



**UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER -CONSTANTINE 3 -  
INSTITUT DE GESTION DES TECHNIQUES URBAINES  
DEPARTEMENT TECHNIQUES URBAINES ET ENVIRONNEMENT**

**TITRE**

**CARTOGRAPHIE ET GESTION DES INCENDIES DANS  
LES INTERFACES HABITAT-FORET DANS UNE ZONE  
MONTAGNEUSE (CAS DE DJEBEL EL OUAHCH)**

**THÈSE**

**POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT LMD  
EN GESTION DES TECHNIQUES URBAINES.  
OPTION : GESTION DES RISQUES NATURELS DANS LE MILIEU  
URBAIN**

**Par  
Louiza SOUALAH**

**Année Universitaire  
2024-2025**





**UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER - CONSTANTINE 3 -**  
**INSTITUT DE GESTION DES TECHNIQUES URBAINES**  
**DEPARTEMENT TECHNIQUES URBAINES ET ENVIRONNEMENT**

N° d'ordre :.....

Série :.....

## TITRE

# **CARTOGRAPHIE ET GESTION DES INCENDIES DANS LES INTERFACES HABITAT-FORET DANS UNE ZONE MONTAGNEUSE (CAS DE DJEBEL EL OUAHCH)**

## THÈSE

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT LMD  
EN GESTION DES TECHNIQUES URBAINES  
**OPTION : GESTION DES RISQUES NATURELS DANS LE MILIEU  
URBAIN**

Par  
Louiza SOUALAH

Devant le Jury Composé de :

Pr. DEKKOUMI Djamel	Président	Université de Constantine-3-
Dr. BOUZEKRI Abdelhafid	Directeur	ENSF Khenchela
Dr. MAILLE Éric	Co-directeur	Université d'Aix Marseille
Pr. BENMESSAOUD Hassen	Examineur	Université El Hadj Lakhdar-Batna-
Dr. BOULAHIA Latifa	Examinatrice	Université de Constantine-3-
Dr. MEDDOUR Oualid	Examineur	Université de Constantine-3-

Année Universitaire  
2024-2025



« وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا »

سورة طه الآية 114

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Dr. BOUZEKRI Abdelhafid, pour son encadrement, ses conseils avisés et ses orientations précieuses tout au long de mon parcours doctoral. Son soutien constant m'a encouragé à améliorer cette thèse, et ses qualités humaines ainsi que son expérience scientifique et pédagogique ont joué un rôle crucial dans le choix et le développement du sujet de recherche.

Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse, Dr. Éric MAILLE, pour m'avoir accueilli et accepté de m'encadrer. Ses orientations, ses relectures, ses remarques, et son expertise dans le domaine ont grandement contribué à l'amélioration de mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour le temps et l'intérêt qu'ils ont consacré à l'évaluation de ma thèse. Leurs remarques enrichiront sans aucun doute la valeur de ce travail.

Je remercie chaleureusement les équipes administratives pour m'avoir facilité l'accès aux données nécessaires, en particulier M. MAGOURA et Mme AOURAS. Sans leur précieuse collaboration, il m'aurait été difficile de mener à bien mon enquête de terrain.

Un remerciement particulier à Dr. GANA Mohammed pour avoir complété les données manquantes et pour son expertise, qui ont été d'une aide inestimable.

Un grand remerciement à ma très chère sœur, Dr. SOUALAH Amira, je dois une immense gratitude pour ses encouragements dès le concours de doctorat et tout au long de ces années. Ses orientations, sa bienveillance, ses commentaires positifs et son aide, m'ont été d'un grand soutien. Sa présence à mes côtés a largement contribué à surmonter les difficultés de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon beau-frère, Dr BOUSSOUF Mouatez Billah, pour ses conseils éclairés, ses encouragements, qui m'ont souvent guidée et apporté une grande sérénité tout au long de mon parcours. Il a toujours été mon recours en cas de difficulté, particulièrement dans le domaine de la cartographie.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux enseignants qui ont contribué au développement de mes connaissances dès les premières années de mon parcours.

## DÉDICACES

*Je dédie ce travail en témoignage de respect, de gratitude et de profonde reconnaissance à :*

*A mes très chers parents, qui ont été les piliers de mon existence. Leur amour inconditionnel, leur patience infinie, leur compréhension sans faille et leurs innombrables sacrifices ont été la force motrice derrière cette réussite. Sans leur soutien indéfectible, ce parcours n'aurait jamais été possible.*

*À mes très chères sœurs, Amira et Nedjma, votre présence à mes côtés a été bien plus qu'un simple réconfort ; elle a été une véritable source d'inspiration, de persévérance, de motivation et d'encouragement. Votre amour et votre soutien constants ont illuminé chaque étape de ce chemin ardu.*

*A mes très chers frères, Abdel Raouf, Abdelhak et Abderrzak qui ont toujours été là pour moi avec leur soutien, leurs encouragements et leur confiance en mes capacités. Leur solidarité a été un rempart inestimable dans les moments de doute.*

*A ma sœur de cœur, Zahra, avec qui j'ai partagé les hauts et les bas de ce parcours doctoral. Ta présence, ton soutien indéfectible et ton amitié ont rendu ce chemin bien plus aisé et supportable.*

*A mes très chères amies, Wissem et Joulie, pour leur amitié précieuse, leur soutien moral inébranlable et pour avoir toujours cru en moi.*

*A mes neveux et nièces, dont l'énergie et la joie de vivre ont apporté une touche de bonheur et de motivation supplémentaire tout au long de ce parcours.*

*A mes collègues, pour leur soutien moral et les moments de partage qui ont enrichi cette aventure académique.*

*Enfin, je dédie cette thèse à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce rêve.*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES .....</b>	<b>xv</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ملخص.....</b>	<b>xviii</b>
<b>CHPITRE I : INTRODUCTIF .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction générale.....	1
1.2 Problématique.....	5
1.3 Hypothèse.....	8
1.4 Objectif théorique et appliqué de la thèse .....	8
1.5 Principales tâches à réaliser.....	9
1.6 Eléments de la Méthodologie globale .....	9
1.6.1 Analyse bibliométrique et retours d'expériences.....	9
1.6.2 Analyse thématique cartographique des données du terrain .....	10
1.6.3 Evaluation du risque d'incendie par croisement de trois méthodologies avancées 10	
1.6.4 L'enquête .....	13
1.7 Outils et logiciels utilisés .....	13
1.8 Structure de la thèse .....	14
<b>CHAPITRE II : POSITIONNEMENT DE LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET DANS LA RECHERCHE : APPROCHE BIBLIOMETRIQUE ET SYSTEMATIQUE .....</b>	<b>17</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>17</b>
2.1 Conception de la recherche .....	17
2.2 Identification des enregistrements : Quels mots-clés ? quelles bases de données et quels articles ? .....	18
2.2.1 Sélection de la base de données .....	18
2.2.2 Chaînes de recherche.....	19
2.2.3 Filtrage et sélection : .....	19
2.3 Inclusion et rapport.....	20
2.3 Résultats de l'analyse bibliométrique .....	22
2.4 La répartition des publications sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt 22	
2.3.1 Les 10 principaux pays publiant le plus sur les incendies de forêt et leurs institutions académiques les plus significatives.....	23
2.3.2 Les revues les plus pertinentes .....	26



2.3.3	Institutions éducatives .....	27
2.3.4	Auteurs les plus prolifiques et leurs affiliations .....	28
2.3.5	Domaine de recherche .....	31
2.3.6	Résumé des résultats .....	32
2.4	Analyse croisée des résultats : Synthèse de la revue systématique et de l'analyse bibliométrique.....	34
2.4.1	Modèles de publication et répartition géographique .....	34
2.4.2	Revue et institutions académiques de premier plan.....	34
2.4.3	Auteurs productifs et mots-clés.....	35
2.4.4	Domaine de recherche et leur impact .....	35
2.5.5	Les méthodes utilisées.....	35
2.5.6	Variables utilisées .....	37
2.5.7	Tendances et Résultats.....	38
2.5.8	Les défis communs identifiés .....	39
2.5.9	Perspectives de recherches .....	40
<b>Conclusion.....</b>		<b>40</b>
<b>CHAPITRE III : ANALYSE MULTIDISCIPLINAIRE DU RISQUE D'INCENDIE DE FORET : DEFINITION, FACTEURS D'AGGRAVATION ET STRATEGIES DE GESTION.....</b>		<b>43</b>
<b>Introduction .....</b>		<b>43</b>
3.1	Définitions clés relatives à la thématique de recherche .....	44
3.1.1	La forêt .....	44
3.1.2	Le risque naturel.....	44
3.1.3	Incendie de forêt.....	45
3.1.4	La pyrologie forestière .....	45
3.1.5	Définition et caractéristiques du combustible .....	46
3.1.6	Les interfaces habitat-forêt : De la définition à la délimitation.....	46
3.2	Contexte global des incendies de forêts .....	48
3.2.1	Statistiques et impacts mondiaux des incendies.....	49
3.2.2	Les incendies de forêts en Algérie.....	50
3.2.3	Particularités des incendies dans les régions méditerranéennes.....	53
3.3	Variables influant sur les incendies de forêts .....	54
3.3.1	Variables topographiques .....	54
3.3.2	Variables climatiques.....	54
3.3.3	Variables de la couverture végétale .....	55
3.3.4	Variables anthropiques .....	56
3.4	Impact des incendies sur les écosystèmes et les communautés .....	57
3.4.1	Conséquences écologiques .....	57

3.4.2	Economiques .....	57
3.4.3	Sociales.....	58
3.5	L'impact des incendies de forêts sur le changement climatique .....	58
3.5.1	Émission de Gaz à Effet de Serre .....	58
3.5.2	Réduction de la Capacité de Séquestration du Carbone.....	59
3.5.3	Effets sur les Aérosols et la Réflectivité de la Terre.....	59
3.5.4	Rétroactions Climatiques .....	59
3.6	Disciplines et approches pour l'étude des incendies de forêt.....	60
3.6.1	Écologie.....	60
3.6.2	Foresterie .....	60
3.6.3	Science de l'environnement.....	60
3.6.4	Ingénierie et technologie .....	61
3.6.5	Sociologie et sciences humaines .....	61
3.6.6	Météorologie : .....	62
3.6.7	Science politique et politique publique .....	62
3.6.8	Géographie et télédétection .....	63
3.7	Stratégie et politique de gestion des incendies.....	63
3.7.1	Cadre institutionnel mondiale pour la gestion des risques des incendies de forêts 63	
3.7.2	Cadre institutionnel pour la gestion des incendies de forêts en Algérie.....	66
<b>Conclusion.....</b>		<b>71</b>
<b>CHAPITRES IV : ANALYSE CARTO THEMATIQUE DU MILIEU BIOPHYSIQUE, PHYSIQUE DU MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....</b>		<b>75</b>
<b>Introduction .....</b>		<b>75</b>
4.1	Présentation de la wilaya de Constantine :.....	75
4.2	Présentation de la zone d'étude :.....	76
4.2.1	Le choix de la zone d'étude : .....	77
4.2.2	Délimitation de la zone d'étude .....	77
4.3	Étude du milieu physique.....	80
4.3.1	Topographie et géologie des sous-zones homogènes de l'aire d'étude.....	81
4.3.2	Hydrographie.....	90
4.3.3	Étude du couvert végétal .....	92
4.3.4	Étude climatique.....	98
<b>Conclusion.....</b>		<b>115</b>
<b>CHAPITRE V : ANALYSE DIACHRONIQUE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL SUITE AUX INCENDIES DE FORET DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUHACH : UNE APPROCHE PAR TELEDETECTION ET CLASSIFICATION SUPERVISEE.....</b>		<b>118</b>

