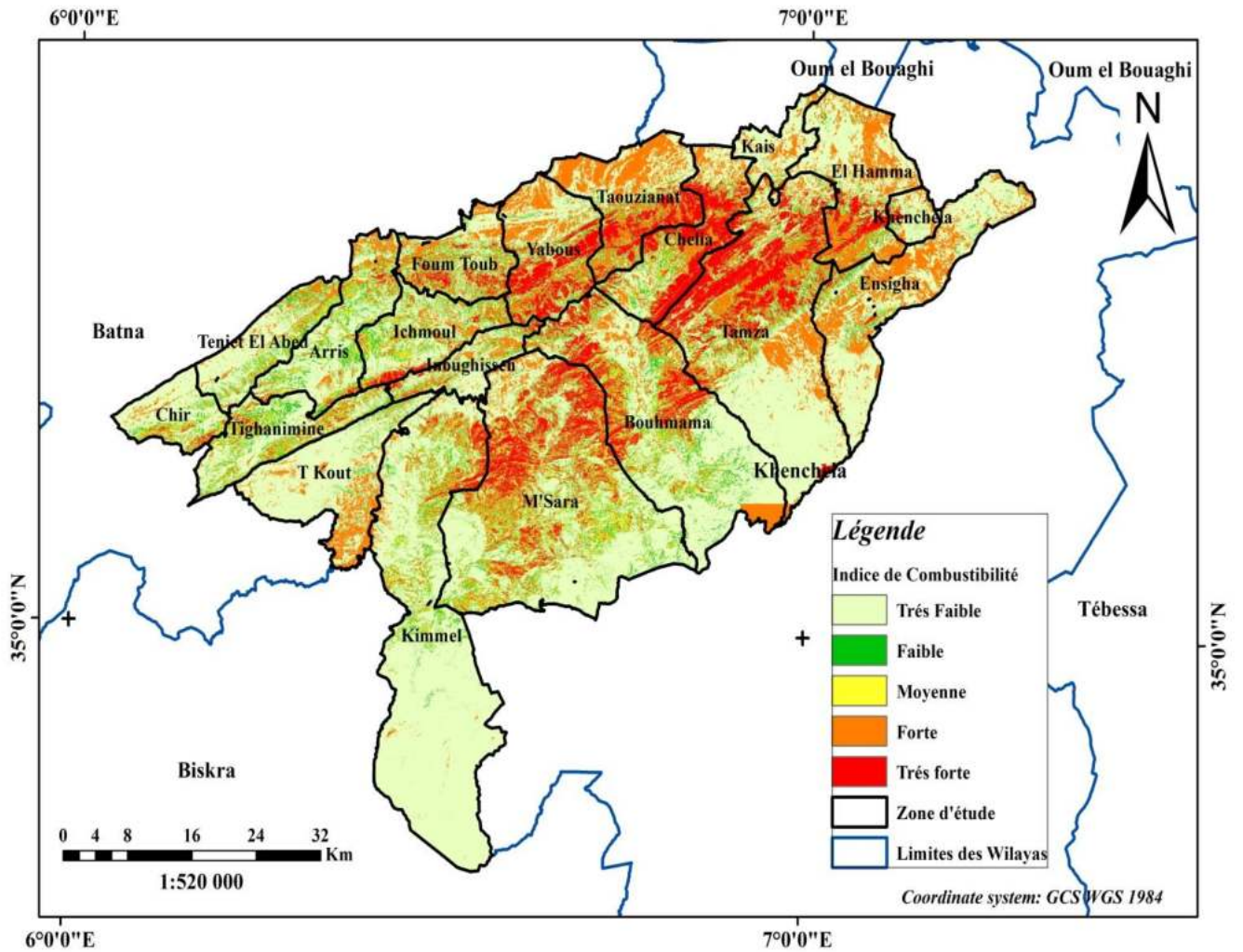


Figure 54. Carte d'indice de combustibilité de la région des Aurès.

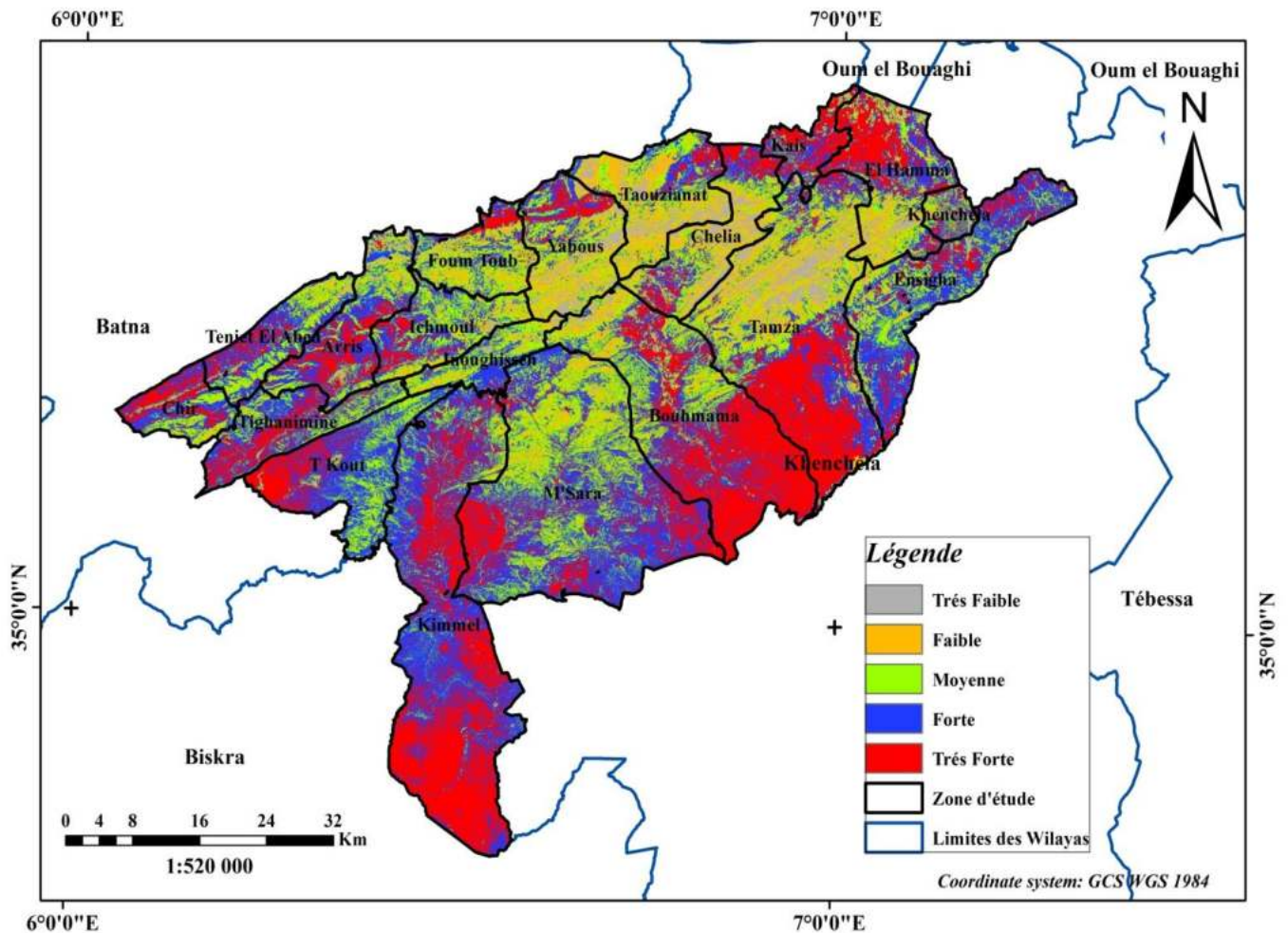


Figure 56. Carte d'indice humaine dans la région des Aurès.

4.2. Indice de risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès

La combinaison par la méthode de la somme pondérée basée sur leurs poids des trois couches résultantes (indice de combustibilité, indice de topo-morphologie et indice humain) a été utilisée pour délimiter les niveaux de risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès.

La carte finale (Fig. 57) et le diagramme (Fig. 58) montrent les différents niveaux de risque d'incendie de forêt dans la zone d'étude.

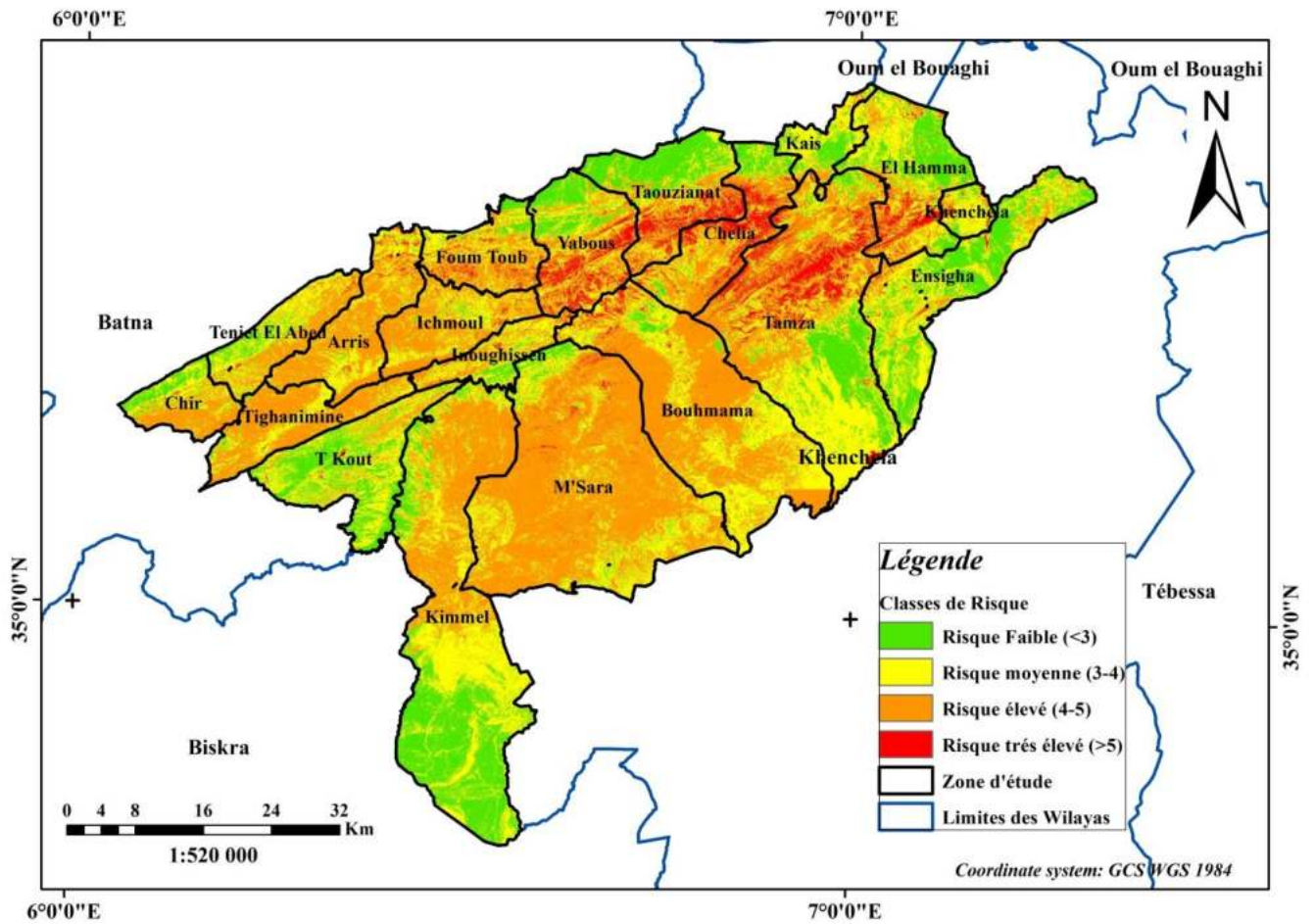


Figure 57. Carte du risque d'incendie de forêt de la région des Aurès.

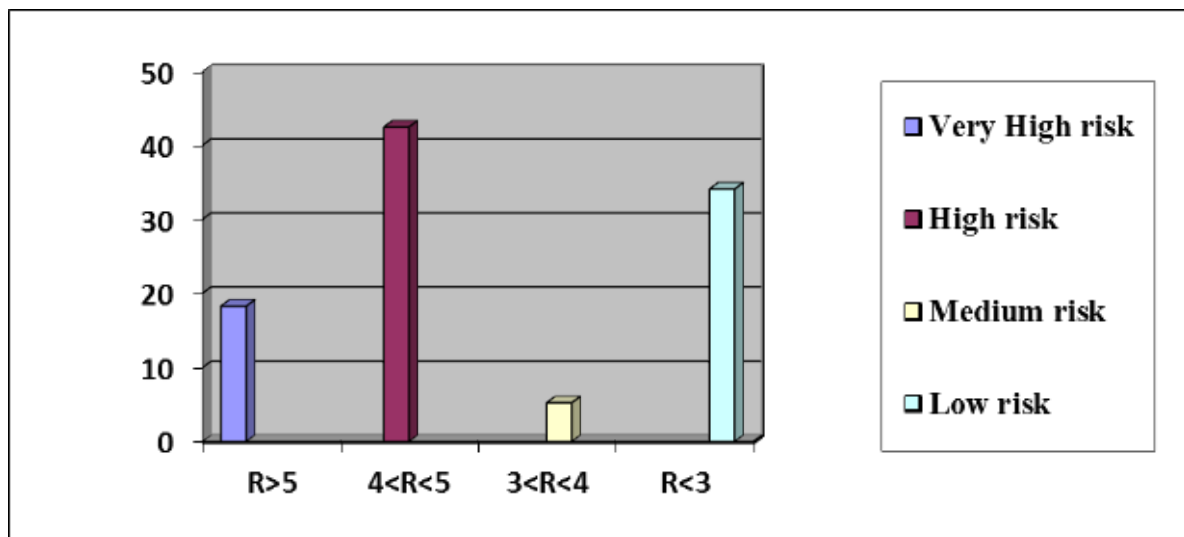


Figure 58. Diagramme de différents niveaux de risque d'incendie de forêt dans la région des Aurès.

D'après la carte finale (Fig. 57) et le calcul des surfaces de chaque niveau de risque (Fig. 68), on peut dire que la carte met en évidence la prédominance de la classe à risque

élevé avec une surface de plus de 169 541,34 ha, (taux de 42,42%). Toutes ces zones sont couvertes de pin d'Alep, c'est une essence très sensible aux incendies, mais peu vulnérable à l'échelle de l'espèce car elle tire parti du passage du feu pour accroître son emprise, à condition que les incendies ne soient pas trop fréquents, suivi par la classe à faible risque représente 34,05 % de la surface totale ; elle est couverte de terres agricoles, de terres nues et de zones bâties. La classe à risque très élevé est bien représentée avec une moyenne de 18,28% de la surface ; il est constitué d'un peuplement mixte de pin d'Alep et de chêne vert. La classe à risque moyen est importante, mais elle ne représente que 5,24 % de la superficie, et il existe uniquement une végétation herbacée.