<b>Introduction .....</b>	<b>118</b>
5.1 Analyse diachronique : Méthodologie et choix des outils .....	119
5.1.1 Rôle de la télédétection dans l'analyse des changements d'occupation du sol ...	119
5.1.2 Importance des indices NDVI, NBR, NDWI .....	119
5.1.3 Sélection et prétraitement des images satellitaires .....	121
5.1.4 Définition des classes d'occupation du sol et échantillonnage : Techniques de classification supervisée appliquée .....	122
5.2 Historique des incendies de forêts dans le grand massif de Djebel El Ouahch.....	124
5.3 Cartographie des Indices Pré- et Post-Incendies .....	125
5.3.1 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (06-07-2017) / Post-Incendie (26-07-2017).....	125
5.3.2 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (21/07/2019 / Post-Incendie (15/08/2019) .....	131
5.3.3 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (20/07/2021 / Post-Incendie (09/08/2021) .....	137
5.4 Analyse des indices de végétation et d'humidité : Impact de la réduction de l'humidité et stratégies de restauration post-incendie .....	143
5.5 L'observation de l'évolution de l'occupation du sol : Classification supervisée de la forêt de Draa El Naga .....	144
5.5.1 Choix de la zone d'étude .....	144
5.5.2 Caractéristiques des Bandes Spectrales de l'Operational Land Imager (OLI) de LANDSAT 8 : .....	145
5.5.3 La Composition colorée .....	146
5.5.4 Résultats de la classification supervisée: Impact des incendies sur la forêt de Draa El Naga.....	147
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>151</b>
<b>CHAPITRES VI : MODELISATION PREDICTIVE DES RISQUES D'INCENDIE DE FORET PAR LOGIQUE FLOUE : UNE APPROCHE FLEXIBLE POUR UNE EVALUATION SPATIALE PRECISE .....</b>	<b>152</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>152</b>
6.1 La logique floue dans le contexte de la prédiction environnementale : Fondements méthodologiques.....	153
6.1.1 Description de l'approche par logique floue.....	153
6.1.2 Collecte et traitement des données .....	155
6.1.3 Traitement par logique floue .....	156
6.1.4 Intégration et prédiction .....	156
6.1.5 Évaluation du modèle.....	156
6.2 Classification et pondération des facteurs et variables retenus dans le processus de la logique floue .....	157
6.2.1 Les variables des facteurs bioclimatiques .....	157

6.2.2	Les facteurs de combustible .....	157
6.2.3	Les facteurs topo morphologiques .....	158
6.2.4	Les facteurs humains .....	158
6.3	Cartographie des variables et classes retenues dans les incendies de forêt.....	160
6.4	Modélisation des incendies de forêt par Logique floue et pondération des paramètres : Cas du massif de Djebel El Ouahch.....	168
6.4.1	Application du système de logique floue au massif de Djebel El Ouahch.....	168
6.4.2	Pondération floue des paramètres spécifiques dans la modélisation des incendies de forêt dans le nord-est de l'Algérie .....	171
6.5	Prédiction des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch : Modélisation par logique floue et identification des zones à risque.....	172
<b>Conclusion.....</b>		<b>179</b>
<b>CHAPITRES VII : GESTION DES INTERFACES HABITAT-FORET ET PREDICTION DES RISQUES D'INCENDIE : APPROCHE INTEGREE POUR LA PREVENTION ET LA PROTECTION DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....</b>		<b>180</b>
<b>Introduction .....</b>		<b>180</b>
7.1	Méthodologie d'identification des interfaces habitat forêt dans le grand massif de Djebel El Ouahch: .....	181
7.1.1	Collecte et sources des données .....	181
7.1.2	Outils et techniques analytiques .....	182
7.2	Identification des structures forestières .....	182
7.3	Identification de l'indice d'agrégation de la végétation (AI).....	184
7.3.1	Description des types de végétations : .....	184
7.3.2	Les classes de végétations .....	185
7.3.3	Pondération de la combustibilité de la couverture végétale.....	185
7.3.4	L'indice d'agrégation.....	187
7.4	Identification et classification des zones de bâti .....	190
7.4.1	Identification des bâtiments isolés .....	190
7.4.2	Identification des bâtiments diffus .....	191
7.4.3	Identification des espaces urbanisés principaux.....	193
7.4.4	Identification des zones périphériques .....	196
7.5	Enjeux humains et prédiction du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt du massif de Djebel El Ouahch .....	199
7.6	Vulnérabilité et stratégies de gestion des risques d'incendie dans le massif de Djebel El Ouahch : Interfaces habitat-forêt et agrégation de la végétation.....	201
<b>Conclusion.....</b>		<b>205</b>
<b>Perspectives et pistes de recherche .....</b>		<b>214</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>217</b>

<b>ANNEXE A : GLOSSAIRE .....</b>	<b>230</b>
<b>ANNEXE B : DONNEES METHODOLOGIQUES .....</b>	<b>234</b>
<b>ANNEXE C : TABLEAU RECAPITULATIF DES ARTICLES ISSUS DE L'ANALYSE SYSTEMATIQUE .....</b>	<b>240</b>
<b>ANNEXE D : PHOTOS .....</b>	<b>252</b>
<b>ANNEXE D'ARTICLE.....</b>	<b>254</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure	page
<b>FIGURE 2.1</b> CADRE PRISMA.....	21
<b>FIGURE 2.2</b> LA REPARTITION DES PUBLICATIONS SUR LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET DE 2013 A 2023.....	22
<b>FIGURE 2.3</b> LES 10 PRINCIPAUX PAYS PUBLIANT LE PLUS SUR LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET .....	24
<b>FIGURE 2.4</b> LES 10 PRINCIPAUX PAYS EN TERMES DE PUBLICATIONS SUR LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET. ....	25
<b>FIGURE 2.5</b> RESULTATS DE L'ANALYSE DES PAYS PROLIFIQUES DANS LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET. ....	30
<b>FIGURE 2.6</b> RESULTATS D'ANALYSE DE PUBLICATIONS PAR MOTS CLES.....	31
<b>FIGURE 2.7</b> DOMAINE DE LA RECHERCHE .....	32
<b>FIGURE 3.1</b> AXE CHRONOLOGIQUE DES INCENDIES DE FORETS DE ALGERIE DE 1881-2023 .....	51
<b>FIGURE 3.2</b> CADRE INSTITUTIONNEL POUR LA GESTION DES INCENDIES DE FORETS EN ALGERIE. ....	66
<b>FIGURE 4.1</b> LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE .....	77
<b>FIGURE 4.2</b> LES ZONES HOMOGENES DE CONSTANTINE.....	78
<b>FIGURE 4.3</b> LES SOUS ZONES HOMOGENES DE CONSTANTINE.....	79
<b>FIGURE 4.4:</b> CARTE DES PENTES DU GRAND MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....	83
<b>FIGURE 4.5</b> CARTE D'ALTITUDES .....	84
<b>FIGURE 4.6</b> CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE .....	85
<b>FIGURE 4.7</b> CARTE DU BASSIN VERSANT DU MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH.....	90
<b>FIGURE 4.8</b> CARTE DES SOUS BASSINS VERSANT DU MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH.....	91
<b>FIGURE 4.9</b> SITUATION DES FORETS DE CONSTANTINE .....	92
<b>FIGURE 4.10</b> SUPERFICIE FORESTIERE DE CONSTANTINE.....	93
<b>FIGURE 4.11</b> CARTE DE LOCALISATION DES FORETS DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH ..	94
<b>FIGURE 4.12</b> VALEURS MENSUELLES DES PRECIPITATIONS A LA STATION EL MILIA.....	101
<b>FIGURE 4.13:</b> VALEURS MENSUELLES DES PRECIPITATIONS A LA STATION CLIMATIQUE DE HAMMA BOUZIANE .....	102
<b>FIGURE 4.14</b> VALEURS MENSUELLES DES PRECIPITATIONS A LA STATION CLIMATIQUE ANRH	103
<b>FIGURE 4.15:</b> VALEURS MENSUELLES DES PRECIPITATIONS A LA STATION CLIMATIQUE DE BATNA .....	104
<b>FIGURE 4.16:</b> CARTE DES PRECIPITATIONS DE LA ZONE D'ETUDE .....	105
<b>FIGURE 4.17:</b> VARIATIONS MENSUELLES DES TEMPERATURES A EL MILIA .....	107
<b>FIGURE 4.18:</b> VARIATION MENSUELLES DES TEMPERATURES A LA STATION HAMMA BOUZIANE .....	107
<b>FIGURE 4.19:</b> VARIATIONS MENSUELLES DES TEMPERATURES A LA STATION CONSTANTINE ANRH .....	108
<b>FIGURE 4.20:</b> VARIATIONS MENSUELLES DES TEMPERATURES A LA STATION DE BATNA .....	109
<b>FIGURE 4.21:</b> CARTE DES TEMPERATURES MENSUELLES MINIMALES.....	110
<b>FIGURE 4.22:</b> CARTE DES TEMPERATURES MENSUELLES MAXIMALES .....	111
<b>FIGURE 4.23:</b> CLIMAGRAMME D'EMBERGER.....	113
<b>FIGURE 5.1:</b> ORGANIGRAMME DE LA METHODE UTILISEE POUR L'ANALYSE DIACHRONIQUE...	123
<b>FIGURE 5.2:</b> CARTE NDVI PRE ET POST INCENDIE .....	126
<b>FIGURE 5.3:</b> CARTE NBR PRE ET POST INCENDIE .....	128
<b>FIGURE 5.4:</b> CARTE NDWI PRE ET POST-INCENDIE .....	130
<b>FIGURE 5.5:</b> CARTE NDVI PRE ET POST-INCENDIE .....	132
<b>FIGURE 5.6:</b> CARTE NBR PRE ET POST-INCENDIE .....	134

<b>FIGURE 5.7:</b> CARTE NDWI PRE ET POST-INCENDIE .....	136
<b>FIGURE 5.8:</b> CARTE NDVI PRE ET POST-INCENDIE .....	138
<b>FIGURE 5.9:</b> CARTE NBR PRE-INCENDIE 20-07-2021 .....	140
<b>FIGURE 5.10:</b> CARTE NDWI PREET POST-INCENDIE.....	142
<b>FIGURE 5.11:</b> CARTE DE SITUATION DRAA EL NAGA.....	145
<b>FIGURE 5.12:</b> CARTE D'OCCUPATION DU SOL 2017 .....	148
<b>FIGURE 5.13:</b> CARTE D'OCCUPATION DU SOL 2019.....	149
<b>FIGURE 5.14:</b> CARTE D'OCCUPATION DU SOL 2022 .....	150
<b>FIGURE 6.1</b> ORGANIGRAMME DE LA METHODE GENERALE UTILISEE POUR LA CARTOGRAPHIE DE PREDICTION DES INCENDIES DE FORET.....	154
<b>FIGURE 6.2</b> CLASSIFICATION DES FACTEURS CLIMATIQUES, A : TEMPERATURE (EN °C), B : HUMIDITE ATMOSPHERIQUE (EN %), ET C : VITESSE DU VENT (EN M/S). .....	161
<b>FIGURE 6.3:</b> CLASSIFICATION DES FACTEURS DE COMBUSTIBLE LIES A LA VEGETATION, A : ESPECES VEGETALES, B : COUVERTURE TERRESTRE, C : NDWI.....	163
<b>FIGURE 6.4:</b> CLASSIFICATION DES FACTEURS GEOMORPHOLOGIQUES, INCLUANT : PENTE EN % (A), EXPOSITION (B), ET NDMI (C). .....	165
<b>FIGURE 6.5:</b> CLASSIFICATION DES FACTEURS HUMAINS. A : DISTANCE AUX HABITATIONS (EN M), B : DISTANCE AUX ROUTES (EN M), ET C : NOMBRE DE DEPARTS DE FEUX DE FORET. ....	167
<b>FIGURE 6.6:</b> MATRICE DE CORRELATION DE PEARSON DES VARIABLES QUANTITATIVES AVANT LE PRETRAITEMENT DU MODELE DE LOGIQUE FLOUE. ....	170
<b>FIGURE 6.7</b> LA CARTE DE PREDICTION DES INCENDIES DE FORET DE LA REGION DE DJEBEL EL OUAHCH. ....	174
<b>FIGURE 6.8</b> CARTE DES INDICES DE ZONE BRULEE. ....	176
<b>FIGURE 6.9</b> CORRELATION ENTRE LES DONNEES OBSERVEES ET PREDITES. ....	177
<b>FIGURE 7.1</b> SUPERPOSITION DES STRUCTURES FORESTIERES AVEC LA CARTE DE PREDICTION DES INCENDIES DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH.....	183
<b>FIGURE 7.2</b> CARTE DES COMBUSTIBLES VEGETAUX.....	184
<b>FIGURE 7.3:</b> CARTE D'INDICE D'AGREGATION DE VEGETATION .....	188
<b>FIGURE 7.4:</b> CARTOGRAPHIE D'HABITAT ISOLE DANS LA ZONE D'ETUDE .....	190
<b>FIGURE 7.5</b> PHOTO DE L'HABITAT ISOLE DANS LA ZONE D'ETUDE .....	191
<b>FIGURE 7.6</b> CARTOGRAPHIE D'HABITAT DIFFUS .....	192
<b>FIGURE 7.7</b> PHOTO DE RESTAURANT DANS LA ZONE DE L'HABITAT DIFFUS.....	193
<b>FIGURE 7.8:</b> CARTOGRAPHIE DE L'URBANISATION PRINCIPALE .....	194
<b>FIGURE 7.9</b> PHOTO DES ESPACES URBANISES PRINCIPAUX.....	195
<b>FIGURE 7.10</b> PHOTO DE L'URBANISATION PRINCIPAL .....	195
<b>FIGURE 7.11:</b> CARTOGRAPHIE DES ZONES PERIPHERIQUES.....	196
<b>FIGURE 7.12:</b> CARTOGRAPHIE DE LA STRUCTURE DU BATI .....	197
<b>FIGURE 7.13:</b> REPARTITION DES TYPES D'HABITAT DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....	198
<b>FIGURE 7.14</b> RISQUE D'INCENDIES DANS LES ZONES D'INTERFACE. ....	200
<b>FIGURE 7.15:</b> ANALYSE DES INTERFACES HABITAT-FORET CROISEES A L'INDICE AI DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....	201

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	page
<b>TABLEAU 2.1</b> CRITERES D'INCLUSION ET D'EXCLUSION .....	19
<b>TABLEAU 2.2</b> LES 10 PRINCIPAUX PAYS DANS LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET ET LEURS INSTITUTIONS ACADEMIQUES LES PLUS SIGNIFICATIVES .....	24
<b>TABLEAU 2.3</b> LES 10 PRINCIPALES REVUES SUR LES INCENDIES DE FORET DANS LA BASE DE DONNEES SCOPUS.....	26
<b>TABLEAU 2.4</b> LES 10 PRINCIPALES INSTITUTIONS EDUCATIVES DANS LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET .....	27
<b>TABLEAU 2.5</b> LES 10 PRINCIPAUX AUTEURS DANS LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET .....	29
<b>TABLEAU 2.6</b> UN APERÇU COMPLET DES ASPECTS CLES .....	33
<b>TABLEAU 3.1</b> DEFINITIONS DES TYPES D'HABITATS .....	48
<b>TABLEAU 3.2</b> STATISTIQUES DES EMISSIONS DE CARBONES DUES AUX INCENDIES DE FORETS ...	49
<b>TABLEAU 3.3</b> APERÇU HISTORIQUE DES INCENDIES DE FORETS DE ALGERIE DE 1881-2023.....	50
<b>TABLEAU 3.4</b> EXEMPLES DES STRATEGIE DE GESTION DES INCENDIES DE FORETS DANS LES INTERFACES HABITAT FORET .....	65
<b>TABLEAU 4.1</b> LES SOUS ZONES PRINCIPALES DE LA WILAYA DE CONSTANTINE .....	80
<b>TABLEAU 4.2</b> REPARTITION DES SOUS-ZONES HOMOGENES DE DJEBEL EL OUAHCH PAR UTILISATION DES SOLS ET SUPERFICIE.....	81
<b>TABLEAU 4.3</b> REPARTITION DES UTILISATIONS DES TERRES PAR SUPERFICIE DANS LA ZONE D'ETUDE .....	81
<b>TABLEAU 4.4</b> RECAPITULATION DES CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE : GRAND MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH.....	88
<b>TABLEAU 4.5</b> SUPERFICIE D'ESSENCE FORESTIERS .....	93
<b>TABLEAU 4.6</b> CARACTERISTIQUES DES ESSENCES FORESTIERES.....	95
<b>TABLEAU 4.7</b> LES CARACTERISTIQUES DES STATIONS METEOROLOGIQUES .....	98
<b>TABLEAU 4.8</b> CRITERES DES STATIONS METEOROLOGIQUES.....	100
<b>TABLEAU 4.9</b> LES PRECIPITATIONS MENSUELLES SELON CHAQUE STATION.....	101
<b>TABLEAU 4.10</b> TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES.....	106
<b>TABLEAU 4.11</b> VALEURS DE L'INDICE D'EMBERGER ET CLASSIFICATION DES ETAGES BIOCLIMATIQUES .....	112
<b>TABLEAU 5.1</b> CLASSE D'OCCUPATION DU SOL ET ECHANTILLONNAGE.....	122
<b>TABLEAU 5.2</b> LES PRINCIPAUX INCENDIES DU GRAND MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH : DATES CLES.....	122
<b>TABLEAU 5.3</b> HISTORIQUE DES INCENDIES DE FORETS DANS LE GRAND MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH .....	124
<b>TABLEAU 5.4</b> VALEURS DES INDICES AVANT /APRES DES INCENDIES.....	144
<b>TABLEAU 5.5</b> CARACTERISTIQUES DES BANDES SPECTRALE L'OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI) DE LANDSAT 8 .....	146
<b>TABLEAU 6.1</b> CLASSIFICATION ET PONDERATION DES FACTEURS DE RISQUE D'INCENDIE DE FORET.....	159
<b>TABLEAU 6.2</b> ÉCHELLE FLOUE DE L'IMPORTANCE RELATIVE ENTRE LES FACTEURS. ....	168
<b>TABLEAU 6.3</b> ÉCHELLE FLOUE D'IMPORTANCE RELATIVE ENTRE LES FACTEURS.....	170
<b>TABLEAU 6.4</b> CROISEMENT DE LA PONDERATION DES FACTEURS UTILISES DANS LA MODELISATION ET LA PREDICTION DU RISQUE D'INCENDIE DE FORET DANS LE NORD-EST DE L'ALGERIE.....	171
<b>TABLEAU 6.5</b> LES POIDS FLOUS DES PARAMETRES SPECIFIQUES UTILISES DANS LA MODELISATION DES INCENDIES DE FORET DANS LE NORD-EST DE L'ALGERIE .....	172



<b>TABLEAU 6.6</b> CATEGORISATION DES ZONES ET POURCENTAGES DE RISQUE D'INCENDIE FORESTIER CORRESPONDANTS.....	173
<b>TABLEAU 7.1</b> MODELE DE COMBUSTIBLE.....	184
<b>TABLEAU 7.2</b> DISTRIBUTION ET ESTIMATION DE LA POPULATION PAR TYPOLOGIE D'HABITAT DANS LES INTERFACES HABITAT FORET .....	199
<b>TABLEAU 7.3</b> CROISEMENT DE L'HABITAT AVEC L'INDICE D'AGREGATION .....	202

## LISTE DES ACRONYMES

ANRH : l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques  
ASAL : Agence Spatiale Algérienne  
BNEDER: Bureau National des Etudes de Développement de l'Environnement Rural  
CAMS : Copernicus Atmosphere Monitoring Service  
CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques  
CO2 : Carbon dioxide  
DGF : Direction Générale des Forêts  
DGPC : Direction Générale de la Protection Civile  
DNRM : Délégation Nationale aux Risques Majeurs  
EADN : l'Entreprise d'Appui au Développement du Numérique  
EFFIS: European Forest Fire Information System  
FAO: Food and Agriculture Organization  
IA : indice d'agrégation  
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement  
MNT : Modèle Numérique de Terrain  
NO2 : le dioxyde d'azote  
OMS : l'Organisation Mondiale de la Santé  
ONF : Office National des Forêts en France  
ONM : Office National de la Météorologie  
ONU : Organisation des Nations Unies  
OSM : Open Street Map  
PAW : Plan d'Aménagement de la Wilaya  
PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme  
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement  
PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses  
SDAT : Schéma Directeur d'Aménagement du Territoire  
SIG : Système d'Information Géographique  
SISPPEO: Satellite Imagery & Signal Processing Package for Earth Observation  
SNAT : Schéma National d'Aménagement du Territoire  
SRAT : Schéma Régional d'Aménagement du Territoire  
UNDRR: United Nations Office for Disaster Risk Reduction  
WUI: Wildland-Urban Interface  
WUIMAP: Wildland-Urban Interface Mapping and Analysis Program

## RÉSUMÉ

Les forêts, vastes écosystèmes interconnectés, jouent un rôle central dans la préservation de la biodiversité et de l'équilibre écologique. Cependant, elles sont gravement menacées par les incendies de forêt, l'un des risques environnementaux les plus dévastateurs en raison de leur propagation rapide et de leur impact sur les écosystèmes et les communautés humaines.

L'objectif appliqué de cette recherche est de développer un cadre méthodologique novateur pour la cartographie du risque d'incendie de forêt dans le contexte de l'Afrique du nord, avec un focus particulier sur le massif de Djebel El Ouahch. Ce cadre prend en compte à la fois les facteurs d'éclosion et de propagation des incendies, ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes forestiers et les enjeux anthropiques associés. L'objectif théorique vise à articuler plusieurs paradigmes issus de la géographie, de la foresterie et des sciences de l'information numérique. Cette approche assure une réalisation valide et cohérente de l'objectif appliqué.

La méthodologie adoptée dans cette thèse combine plusieurs techniques : des analyses diachroniques des images satellitaires, l'utilisation des indices NDVI et NBR pour évaluer l'évolution de la couverture végétale, ainsi qu'une évaluation des interfaces habitat-forêt qui sont des zones critiques pour la propagation des incendies. La logique floue a été utilisée pour modéliser la vulnérabilité des différentes zones et prédire les risques d'incendie, intégrant à la fois des données environnementales et humaines.

Le modèle développé permet non seulement de cartographier les zones à risque, mais également de spécifier et de développer des outils d'aide à la décision pour la gestion du risque d'incendie de forêt, offrant ainsi des solutions pratiques et adaptées aux gestionnaires locaux. Ces outils visent à renforcer la capacité de prévention, de surveillance et d'intervention en fonction des spécificités locales, permettant une gestion proactive et efficace des incendies.

**Mots clés :** Incendie de forêt, télédétection, logique floue, SIG, gestion des risques.

## ABSTRACT

Forests, vast interconnected ecosystems, play a central role in preserving biodiversity and ecological balance. However, they are severely threatened by forest fires, one of the most devastating environmental hazards due to their rapid spread and impact on ecosystems and human communities.

The applied objective of this research is to develop an innovative methodological framework for mapping forest fire risk in the context of North Africa, with a particular focus on the Djebel El Ouahch massif. This framework considers both the ignition and propagation factors of fires, as well as their impacts on forest ecosystems and the associated anthropogenic challenges. The theoretical objective aims to articulate several paradigms from geography, forestry, and digital information sciences. This approach ensures the valid and coherent achievement of the applied objective.

The methodology adopted in this thesis combines several techniques: diachronic analyses of satellite images, the use of NDVI and NBR indices to assess changes in vegetation cover, as well as an evaluation of forest-urban interfaces, which are critical zones for fire propagation. Fuzzy logic was used to model the vulnerability of different areas and predict fire risks, integrating both environmental and human data.

The developed model not only maps high-risk areas but also specifies and develops decision-support tools for managing forest fire risk, thus offering practical and tailored solutions for local managers. These tools aim to strengthen prevention, monitoring, and intervention capacities based on local specificities, allowing for proactive and effective fire management.

**Keywords:** Forest fire, remote sensing, fuzzy logic, GIS, risk management.

## ملخص

الغابات، تلك النظم البيئية المترابطة والشاسعة، تلعب دورًا محوريًا في الحفاظ على التنوع البيولوجي والتوازن البيئي. ومع ذلك، فإنها مهددة بشكل خطير من قبل حرائق الغابات، والتي تعد من أخطر المخاطر البيئية نظرًا لانتشارها السريع وتأثيرها على النظم البيئية والمجتمعات البشرية.

الهدف التطبيقي من هذا البحث هو تطوير إطار منهجي مبتكر لرسم خرائط مخاطر حرائق الغابات في سياق شمال إفريقيا، مع التركيز بشكل خاص على كتلة جبل الوحش. يأخذ هذا الإطار في الاعتبار كل من عوامل اندلاع وانتشار الحرائق، وكذلك تأثيراتها على النظم البيئية للغابات والتحديات البشرية المرتبطة بها. يهدف الهدف النظري إلى ربط عدة نماذج من الجغرافيا، علم الغابات، وعلوم المعلومات الرقمية. هذه المقاربة تضمن تحقيق الهدف التطبيقي بشكل صحيح ومتناسق.

تعتمد المنهجية المتبعة في هذه الأطروحة على عدة تقنيات: تحليلات زمنية للصور الفضائية، استخدام مؤشرات لتقييم تغير الغطاء النباتي، وكذلك تقييم واجهات الغابات والمناطق الحضرية التي تعتبر مناطق حرجة لانتشار الحرائق. تم استخدام المنطق الضبابي لنمذجة ضعف المناطق المختلفة والتنبؤ بمخاطر الحرائق، مع دمج البيانات البيئية والبشرية. النموذج المطور لا يكتفي فقط برسم خرائط للمناطق المعرضة للخطر، بل يحدد ويطور أيضًا أدوات لدعم اتخاذ القرار في إدارة أخطار حرائق الغابات، مما يوفر حلولًا عملية ومخصصة للمديرين المحليين. تهدف هذه الأدوات إلى تعزيز قدرات الوقاية، المراقبة، والتدخل وفقًا لخصائص كل منطقة، مما يسمح بإدارة فعالة واستباقية للحرائق.

**كلمات مفتاحية:** حرائق الغابات، الاستشعار عن بعد، المنطق الضبابي، نظم المعلومات الجغرافية، إدارة المخاطر.

# CHPITRE I : INTRODUCTIF

## 1.1 Introduction générale

Les forêts sont des écosystèmes souvent étendus et interconnectés qui abritent une extraordinaire diversité de flore et de faune, jouant un rôle pivot dans le maintien de l'équilibre écologique (Eldredge, 2000).