En Algérie, de nombreuses études ont été effectuées pour évaluer le risque d'incendie de forêt. (Guettouche et Derias 2013) et (Okacha et al. 2017) ont réalisé des études similaires sur d'autres régions de la forêt algérienne (la région de la touffe de Bouzareah et les forêts de Saïda respectivement) et ont constaté que le total du risque d'incendie de forêt est fortement influencé par la végétation forestières, considérant la valeur du poids attribué à ce paramètre.

Dans cette étude, selon les indices liés au risque d'incendie, l'analyse de risque a été soumise à la combustibilité de la végétation (pin d'Alep et chêne vert) qui sont les espèces les plus dominantes dans la zone d'étude. À la prédominance de l'exposition sud qui crée des conditions plus favorables à une inflammation rapide et à la propagation des flammes, et à des facteurs anthropiques tels que les activités humains qui peuvent être considérées comme une source de risque.

En l'absence d'une étude similaire dans la région des Aurès, la carte des risques établie dans le cadre de cette étude sera d'un intérêt capital pour les services de lutte contre l'incendie et d'aménagement, vu que le modèle adopté dans la méthodologie a donné des résultats importants et convaincants caractérisés par son adaptabilité à la zone d'étude. Ainsi, la cartographie de risque d'incendie de forêts permet de mettre en évidence les zones les plus sensibles et de mieux identifier et préciser les zones de protection prioritaires. Cette carte peut être utilisée pour l'installation d'équipements et le placement de pistes. La cartographie du risque d'incendie est un moyen visant à la protection des zones sensibles aux incendies de forêt.

Dans le domaine de la prévention, les cartes de risque d'incendie peuvent servir de référence pour l'implantation future de points d'eau, de nouvelles pistes ou de pare-feu et bien entendus à la détermination des zones à haut risque. Pour la détection, elles seront utiles pour l'implantation des tours de guet et la multiplication de patrouille de surveillance dans des zones présentant un risque élevé. L'objectif de la cartographie du risque d'incendie est donc

de permette une meilleure anticipation de l'intervention, en prédisposant à l'avance sur le terrain des groupes d'intervention, au plus près des zones potentielles d'éclosion, en fonction de la difficulté pressentie de l'intervention.

Conclusion générale et perspectives

En l'absence actuellement de l'historique spatial numérique et la localisation géographique des points de départs de feux de forêts en Algérie orientale, nous avons présenté au cours de cette étude les méthodes et les approches utilisées pour, d'une part, la création d'une base de données regroupant toutes les couches thématiques relatives aux feux de forêts durant la période de 1986-2016 et, d'autre part, la modélisation et la cartographie de risque d'incendie de forêts dans la région des Aurès.

Parmi les résultats d'analyse de cette étude nous avons relevé qu'au niveau de la partie orientale d'Algérie :

- Les incendies ravagent des étendues considérables de forêts dans la zone d'étude, 647.291,1 ha brûlés soit 38% de la surface forestière totale durant la période allant de 1985 à 2016 avec une moyenne de 20.880,4 ha/an.
- Skikda représente à elle seule 23% soit (148.652,10 ha) avec et une moyenne de 4.795,2 ha/an ;
- EL Tarf totalise 21% soit avec une moyenne de 4.301,5ha/an ;
- Jijel 16% avec une moyenne de 3.365,4ha/ an ;
- Guelma représente 10% avec une moyenne de 2.092,2ha/an ;
- Annaba présente 54.069, 60 ha brûlés soit 8% de la surface totale brûlée dans la zone d'étude avec une moyenne de 1.744,18 ha/an ;
- Batna présente 39.988,80 ha brûlés soit 6% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 1.289, 96 ha/an ;
- Khenchela présente 34.947,20 ha brûlés soit 5% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 1.127, 33 ha/an ;
- Souk Ahras présente 29.279,50 ha brûlés soit 5% de la surface totale brûlée dans la région d'étude avec une moyenne de 944,50 ha /an ;
- Les incendies de forêts dans les deux wilayas de Constantine et Sétif affectant respectivement une superficie de 20.280,30 ha et 14.319,20 ha soit 3% et 2% de la surface totale brûlées dans la zone d'étude avec une moyenne de 654,20 ha et 461,91ha chacune ;
- La wilaya Mila et O.EL Bouaghi présentent la plus faible valeur en termes de superficie brûlée avec un pourcentage de 0.3% chacune avec une moyenne de 63,96 ha et 40,04 ha /an ;

Conclusion générale et perspectives

- Pour le nombre de foyers enregistrés durant la période (2001-2006), le mois d'Août est le mois qui totalise le plus grand nombre de foyers pour l'ensemble de la zone d'étude avec 9500 départs de feux, soit 47%. Les feux s'étendant aussi partiellement en juin et octobre avec respectivement 1203 et 1483 incendies en moyenne par an avec une incertitude accrue au printemps ;
- L'analyse de la corrélation, croisée entre les superficies brûlées enregistrées par les données de la DGF, de LANDSAT, de MODIS et de l'ESA indique que les données DGF étaient les mieux corrélées à LANDSAT dans 6 wilayas, suivies par FIRECCI151 dans 4 wilayas et MCD64A1 dans 3 wilayas.
- L'analyse de rapport DGF/LANDSAT indique qu'une forte sous-estimation a été constatée dans les données DGF pour toutes les wilayas de la partie orientale d'Algérie, variant entre 28% pour Oum.Bouaghi jusqu'à 635% pour Khenchela, avec une sous-estimation globale de 176% pour l'ensemble de la zone d'étude.
- La cartographie de risque de feux de forêts dans la région des Aurès a montré que les zones à risque fort sont les plus dominantes avec un pourcentage de 42.42% et elles occupent le nord-ouest et sud de secteur d'étude, ce risque dû à la végétation inflammable (pin d'Alep et chêne vert) et la pente forte et l'occupation humaine ;
- La classe à risque moyenne et faible représente respectivement 34.5 et 5.24, elle couvre les terres agricoles, les sols nus et les zones bâties ;
- Pour la classe très forte, elle est bien représentée avec un pourcentage de 18.28%, elle est constituée d'un peuplement mixte de pin d'Alep, le cèdre et le chêne vert.

En conclusion, la base de données produite au cours de cette étude, constituera un outil extrêmement utile pour les gestionnaires et les décideurs d'aménagement contre les feux de forêts. Son importance réside surtout dans l'inventaire des dégâts, ce qui facilite la mise en place d'un programme de réhabilitation des zones touchées par les feux. Ainsi, des analyses plus approfondies peuvent maintenant être effectuées sur les estimations des risques d'incendie, et pour une synthèse à l'échelle nationale et méditerranéenne sur les régimes d'incendie. Sur un plus long terme, elle permet de suivre l'évolution des zones brûlées, qui présentent un risque d'inflammabilité important après repousse et contribue à l'élaboration et à la mise à jour des plans de prévention des risques. Elle constitue donc un outil important d'aide à la gestion des futurs incendies dans une région donnée.

La carte du risque d'incendies produite pour la région des Aurès constitue un outil important permettant de définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde nécessaires. Elle aidera les forestiers et les décideurs à identifier et hiérarchiser les zones à

Conclusion générale et perspectives

risque d'incendie, afin d'intervenir dans l'environnement avec une gestion durable, mettre en place une politique raisonnée de lutte et de prévention contre les incendies de forêt, et établir un plan de développement et un contrôle foncier adapté en fonction du risque. Cette carte des risques produite pourra être améliorée en prenant en compte surtout des dispositifs de surveillance et de lutte contre les incendies, mais en soi, elle constituera la clé de n'importe quel programme de formation ou projet environnemental permettant aux municipalités des régions fortement touchées par les incendies de prendre les mesures préventives nécessaires afin de préserver les forêts et de surveiller le déclenchement des incendies.

Comme perspectives à cette étude, il serait intéressant de :

- Nécessité d'une évaluation approfondie de la qualité des données de l'historique des incendies dans les statistiques nationales et l'importance de l'homogénéisation ces données avant l'analyse.
- Élargir la base de données géographique relative aux départs de feu de forêt à l'ensemble de toutes les wilayas restantes pour obtenir une localisation spatiotemporelle des feux à l'échelle nationale. Cela permettra de comparer les différentes wilayas, en prenant en compte la particularité de chacune d'elles ;
- Intégrer avec la modélisation de risque feu de forêt un indice forêt/météo basé sur les données des stations et postes météorologiques afin de prévoir le risque journalier d'éclosion et de propagation du feu ;
- Utiliser la carte de risque d'incendie pour identifier et préciser les espèces forestières de protection prioritaires tel que le Cèdre de l'atlas et le Genévrier thurifère, ces espèces nécessitent une attention particulière pour réduire les dégâts occasionnés par les feux et les préserver pour les générations futures.
- Renforcer la protection des zones forestières et lutter contre l'extension de la désertification.
- Pour le reboisement, des peuplements moins combustibles, par leur structure et leur composition, sont privilégiés.
- Généraliser l'utilisation de l'outil géomatique, car il permet de suivre les changements environnementaux, notamment pour des grandes superficies. Ce travail qui est important doit être complété et enrichi par des études futures plus approfondies, englobant toute la zone forestière en Algérie.

Références bibliographiques

1. Abdessemed K (1981). Le cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Étude phytosocio-logique et problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doctorat 3ecycle, Université d'Aix-Marseille III, 199 p.
2. Abdessemed K (1984). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). Première partie : la dégradation, ses origines et ses conséquences. Forêt méditerranéenne 4(1) : 19-26.
3. Abdessemed K (1984). Les Relations Climat-Végétation dans le Sud Constantinois, Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 131:2-4,145-155, <https://doi.org/10.1080/01811789.1984.10826656>.
4. Adab H, Kanniah K, Solaimani K (2013). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques, Journal of Natural Hazards, 65, 1723-1743, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>.
5. Adjali S (1986). Habitat traditionnel dans les Aurès le cas de la vallée de l'oued Abdi, Editions du CNRS Annuaire de l'Afrique du Nord Tome XXV, 271-280p.
6. Agee J K (1993). Fire Ecology of Pacific Northwest forests. Island Press, Washington, Dc.
7. Alessio G A, De Lillis M, Fanelli M, Pinelli P et Loreto F (2004). Direct and indirect impacts of fire on isoprenoid emissions from Mediterranean vegetation. Functional Ecology, 18, 3357–3364
8. Alexandrian D (2008). Les statistiques “feux de forêt” de ces trente dernières années. Forêt méditerranéenne t. XXIX, n°4, pp. 377-384.
9. Alexandrian D et Esnault F (1998). Politiques nationales ayant une incidence sur les incendies de forêt dans le Bassin Méditerranéen. Réunion FAO, 28-30 oct. 1998, Rome, 15 p.
10. Alexandrian D et Rigolot E (1992). Sensibilité du pin d'Alep à l'incendie. Forêt méditerranéenne, T.13, N°3 : pp. 185-197.
11. Alexandrian D, Esnault F, Calabri G (1998). Analyse des tendances des feux de forêt en Méditerranée et des causes sous-jacentes liées aux politiques. Disponible on line <http://www.fao.org/3/x1880f/x1880f07.htm>
12. Alexandrian D, Esnault F, Calabri G (1999). Feux de forêts dans la région méditerranéenne. Analyse des tendances des feux de forêt en Méditerranée et des causes sous-jacentes liées aux politiques. Unasylva, 197 (50) : pp. 35-41.

Références Bibliographiques

13. Alonso-Canas I, Chuvieco E (2015). Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. *Remote Sens. Environ.*, 163, 140–152.
14. Archibald S, Caroline E R L, Jose L, Gómez D, Ross AB (2013). Defining pyromes and global syndromes of fire regimes .*PNAS*, 110 (16) 6442-6447; <https://doi.org/10.1073/pnas.1211466110>.
15. Arfa A M T (2008). Les incendies de forêt en Algérie : stratégies de prévention et plans de gestion. Thèse Magistère en Ecologie et Environnement, Option Gestion et pathologie des écosystèmes forestiers, Université Mentouri Constantine, Algérie, 132 p.
16. 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 Écologie et Environnement. Frères Mentouri Constantine 1. Algérie.
17. Arino O, Rosaz J M (1999). 1997 and 1998 World Fire Atlas using ERS-2 ATSR-2 Data". *Proceedings of Joint Fire Science Conference and Workshop, Boise, Idaho*, 177-182
18. Assali F et Rachdi S (2005). Incendies de forêts au Maroc : situation actuelle, enseignements dégagés et perspectives d'avenir. Communication 1.4 au Forum régional "Secteur forestier et développement durable en Méditerranée : défis, politiques et gouvernance", Plan Bleu. 12 p.
19. Assali F, Mharzi A H, Rouchdi M, Badraoui M (2016): Modelling and mapping forest fire ignition risk in North-West Morocco (Chefchaouen-Ouazzane Region), *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 17, 111-128.
20. Avitabile SC, Callister K E, Kelly L T, Haslem A, Fraser L, Nimmo D G, Watson S J, Kenny S A, Taylor R S (2013). Spence Bailey, L.M.; et al. Systematic fire mapping is critical for fire ecology, planning and management: A case study in the semi-arid Murray Mallee, south-eastern Australia. *Landsc. Urban Plan.* 117, 81-91.
21. Baara Y (2014). Fractal and multifractal characterization of heat transfer application to fire, Doctoral thesis, University of Sciences and Technology (USTO-MB), Algeria.
22. Ball G H, Hall DJ (1965). ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification. Technical Report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, U.S.A.
23. Ballais J L (1981). Recherches géomorphologiques dans les Aurès (Algérie). Thèse doctorat- Université de Paris I, pp 572 + Annexes + Cartes.

Références Bibliographiques

24. Ballais J L (1989) « Aurès », in 7 /Asarakae – Aurès, Aix-en-Provence, Edisud (« Volumes », no 7. [En ligne],. URL : <http://encyclopedieberbere.revues.org/1226>
25. Barbosa P M, San-Miguel Ayanz J, Martinez B, Schmuck G (1998). Burnt area mapping in Southern Europe using IRS-WiFS. In Viegas, editor, Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Rotterdam.
26. Bastarrika A, Alvarado M, Artano K, Martinez M P, Mesanza A, Torre L, Ramo R, Chuvieco E (2014). BAMS: A tool for supervised burned area mapping using Landsat data. Remote Sens. 6, 12360–12380.
27. Beghami Y (2013). Ecologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, université El-Hadj Lakhdar– Batna, 193 p.
28. Bekdouche F (2010). Evolution après feu de l'écosystème subéraie de Kabylie (Nord algérien). Thèse de Doctorat d'État en Sciences Agronomiques. Option : écologie forestière. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 175 p.
29. Bekdouche F, Derridj A, Krouchi F (2007). Evolution après feu de la composition floristique de la subéraie de Mizrana (Tizi-ouzou, Algerie). Sciences & Technologie 28 :19 -29.
30. Belhadj-Khedher C , Koutsias N, Karamitsou A, El-Melki T, Ouelhazi B , Hamdi A, Nouri H, Mouillot F (2018). A Revised Historical Fire Regime Analysis in Tunisia (1985–2010) from a Critical Analysis of the National Fire Database and Remote Sensing. Forests 2018, 9, 59. <https://doi.org/10.3390/f9020059>.
31. Belkaid H (2016). Analyse spatiale et environnementale du risque d'incendie de forêt en Algérie : Cas de la Kabylie maritime. Géographie. Université Nice Sophia Antipolis .
32. Belouahem A D, Belouahem F, Bélair G (2009). Biodiversité Floristique et Vulnérabilité des Aulnaies Glutineuses de la Numidie Algérienne (N.E Algérien). European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.32 No.3 (2009), pp.329-361
33. Ben Jamaa M E H et Abdelmoula K (2004). Les feux de forêts dans la subéraie tunisienne. Colloque Vivexpo : le chêne liège face au feu. Perpignan.
34. Benali A, Russo A, Sa A C L, Pinto R M S, Price O, Koutsias N, Pereira J M C (2016). Determining fire dates and locating ignitions points with satellite data. Remote Sensing. 8, 326.

Références Bibliographiques

35. Benchetrit M (1956). Les sols d'Algérie. *Revue de Géographie Alpine* 44-4 pp. 749-761
36. Benderradji M E H , Alatou D , Arfa A M T (2004). Bilan des incendies de forêts dans le Nord-Est algérien : Cas de Skikda, Annaba et El Tarf période 1990-2000. *Forêt Méditerranéenne* T. XXV, n° 3 : pp. 211-218.
37. Benmessaoud H (2010). Étude de la vulnérabilité a la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse de docteur En aménagement du territoire. Université de Batna, 227 p.
38. Bentouati A, Bariteau M (2005). Une sylviculture pour le pin d'Alep des Aurès (Algérie), forêt méditerranéenne t. XXVI, n° 4, décembre 2005, 315-321).
39. Bistinas, I.; Harrison, S.P.; Prentice, I.C.; Pereira, J.M.C. Causal relationships versus emergent patterns in the global controls of fire frequency. *Biogeosciences* 2014, 11, 5087–5101.
40. Boschetti L, Eva H, Brivio P A, Gallego J (2004). The validation protocol of GBA2000 global burned area maps. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 3, 2107–2110.
41. Boschetti L, Flasse S, Jacques de Dixmude A, Trigg S (2002). A multi temporal change-detection algorithm for the monitoring of burnt areas with SPOT-Vegetation data, in Bruzzone, L. and Smith, P. (eds.), *Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, Singapore: World Scientific Publishing, 75-82.
42. Boudjoujou (2010). Etude de la flore adventice des cultures de la région de Jijel, Thèse de Magistère, Université de Ferhat Abass, Sétif., 155p.).
43. Boumediene K (2011). Les résineux dans la région de Tlemcen ((Nord-Ouest Algérien)) Aspects écologiques, inflammabilité et combustibilité. Mémoire de Magister en : Ecologie et Environnement. Université des sciences et de la technologie « Houari BOUMEDIENE ».
44. Bouzekri A (2015). Evaluation multicritère des situations critiques au risque de la désertification dans les Aurès (Algérie). Thèse de doctorat en aménagement du territoire et gestion des risques majeurs, université el hadj lakhdar- Batna.
45. Bowman D M J S, Williamson G J, Abatzoglou J T, Kolden C A, Cochrane M A, Smith A M S (2017). Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0058. <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058>.

Références Bibliographiques

46. Broucke S (2009). État de l'art sur la détermination du régime du feu par des moyens de télédétection. Rapport sur l'évaluation du régime du feu par des moyens de télédétection et qualification des données.
47. Calle A, Casanova J L , Romo A, Gonzalez-Alonso F (1999). An operational system for the forest fire risk assessment by means of NOAA images. Source 19TH EARSEL Symposium on Remote Sensing in the 21ST Century, Valladolid (Spain), 31 May - 2 June, pp. 363-368.
48. Canakcioglu H (1986). Forest fires and fire problems in Turkey. Document présenté au séminaire sur les Méthodes et matériels à utiliser pour prévenir les incendies de forêt, Valence, Espagne, 29 septembre-4 octobre 1986. 10 p. + annexes.
49. Carbonell G (2004). Embrasement Généralisé Eclair en Feu de Forêt. Embrasement Généralisé éclair en Feu de Forêt, 2004, p. 153.
50. Carrega P., Geronimo N., 2007. Risque météorologique d'incendie de forêt et méthodes de spatialisation pour une cartographie à fine échelle. Actes du XXème colloque international de l'AIC. Tunis, sept. 2007. pp. 168- 173.
51. Chautrand L (1972). In « Les incendies de Forêts ». Bull. Techn. d'Inf. Du ministère de l'Agriculture. 268, pp. 397-542.
52. Chen F, Zhao X, Ye H (2012). Making Use of the Landsat 7 SLC-off ETM+ Image Through Different Recovering Approaches. Chapter 13. IntechOpen (book). <https://doi.org/10.5772/48535>.
53. Chergui B, Fahd S, Santos X, Pausas J G (2017). Socio-economic factors drive fire regime variability in the Mediterranean basin. Rev.Ecosystems.
54. Chuvieco E et Congalton R G (1989). Application of remote sensing and GIS to forest fire hazard mapping. Rem. Sens. Environ. 29, pp. 147-159.
55. Chuvieco E, Englefield P, Trishchenko A P, Luo Y (2008). Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. Remote Sensing of Environment, 112: 2381–2396.
56. Chuvieco E, Martin M P, Palacios A (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. International Journal of Remote Sensing, 23(23) :5103 5110.
57. Chuvieco E, Ventura G, Martin M P, Gomez I (2005). Assessment of mutitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. Remote Sensing of Environment, 94: 450–462.

Références Bibliographiques

58. 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.
59. Collin E K , Joachim E E (2006). Apport de trois méthodes de détection des surfaces brûlées par imagerie LANDSAT ETM+ : application au contact forêt- savane du Cameroun. *European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, document 357. DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.2711>
60. Conese C, Checcacci E (2006). Burned forest mapping from satellite images. In *International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area (ISEIM)*, Corte-Ajaccio, France.
61. Coudour B (2015). Influence de la végétation et du relief dans les feux de forêt extrêmes : étude de la dégradation, de l'accumulation et des propriétés de combustion des composés organiques volatils issus des feux de forêt. *Physique [physics]*. Université de Poitiers - Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées.
62. Daget P (1977). Le Bioclimat Méditerranéen: Caractères Généraux, Modes de Caractérisation. *Vegetatio*34 (1): 1–20.
63. Dagorne A., Duche Y, Castex J M, Ottavij Y (1994): Protection of forests against fire and geo-graphic information system: application to the municipality of Auribeau-sur-Siagne (Alpes Maritimes), *Mediterranean Forest Revue*, 15 (4), 409-420.
64. De lartigue M (1904). Monographie de l'Aurès" Constantine, Imprimerie à vapeur Marle - Audrino, gr. in-8, x, 491 p.
65. Debrach J (1953). Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc méd.* N°342: 14 p.
66. Delabraze P, Valette J C (1974). Inflammabilité et combustibilité de la végétation forestière méditerranéenne. *Revue forestière française*, n° spécial, pp. 171-177.
67. Dernegi D (2010). Profil d'écosystème. Hotspot de la biodiversité du bassin méditerranéen. Arlington,USA, Critical Ecosystem Partnership Fund. 258 pp.
68. DGF (2010). Étude et expertise sur le dépérissement de la cédraie d'ouled yagoub et chelia wilaya de kenchela.
69. DGF (2015). Plan de gestion simplifié (2015).forêt domaniale des ouled oudjana canton : oued tidder, 58p.
70. Djebaili S (1984). Steppe algérienne : Phytosociologie et écologie. OPU, Alger177p.

Références Bibliographiques

71. Dubreuil V, Lecerf R, Hubert-Moy L (2004). Suivi de la sécheresse par télédétection : exemple de l'été 2003 en Bretagne. Conférence invitée au symposium national de Climatologie - Université Alexandru Cuza (Iasi) 28-31 octobre 2004.
72. ELLER M C (1996). The influence of fire severity, not fire intensity, on understory vegetation biomass in British Columbia, 13th Conference on Fire and Meteorology, Lorne, Australia.
73. Erten E, Kurgun V, Musaoglu N (2004): Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS a case study, XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Istanbul, Turkey.
74. Eva H D et al (2003). Suivi des feux de végétation dans les aires protégées d'Afrique sub-saharienne : Apport des techniques spatiales et des données satellitales pour le suivi des feux en Afrique sub-saharienne, Commission européenne- Centre commun de recherche, EUR 20862 FR, 55 p.
75. Eva H, Lambin E F (1998). Burnt area mapping in central Africa using ATSR data, *Journal of Remote Sensing*, 19. 3: 473- 497.
76. Ezzine H, Saidi M, Casanova J L, Montes A, Ghribe A (2005). Conception et mise en place d'un système à base de données NOAA-AVHRR, pour la prévention et le suivi des incendies de forêts au Maroc. *Geo observateur*, (14).
77. Faleh A, Lakhouaja H, Sadiki A, Chaouan J (2012). GIS, teledetection and evaluation of forest risk "Example of forest Khezana (Province Chaouene)", *Journal of Papeles de Geografía*, 55-56, 37-48.
78. FAO (2007). Fire management – global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005, Rome, 2007.
79. FAO (2008). Repor: Workshop on forest fires in the Mediterranean region: Prevention and regional cooperation, Sabaudia, Italy, Rome, FAO, 28 p.
80. FAO (2010). Global forest resources assessment 2010. Main report. FAO Forestry Paper No. 163. Rome.
81. FAO (2013). Etat des forêts méditerranéennes. Disponible en ligne <http://www.fao.org/3/i3226f/i3226f.pdf>
82. FAO (2015). Évaluation des ressources forestière mondiale 2015. Répertoire de données de FRA2015. Rome, FAO. 253 pp.
83. FAO (2020). État des forêts méditerranéennes 2018. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome et Plan Bleu, Marseille.

Références Bibliographiques

84. Floret C, Galan M J , Le F, Orshan G, Romane F (1990). Growth forms and phenomorphology traits along an environmental gradient: tools for studying vegetation. *Journal of Vegetation Science* 1, 71-80.
85. Fornacca D, Ren G, Xiao W (2017). Performance of Three MODIS Fire Products (MCD45A1, MCD64A1, MCD14ML), and ESA Fire_CCI in a Mountainous Area of Northwest Yunnan, China, Characterized by Frequent Small Fires. *Remote Sens.* 2017, 9, 1131; doi:10.3390/rs9111131.
86. FOSA (2000). L'étude prospective du secteur forestier en Afrique. Algérie. FAO, Rome, 60 p. <http://www.fao.org/3/x6771f/x6771f.pdf>.
87. Franquesa M, Vanderhoof M K, Stavrakoudis D, Gitas IZ, Roteta E, Padilla M, Chuvieco E (2020). Development of a standard database of reference sites for validating global burned area products, *Earth Syst. Sci Data* 12:3229–3246, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3229>.
88. Gabban A, San-Miguel-Ayanz J, Viegas D X (2008). Assessment of forest fire risk in European Mediterranean region: Comparison of satellite-derived and meteorological indices. *Scientific and Technical Reports*, 142 p.
89. Galizia L F, Curt T, Barbero R, Rodrigues, M (2021). Assessing the accuracy of remotely sensed fire datasets across the southwestern Mediterranean Basin, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 21: 73–86. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-73-2021>.
90. Gao Y J, Ni S (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594, <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.
91. Garcia M, Chuvieco E (2004). Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment*, 92 :414–423.
92. Giglio L, Loboda T, Roy D P, Quayle B, Justice C O (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sens. Environ.* 113, 408–420.
93. Giglio L, Randerson J T, van der Werf G R, Kasibathla P S, Collatz G J, Morton D C, DeFries R S (2010). Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences*, 7, 1171–1186.
94. Giglio L, van derWerf, G R, Randerson J T, Collatz G J, Kasibathla P (2006). Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 957–974.

Références Bibliographiques

95. Giorgi F (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8): L08707.
96. Golden B L, Wasil E A, Harker P T (1989). *The Analytic Hierarchy Process, Applications and Studies*, Springer, Berlin, pp. 265.
97. Good P , Moriondo M , Giannakopoulos C, Bindi M (2008). The meteorological conditions associated with extreme fire risk in Italy and Greece: relevance to climate model studies. *International Journal of Wildland Fire*, 17: pp. 155-165.
98. Goubi M (2011). Croissance et productivité du pin d'Alep dans quelques stations du massif des Aurès. Mémoire de Magistère en Agronomie, université El-Hadj Lakhdar–Batna, 64p.
99. Guedjiba A (2012). La situation linguistique dans le massif centrale de l'Aurès. Thèse de doctorat. Univ. Mouloud Mammeri - Tizi ousou.
100. Guerbah Y A (1992). L'occurrence des feux de forêts dans la wilaya d'El-Tarf : Causes originelles et prévention. Mém. Ing. d'état en écologie. univ. Constantine, 90 p.
101. Guettouche S M, Derias A (2013). Modelling of Environment Vulnerability to Forests Fires and Assessment by GIS Application on the Forests of Djelfa (Algeria), *Journal of Geographic Information System*, 5, 24-32, <https://doi.org/10.4236/jgis.2013.51003>.
102. Halitim S (2006). Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols de cédraies dans les Aurès : influence des facteurs édaphiques. Mémoire de Magistère en Sciences Agronomiques, université El-Hadj Lakhdar. Batna. 138p.
103. Hantson S, Arneth A, Harrison S P, Kelley D I, Prentice I C, Rabin S S, Archibald, S, Mouillot F, Arnold S R, Artaxo P et al (2016). The status and challenges of global fire modelling. *Biogeosciences*, 13, 3359–3375.
104. Hantson S, Padilla M, Corti D, Chuvieco E (2013). Strength and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. *Remote Sens. Environ.* 131, 152–159.
105. Hao W M, Liu MH (1994). Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. *Global biogeochemical cycles*, Vol.8, No. 4, 495-503. <https://doi.org/10.1029/94GB02086>.
106. Hao W M, Reeves M C, Baggett L S, Balkanski Y, Ciais P, Nordgren B L, Petkov A, Corley RE, Mouillot F, Urbanski S P (2021). Wetter environment and

Références Bibliographiques

- increased grazing reduced the area burned in northern Eurasia: 2002-2016. *Biogeosciences* 18(8): 2559-2572.
107. Hawbaker T J, Vanderhoof M K, Beal, Y.J, Takacs J D, Schmidt G L, Falgout J T, Williams B, Fairaux N M, Caldwell M K, Picotte J J et al (2017). Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 198, 504–522.
108. He L et Li Z (2011). Enhancement of a fire-detection algorithm by eliminating solar contamination effects and atmospheric path radiance: Application to MODIS data. *Int. J. Remote Sens.* 32, 6273–6293.
109. Helal Y (2010). Etude de biomasse du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) dans le massif des Beni-Imloul-Aurès-Algérie. *Revue Forest Science*, 3 : 25-42.
110. Henry M C (2008). Comparison of single- and multi-date landsat data for mapping wildfire scars in Ocala national forest. Florida. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
111. Hesses N (2005). Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes-Maritimes. Thèse de doctorat en Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble, France.
112. Hudak A T, Brockett B H (2004). Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. *Int. J. Remote Sensing.* 25, 3231–3243.
113. Illera P, Fernandez A, Calle A, Casanova J L (1996). Evaluation of forest fires danger in Spain by means of NOAA AVHRR images. *Earsel Advances in Remote Sensing*, vol. 4, No. 4-XI, pp. 33-43.
114. Isichei A O, Muaghalu J I, Akeredoly F A, Afolabi O A (1995) Fuel characteristics and emissions from biomass burning and land use change in Nigeria, *Environmental Monitoring and Assessment*, Kluwer Academic Publisher, 38, 279-289.
115. Jappiot M (2000). Evaluation et cartographie du risque d'incendie de forêt à l'aide d'un SIG. Exemple d'un massif forestier du sud de la France. *Revue de forêt méitérnnéenne*. XXI.
116. Jean B (1971). Les sols de Franc. In: *Revue Géographique de l'Est*, tome 11, n°2 .Etudes de géographie physique. p. 243.
117. Jean C R, Dominique M, Dumé G (1989). *Flore forestière française : guide écologique illustré*, 1989. (livre) Amazon France, p2421.