Cependant, ces sources de biodiversité font face à une menace grave : l'incendie de forêt, l'un des risques les plus dévastateurs à cause de sa propagation rapide et son impact sur les écosystèmes et l'environnement. (Meng Yongchang and Deng, 2015)

Partant de la définition du risque, qui associe aléa et vulnérabilité, le risque d'incendie de forêt se définit comme la probabilité qu'un incendie survienne (**aléa**), combinée à la **vulnérabilité** des populations, infrastructures, et écosystèmes exposés. Plus l'aléa est élevé (conditions favorables à l'incendie) et plus la vulnérabilité est importante (présence humaine ou écosystèmes sensibles), plus le risque global augmente.

Il est défini comme un phénomène de combustion incontrôlée qui se propage se propage à travers l'écosystème forestier conduit par des facteurs météorologiques, la topographie du terrain, et la disponibilité de combustibles (Trabaud & Oustric, 1989). Son éclosion résulte de l'interaction entre les facteurs biophysiques et anthropique.

L'impact de ces incendies résonne à travers le globe, décimant non seulement des hectares de verdure mais perturbant également le climat et posant des menaces significatives tant pour les écosystèmes que pour les établissements humains.

Selon l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, les surfaces incendiées dans le monde représentent environ trois cents millions hectares chaque année, soit plus de 11 hectares par seconde.

Depuis 2007, de nombreux pays européens ont été durement frappés par des incendies de forêt dévastateurs, provoquant des pertes humaines tragiques et des destructions environnementales significatives : En 2007, la Grèce a connu plus de 3 000 incendies de forêt durant la saison estivale, qui ont ravagé plus de 270 000 hectares de forêts, de terres agricoles et de villages. Ces incendies ont coûté la vie à environ 84 personnes et engendré des pertes économiques estimées à plus de 3 milliards d'euros. (Commission - Joint Research Centre - IEC Unit, 2007). En 2012, l'Espagne a traversé une année particulièrement dévastatrice en matière d'incendies de forêt, avec près de 15 902 incendies recensés. Ces feux ont ravagé plus de 209 855 hectares de terres, marquant l'une des pires années en termes de destruction environnementale et de surfaces brûlées (European Commission, 2013).

## Chapitre introductif

Cinq ans plus tard, en 2017, le Portugal a traversé une année tragique en matière d'incendies de forêt, avec plus de 17 000 feux enregistrés. Ces incendies ont ravagé environ 442 418 hectares de forêts et de terres. Sur le plan humain, le bilan est lourd : 118 personnes ont perdu la vie, dont 66 victimes lors du dramatique incendie de Pedrógão Grande en juin, et 51 autres lors d'une série d'incendies dévastateurs survenus en octobre.

Ces incendies ont conduit à une révision des politiques de prévention et de gestion des incendies au Portugal, mettant en lumière la vulnérabilité accrue due aux changements climatiques et aux pratiques de gestion des forêts.

L'année suivante, en 2018, la Grèce a de nouveau été frappée par un incendie dévastateur à Mati, causant la mort de 100 personnes, ce qui en fait l'un des bilans les plus lourds en Europe. Cet incendie a ravagé environ 1 276 hectares de terres, ajoutant aux dégâts humains une destruction considérable de l'environnement (San-Miguel-Ayanz, 2019). Plus récemment, en 2021, la côte sud de la Turquie a été ravagée par une série d'incendies dévastateurs, détruisant des villages, des forêts, et forçant des milliers de personnes à évacuer. Ces incendies ont touché environ 200 000 hectares de terres, causé la mort d'au moins 8 personnes, et conduit à l'évacuation de plus de 36 000 personnes. Les feux ont également détruit des centaines de maisons et d'infrastructures dans les régions les plus touchées, notamment à Antalya et Muğla (Jesús San-Miguel-Ayanz, 2022).

Selon les données du système européen d'information sur les incendies de forêt (Jesús San-Miguel-Ayanz, 2022) la saison estivale de 2021 a marqué une augmentation alarmante du nombre d'incendies de forêt en Europe, presque cinq fois supérieure à la moyenne enregistrée entre 2008 et 2020. Depuis, cet aléa naturel est devenu un sujet de préoccupation croissante.

Dans le monde de la recherche, plusieurs études se sont intensément penchées sur l'identification et l'analyse des principaux facteurs responsables des incendies de forêt. Ces travaux ont mis en lumière un ensemble complexe de causes qui interagissent de manière dynamique pour déclencher et propager ces catastrophes. La relation complexe entre les forêts, le climat et le feu souligne le besoin urgent d'une compréhension complète des facteurs entraînant les incendies de forêt. (Gupta et al., 2023 ; Gajendiran et al., 2024).

D'après Farfan et al., 2021, nulle part la menace des incendies n'est plus aiguë que dans les régions caractérisées par des forêts denses, surtout sous des conditions climatiques semi-arides, qui est le cas notamment des terrains montagneux de la région méditerranéenne d'Afrique du Nord (Bentchakal et al., 2022).

En effet, la compréhension de la nexus entre le changement climatique, la sécheresse sévère, et les incendies de forêt dans des régions vulnérables comme la région méditerranéenne

## Chapitre introductif

de l'Afrique du nord nécessite encore des recherches par une approche multidisciplinaire, intégrant des méthodologies de pointe et des résultats de recherche empirique (Bentchakal et al., 2022; Gallardo-Salazar et al., 2023).

Les modifications des courbes de température et des régimes de précipitation induites par le changement climatique sont bien documentées dans les études du GIEC (IPCC, 2021), amplifiant significativement le risque d'incendies de forêt dans ces habitats fragiles (Allen et al., 2015). De plus, le forçage climatique du Sahara, comme les vents chauds et secs, la désertification progressive et la montée des températures, peut influencer négativement les écosystèmes forestiers situés dans les zones proches, en particulier dans le nord de l'Afrique où le climat est méditerranéen (Chenchouni, 2010); Allen, Breshears and McDowell, 2015; Hantson et al., 2017; Jones et al., 2020)

La fragilité écologique des écosystèmes nord-africains renforce davantage l'urgence de techniques de recherche avancées. Les variations de température et d'humidité perturbent les équilibres écologiques délicats, rendant la végétation forestière plus susceptible aux maladies, aux ravageurs et, en fin de compte, aux incendies (van Lierop et al., 2015). L'utilisation de techniques de modélisation avancées permet une compréhension détaillée de ces dynamiques écologiques, mettant en lumière l'interaction complexe entre les conditions climatiques changeantes et la vulnérabilité des forêts (Thrippleton et al., 2020; Forzieri et al., 2021; Abdelhamid et al., 2023).

Les zones où les espaces urbains discontinus se mêlent aux forêts, appelées interfaces forêt-urbain, ou interfaces habitat-forêt lorsque l'on ne prend en compte que les zones résidentielles, sont particulièrement vulnérables aux feux. Une anticipation fiable des incendies permet d'organiser des évacuations en temps utile, sauvegardant ainsi des vies et préservant les propriétés des résidents (Long-Fournel et al., 2012).

De plus, les incendies forestiers peuvent avoir un impact direct sur la qualité de vie, notamment par la dégradation de la qualité de l'air et par les traumatismes psychologiques dus à la perte de biens et de lieux de vie (Mell et al., 2010) Mais dans de nombreux contextes méditerranéens, les interfaces forêt-urbain sont également les zones où se produisent très majoritairement les ignitions (Ganteaume & al., 2018). Les interfaces représentent donc à la fois un facteur de détérioration de la végétation, et des zones de vulnérabilité et d'ignition. La limitation du nombre d'incendies de forêt et de leurs impacts sur les enjeux anthropiques requièrent la prise en compte de ces interfaces dans les plans de gestion territoriale et de prévention des incendies.



## Chapitre introductif

D'autres chercheurs ont concentré leurs travaux sur l'analyse des risques liés aux incendies de forêt et sur les mesures de prévention, en particulier pour les communautés humaines vivant à proximité des zones forestières, qui sont particulièrement vulnérables à ces dangers (Ganteaume et al., 2013).

La prédiction des feux de forêt représente un domaine critique de la recherche et de la gestion environnementale. L'objectif principal de ces recherches est de développer des modèles et des stratégies capables d'identifier les zones à risque avant que les incendies ne se déclenchent, permettant ainsi une intervention précoce. Cette anticipation est essentielle pour prévenir, ou du moins minimiser, les dommages potentiels aux populations, aux infrastructures, et aux écosystèmes.

L'avènement de nouvelles technologies a significativement transformé les stratégies de prévention des feux de forêt. La technologie de télédétection, couplée aux systèmes d'information géographique (SIG), est devenue une pierre angulaire dans la gestion des feux de forêt. Ils permettent une évaluation rapide des zones à risque d'incendie en analysant le type de végétation, le contenu en humidité et d'autres facteurs critiques contribuant au risque d'incendie. Des études, telles que celles de (Jones Holly P. and Nickel, 2020), ont démontré comment la télédétection peut permettre d'identifier les points chauds potentiels avec une grande précision, permettant de prendre des mesures préventives avant le début d'un incendie.

Les méthodes employées pour atteindre cet objectif sont variées et s'appuient sur un large éventail de disciplines scientifiques, allant de l'écologie et la météorologie à l'informatique et l'ingénierie. Parmi les approches les plus répandues, on peut citer les SIG et la télédétection. Les chercheurs ont suivi diverses approches et algorithmes pour délimiter les zones de danger d'incendie, intégrant des données de télédétection dans les SIG (Abedi Gheshlaghi, 2019). La logique floue, un outil de modélisation polyvalent, a fortement été utilisée par les chercheurs pour évaluer le risque d'incendie de forêt (IBID). Les systèmes de logique floue, réputés pour leur adaptabilité, ont trouvé des applications répandues dans des domaines divers tels que la modélisation, la prévision et la classification (Iliadis et al., 2002, 2010)

En utilisant des systèmes de logique floue, les chercheurs peuvent saisir l'incertitude inhérente aux systèmes écologiques. Couplé aux SIG, qui fournissent un contexte spatial et permettent de cartographier les zones vulnérables (Abedi Gheshlaghi et al. 2020; Shatnawi, 2022), ces outils avancés ouvrent la voie à une compréhension profonde du phénomène des incendies de forêt. En analysant minutieusement les données et en employant une modélisation prédictive utilisant la logique floue, les chercheurs peuvent fournir des éclairages précieux dans la formulation de politiques d'atténuation proactives (Devisscher et al. 2016). Ces politiques,

## Chapitre introductif

fondées sur des preuves empiriques, peuvent réduire significativement la vulnérabilité de ces régions. Plusieurs études ont démontré l'efficacité de telles stratégies fondées sur des preuves dans l'atténuation des pertes économiques et la protection des communautés (Zeyad T. Aklah et al., 2023; Segura Dorado et al., 2023).

Aborder les politiques d'atténuation proactives exige un examen minutieux de chaque source potentielle d'ignition et de chaque facteur exacerbant. Les efforts pour combattre les incendies de forêt reposent sur le développement de cartes de risque d'occurrence d'incendies de forêt précises et complètes, qui servent de pivots dans la gestion stratégique et la protection des régions forestières (Abedi Gheshlaghi, 2019)

Pour qu'un incendie se déclenche et se propage, une confluence de facteurs, incluant la disponibilité de matériel combustible, la morphologie environnementale, les conditions climatiques et les activités humaines, doivent s'aligner de manière synergique (Abedi Gheshlaghi et al., 2020; Farfán et al., 2021; Gupta et al., 2023). Ainsi, comprendre la dynamique des incendies de forêt nécessite une analyse holistique des multiples éléments contributifs.

### 1.2 Problématique

Dans la littérature existante les approches utilisées sont souvent centrées sur un seul aspect de la problématique, que ce soit l'analyse environnementale (facteurs biophysiques) ou l'impact des activités humaines sur l'éclosion des incendies. Ces recherches n'intègrent pas toujours de manière fluide la complexité des interactions entre les facteurs naturels et anthropiques, ce qui limite leur portée. La logique floue, par exemple, a été largement utilisée pour modéliser les risques d'incendie en tenant compte de l'incertitude des données, mais elle est rarement combinée avec des approches spatiales avancées ou des modèles de gestion territoriale. Il manque souvent une articulation efficace entre les paradigmes de la géographie, de la foresterie, et des sciences de l'information numérique.

Les méthodes développées dans la littérature pour la cartographie des incendies de forêt sont souvent conçues pour des régions spécifiques, telles que les forêts méditerranéennes européennes ou les forêts tropicales, sans réelle adaptation aux contextes sud-méditerranéens, comme les forêts d'Afrique du Nord. Les conditions semi-arides, la pression anthropique et les spécificités topographiques des zones montagneuses de cette région rendent les modèles existants partiellement inadaptés. Les particularités des interfaces habitat-forêt dans les zones vulnérables ne sont pas toujours prises en compte dans les modèles globaux.