Références Bibliographiques

118. Jorge Q (2011). Changement climatique et dynamique de la végétation dans les Andes du Chili central, depuis le milieu du XXème siècle: l'exemple de la vallée de Yerba Loca. Milieux et Changements globaux. Université de Grenoble. Français. p.271.
119. Kadik B (1987). Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie: Ecologie dendrométrie morphologie. OPU. Alger, 1987, 580 p.
120. Kaiss A, Zekri L, Zekri N, Porterie B, Clerc JP, Picard C (2007). Efficacité des coupures de combustible dans la prévention des feux de forêts. C. R. Physique, 8 : 462–468.
121. Kana C, Etouna Joachim E (2006). Apport de trois méthodes de détection des surfaces brûlées par imagerie Landsat ETM+ : application au contact forêt- savane du Cameroun. European Journal of Geography.
122. Kasischke E S, French N H F (1995). Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data. Remote Sensing of Environment, 51: 263–275.
123. Kasischke E, Stocks B J, O'Neil K, French N H F, Bourgeau-Chavez L L S (2000). Direct effects of fire on the boreal forest carbon budget. In Biomass Burning and Its Interrelations with the Climate System; Kluwer Academic: Dordrecht, The Netherlands, pp. 51–68.
124. Keeley J E (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. International Journal of Wildland Fire, 18(1), 116–126.
125. Key C H, Benson N C (1999). Measuring and remote sensing of burn severity. In Joint Fire Science Conference and Workshop, Moscow, Russia.
126. Khader M , Benabdeli K , Mederbal K , Fekir Y , Gueddin R, Mekkous B (2009). Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique : cas de la forêt de Nesmoth (Algérie). Mediterranea Serie de Estudios Biológicos. Época II N° 20 : pp. 10-38.
127. Kherchouche D, Bentouati A, Kaabeche M, 2011. Croissance et ecologie du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif des Beni-Imloul (Aurès, Algérie). Sècheresse 22 :43-8. <https://doi.org/10.1684/sec.2011.0294>.
128. Kitzberger T, Swetnam T W, Veblen TT (2001) Inter hemispheric synchrony of forest fires and the El Niño southern oscillation. Glob. Ecol. Biogeogr. 10, 315–326.
129. Koffi B, Grégoire J M, Male G, Lacaux J P (1995) Remote sensing of bush fire dynamics in Central Africa from 1984 to 1988: analysis in relation to regional

Références Bibliographiques

- vegetation and pluviometric patterns, *Athmospheric Research*, 39, 179- 200.
[https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00011-F](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00011-F).
130. Kolden C A, Weisberg P J (2007). Assessing accuracy of manually mapped wildfire perimeters in topographically dissected areas. *Fire Ecology* volume 3, pages 22–31 (2007).
131. Kouassi A M, Koffi F K, Yao Blaise K, Kouakou B D, Jean E P et Sekouba O (Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l’Ouest : cas du bassin versant du N’zi (Bandama) en Côte d’Ivoire. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.23388>
132. Laffit R (1939). Étude géologique des Aurès. In bulletin du service de la carte géologique de l’Algérie, Alger 484p+ carte hors texte.
133. Lampin-Maillet C A, Mantzavelas L, Galiana M, Jappiot M, Long et al (2010). Wildland urban inter-faces, fire behaviour and vulnerability: characterization, mapping and) assessment. *Towards Integrated Fire Management - Outcomes of the European Project Fire Paradox*, EuropeanForest Institute, 21 p., 2010. hal-00593577
134. Lizundia-Loiola J, Otón G, Ramo R, Chuvieco E (2020). A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 236:111493, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>.
135. Lizundia-Loiola J, Pettinari M L, Chuvieco E, Storm T, Gómez-Dans J (2018). ESA CCI ECV Fire Disturbance: Algorithm Theoretical Basis Document-MODIS, version 2.0.”Fire_cci_D2.1.3_ATBD-MODIS_v2.0. Available at <https://esa-fire-cci.org/documents>.
136. Loepfe L, Rodrigo A, Lloret F (2014). Two thresholds determine climatic control of forest fire size in Europe and northern Africa. *Reg. Environ. Chang.* 2014, 14, 1395–1404.
137. Long M, Ripert C, Piana C, Jappiot M, Lampin-Maillet C, Ganteaume A, Alexandrian D, Rouch L (2008). Amélioration de la connaissance des causes d’incendie de forêt et mise en place d’une base de données géoréférencées. *Forêt Méditerranéenne T. XXX, n° 3* : pp. 224-229.
138. López S, González F, Llop R, Cuevas J M (1991). Evaluation of the utility of NOAA AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. In *International Journal of Remote Sensing*. Londres (GB): Taylor & Francis, pp. 1841-1851.

Références Bibliographiques

139. Madoui A (2002). Les incendies de forêts en Algérie: Historique, bilan et analyse. *Forêt Méditerranéenne*, XXIII, 1: pp. 23-30. Available online: <http://hdl.handle.net/2042/39420>
140. Margerit J (1998). Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts. Thèse Doctorat Inst. Nat. Polytechnique de Lorraine. Nancy, France, 260 p.
141. Mariel A (1995). Mapping the level of fire risk: example of the Maures massif, Cemagre report.
142. Marlon J R, Kelly R, Daniau A L, Vanniere B, Power M J, Bartlein P, Higuera P, Blarquez O, Brewer S, Brucher T et al (2016). Reconstruction of biomass burning from sediment-charcoal records to improve data-model comparisons. *Biogeosciences*, 13, 3225–3244.
143. Martín M P, Chuvieco E (1998). Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica* 7, 109–128.
144. Martín P, Gomez I, Chuvieco E (2005). Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*, Zaragoza. Universidad de Zaragoza. 19.
145. McCarley T R, Smith A M S, Kolden C A, Kreitler J (2018). Evaluating the Mid-Infrared Bi-spectral Index for improved assessment of low-severity fire effects in a conifer forest. *International Journal of Wildland Fire*. <https://Doi.org/10.1071/WF17137>
146. Mebarki A (2005). Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement, Thèse de doctorat d'état, Université Mentouri de Constantine.
147. Meddour H (1983). Contribution à l'étude de la croissance du *Pinus halepensis* Mill. En relation avec les groupements végétaux dans la forêt de Bâinem. *Mém. Ing. Inst. Nat. Agro. Alger*, 63 p.
148. Meddour S 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 Doctorat en sciences agronomiques, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. Algérie, 256 p.

Références Bibliographiques

149. Meddour S O, Bouisset C (2013). Les grands incendies de forêt en Algérie : problèmes humains et politiques publiques dans la gestion des risques. *Revue géographique des pays méditerranéens* p. 33-40. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6827>
150. Meddour S O, Derridj A (2012). Bilan des feux de forêt en Algérie : Analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010), *Sécheresse*, 23, pp. 133-141.
151. Meddour S O, Meddour R, Derridj A (2008). Les causes des incendies en Algérie. Laboratoire de gestion des écosystèmes forestiers, Institut national Agronomique El Harrach, Alger, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
152. Meddour S O, Meddour R, Leone V, Lovreglio R, Derridj A (2013). Analysis of forest fires causes and their motivations in northern Algeria: The Delphi method. *iForest*, 6, 247–254.
153. 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 Doctorat en sciences agronomiques, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. Algérie, 256 p.
154. Meddour-Sahar O et Derridj A (2012). Bilan des feux de forêts en Algérie : Analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). *Sécheresse*; 23, (2): pp. 133-141.
155. Meddour-Sahar O, Meddour R, Derridj A (2008). Les feux de forêts en Algérie sur le temps long (1876-2007). *Les Notes d'analyse du CIHEAM*, n° 39, 11 p.
156. Megrerouche R (2006). Sensibilité de la végétation forestière aux incendies: Cas de la forêt domaniale de Chettabah-Ain Smara-Constantine. Mémoire de Magistère en Ecologie et Environnement, Université de Constantine, 106 p.
157. Meharzi M K (1994). Le rôle de l'orographie dans la répartition spatiale des précipitations dans le massif de l'Aurès. In: *Méditerranée, Géographie physique de l'Algérie orientale*. Tome 80, 3-4, 73-78.
158. Melanie K, Vanderhoof D, Brunner N, Yen-Ju G, Beal D, Hawbaker T J (2017). Evaluation of the U.S. Geological Survey Landsat Burned Area Essential Climate Variable across the Conterminous U.S. Using Commercial High-Resolution Imagery. *Remote Sens.* 9, 743; <https://doi.org/10.3390/rs9070743>.

Références Bibliographiques

159. Merdas S (2007). Bilan des incendies de forêts dans quelques wilayas de l'Est algérien; cas de Bejaia, Jijel, Sétif et Bordj Bou-Arréridj. Mémoire de Magistère, Univ. de Constantine, 51 p.
160. Mieville A, Granier C, Liousse C, Guillaume B, Mouillot F, Lamarque J F, Gregoire J M, Petron G (2010). Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction. *Atmos. Environ.* 44, 1469–1477.
161. Missoumi A, Mederbal K, Benabdelli K (2002). Apport des systèmes d'information géographiques dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts exemple de la forêt domaniale de Kounteidat, Algérie. *Forêt méditerranéenne t. XXIII*, n° 1, pp. 11-22.
162. Mol T et Küçükosmanoglu A (1997). Forest fires in Turkey. In Proc. XI World Forestry Congress, Antalya, Turkey, 10 p.
163. Moro C et Valette J C (1996). Teneur en eau de combustibles forestiers méditerranéens. Document Interne INRA-PIF 9602, 28 p.
164. Mouillot F, Field C B (2005). Fire history and the global carbon budget: A 1^o×1^o fire history reconstruction for the 20th century. *Glob Chang. Biol.* 11, 398–420.
165. Nedjraoui D et Bédrani S (2003). La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *VERTIGO*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.5375>
166. Nogueira J M P, Ruffault J, Chuvieco E, Mouillot F (2017). Can we go beyond burned area in the assessment of global remote sensing products with fire patch metrics? *Remote Sens.* 9, 7.
167. Ogaya R , Penuelas J (2007). Seasonal ultrasonic acoustic emissions of *Quercus ilex* L. trees in a Mediterranean forest. *Acta. Physiol. Plant.*, 29: 407-410. *Options Méditerranéennes*, 35: 25-29.
168. Okacha T, Benabdelli K, Benhanifia K, Haddouche D (2017). Cartographie des zones de risque de feux de forêt dans la commune de Doui Thabet, Saïda, Algérie Pages 543-552. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1386434>.
169. Oldache E H (2003). Impact des incendies sur la biodiversité, Recueil des Communications de l'atelier N° 2 «Menaces pesant sur la diversité biologique» MATE-GEF/PNUD, Projet ALG97/G31, pp 69-78.

Références Bibliographiques

170. Oliveira S L J, Pereira J M C, Carreiras J M B (2012). Fire frequency analysis in Portugal (1975–2005), using Landsat-based burnt area maps. *Int. J. Remote Sensing*. 21, 48.
171. ONTF (1982). Grand Projet Aurès (1982)- Plan d'aménagement de la forêt domaniale du massif de Chélia. 46p.
172. Padilla M, Stehman S V, Chuvieco E (2014). Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sens. Environ.* 144, 187–196.
173. Papadopoulos A, Barbero M, Quézel P (2003). Caractérisation climatique et bioclimatique de l'aire de répartition du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Grèce ; l'action du climat sur la dynamique de ses populations. *ecologia mediterranea*, tome 29, fascicule 1, 27-37.
174. Parisien MA, Hirsch KG, Lavoie SG, Todd JB, Kafka VG (2004). Saskatchewan fire regime analysis. *Nature Resour. Can For Serv North Cent. Edmonton, AB Inf. Rep. NOR-X394*.
175. Pellizzaro G, Cesaraccio C, Duce P, Ventura A, Zara P (2007). Relationships between seasonal patterns of live fuel moisture and meteorological drought indices for Mediterranean shrubland species. *Int. J. Wildland Fire*. 6, 232–241.
176. Pereira J M C (1999). A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indices for burned surface detection and mapping. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 217–226.
177. Pereira M G, Malamud BD, Trigo RM, Alves PI (2011). The history and characteristics of the 1980–2005 Portuguese rural fire database. *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci*11: 3343–3358.
178. Perriez F, Jean H B, François B, Patrice F, Jean P B, Jean P D (2003). Rapport sur la protection des incendies de forêt après les feux de l'été 2003. Orée. P 126.
179. Philip J, Peter P, Omeny A, Marchant R (2014). AFRICLIM: high-resolution climate projections for ecological applications in Africa (2014). *African journal of ecology*. <https://doi.org/10.1111/aje.12180>.
180. Pinty B, Verstraete M M (1992). GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Plant Ecology*, 101:15-20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>.
181. Quézel P (1957). Peuplement végétal des hautes montagnes de l'Afrique du Nord. Lechevalier Ed., Paris. 20p.

Références Bibliographiques

182. Quezel P (1976). Les chênes sclérophylles en région méditerranéenne. CIHEAM.
183. Rabin SS, Melton JR, Lasslop G, Bachelet D, Forrest M, Hantson S, Kaplan JO, Li F, Mangeon S, Ward DS (2017). The fire modeling inter-comparison project (Fire MIP), phase 1: Experimental and analytical protocol with details model descriptions. *Geosci. Model Dev* 10: 1175–1197.
184. Rebai A (1982). Les incendies de forêts dans la wilaya de Mostaganem (Algérie) : étude écologique et propositions d'aménagement. Thèse de Doctorat spécialité Ecologie Méditerranéenne. Faculté des Sciences et Techniques de St.-Jérôme, Université d'Aix-Marseille III, 130 p.
185. Robitaille A (1995). La cartographie des districts écologiques du ministère des Ressources naturelles du Québec. *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 2, 1995, pp. 173-189.
186. Rogan J, Franklin J (2001). Mapping burn severity in Southern California using spectral mixture analysis. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Sydney, Australie.
187. Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *Third ERTS Symposium*.
188. Roy D P, Boschetti L (2009). Southern Africa validation of the MODIS, L3JRC, and GlobCarbon burned-area products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47, 1032–1044.
189. Roy D P, Jin Y, Lewis P E (2005) Justice, C.O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sens. Environ.* 97, 137–162
190. Ruffault J, Curt T, Moron V, Trigo R M, Mouillot F, Koutsias N, Pimont F, Martin St Paul N, Barbero R, Dupuy J L, Russo A, Belhadj Khedher C (2020). Increased likelihood of heat induced large wildfires in the Mediterranean basin. *Scientific Report* 10(1):1-9.
191. Ruffaut J, Mouillot F (2015). How a new fire suppression policy can abruptly reshape the fire weather relationship. *Ecosphere* 6(10): 1-19.
192. Saaty T L (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281. <https://doi.org/10.1016/0022-2496>.