Bien que certaines études aient proposé des modèles de prédiction des incendies, peu ont réussi à développer des outils d'aide à la décision adaptés aux besoins des gestionnaires locaux et aux spécificités des territoires. La gestion des interfaces habitat-forêt, par exemple, est sous-

## Chapitre introductif

représentée dans la littérature malgré l'importance critique de ces zones pour la propagation des incendies. Les outils existants ne sont souvent pas suffisamment intuitifs ou spécifiques pour être utilisés directement par les acteurs locaux dans la gestion proactive des risques.

La gestion des incendies de forêt dans la littérature existante a adopté différentes approches, notamment l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), de la télédétection, et des modèles de prédiction comme la logique floue. Ces approches ont permis des avancées significatives dans la cartographie des risques, l'évaluation des facteurs environnementaux et anthropiques, ainsi que dans la prévention des incendies en général. Cependant, ces études présentent certaines limites qui ne permettent pas de répondre pleinement à l'objectif de thèse fixé.

L'Algérie ne possède que 4,2 millions d'hectares de forêts, représentant seulement une surface de 2% du territoire national (MOKHTARI Samah, 2018) à cause des conditions climatiques qui défavorisent le développement de ces formations forestières. Cependant, ces dernières années, des villes algériennes ont été sérieusement touchées par les feux de forêt à leur périphérie en contact avec la végétation arborée. Selon le bilan de la direction générale des forêts (DGF) et divers bilans des autorités locales et du ministère de la défense, une évaluation très lourde a été enregistré ces dernières années : plus de 88 incendies ont été enregistré en 2022, les feux de forêt ayant ravagé plus 89.000 hectares à travers 35 wilayas du pays où un total de 1.186 foyers d'incendie a été enregistré causant la mort d'au moins 90 personnes, parmi lesquels 33 militaires.

La wilaya de Constantine est la 3<sup>ème</sup> métropole en Algérie. Elle possède une couverture forestière dense avec 28074 hectares répartie par ordre d'importance : une forêt qui s'étend sur 18 357 hectares, constituant un écosystème relativement dense, majoritairement composé de forêt proprement dite, accompagnée de 9 097 hectares de maquis, qui représentent une végétation plus basse et arbustive. Par ailleurs, on trouve 58 hectares de terres vides labourables, ainsi que 562 hectares de broussailles, ajoutant une couche de végétation plus clairsemée et inflammable. Le massif de Djebel El Ouahch, notre terrain d'étude, est situé au nord-est de la wilaya de Constantine. Couvrant une superficie de 57 685 ha, il s'étend sur cinq communes : Zighoud Youcef, Constantine, la partie nord d'El Khroub, Ibn Badis et Didouche Mourad. Sa couverture végétale comporte un écosystème très riche en matière d'essences forestiers et comprend deux arboretums. Ce massif présente en outre plusieurs interfaces forêt-urbain.

## Chapitre introductif

Ce massif qui forme l'interface habitats- forêt a connu une forte dégradation par les feux de forêts. Elle représente à la fois un facteur de détérioration de la végétation, et un enjeu de vulnérabilité.

En Algérie le problème réel réside dans la gestion de ce risque majeur, aussi bien au plan matériel qu'au plan humain. D'après la loi Algérienne : les incendies de forêts sont classés parmi les risques majeurs en vertu de la loi 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Cette dernière a élaboré une stratégie pour réduire le risque et lutter contre les feux de forêts :

Sur le plan de la prévention, la direction générale des forêts envisage des travaux sylvicoles, l'ouverture et l'entretien des pistes forestières, l'entretien des tranchées pare-feu, ainsi que la construction et l'aménagement des points d'eau, sans oublier la sensibilisation et l'éducation environnementale.

Sur le plan de l'organisation ; conformément au décret n° 07-301 du 27 septembre 2007, modifiant et complétant le décret n°80-184 du 19 juillet 1980, portant une mise en place des organes de coordination des actions de protection des forêts.

Sur le plan de prévision et d'intervention ; à travers un dispositif renforcé en moyens humains et matériels. Une Plateforme de gestion et de suivi des feux de forêts par la mise en place d'équipements numériques fondés sur les des technologies de l'information et de la communication, et un projet de mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi des incendies de forêts est en cours d'approbation auprès du ministère de la poste et des télécommunications, pour un montant avoisinant les 90 millions de dinars en partenariat avec l'Entreprise d'Appui au développement du Numérique (EADN).

Bien que la stratégie algérienne montre une bonne prise en compte des enjeux liés aux incendies de forêt, son succès dépend de la mise en œuvre efficace de ces mesures, de leur adaptation continue face aux nouveaux défis climatiques et technologiques, et de l'évaluation régulière de leur impact. D'un point de vue académique, des études pour évaluer ces aspects en profondeur doivent être conduites, afin de proposer des améliorations ou des renforcements là où cela s'avère nécessaire.

Parmi les éléments devant être approfondis, la question des interfaces forêt-urbain est des plus cruciales. Ces espaces définies comme « *les zones de contact entre les surfaces naturelles et les milieux urbanisés, posent de sérieux problèmes en matière de gestion du territoire et de risque. En effet, les interfaces sont sources de départs de feu* » (Long-Fournel et al., 2013) sont clairement définies et régies par une réglementation spécifique dans de

## Chapitre introductif

nombreux pays soumis au risque incendie de forêt, mais ne bénéficient pas d'une reconnaissance adéquate dans la législation algérienne. Dans ces pays, ces zones sensibles font l'objet de réglementations strictes visant à minimiser les risques d'incendies et à protéger les populations ainsi que les écosystèmes environnants. Ces réglementations incluent souvent des mesures telles que l'entretien régulier des zones tampons, des restrictions sur l'urbanisation à proximité des forêts, et des exigences en matière de construction pour réduire la vulnérabilité aux feux.

En revanche, en Algérie, l'absence de reconnaissance légale et de réglementation spécifique pour ces interfaces limite les capacités de prévention et de gestion des risques dans ces zones critiques. Cela peut entraîner une urbanisation non contrôlée à proximité des forêts, augmentant ainsi le risque d'incendie et compliquant les efforts de lutte contre les feux de forêt. Une intégration de ces concepts dans la législation algérienne permettrait non seulement d'améliorer la résilience des communautés vivant à proximité des forêts, mais aussi de protéger les écosystèmes forestiers essentiels face à la menace croissante des incendies.

**Notre questionnement se déroule comme suit :**

- Quels sont les principaux facteurs d'éclosion et de propagation des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch, et comment ces facteurs interagissent-ils avec les écosystèmes forestiers et les enjeux anthropiques ?
- Comment peut-on élaborer un cadre méthodologique novateur pour la cartographie du risque d'incendie ?
- Et quels outils numériques spécifiques peuvent être développés pour aider les gestionnaires locaux à prévenir et gérer efficacement les risques d'incendie de forêt dans ces contextes ?

### 1.3 Hypothèse

L'intégration de méthodologies avancées comme la logique floue, couplée aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), est un cadre méthodologique efficace pour la représentation des relations complexes entre les incendies de forêt, le changement climatique et la vulnérabilité des communautés.

### 1.4 Objectif théorique et appliqué de la thèse

L'objectif théorique est **la spécification de l'articulation** de plusieurs paradigmes issus de la géographie, la foresterie et les sciences de l'information numérique, incluant la logique floue, l'analyse spatiale et les systèmes de traitement de l'information spatiale, permettant une réalisation valide et cohérente de l'objectif appliqué.

## Chapitre introductif

L'objectif appliqué de ce travail est la formulation d'un **cadre méthodologique novateur** permettant la cartographie du risque incendie de forêt dans les contextes sud-méditerranéens, en prenant en compte à la fois les **facteurs d'éclosion et de propagation** ainsi que l'impact sur les écosystèmes forestiers et les enjeux anthropiques. Cet objectif inclut également la **spécification et le développement d'outils d'aide à la décision** pour la gestion du risque incendie de forêt, afin de fournir des solutions pratiques et adaptées aux gestionnaires locaux.

### 1.5 Principales tâches à réaliser

Afin de réaliser notre objectif appliqué, les principales tâches suivantes devront être réalisées :

- Identifier et évaluer les facteurs de risque, notamment climatiques, géomorphologiques et anthropiques, qui contribuent à la propagation des incendies.
- Analyser l'évolution temporelle et spatiales des incendies de forêts pour mieux comprendre les causes.
- Évaluer l'efficacité des politiques et des réglementations actuelles en matière de gestion des incendies de forêts et recommander des améliorations.
- Développer des méthodologies innovantes pour la prévention et la gestion des incendies de forêts
- Cartographier et d'évaluer la sensibilité des interfaces habitat-forêts.

Cela permettra de dégager un ensemble d'orientations pour les gestionnaires des forêts pour la prise en compte du risque incendie de forêt dans la gestion du patrimoine forestier.

### 1.6 Éléments de la Méthodologie globale

Dans cette section, nous introduisons les méthodologies utilisées pour vérifier notre hypothèse de recherche et leur articulation afin d'atteindre les objectifs de notre étude. Pour une analyse exhaustive et multi-facettes, nous avons adopté plusieurs approches, chacune apportant une perspective unique sur la problématique des incendies de forêts. Nous proposons trois approches principales :

#### 1.6.1 Analyse bibliométrique et retours d'expériences

Ce volet est consacré à la revue de la littérature et aux retours d'expériences dans le domaine de la gestion des incendies de forêt. Une analyse bibliométrique a été réalisée pour identifier les tendances de recherche, les auteurs et institutions les plus prolifiques, ainsi que les collaborations internationales dans ce domaine. Cette analyse a permis de positionner notre thématique dans le paysage scientifique global. Elle a été complétée par une revue systématique de la littérature, structurée selon le cadre PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic

## Chapitre introductif

Reviews and Meta-Analyses), permettant d'approfondir les approches méthodologiques, les défis, et les orientations futures des recherches sur la cartographie et la gestion des incendies.

L'outil VOSviewer a été utilisé pour visualiser les réseaux de recherche, tandis que la base de données SCOPUS a servi de référence pour recueillir des publications pertinentes. Cette analyse a permis de dégager des conclusions sur l'état actuel de la recherche et d'orienter la suite de l'étude.

### 1.6.2 Analyse thématique cartographique des données du terrain

Cette approche s'appuie sur une cartographie thématique détaillée du massif de Djebel El Ouahch, en prenant en compte divers paramètres : climatiques, topographiques, géologiques, et de couverture végétale. La délimitation de la zone d'étude a été réalisée à l'aide des SIG (ArcGIS 10.8.1), facilitant la création de cartes précises des facteurs contribuant au risque d'incendie. Des données démographiques ont également été intégrées pour prendre en compte l'impact anthropique.

En outre, une analyse des instruments stratégiques, tels que le PDAU, le SDAT, le PAW, et le SNAT 2030, a permis de relier les dynamiques de développement local avec les risques d'incendie. Les logiciels ArcGIS et Excel ont été utilisés pour le traitement et l'analyse de ces données.

### 1.6.3 Evaluation du risque d'incendie par croisement de trois méthodologies avancées

Ces trois approches, diachronique, logique floue, et analyse des interfaces habitat-forêt, s'articulent de manière complémentaire pour atteindre l'objectif global de gestion efficace des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch.

L'analyse diachronique permet de suivre l'évolution des incendies à travers le temps, en identifiant les zones affectées et les dynamiques de régénération de la végétation. La logique floue intervient ensuite pour modéliser et prédire les risques d'incendie en intégrant des variables incertaines comme les facteurs environnementaux, climatiques, et humains, offrant une cartographie des zones à risque. Enfin, l'analyse des interfaces habitat-forêt complète cette démarche en identifiant les zones critiques où la proximité entre les habitations et les forêts accroît les risques, et en proposant des mesures de prévention spécifiques. Ensemble, ces approches fournissent une vision intégrée et prédictive, permettant d'élaborer des stratégies de prévention et de gestion adaptées aux spécificités de chaque zone.

- **Approche I : Evaluation de l'évolution temporelle des incendies par analyse diachronique d'images satellitales**

## Chapitre introductif

Combinée avec une classification supervisée, nous évaluerons l'évolution temporelle des incendies en utilisant des outils de télédétection indispensables à cette méthode. Trois dates clés des incendies dans la zone de Djebel El Ouahch seront analysées.

La première phase de cette approche consiste à calculer les indices suivants :

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour évaluer la santé et la densité de la végétation,
- NBR (Normalized Burn Ratio) pour déterminer les zones brûlées,
- NDWI (Normalized Difference Water Index) pour évaluer la teneur en eau de la végétation, avant et après chaque incendie. Pour cela, nous utiliserons les images satellite Sentinel-2. Ces indices sont essentiels pour cette étude.

La deuxième phase implique la réalisation d'une classification supervisée dans une zone plus restreinte, la forêt de Draa El Naga. Nous classifions trois catégories en utilisant les images satellite Landsat 8 OLI des mêmes dates clés des incendies. Le traitement des images satellites a été effectué avec le logiciel QGIS 3.32.2.

### - **Approche II : Evaluation et prédiction de l'aléa par la logique floue**

C'est une méthode de traitement des données qui permet de gérer l'incertitude et l'imprécision en attribuant des degrés d'appartenance à des variables plutôt que des valeurs binaires (vrai/faux). Cette approche est utilisée pour évaluer et prédire les risques d'incendie de forêt de manière plus flexible et réaliste.

Cette approche se décompose en quatre étapes :

#### • **Fuzzification (0-1) :**

Cette étape consiste à transformer les valeurs numériques précises en degrés d'appartenance flous. Par exemple, plutôt que de classer une zone comme simplement "sèche" ou "humide", la fuzzification attribue un degré d'humidité allant de 0 à 1, permettant une représentation plus nuancée des conditions environnementales.

#### • **Définition des fonctions d'appartenance :**

Des fonctions d'appartenance sont définies pour chaque facteur pertinent, tels que les facteurs de carburant (combustibles), bioclimatiques, topomorphologiques et humains. Ces fonctions permettent d'évaluer la contribution de chaque facteur au risque d'incendie. Par exemple, une fonction d'appartenance pourrait quantifier le risque de feu basé sur la densité de la végétation ou la pente du terrain.

#### • **Combinaison des fonctions d'appartenance :**

Les différentes fonctions d'appartenance sont combinées selon la méthode de logique floue. Cela intègre les différentes variables (carburant, climat, topographie, facteurs



## Chapitre introductif

humains) pour évaluer le risque d'incendie de manière globale. Cette combinaison est essentielle pour fournir une estimation précise et complète des risques.

- **Défuzzification :**

Le processus de défuzzification convertit les résultats flous en une sortie nette et quantifiable. Par exemple, l'Indice de Zone Brûlée (BIA) est calculé pour estimer l'impact potentiel d'un feu de forêt. Ce résultat quantifiable peut ensuite être utilisé pour la planification et la gestion des ressources.

Les données nécessaires pour cette approche incluent les images satellites Sentinel-2, utilisées pour obtenir des informations détaillées sur la couverture terrestre et la végétation via des techniques de traitement d'images, ainsi que les données climatiques, comprenant la vitesse du vent, la température et l'humidité atmosphérique, essentielles pour évaluer les conditions propices aux incendies.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est conçu pour fournir des informations sur la pente et l'exposition du terrain. Les cartes Open Street Map (OSM) sont utilisées pour analyser la proximité des routes et des habitats et évaluer l'historique des départs de feu. Ces outils et données sont intégrés pour fournir une évaluation précise et complète du risque d'incendie dans la région étudiée. Le logiciel utilisé est ArcGIS 10.8.1

- **Approche III : Evaluation d'indicateurs de la vulnérabilité, de la défendabilité et d'un potentiel d'ignition anthropique par analyse des interfaces forêt-urbain.**

Cette approche adopte une méthodologie développée par l'équipe de l'INRAE/ONF, spécialement conçue pour l'étude des interfaces habitats-forêts dans le contexte des risques d'incendie en milieu méditerranéen. La méthode s'appuie sur les développements récents de la méthode WUIMAPII, qui résulte d'une amélioration de l'approche INRAE et ONF.

Cette approche produit des types d'organisation spatiale des interfaces fortement corrélées aux différentes composantes du risque, en particulier à la vulnérabilité anthropique, mais aussi à la défendabilité et au potentiel d'ignition d'origine anthropique.

La méthode WUIMAP (Wildland-Urban Interface Mapping and Analysis Program) est une méthode avancée pour analyser et cartographier les interfaces entre les zones urbaines et les forêts. Initialement développée par l'INRAE et l'ONF, cette méthode a été améliorée pour mieux comprendre les risques d'incendie en prenant en compte plusieurs facteurs environnementaux et structurels. WUIMAPII représente la dernière itération de cette méthodologie, apportant des améliorations significatives par rapport aux versions précédentes. Cette méthode développe les classifications antérieures par une approche globale qui considère

## Chapitre introductif

à la fois la structure spatiale des bâtiments et leur intégration dans l'environnement végétal environnant.

WUIMAPII examine la disposition des bâtiments, leur densité, et leur proximité avec la végétation environnante. Les zones sont classifiées en fonction de leur vulnérabilité aux incendies, prenant en compte la densité de construction et les types de matériaux utilisés. L'analyse considère non seulement la quantité de végétation autour des bâtiments, mais aussi la composition de cette végétation (types de plantes, densité, inflammabilité). L'interface entre les zones construites et les espaces naturels est étudiée pour évaluer le potentiel de propagation des incendies.

WUIMAPII intègre des données climatiques, topographiques, et socio-économiques pour fournir une évaluation complète du risque d'incendie. Elle utilise des modèles spatiaux pour simuler la propagation des incendies et identifier les zones à risque élevé.

### 1.6.4 L'enquête

Afin de déterminer la pondération des différentes variables retenues dans cette étude, une enquête par questionnaire a été menée. Dix questionnaires ont été distribués à des experts, leur demandant d'attribuer un poids à chacun des facteurs identifiés. Cette approche vise à obtenir des avis spécialisés pour affiner la modélisation des risques et garantir une pondération adaptée des paramètres analysés. (Voir Annexe B)

### 1.7 Outils et logiciels utilisés

Chaque approche méthodologique décrite dans cette thèse utilise des outils et des logiciels spécifiques pour atteindre les objectifs de l'étude.

#### Analyse bibliométrique

- SCOPUS : Base de données pour l'analyse bibliométrique.
- PRISMA : Cadre pour structurer la revue systématique de la littérature.
- VOSviewer : Outil pour analyser et visualiser les données bibliométriques.

#### Analyse des données descriptives du territoire

- ArcGIS 10.8.1 : Logiciel SIG pour l'analyse des données spatiales.
- Excel : Tableur pour l'analyse des données statistiques.

#### Croisement de méthodes avancées pour l'évaluation du risque

- Sentinel-2 : Images satellites pour l'observation de la couverture terrestre.
- Landsat 8 OLI : Images satellites multispectrales.
- QGIS 3.32.2 : Logiciel SIG open-source pour le traitement des images satellites.
- Logique Floue : Méthode pour gérer l'incertitude et l'imprécision.

## Chapitre introductif

- MNT : Modèle Numérique de Terrain pour analyser la topographie.
- Open Street Map (OSM) : Base de données cartographique pour analyser les infrastructures.
- WUIMAPII : Programme pour analyser et cartographier les interfaces urbaines-forestières.

En intégrant ces outils et logiciels, nous avons pu développer une méthodologie complète et avancée pour évaluer et prédire les risques d'incendie de forêt. Chaque outil a été choisi pour sa capacité à fournir des données précises et pertinentes, contribuant ainsi à la robustesse de notre recherche.

### 1.8 Structure de la thèse

Notre réflexion sur cette recherche s'est progressivement développée en six chapitres qui suivent une progression logique allant de la définition du cadre théorique à la proposition de solutions pratiques pour la gestion des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch. Chaque chapitre apporte une contribution spécifique, et l'ensemble forme une approche multidisciplinaire intégrant des outils numériques, des analyses spatiales, et des stratégies de gestion des risques

Le premier chapitre portant sur la revue de la littérature pose les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de la problématique des incendies de forêt. Il commence par une revue systématique et bibliométrique de la littérature, qui permet de situer le sujet de recherche dans son contexte scientifique en identifiant les lacunes existantes dans les études précédentes

Le deuxième chapitre adopte une approche multidisciplinaire pour explorer les diverses dimensions du risque d'incendie de forêt, en mettant l'accent sur l'utilisation des outils numériques et des techniques de télédétection. Il identifie les facteurs physiques, environnementaux et anthropiques qui amplifient les risques, tout en soulignant l'importance de leur interaction. En outre, il examine les cadres réglementaires nationaux et internationaux, montrant que la gestion des incendies repose non seulement sur ces facteurs, mais aussi sur les politiques publiques, lois et règlements encadrant la prévention, l'intervention et la restauration. Ce chapitre pose ainsi les bases des analyses et modèles développés dans les chapitres suivants, offrant un cadre conceptuel et méthodologique solide.

L'analyse cartographique thématique du massif de Djebel El Ouahch est abordée dans le troisième chapitre. Il décrit en détail les caractéristiques topographiques, géologiques et végétales de la région étudiée, en s'appuyant sur des données issues de la télédétection. Cette

## Chapitre introductif

analyse permet de mieux comprendre la répartition spatiale des zones à risque et fournit les bases pour les études diachroniques de l'analyse des facteurs anthropiques et de modélisation des risques présentées dans les chapitres suivants.

Le quatrième chapitre, en se concentrant sur l'analyse diachronique des incendies à l'aide de données satellitaires, apporte une contribution essentielle à la thèse en fournissant une vision dynamique et spatio-temporelle des impacts des incendies sur la couverture végétale et les écosystèmes. En utilisant des indices tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le NBR (Normalized Burn Ratio), ce chapitre permet de quantifier les changements dans la végétation avant et après les incendies, d'identifier les zones critiques gravement affectées et d'évaluer leur potentiel de régénération. Cela enrichit la thèse en offrant une analyse empirique approfondie des effets des incendies, en fonction du temps et de l'espace.

Pour les chapitres suivants, ce travail représente une base de données cruciale pour la modélisation prédictive des risques d'incendie. En identifiant les zones à haut risque et les dynamiques écologiques post-incendie, il permet de valider et affiner les modèles prédictifs développés ultérieurement, en assurant que ces modèles reposent sur des données concrètes et actualisées.

Dans le cinquième chapitre, un modèle prédictif basé sur la logique floue est développé pour évaluer les risques d'incendie dans le massif de Djebel El Ouahch. Ce modèle prend en compte des variables incertaines ou ambiguës, telles que la végétation, l'humidité du sol, et la proximité des infrastructures humaines. La logique floue permet de quantifier le degré de risque dans différentes zones, offrant ainsi un outil précieux pour la prise de décision en matière de prévention et de gestion des incendies. Ce modèle constitue un outil opérationnel qui peut être appliqué à d'autres contextes géographiques similaires.

Un dernier chapitre Le chapitre sur les interfaces habitat-forêt explore les zones critiques où la proximité entre les habitations et les forêts accroît le risque d'incendie. À travers l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) et des données satellitaires, une cartographie détaillée des interfaces dans le massif de Djebel El Ouahch est réalisée. Cette analyse met en évidence les zones les plus vulnérables, en tenant compte de la disposition des infrastructures humaines et de la végétation environnante. L'étude s'appuie sur la méthode WUIMAPII pour évaluer la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, identifiant des zones à haut risque nécessitant des mesures de prévention spécifiques telles que le débroussaillage et la création de coupe-feu.

Ce chapitre souligne l'importance des dynamiques d'interaction entre l'urbanisation et les écosystèmes forestiers, montrant comment ces interactions augmentent la probabilité de

## **Chapitre introductif**

propagation des incendies. Les résultats obtenus fournissent une base solide pour orienter les politiques publiques et améliorer la gestion des risques dans les zones sensibles, contribuant à la protection des populations locales et à la prévention des incendies dans les interfaces habitat-forêt.



## **CHAPITRE II : POSITIONNEMENT DE LA CARTOGRAPHIE ET LA GESTION DES INCENDIES DE FORET DANS LA RECHERCHE : APPROCHE BIBLIOMETRIQUE ET SYSTEMATIQUE**

### **Introduction**

Au cours de la dernière décennie, il y a eu une augmentation notable des recherches et des publications liées à la cartographie et à la gestion des incendies de forêt. Cette augmentation reflète la reconnaissance croissante de l'importance de ce domaine et la nécessité de stratégies complètes pour relever les défis posés par les incendies de forêt. Étant donné le nombre croissant de publications, une analyse bibliométrique est essentielle pour comprendre le paysage de la recherche, identifier les tendances clés et mettre en lumière les contributeurs et les institutions influentes (Juárez-Orozco et al., 2017). Une telle analyse révèle les travaux les plus cités, les domaines d'intérêt émergents et les réseaux de collaboration au sein de la communauté scientifique (Liu & Wimberly, 2015). En examinant les données bibliométriques, les chercheurs et les décideurs peuvent mieux prioriser les ressources et les efforts pour améliorer les pratiques de gestion des incendies de forêt (Pourghasemi et al., 2020)

Les objectifs de cette analyse bibliométrique et systématiques sont d'examiner les tendances des publications de recherche sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt, d'identifier les auteurs et les institutions les plus prolifiques, d'explorer les réseaux de collaboration et les revues clés dans ce domaine et identifier les méthodes, les variables, les résultats ainsi que les défis et les futures directions de chaque recherche dans cette revue systématique de la littérature. En fournissant une vue d'ensemble détaillée des activités et des développements de la recherche, ce chapitre vise à identifier les questions de recherche qui ont été largement étudiées, tout en mettant en évidence les lacunes, et à fournir des informations quantifiées aux chercheurs, décideurs et praticiens impliqués dans la gestion des incendies de forêt.