Références Bibliographiques

193. San Miguel-Ayanz J, Moreno J M, Camia A (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *For. Ecol. Manag.* 294, 11–22.
194. Scholemberger A (1970). Etude de la végétation de l'Aurès oriental. FAO. *Projet Algérie* 15. 20p.
195. Scholes R J (1995). Greenhouse gas emissions from vegetation fires in southern Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, Kluwer Academic Publisher, 38, 169-179.
196. Sebei S (2015). Le degré météorologique du risque incendie de forêt (DMRIF): Méthode d'évaluation du risque d'incendie en Tunisie. XXVIII colloque de l'association internationale de climatologie, Liège (Belgium). Available online: http://www.climato.be/aic/colloques/actes/ACTES_AIC2015/2%20Climatologie%20a
197. Seltzer P (1946). Le climat de l'Algérie. *Trav. l'inst. Mét. phys. glo.*, Algérie Alger. Carbonel. 219 p.
198. Slimani S (2014). Reconstitutions dendro-chronologiques du climat et de l'historique des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie. Thèse de doctorat en sciences biologiques, université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou. 171p.
199. Smith A M S, Drake NA, Wooster MJ, Hudak A T, Holden Z A, Gibbons C J (2007). Production of Landsat ETM preference imagery of burned areas within southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS. *International Journal of Remote Sensing* 28, 2753–2775. <https://doi.org/10.1080/01431160600954704>.
200. Souidi Z, Bento-Gonçalves A, Vieira A (2015). Forest fires in Algeria, occurrences, causes and prevention. *Wildland fires: a worldwide reality*, Chapter 7.
201. Sparks A M, Boschetti L, Smith A M S, Tinkham W T, Lannom K O, Newingham B A (2015). An accuracy assessment of the MTBS burned area product for shrub–steppe fires in the northern Great Basin, United States. *International Journal of Wildland Fire* 24, 70. <https://doi.org/10.1071/WF14131>.
202. Syphard A D, Keeley J E (2016). Historical reconstruction of California wildfires vary with data source. *Int. Journal. Wildland Fires*, 25, 1221–1227.
203. Tansey K, Grégoire J M, Defourny P, Leigh R, Peckel J F, Bogaert E V, Bartholome J E (2008). A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2007GL03156>.

Références Bibliographiques

204. Tansey K (2002). Implementation of regional burnt area algorithms for the GBA initiative, EC- JRC, EUR 20532 EN, 169 p.
205. Tansey K, Gregoire J M, Stroppiana D, Sousa A, Silva J, Pereira J M C, Boschetti L, Maggi M, Brivio P A, Fraser R, et al (2004). Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 109, D14S03.
206. Touati D, Zaanoune L, Kherchouche D (2015). Histoire des feux de forêts dans la cédraie des Ouled-Yaâgoub par l'approche Dendrochronologique. Séminaire International sur : Gestion et Aménagement durable des écosystèmes forestiers méditerranéens, Batna 08 – 09 Décembre 2015.
207. Trabaud (1992). Sécheresse, attention aux feux de forêt. *journal l'Alsace centrale* (publier me 12 mars 2012).
208. Trabaud L (1985). Quantités d'énergie et puissance potentielle de feu de quelques communautés végétales du sud de la France. *Acta Oecologica, Oecologica Plantarum* 6: pp.387-394.
209. Trigg S, Flasse S (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, no.13, 2641–2647. <https://doi.org/10.1080/01431160110053185>.
210. Tucker C J (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0) .Wildland fire management terminology, FAO, Rome, 1986, pp. 257Zha,
211. Turco M, Bedia J, Di Liberto F, Fiorucci P, von Hardenberg J, Koutsias N, Llasat M C, Xystrakis F, Provenzale A (2017). Decreasing fires in Mediterranean Europe. *PLoS ONE*, 11.
212. Turco M, Llasat M C, Tudela A, Castro X, Provenzale A (2013). Brief communication Decreasing fires in a Mediterranean region (1970–2010, NE Spain). *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci.* 13, 649–652.
213. Turco, M, Herrera, S, Tourigny, E, Chuvieco, E, Provenzale, A (2019) A comparison of remotely-sensed and inventory datasets for burned area in Mediterranean Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 82:101-887, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.020>.

Références Bibliographiques

214. Valette J C (1990). Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes. Conséquence sur la combustibilité des formations forestières. In *Revue forestière française*, 17 : pp. 76-92.
215. Van-derWerf G R, Peters W, Van Leeuwen T T, Giglio L (2013). What could have caused pre-industrial biomassburning emissions to exceed current rates? *Clim. Past* 9: 289–306.
216. Vilar, L.; Camia, A.; San Miguel-Ayanz, J. A comparison of remote sensing products and forest fire statistics for improving fire information in Mediterranean Europe. *Eur. J. Remote Sens.* 2015, 48, 345–364.
217. Youta H J (1998). Arbres contre graminées: la lente invasion de la savane par la forêt au centre Cameroun, Thèse de doctorat, Université de Sorbonne Paris IV. 237 p.
218. Yue C, Ciais P, Zhu D, Wang T, Peng S S, Piao S L (2016). How past fire disturbances contributed to the current carbon balance of boreal ecosystems? *Biogeosciences* 13: 675–690.
219. Zammit O (2008). Détection de zones brûlées après un feu de forêt à partir d'une seule image satellitaire spot 5 par techniques SVM. Thèse de doctorat en Automatique, Traitement du Signal et des Images. Université de Nice-Sophia Antipolis.
220. Zha Y, Gao J, Ni S (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.

Site internet

<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

<http://glovis.usgs.gov/>

https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q1

<https://www.copernicus.eu/en/fire-climate-change-initiative>

<https://www.esa-fire-cci.org/>

Annexe 01

Les données climatiques de la station de Jijel

Station	Param	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
JIJEL	M °C	16,2	16,3	18,2	20,1	23,3	27,4	30,2	31,4	28,5	25,5	20,5	17,5	
	m°C	6,7	6,6	8,3	9,8	13,1	16,5	19,9	20,3	18,7	15,2	10,9	8,1	
	T°C	11,45	11,45	13,25	15	18,2	22	25,1	25,85	23,6	20,4	15,7	12,8	
	P(mm)	143,3	120,9	85,3	85,2	25,1	13,8	3,6	15	67,5	95,1	147	183	

Annexe 02

Les données climatiques de la station d'Annaba

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
ANNABA	M °C	16,7	17,1	18,3	21,3	24,3	27,2	30,7	31,4	29,3	25,8	20,9	17	
	m°C	6,9	9,9	7,5	9,7	13,2	15,8	19	19,7	18,3	14,7	10,1	7,3	
	T°C	11,8	13,5	12,9	15,5	18,75	21,5	24,85	25,55	23,8	20,25	15,5	12,15	
	P(mm)	100,52	81,59	69,35	59,42	36,72	14,69	2,51	9,4	36,42	71,9	86,29	122,3	69

Annexe 03

Les données climatiques de la station d'EL Tarf

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
EL TARF	M °C	13,3	15,2	16,6	17,3	19,9	23,9	26,3	27,9	27,8	25,2	20,1	15,7	
	m°C	6,2	7,4	10,5	12,6	15,5	16,7	20,1	21,8	21	18,6	16,9	9,8	
	T°C	9,75	11,3	13,55	14,95	17,7	20,3	23,2	24,85	24,4	21,9	18,5	12,8	
	P(mm)	145	120	79	64	44	21	4	11	44	85	137	156	

Annexe 04

Les données climatiques de la station de Guelma

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
GUELMA	M °C	15,78	16,2	19,7	22,8	27,26	32,88	36,65	36,51	31,28	27,9	20,93	16,86	
	m°C	4,525	4,5	6,26	8,94	11,43	15,6	18,69	19,11	17,01	13,9	9,36	6,05	
	T°C	10,15	10,3	13	15,9	19,35	24,24	27,67	27,81	24,15	20,9	15,15	11,45	
	P(mm)	90,29	75,2	76	69,6	40,44	18,08	3,72	17,81	46,59	51,6	72,65	87,08	

Annexe 05

Les données climatiques de la station de Sétif

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
SETIF	M °C	9,59	11,2	14,26	17,41	23,06	29,34	33,35	32,75	27,09	21,37	14,43	10,2	
	m°C	1,73	2,36	4,45	6,89	11,49	16,22	19,74	19,67	15,61	11,63	6,71	2,83	
	T°C	5,66	6,78	9,355	12,15	17,28	22,78	26,55	26,21	21,35	16,5	10,57	6,52	
	P(mm)	39,73	32	35,09	38,96	46,45	22,05	12,83	14,06	42,08	32,83	34,86	49	

Annexe 06

Les données climatiques de la station de Khenchela

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Khenchela	M °C	9.41	9.49	13.74	17.94	24.11	28.57	32.14	32.87	27.90	20.50	14.43	10.11	
	m°C	0.99	0.40	1.43	5.02	9.53	12.88	15.28	17.17	13.28	8.42	3.53	1.41	
	T°C	5,2	4,95	7,59	11,3	16,8	20,73	23,7	25	20,59	14,5	8,98	5,76	
	P(mm)	34,5	40,4	33,1	58,3	52,3	32,5	21,1	21,1	56,29	42,1	40,6	43,5	

Annexe 07

Les données climatiques de la station de Batna

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
BATNA	M °C	12,13	13,41	16,78	20,3	26,01	31,71	35,69	34,96	29,35	24,19	17,28	12,9	
	m°C	0,1	0,49	2,86	5,74	9,75	14,29	17,09	17,13	14,38	10,13	4,77	1,3	
	T°C	6,115	6,95	9,82	13	17,88	23	26,39	26,05	21,87	17,16	11,03	7,11	
	P(mm)	31,76	23,74	31,01	36,34	41,71	18,09	6,69	20,79	33,70	24,24	24,42	28,64	

Annexe 08

Les données climatiques de la station de Mila

Station		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
MILA	M °C	11,5	12,4	15,02	18,74	23,5	25,7	30,9	30,7	26,8	24,6	16,5	14,49	
	m°C	4,12	4,15	6,2	8,33	10	13,25	17,42	18,09	15,02	14,2	9,5	5,03	
	T°C	7,81	8,28	10,61	13,54	16,8	19,48	24,16	24,4	20,91	19,4	13	9,76	
	P(mm)	80	88,9	82,5	47,82	39,9	42,01	12,5	43,5	30,02	43,2	78,6	68,72	

Annexe 09

Précipitations moyennes saisonnières des Stations étudiées.

Station	Automme	Hiver	Printemps	Été	Type
Jijel	31,4%	45,4%	19,9%	3,3%	HAPE
Annaba	28,2%	44,0%	23,9%	3,8%	HAPE
EL Tarf	29,2%	46,3%	20,5%	4,0%	HAPE
Guelma	26,3%	38,9%	28,7%	6,1%	HPAE
Sétif	27,4%	30,2%	30,1%	12,2%	HPAE
Khenchela	29,2%	24,9%	30,2%	15,7%	PAHE
Batna	27,2%	27,8%	30,0%	15,0%	PHAE
Mila	23,1%	36,1%	25,9%	14,9%	HPAE

MODELLING OF FOREST FIRE RISK SPATIAL DISTRIBUTION IN THE REGION OF AURES, ALGERIA

SOUAD RAHMANI¹, HASSEN BENMASSOUD²

¹ University of Batna 2, Faculty of Nature and Life Sciences, Department of Ecology and Environment, Laboratory for Improvement of Agricultural Production and the Protection of Ecosystems in Arid Zones, Street of Constantine Fésdis 53, 05078 Batna, Algeria, e-mail: s.rahmani@univ-batna2.dz

² University of Batna 1, Institute of Veterinary Sciences and Agronomic Sciences, Department of Agricultural Sciences, Laboratory for Improvement of Agricultural Production and the Protection of Ecosystems in Arid Zones, Avenue Chahid Boukhrouf 5, 05000 Batna, Algeria, e-mail: ha123_m123@yahoo.fr

DOI: 10.15291/geoadria.2846

UDK: 528.9:<504.2:614.85>(65)(256)=111

Original scientific paper

Received: 5-7-2019



The objective of this study is to model and map the forest fire risk in the region of Aures situated in the northeast of Algeria, through the application of Analytical Hierarchy Process (AHP) method to integrate geographic information systems (GIS) and remote sensing. The methodology is based on a weighted linear combination of three parameters, namely, vegetation, topography and the anthropogenic factor which influences the initiation and propagation of a forest fire. The result is a risk map with four classes according to pixel values, whereas very high-risk class takes up 18.28% of the study area, high-risk class takes up 42.42%, moderate risk class takes up 5.24% and low-risk class takes up 34.05%.

KEY WORDS: modelling, forest, fire, risk, Analytic Hierarchy Process (AHP), GIS, remote sensing.

INTRODUCTION

In the Aures region (northeast of Algeria), forest fire causes huge environmental damage. Each year a lot of forest areas are destroyed, and this has been happening especially over the last seven years. The anthropic pressure is the main factor of forest fires in the Mediterranean basin with at least 95% of fires are caused by man. The most frequent human activities that cause forest fires are: the extraction of non-woody plants, clearing due to agricultural activities, arson, negligence, and hunting. The economic losses due to forest fires are not estimated only in terms of burned area, but also in terms of loss of production, degradation of the environment and the social impact (*Fire management – global assessment 2006, 2007*). The spread and intensity of forest fires are related to climatic, topo-morphological conditions, the type of vegetation and anthropogenic factors (FALEH ET AL., 2012).

The Mediterranean climate of the study area is characterized by a dry summer period with an extreme flammability of the vegetation during this season, the increasing rugged character of the field and human activities make this region an area of a repetitive risk of forest fires (*Fire management – global assessment 2006, 2007*). Conventional methods generally used in the study area for the prevention and the firefighting are time-consuming and are not always reliable due to the complexity and diversity of forest ecosystems. According to the FAO, the fire risk is the chance of fire starting as determined by the presence and activity of causative agents, a causative agent, a number related to the potential of firebrands to which a given area will be exposed during the rated day (*Wildland fire management terminology, 1986*).

In this context, the modelling of forest fire risk allows on one hand to guide and optimize in short and medium term the rate of investment including infrastructure, equipment and fire development operations (ASSALI ET AL., 2016). On the other hand, it allows the involvement of managers in their activities of prevention, intervention and territorial planning for identifica-

tion of the areas most vulnerable to fire.

Various methods can be implemented in order to model and localize the hazard. Those vary according to the aims, the means and various forms of modelling used. In our study, the Analytic Hierarchy Process (AHP) integrated with Geographic Information Systems (GIS) was applied in modelling and mapping the forest fire risk in the Aures region. The study was carried out considering objective parameters that can influence vulnerability to forest fire such as the ecological parameters (the combustibility of the vegetation formations), the site parameters (slope, exposure, and topo-morphology) and anthropogenic factors.