### **2.1 Conception de la recherche**

Cette analyse bibliométrique et revue systématique de la littérature, basée sur le cadre PRISMA (Moher et al., 2009), se focalise sur les publications relatives à la cartographie et la gestion des incendies de forêt.

La première phase consiste en une analyse bibliométrique qui identifie les principaux pays, les institutions éducatives de premier plan, les revues les plus pertinentes et les auteurs les plus prolifiques dans ce domaine de recherche. De plus, cette phase met en lumière les tendances clés et les mots-clés émergents dans le domaine au cours de la dernière décennie.

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

La deuxième phase comprend une revue systématique de la littérature visant à analyser en profondeur les articles pertinents dans ce domaine de recherche. Cette analyse explore leurs applications, variables, résultats, défis et directions futures, offrant ainsi une vue d'ensemble complète et détaillée des avancées et des lacunes dans la recherche sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt.

Nous avons également utilisé VOSviewer pour améliorer la visualisation et l'analyse des données. VOSviewer est un outil logiciel pour la construction et la visualisation de réseaux bibliométriques. Il est largement utilisé dans le domaine de la bibliométrie pour analyser la littérature scientifique et visualiser des données complexes. VOSviewer permet aux utilisateurs de charger facilement des données bibliométriques, de créer des visualisations et de personnaliser des cartes.

Le logiciel peut générer divers types de cartes bibliométriques, y compris des cartes de co-auteur, des cartes de citation et des cartes de co-occurrence de mots-clés. Il gère également efficacement de grands ensembles de données, ce qui le rend adapté à l'analyse de données bibliométriques étendues provenant de sources comme Scopus ou Web of Science. Les chercheurs utilisent VOSviewer pour identifier les tendances de recherche, les auteurs clés, les revues influentes et les modèles de collaboration au sein d'un domaine spécifique (van Eck & Waltman, 2014).

### **2.2 Identification des enregistrements : Quels mots-clés ? quelles bases de données et quels articles ?**

Nous examinons dans cette partie les bases de données, les mot-clés et les articles utilisés pour l'analyse :

#### **2.2.1 Sélection de la base de données**

Les requêtes ont été émises le 1er juin 2024, et Scopus a été sélectionnée comme principale base de données pour cette revue. Scopus a été choisie pour cette étude en raison de ses capacités analytiques avancées, de sa couverture multidisciplinaire étendue et de ses fonctionnalités robustes de suivi des citations. Cette base de données complète comprend une large gamme d'articles, de communications de conférences et de livres, ce qui en fait une ressource inestimable pour les chercheurs. Ses sources de haute qualité et ses outils bibliométriques détaillés facilitent une analyse approfondie, soutenant un large éventail de domaines de recherche (Baas et al., 2020).



## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

### 2.2.2 Chaînes de recherche

Pour assurer la récupération des études pertinentes, nous avons utilisé des mots-clés spécifiques tels que "cartographie et gestion des incendies de forêt," formulés comme TITLE-ABS-KEY (cartographie AND gestion AND des AND incendies AND de AND forêt). La recherche a été limitée aux publications des dix dernières années, spécifiquement de 2013 à 2023 (PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2024). De plus, le domaine de recherche a été restreint aux sciences de l'environnement (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")). Les types de documents étaient limités aux articles et communications de conférences (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp")). Enfin, seules les publications en langue anglaise ont été incluses (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")).

**Tableau 2.1** critères d'inclusion et d'exclusion

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<b>Domaine de recherche : cartographie et gestion des incendies de forêt</b>	Toutes les publications antérieures à 2013 ont été exclues. Les publications de 2024 ont également été exclues.
<b>2013-2023</b>	
<b>Langue anglaise</b>	Toute autre langue a été exclue.
<b>Articles, communications de conférences</b>	Thèses, livres, chapitres de livres, blogs ont été exclus.
<b>Revue</b>	

Source : Scopus + traitement auteur 2024

### 2.2.3 Filtrage et sélection :

Les mots-clés principaux utilisés étaient "cartographie et gestion des incendies de forêt," aboutissant à une recherche initiale de 927 documents. Après l'application des critères d'inclusion et d'exclusion énoncés dans le Tableau 2.1, la sélection finale comprenait 240 documents, avec 687 publications exclues.

Lors de la première phase, nous avons tenté de télécharger les 240 documents sélectionnés. Cependant, seulement 160 documents ont pu être téléchargés avec succès. Les 80 documents restants n'ont pas pu être récupérés pour plusieurs raisons : certains articles étaient en accès restreint, d'autres n'avaient pas de DOI.

Dans la deuxième phase, les 160 documents téléchargés ont été évalués initialement en examinant le titre, les mots-clés et le résumé. Suite à cette évaluation, 140 articles ont été exclus car jugés non pertinents pour notre étude.

La troisième phase impliquait une évaluation manuelle de la qualité des 40 articles restants. Après cette évaluation approfondie, 20 articles supplémentaires ont été exclus car ils

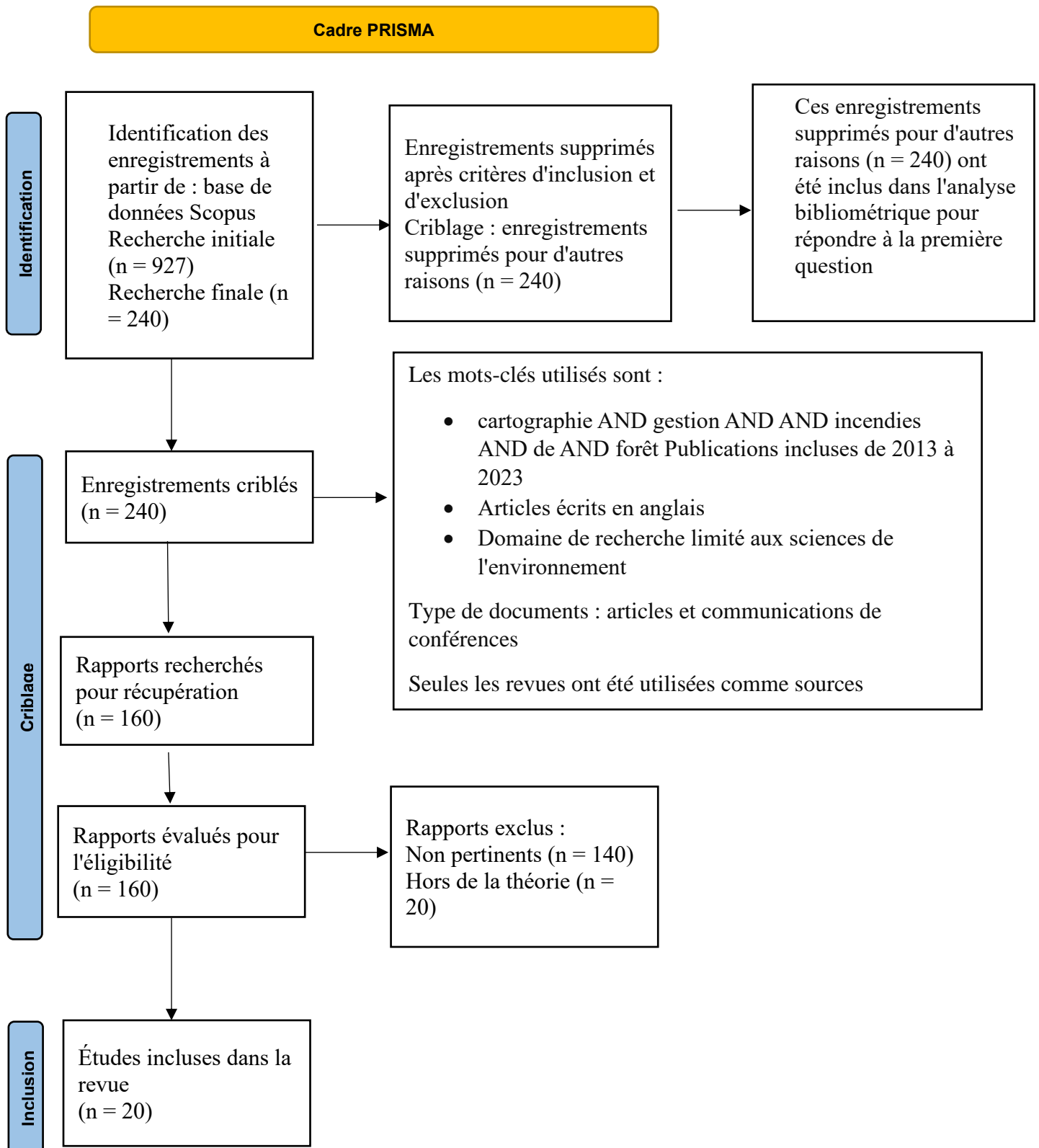
## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

ne correspondaient pas aux théories utilisées dans cette étude. Finalement, seuls 20 articles étaient pertinents et ont été inclus dans cette étude.

### **2.3 Inclusion et rapport**

Les résultats de cette analyse bibliométrique seront rapportés selon le cadre PRISMA (Moher et al., 2010), comme illustré dans la Figure 2.1. Les sections suivantes aborderont en détail les questions de recherche.

**Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche :  
approche bibliométrique et systématique**



**Figure 2.1** Cadre PRISMA

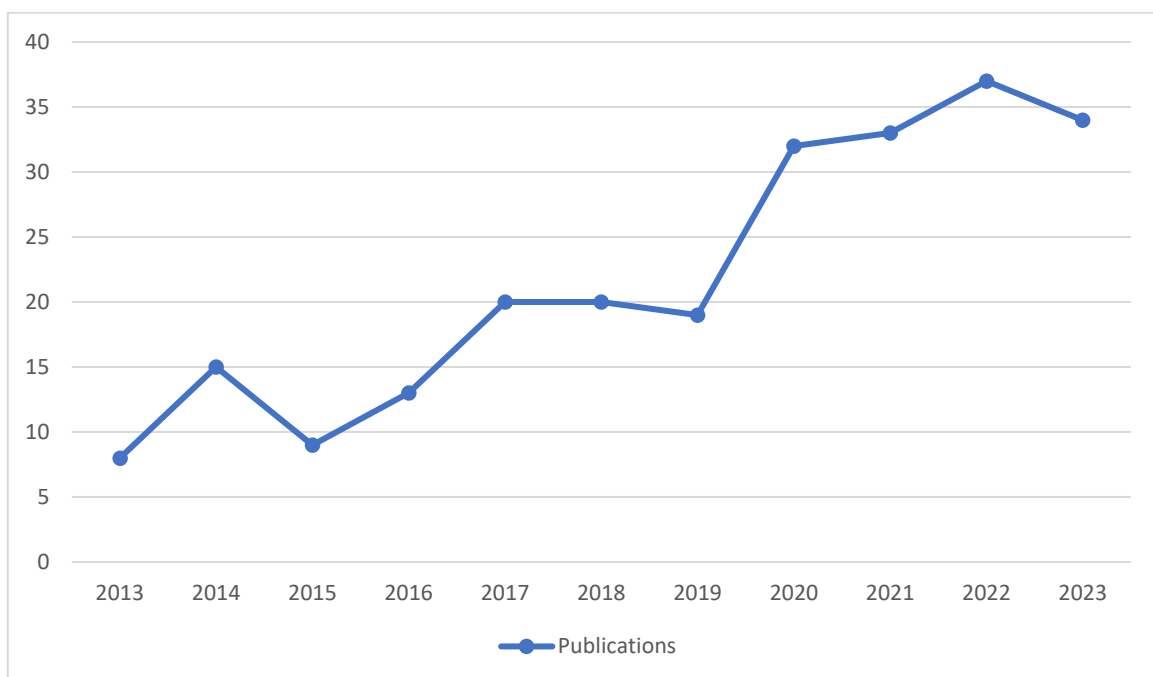
Source : auteure 2024

### **2.3 Résultats de l'analyse bibliométrique**

Dans cette section, nous abordons les questions de recherche basées sur l'analyse des données récupérées de la base de données Scopus. Une recherche complète utilisant les mots-clés et les critères spécifiés a abouti à un ensemble de données affiné de 240 documents pertinents pour l'analyse bibliométrique. Les résultats sont organisés comme suit :

#### **2.4 La répartition des publications sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt**

L'exploration de la répartition temporelle des publications liées à la cartographie et à la gestion des incendies de forêt au cours de la dernière décennie (2013-2023), illustrée dans la figure 2.2 ci-dessous indique une tendance croissante. En effet, en 2013, il n'y avait que 8 publications. Toutefois, ce nombre a presque doublé en 2014, atteignant 15 publications. La tendance a continué à augmenter au fil des ans, atteignant un pic en 2022 avec 37 publications. En 2023, il y avait 34 publications, montrant une légère baisse mais maintenant toujours une activité de recherche élevée dans ce domaine.