The Analytic Hierarchy Process (AHP), introduced by T. Saaty (1977), is a method which provides a technique based on a mathematical model for analyzing complex situations and is sophisticated in its simplicity. This technique has become very successful in helping decision makers to structure and analyze a wide range of problems (GOLDEN ET AL., 1989).

According to researchers (DAGORNE ET AL., 1994; ERTEN ET AL., 2004; ADAB ET AL., 2013; ASSALI ET AL., 2016), the modelling of risk of forest fires incorporating three sub-indices, which is: topo-morphology, combustibility and the anthropogenic factor as parameters to which weights have been assigned in accordance with the importance of each parameter in forest fire risk. The aim of the study is to provide managers a tool to help them in their planning, prevention and fight against fires in the forests in Aures region taking into account that this paper deals with long-term hazard assessment.

PRESENTATION OF THE STUDY AREA

The study area is located at the eastern Aures, part of the Saharan Atlas which is located geographically in northeastern Algeria (Fig. 1). It is situated between Arris and Khenchela, ranging from the Chelia mountain in the north, to the oasis of El Ouldja (Taghzout) on the southern part of the massif of Aures, it extends

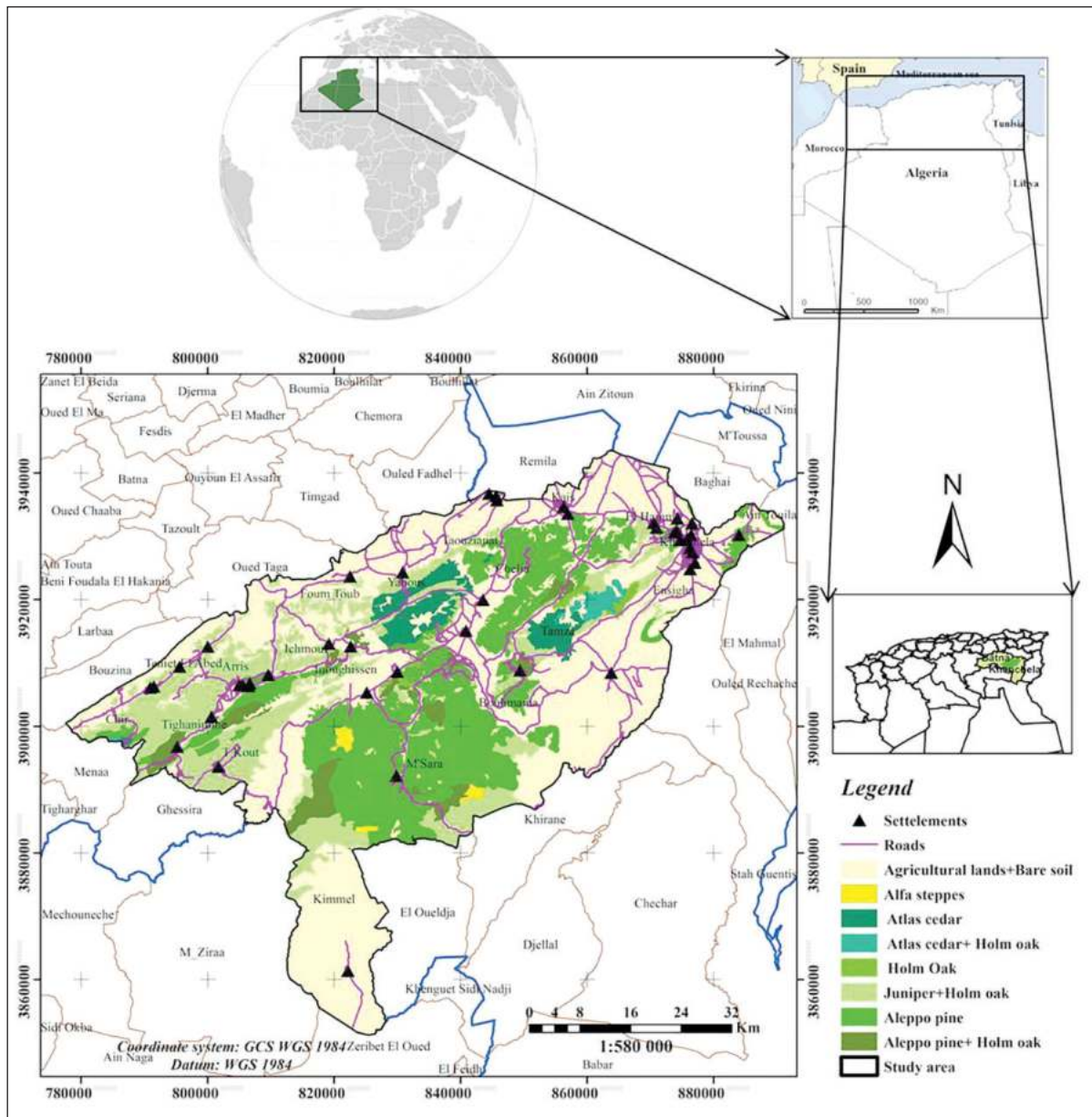


FIGURE 1 Geographic localization and the land use of the study area

between the $35^{\circ} 00'$ and $35^{\circ} 18'$ north latitude and $6^{\circ} 22'$ and $6^{\circ} 52'$ longitude.

This area is composed of four contiguous mountains: Beni Imloul with more than 75,000 hectares, the Ouled Yagoub which counts 45,000 hectares (GARAH ET AL. 2016) and the forest of the southern area of Aurès with 61885.04 hectares. The complex of Aures landscapes is composed of different interacting vegetation patches. Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and holm oak (*Quercus ilex*) ecosystems form contiguous patches within these landscapes, or as mixed pine-oak and *Cèdre de l'Atlas* (*Cedrus atlantica*) ecosystems located between 600 and 2300 meters above sea level. The study area is

known for its sensitivity to very frequent fires in the summer, and these vegetation types are mainly distributed from the Bouhmama series with an altitude of 1736 m to the first Saharan oasis of Kheirane at the altitude of 662 m (HELAL, 2010).

The study area consists of a set of hilly reliefs of direction general south and north, ranging in altitude from 662 to 2300 m, with an average slope of 30%. The field of study is characterized by the Mediterranean climate corresponding to bioclimatic vegetation floors ranging from semi-arid to the sub-humid and varied precipitation depending on the altitude and exposure.

MATERIALS AND METHODS

The approach adopted for this study is based on the integration of geographic information systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP) to estimate *forest fire risk* zones in Aures region.

The aim of the present study is to propose a methodology based on the previously presented researches related to modelling and mapping of forest fire risk by identifying three principal criteria, that are linked to forest fire: topography, vegetation and human factor using *fire-related risks* parameters and indices that are adapted to the Mediterranean semi-arid and sub-humid areas of North Africa (BOULTIF, BENMESSAOUD, 2017), with the use of land management expertise weighting, Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS (Fig. 2).

The first step in the pre-treatment of image data is the delimitation of the study area after the mosaicking of 2 scenes, as well as in the atmospheric correction of images. The second step is to

produce a thematic map showing the distribution of vegetation classes in the study area by using supervised classification method with ENVI 5.1 software. The classes were determined based on the spectral characteristics of geographical objects, and validated by the information collected in the study area. This information is essentially summarized in the description of vegetation formations, and taking their geographical coordinates GPS (Global Positioning System). Using the Google earth program, additional sampling points were taken and the on-site situation was examined for places with difficult access.

DEVELOPMENT OF CRITERIA

In the case of this study three criteria chosen in our analysis (AHP), topo-morphology, vegetation combustibility and the anthropogenic factor. These criteria were extracted from the sentinel satellite data, digital elevation model (DEM) and

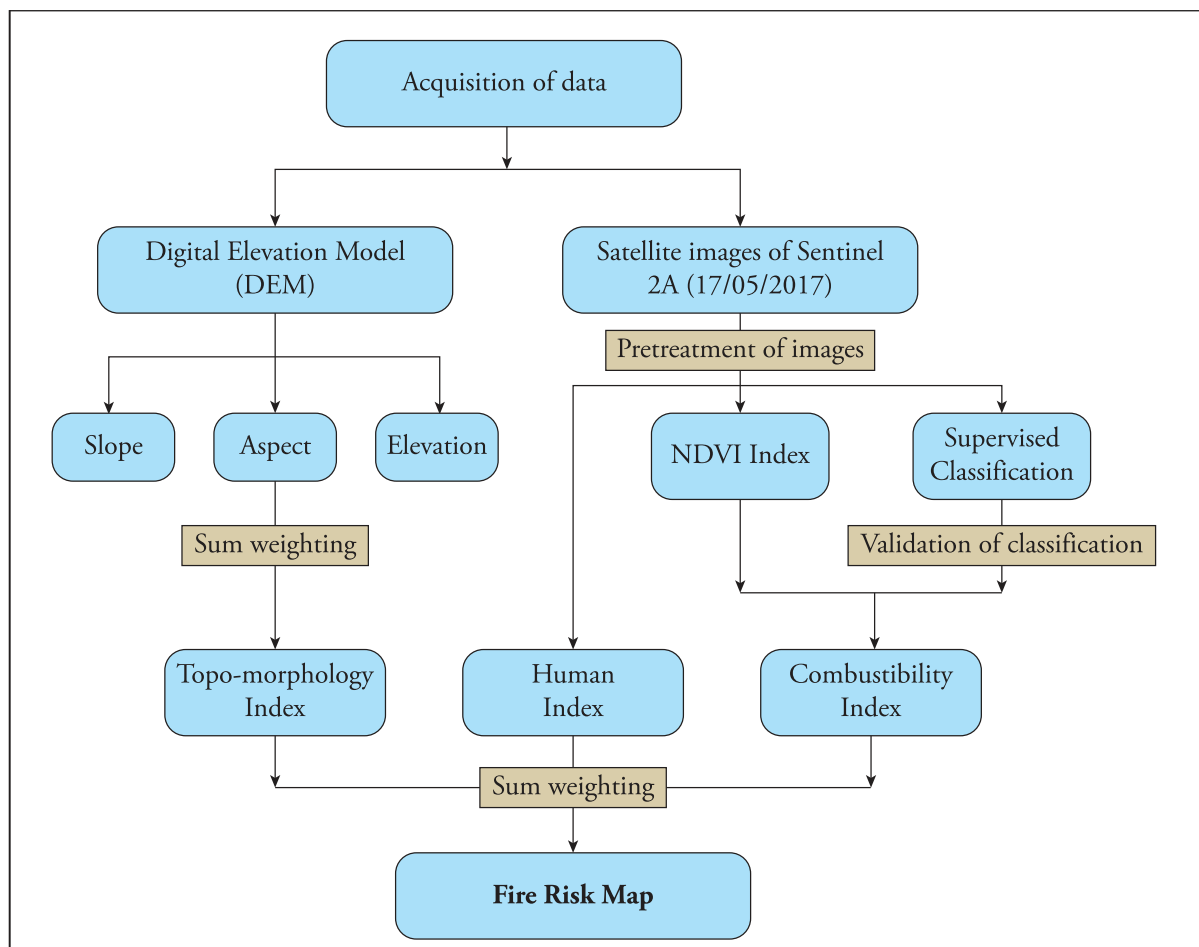


FIGURE 2 Methodology chart of the fire risk mapping in the study area

SRTM respectively and were measured using the spatial analysis capabilities of GIS.

1. *Vegetation combustibility*

The combustibility indicates the ability of vegetation to spread fire, and to release quantities of heat more or less important during combustion, depending on the structure and the dominant plant species of the forest (FALEH ET AL., 2012). The combustibility index or the index of potential fire intensity was estimated by the formula below (Equation 1), which was proposed by (MARIEL, 1995).

$$IC = 39 + 0,23 BV (E1 + E2 - 7,18) \text{ (Equation 1)}$$

Where:

BV: Bio volume of the plant formation.

E1: Note of combustibility for dominant tree tops

E2: Notes of combustibility for dominant low woody or herbaceous plants

In this study, the calculation of combustibility is based on combination of dominant vegetation classification of the study area by using the supervised classification (maximum likelihood) tool in Arc GIS 10.2.2 software, and the *quantities of combustible biomass* that is estimated from the vegetation index normalized difference (NDVI) using raster calculator tool in ArcGIS. The NDVI is defined as the difference between the red and near infrared (NIR) reflectance divided by their sum (TUCKER, 1979), and it is calculated from these individual measurements as follows (Equation 2):

$$NDVI = \frac{(NIR - NED)}{(NIR + NED)} \text{ (Equation 2)}$$

This step of calculation of combustibility was done from two recent satellite images taken in 17 June 2017 from the new satellite SENTINEL2A, acquired in the dry season, where one can distinguish the various types of land cover. The *satellite* carries a wide swath high-resolution (10 m) multispectral imager with 13 spectral *bands*, and its wide swath width (290 km).

2. *Topo-morphological index*

The topography is also one of the main factors that affect the spread of a forest fire. The slope determines the flames inclination and thus their rate of spread (MERDAS, 2007). The exposure also has an indirect role in the progression of the fire, because it determines the type of vegetation (BAARA, 2014), the influence of the winds and sun radiation. So the topo-morphological index is calculated by the combination of three physical parameters, such as the slope, exposure and altitude, and these three components were extracted from digital elevation model or DEM of the study area.

3. *Human index*

The anthropogenic factor is one of the main factors that aggravate the spread of the fire. The human index related to the occupation and human activity, this index was conducted by calculating the index of normalized difference built NDBI defined by (ZHA ET AL., 2003). The development of NDBI index was based on the unique spectral response of built-up land that has stronger reflectance in the range of MIR (medium infrared) wavelength in the range of wavelength NIR (near radiation infrared). This index was expressed by the following formula (Equation 3):

$$NDBI = B6 - B5 / B6 + B5 \text{ (Equation 3)}$$

The Normalized Difference Build-up Index value lies between -1 to +1. Negative values of NDBI represent water bodies while higher values represent build-up areas. NDBI value for vegetation is low (ZHA ET AL., 2003).

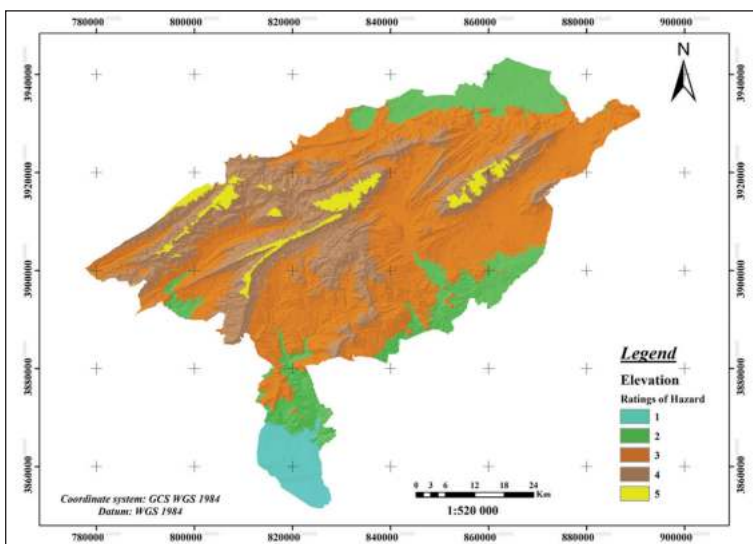
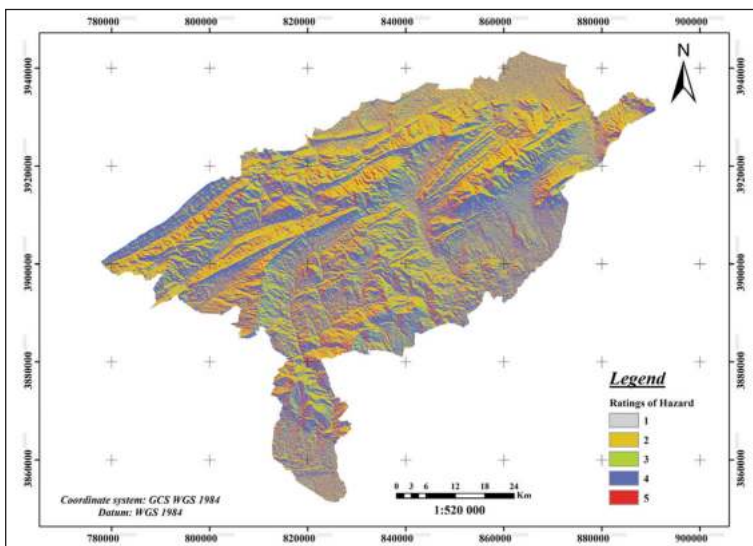
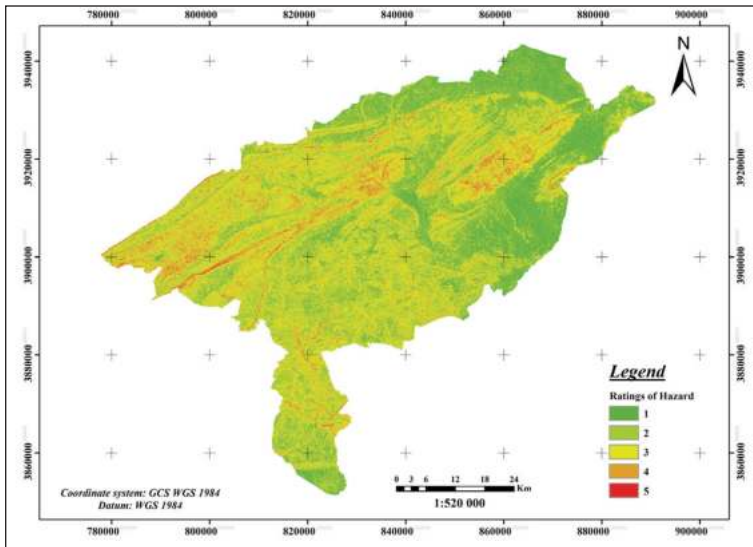
MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING

Sub criteria mapping and scores assigning

At first, all indices and parameters were mapped to form sub-criteria layers that will enter in the assessment of final forest fire risk (Fig. 3).

The next step is to reclassify each sub-criteria layer into value intervals using ArcGIS reclassifying tool (Tab. 1), then, scores from 1 to 5 were

assigned to each class according to the intensity of each class on the risk, where 1 stands for a favourable value class.



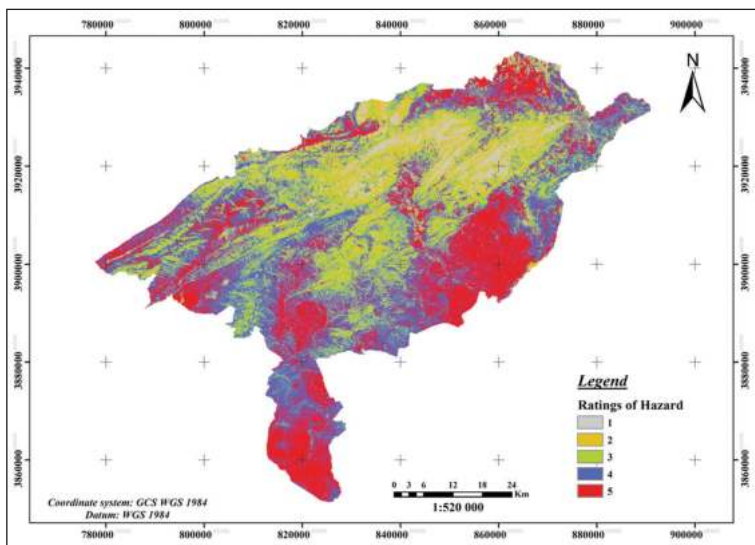
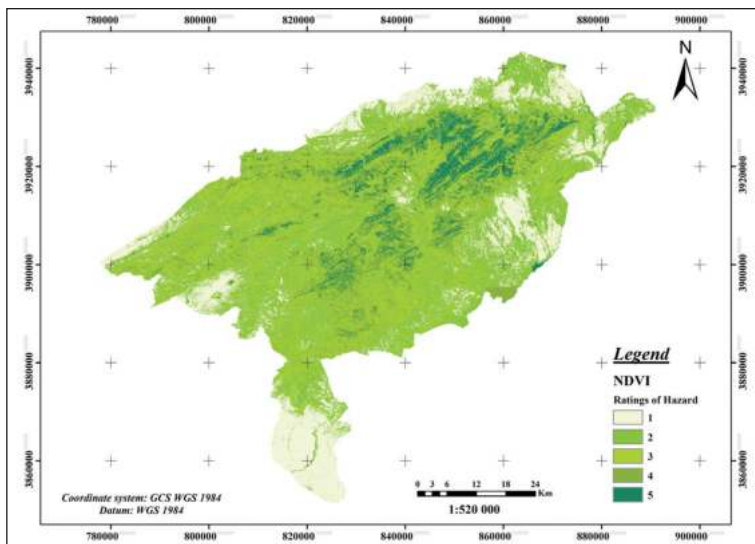
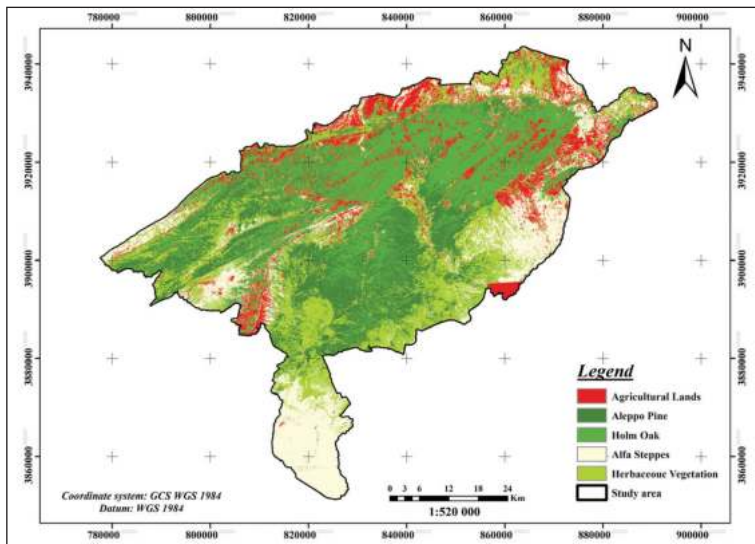


FIGURE 3 Slope, aspect, elevation, land use, NDVI index and Human index of the research area

TABLE I Weight of parameters in determination of fire risk areas

Factors	Parameters and indices	Values	Scores
Topo-Morphology	slope	Very Low	1
		Low (P<15%)	2
		Medium (15<P< 30%)	3
		High (30<P< 45%)	4
		Very high (P>45%)	5
	Aspect	Dish	1
		North	2
		East	3
		South	4
		West	5
	Topo-morphology	Plain (P <3%)	1
		Low piedmont (3< P <12.5%)	2
		Medium piedmont (12.5< P <25%)	3
		High piedmont (25< P <35%)	4
		Mountain (P> 35%)	5
Combustibility	land use	Agriculture	1
		Alfa steppe	2
		Herbaceous vegetation	3
		Holm oak	4
		Aleppo pine	5
	NDVI	Very Low	1
		Low	2
		medium	3
		High	4
		Very high	5
Anthropogenic	Human index	Very low	1
		Low	2
		Medium	3
		High	4
		Very high	5

TABLE 2 Assigned weight according to Saaty scale

Criterion	Combustibility	Topo-morphology	Anthropogenic
Combustibility	1	3	5
Topo-morphology	1/3	1	3
Anthropogenic	1/5	1/3	1

Multicriteria decision making

The method of Analytical Hierarchy Process (AHP) produces standardized weights whose sum is equal to "1." The method is based on a series of pairwise comparisons of these criteria from the construction of a square matrix taking into account the relative importance of a criterion relative to another (BOUZEKRI, 2015) for the establishment of such measures using Saaty scale (Tab. 2).

Weighting of criteria

For estimating the weighting coefficient requires the calculation of the eigenvector (V_p) of the comparison matrix in pairs, the values of these eigenvectors (V_p) are determined by calculating their geometric mean by cork for each criterion and the weighting coefficient for each criterion is deduced by standardizing the eigenvector by dividing each eigenvector by their sum and provided that the sum of the weighting coefficients must be equal to 1 (Tab. 3).

TABLE 3 Weight values for the different criteria.

Criterion	Weight
Combustibility	0.63334572
Topo-morphology	0.26049796
Anthropogenic	0.10615632
Total	1

The final step is to calculate a consistency ratio (CR) to measure how consistent the judgments have been relative to large samples of purely random judgments. Saaty suggests that if that ratio exceeds 0.1 the set of judgments may be too inconsistent unreliable. And if CR equals 0 then that means that the judgments are perfectly consistent (SAATY, 1977). The consistency ratio (CR) in this study is equal 0.09.

RESULTS AND DISCUSSION

In the final step, the decision criteria were aggregated and combustibility, topo-morphology and the human index were compiled (Fig. 4) by the method of the weighted sum based on their weights. Each standardized test layer was multiplied by its coefficient of corresponding weighting.

Index of forest fire risk in the region of Aures

The combination by the method of the weighted sum based on their weights the three resulting layers (combustibility index, index of topo-morphology and the human index) were used to determine the level of risk to forest fires in the Aures region (Fig. 5).

According to the final map (Fig. 5) and the calculation of the areas of each level of risk, we can say that the map highlights the dominance of high risk class with an area of over 169,541.34 ha, (rate of 42.42%). All these areas are covered with Aleppo pine. Low risk class represented 34.05% of the total surface area; it is covered with farmland, bare land and built-up areas. High risk class is well represented with an average of 18.28% of the area; there is a mixed stand of Aleppo pine and holm oak. Medium risk class is important, but it has only 5.24% of the area, and there is only herbaceous vegetation.

The bar chart below (Fig. 6) shows the different forest fire risk levels in the study area.

In Algeria, many studies were conducted to assess forest fire risk and (GUETTOUCHE, DERIAS, 2013) and (OKACHA ET AL., 2017) have conducted similar studies on other regions of the Algerian forest (the region of Bouzareah Clump and the Forests of Saida) and they found that the total of forest fire risk is highly influenced by vegetation, given the value of the weight assigned to this parameter. However, this influence is diminished

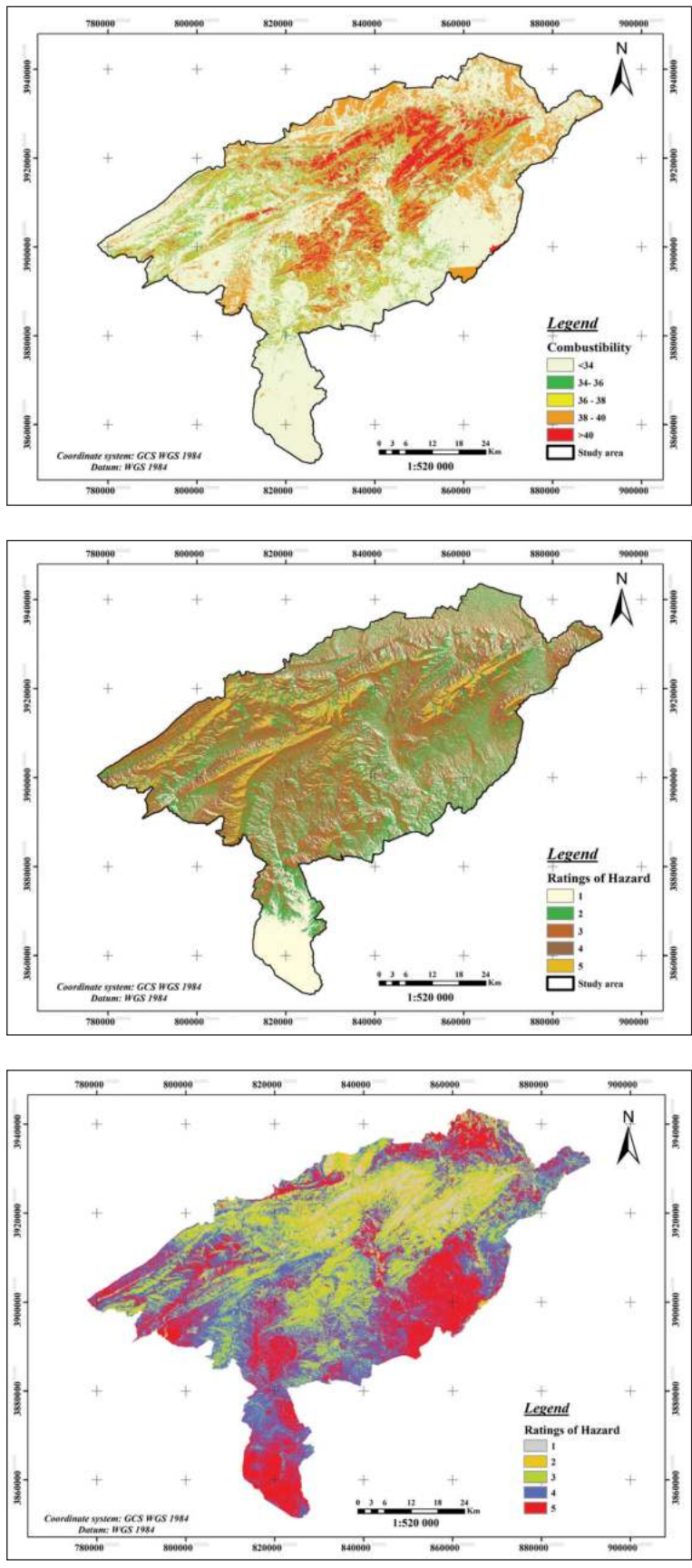


FIGURE 4 Spatial sensitivity criteria of Aures region. Combustibility, topomorphology and anthropogenic factor

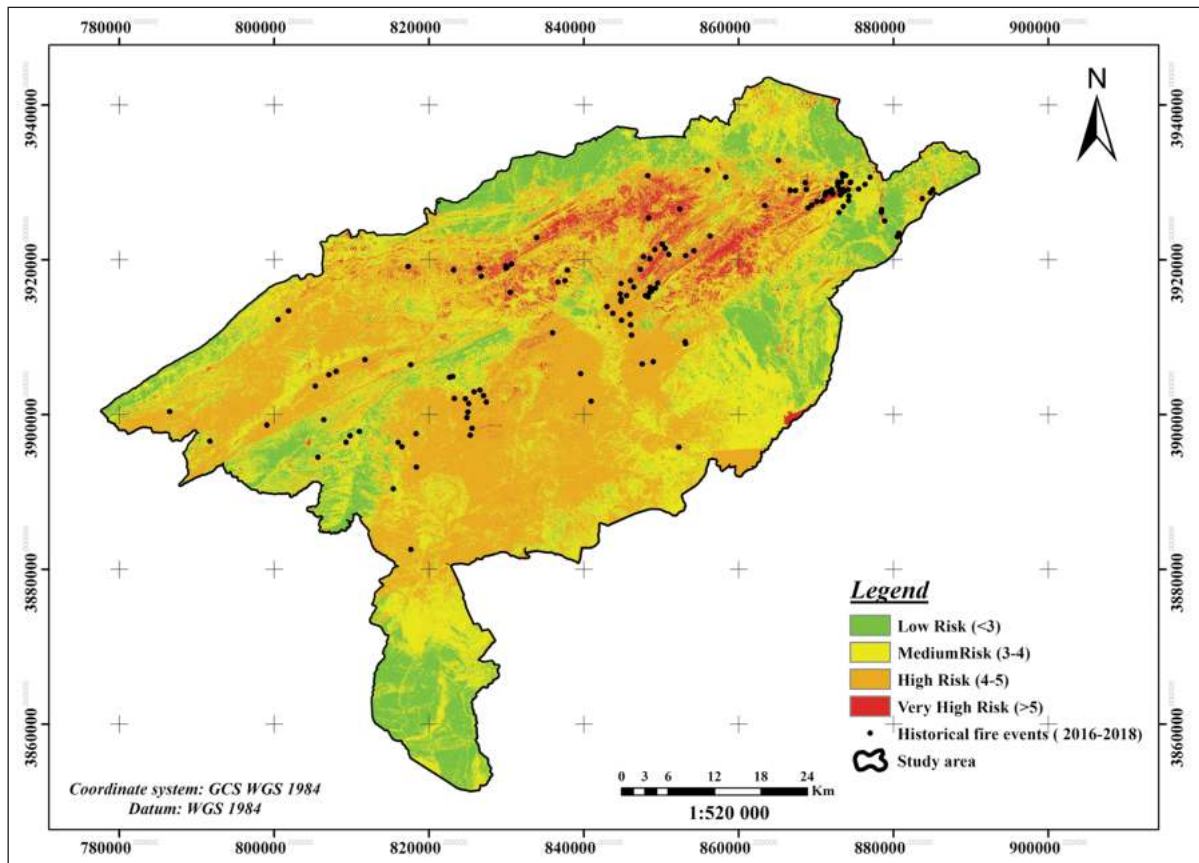


FIGURE 5 Map of forests fire risk in Aures region

when there are several other parameters for the same zone.

In this study, according to the indices related to the risk of fire, risk analysis was subject to vegetation combustibility (Aleppo pine and holm oak) which are the most dominant species in the study area, the dominance of south exposition which

sets out more favourable conditions for rapid inflammation and the spread of the flames, and anthropogenic factors such as habitat/forest interfaces that can be singled out as vulnerable to fire and so as a source of hazard. In the absence of a similar study in the study area, the risk map produced in this study will be of vital interest to the

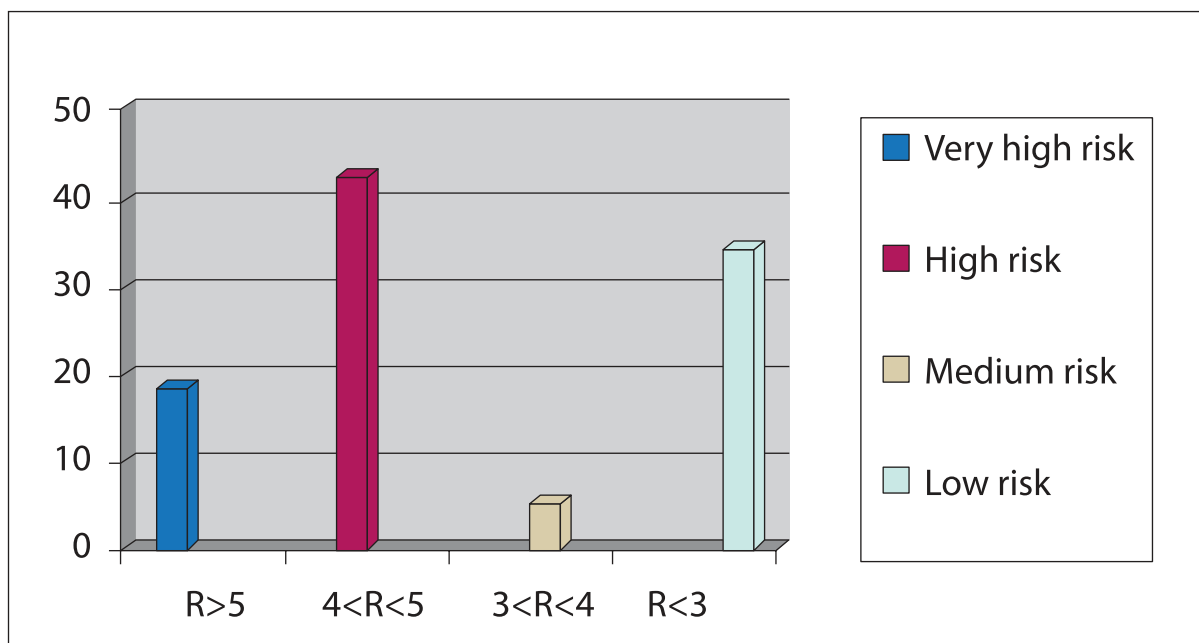


FIGURE 6 Different forest fire risk levels in the study area

firefighting and development services, because the model adopted in the methodology gave important and convincing results characterized by its adaptability to the area of study. Therefore, the mapping model allows highlighting the most sensitive areas and to identifying and clarifying priority protection areas better. This map can be used for equipment installation, firewall trenching and the establishment of trails.

CONCLUSION

The remote sensing and GIS are techniques with considerable contribution in the context of sustainable management of natural resources. GIS and methods of hierarchical multi-criteria (AHP) analysis were used in this study, we took into account the criteria of topography, combustibility and the anthropogenic factor, as the integration of these three parameters into GIS can be very useful to determine risk map and to plan forestry management after fire. According to the final map that shows the vulnerability of the study area to forest fire, we found that very high risk and high risk class take up 18.28% and 42.42% of the total surface respectively, medium risk class takes up 5.24% and low risk class

takes up 34.05%. The risk map is not a means of firefighting, but it helps foresters and decision makers to: identify and prioritize fire risk areas, in order to intervene in the environment with sustainable management, put in place a reasonable policy for the fight and prevention against forest fires, and establish a development plan and a suitable land control according to the risk. The vulnerability of study area, notably its highly combustible vegetation composition makes it desirable to improve this study with other models which would incorporate other parameters such as meteorological data like temperature, air humidity, the speed and direction of wind, precipitation. We have proposed strengthening of the emergency response, the implementation of the access roads especially where the risk is high, monitoring, water stations, raising public awareness in order to reduce the risk of fire and to limit the consequences.

Acknowledgments

We wish to thank the General Directorates of Forests in BATNA and KHENCHELA for their support, information and discussion with experts in this field.

BIBLIOGRAPHY

- ADAB, H., KANNIAH, K., SOLAIMANI, K. (2013): Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques, *Journal of Natural Hazards*, 65, 1723-1743, DOI: 10.1007/s11069-012-0450-8.
- ASSALI, F., MHARZI ALAOU, H., ROUCHDI, M., BADRAOUI, M. (2016): Modelling and mapping forest fire ignition risk in North-West Morocco (Chefchaouen-Ouazzane Region), *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 17, 111-128.
- BAARA, Y. (2014): *Fractal and multifractal characterization of heat transfer application to fire*, Doctoral thesis, University of Sciences and Technology (USTO-MB), Algeria.
- BOULTIF, M., BENMESSAOUD, H. (2017): Using Climate-Soil-Socioeconomic Parameters for a Drought Vulnerability Assessment in a Semi-Arid Region: Application at the Region of El Hodna, (M'sila, Algeria), *Journal of Geographica Pannonica*, 21, 142-150, DOI: 10.5937/GeoPan1703142B.
- BOUZEKRI, A. (2015): *Multicriteria evaluation of critical situations to desertification risk in Aurès*, Doctoral thesis, El Hadj Lakhdra University, Batna, Algeria, pp. 186.
- DAGORNE, A., DUCHE, Y., CASTEX, J. M., OTTAVIJ, Y. (1994): Protection of forests against fire and geographic information system: application to the municipality of Auribeau-sur-Siagne (Alpes Maritimes), *Mediterranean Forest Revue*, 15 (4), 409-420.
- ERTEN, E., KURGUN, V., MUSAOGU, N. (2004): Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS a case study, *XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, Istanbul, Turkey.
- FALEH, A., LAKHOUAJA, H., SADIKI, A., CHAAOUAN, J. (2012): GIS, teledetection and evaluation of forest risk "Example of forest Khezana (Province Chaouene)", *Journal of Papeles de Geografia*, 55-56, 37-48.
- Fire management – global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*, FAO, Rome, 2007.
- GARAH, K., CHAFAI, C., BENTOUATI, A. (2016): Spatio-temporal changes in Aleppo pine forest ecosystems in the eastern Aures (Algeria), *Revue Forestière Française*, 3, 217-229, DOI :10.4267/2042/62003.
- GOLDEN, B. L., WASIL, E. A., HARKER, P. T. (1989): *The Analytic Hierarchy Process, Applications and Studies*, Springer, Berlin, pp. 265.
- GUETTOUCHE, S. M., DERIAS, A. (2013): Modelling of Environment Vulnerability to Forests Fires and Assessment by GIS Application on the Forests of Djelfa (Algeria), *Journal of Geographic Information System*, 5, 24-32, DOI:10.4236/jgis.2013.51003.
- HELAL, Y. (2010): Investigation of *Rosmarinus officinalis L.*, Biomass in the massif Beni-Imloul-Aures-Algeria, *Revue Forest Science*, 3, 25-42
- MARIEL, A. (1995): *Mapping the level of fire risk: example of the Maures massif*, Cemagre report.
- MERDAS, S. (2007): *Assessment of forest fires in some wilayas of eastern Algeria; case of Bejaia, Jijel, Setif and Bordj Bou-Arréridj*, Magister thesis., University of Mentouri-Constantine, Algeria.
- SAATY, T. L. (1977): A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281, DOI: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- TUCKER, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Wildland fire management terminology*, FAO, Rome, 1986, pp. 257
- ZHA, Y., GAO, J., NI, S. (2003): Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594, DOI: 10.1080/01431160304987.

المخلص

توفر عمليات إعادة بناء تاريخ الحرائق على المدى الطويل معلومات ثمرة في سياق التغيير العالمي. غالبًا ما تفتقر المناطق المحروقة من الإحصائيات الوطنية إلى المصدقية بسبب التناقضات في بروتوكولات تقارير الحرائق بين البلدان، وسجلات البيانات الجزئية، وتقديرات المناطق المحروقة غير المؤكدة من الملاحظات الميدانية. ومع ذلك، فهي تشكل مصدرًا بديلًا فريدًا وقيمًا طويل المدى للمعلومات. نقدم هنا تحليلًا نقديًا لقاعدة بيانات الحرائق في الجزائر. قمنا بتحليل قاعدة بيانات تسجيل الحرائق جنبًا إلى جنب مع توصيف المنطقة المحروقة بالاستشعار عن بعد من صور لاندسات. من قاعدة البيانات المصححة هذه، نستنتج الحاجة إلى إجراء تقييم شامل لجودة البيانات في إعادة بناء تاريخ الحرائق من الإحصائيات الوطنية لمنع الاستنتاجات المضللة، ولزيادة المصدقية، من أجل استخدامها بشكل أكبر في قياس نماذج الحرائق أو تحليل طقس الحرائق. تبحث هذه الدراسة أيضًا في إمكانية نمذجة نظم المعلومات الجغرافية ورسم خرائط لمخاطر حرائق الغابات في منطقة الأوراس. أثبتت بيانات الأقمار الصناعية لرصد الأرض المرتبطة بأنواع مختلفة من معلومات حرائق الغابات، بمجرد دمجها في نظام المعلومات الجغرافية، أنها خيار موثوق لرصد حالات الطوارئ، وتحديد المناطق المعرضة للخطر، ورسم خرائط مدى الحرائق

الكلمات المفتاحية: حرائق الغابات، قاعدة بيانات، الاستشعار عن بعد، نمذجة خطر الحرائق

Abstract

Long-term fire history reconstructions provide fruitful information in the context of global change. Burned areas from national statistics often lack credibility due to discrepancies in fire report protocols between countries, partial data records and uncertain burned area estimates from field observations. However, they constitute a unique and valuable alternative long-term key source of information. We provide here a critical analysis of the fire database in Algeria. We analyzed the fire record database combined with remote sensing burned area characterization from Landsat images. From this corrected database, we conclude on the need for thorough assessment of data quality in fire history reconstruction from national statistics to prevent misleading conclusions, and for an increased credibility, in order to be further used in fire models benchmarking or fire weather analysis. This study also examines the possibility of GIS modelling and mapping of forest fire risk in the Aures region. Earth observation satellite data associated with the different types of forest fire information, once integrated into a geographic information system, have proved to be a reliable option for monitoring emergencies, identifying areas at risk, and mapping the extent of the fires.

Keywords : Forest fire, LANDSATdata, remote sensing, modelling fire risk,

Résumé

Les reconstitutions de l'histoire des incendies à long terme fournissent des informations utiles dans le contexte du changement global. Les zones brûlées obtenues à partir des statistiques nationales manquent souvent de crédibilité en raison des divergences entre les protocoles de déclaration des incendies entre les pays, des enregistrements partiels des données et des estimations incertaines des zones brûlées résultant des observations sur le terrain. Cependant, elles constituent une source d'information unique et précieuse à long terme. Nous fournissons ici une analyse critique de la base de données sur les incendies en Algérie orientale. Nous avons analysé la base de données des incendies combinée à la caractérisation des zones brûlées à partir d'images Landsat. A partir de cette base de données corrigée, nous concluons sur la nécessité d'une évaluation approfondie de la qualité des données dans la reconstruction de l'histoire des incendies à partir des statistiques nationales pour éviter des conclusions erronées, et pour une crédibilité accrue, afin d'être utilisé dans l'évaluation comparative des modèles d'incendie ou l'analyse de la météo des incendies. Cette étude aussi examine la possibilité de modélisation et de cartographie par SIG du risque d'incendies de forêts dans la région des Aurès. Les données issues des satellites d'observation de la terre associées aux différents types d'information liés aux feux de forêts, une fois intégrés dans un système d'information géographique, se sont avérées comme une option fiable de suivi des urgences, d'identification des zones à risques et de cartographie de l'étendue des feux.

Mots clés : feux de forêts, Base de données, télédétection, modélisation de risque ;