**Figure 2.2** La répartition des publications sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt de 2013 à 2023.

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Cette augmentation pourrait être attribuée à plusieurs facteurs. Une raison significative est le changement global ; selon les statistiques de la FAO, 2017 a été marqué par certains des plus

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

grands et des plus destructeurs incendies de forêt. De plus, 2021 a connu une activité de feux de forêt sans précédent, ce qui a incité à une augmentation des recherches sur cette question critique. Par ailleurs, les avancées dans la technologie de télédétection et la disponibilité des images satellites ont facilité les études et la publication de travaux plus approfondis sur ce type de risque.

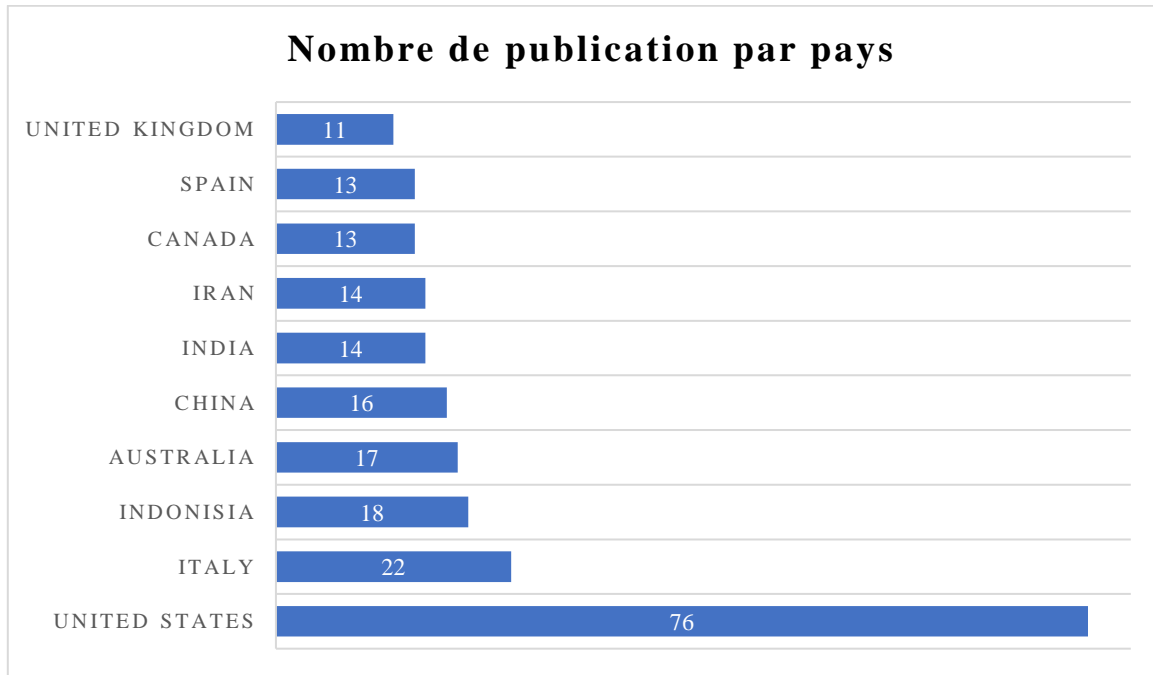
### **2.3.1 Les 10 principaux pays publiant le plus sur les incendies de forêt et leurs institutions académiques les plus significatives**

L'analyse est basée sur le nombre de publications attribuées aux chercheurs de chaque pays au cours des dix dernières années. Cette section répondra aux questions suivantes :

- Quels sont les pays qui publient le plus sur les incendies de forêt ?
- Quelles sont les institutions académiques les plus significatives dans ces pays ?

Au cours des dix dernières années, les États-Unis ont publié 76 articles sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt. Ce volume substantiel de recherche est motivé par les incendies de forêt fréquents et graves, en particulier dans des états comme la Californie. D'autres pays ont également apporté des contributions significatives à ce domaine, bien que dans une moindre mesure. L'Italie a publié 22 articles, suivie de l'Indonésie avec 18, l'Australie avec 17, la Chine avec 16, et l'Inde et l'Iran avec chacun 14 publications. Le Canada et l'Espagne ont chacun contribué 13 articles, tandis que le Royaume-Uni a publié 11 articles. La prédominance des États-Unis dans ce domaine de recherche peut être attribuée à ses vastes zones forestières, à l'impact significatif des incendies de forêt et à la technologie avancée disponible pour la gestion et la cartographie des incendies. Ainsi qu'à la langue de publication.

**Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche :  
approche bibliométrique et systématique**



**Figure 2.3** Les 10 principaux pays publiant le plus sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Cette section identifie également les 10 pays avec le plus grand nombre de publications dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt et met en avant les pays les plus productifs ainsi que leurs principales institutions académiques contribuant à ce domaine de recherche. En examinant ces institutions illustrées dans le tableau ci-dessous, nous pouvons obtenir des informations sur les régions qui stimulent les avancées dans la recherche sur les incendies de forêt.

**Tableau 2.2** Les 10 principaux pays dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt et leurs institutions académiques les plus significatives

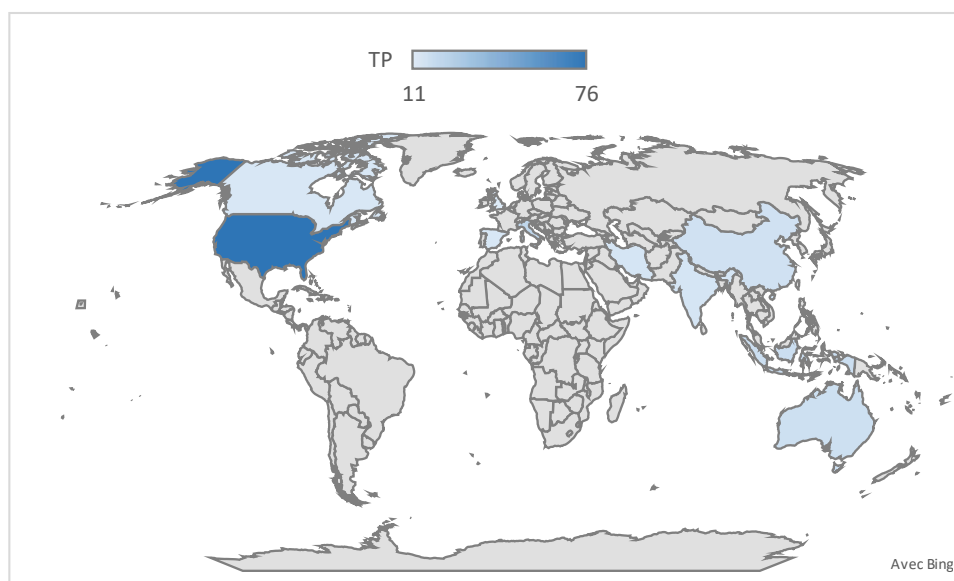
Rang	Pays	TP	Institutions académiques les plus significatives
1	États-Unis	76	Université de Californie
2	Italie	22	Université de Cassino et du Latium méridional
3	Indonésie	18	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
4	Australie	17	Université Nationale Australienne
5	Chine	16	Académie Chinoise des Sciences
6	Inde	14	Université Thapar

## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

7	Iran	14	Université de Shiraz
8	Canada	13	Centre forestier du Nord
9	Espagne	13	Institut Pirénéen d'Écologie
10	Royaume-Uni	11	Université de Cassino et du Latium méridional

Source : Scopus + traitement auteure 2024

En tête de liste figure 2.3 l'Université de Californie, affiliée aux États-Unis, avec 76 publications, indiquant une activité de recherche significative dans cette région. L'Université de Cassino et du Latium méridional, affiliée à l'Italie, suit avec 22 publications, montrant un fort intérêt pour la recherche sur les incendies de forêt en Italie. Fait intéressant, la même institution, lorsqu'elle est affiliée au Royaume-Uni, compte 11 publications. Les différentes productions de publications parmi ces institutions reflètent des niveaux variés d'intérêt et d'investissement dans la recherche sur les incendies de forêt à travers différentes régions.



**Figure 2.4** Les 10 principaux pays en termes de publications sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt.

Source : Scopus + traitement auteure 2024

L'intensité de la couleur représente le nombre de publications, les teintes plus foncées indiquant un nombre plus élevé de publications.

**Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche :  
approche bibliométrique et systématique**

**2.3.2 Les revues les plus pertinentes**

La réponse à la question : Quelles sont les revues les plus pertinentes dans la recherche sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt ? nous a permis d'identifier les sources et les contributeurs clés, offrant ainsi une meilleure compréhension des principaux centres de connaissances et d'innovation dans ce domaine de recherche.

**Tableau 2.3** Les 10 principales revues sur les incendies de forêt dans la base de données Scopus

Revue	TP	TC	Cite score	Article le plus cité	Nbre de citation	Editeur
<b>Forest Ecology and Management</b>	2956	22 767	7.5	Influence of nitrogen addition on the functional diversity and biomass of fine roots in warm-temperate and subtropical forests	30	Elsevier
<b>Journal Of Environmental Management</b>	8751	120 010	13.7	The role of digitalization on green economic growth: Does industrial structure optimization and green innovation matter?	268	Elsevier
<b>Science of the Total Environment</b>	30 644	540 202	17.6	Endorsing sustainable development in BRICS: The role of technological innovation, renewable energy consumption, and natural resources in limiting carbon emission	228	Elsevier
<b>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation</b>	1495	17 951	12	Coherency and phase delay analyses between land cover and climate across Italy via the least-squares wavelet software	49	Elsevier
<b>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</b>	66 209	68 990	1	Investments in green business and corporate governance by Ukraine's cooperation with the European Union	24	
<b>Fire Ecology</b>	160	986	6.2	Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting	48	Association for Fire Ecology
<b>Environmental Monitoring and Assessment</b>	4086	19 023	4.7	The spatial pattern of Scirpus mariqueter expansion and the associated mechanism of self-organization using unmanned aerial vehicles and its significance for coastal wetland restoration	2	Springer Nature
<b>Geocarto International</b>	1229	7986	6.3	Modelling groundwater level fluctuations by ELM merged advanced metaheuristic algorithms using hydroclimatic data	23	Taylor & Francis



## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

<b>International Journal of Wildland Fire</b>	338	1862	5.5	Nature-based solutions to wildfires in rural landscapes of Southern Europe: let's be fire-smart!	8	CSIRO
<b>Sustainability (Switzerland)</b>	55 991	381 353	6.8	Chatbots in Education and Research: A Critical Examination of Ethical Implications and Solutions	121	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Comme le montre le Tableau 2.3, les revues les plus productives dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt incluent "Science of the Total Environment," qui affiche un CiteScore de 17.6, et le "Journal of Environmental Management," avec un CiteScore de 13.7. En termes de nombre total de publications, "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science" est en tête avec 66,209 publications, suivi par "Sustainability (Switzerland)" avec 55,991 publications dans ce domaine de recherche. À l'inverse, la revue "Fire Ecology" a le moins de publications, avec seulement 160 articles.

En termes de citations totales, "Science of the Total Environment" et "Sustainability (Switzerland)" ont respectivement recueilli 540,202 et 381,353 citations. En revanche, "Fire Ecology" a le moins de citations totales. Cette différence peut être attribuée à la nature interdisciplinaire des revues les plus citées, qui couvrent un éventail plus large de sujets environnementaux. Ces revues attirent un groupe plus large et plus diversifié de chercheurs. En revanche, "Fire Ecology" se concentre spécifiquement sur les aspects écologiques du feu, ce qui limite son audience à une communauté de recherche plus restreinte.

### 2.3.3 Institutions éducatives

La réponse à la question : Quelles sont les institutions éducatives dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt ? A mis en lumière les contributions des institutions, pour mieux comprendre les sources de recherche et d'innovation significatives dans ce domaine critique.

**Tableau 2.4** Les 10 principales institutions éducatives dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt

<b>Institutions</b>	<b>TP</b>	<b>Pays</b>
<b>USDA Forest Service</b>	31	États-Unis
<b>USDA ARS Rocky Mountain Research Station</b>	15	États-Unis
<b>United States Geological Survey</b>	8	États-Unis
<b>Natural Resources Canada</b>	7	Canada
<b>Canadian Forest Service</b>	6	Canada
<b>The Australian National University</b>	6	Australie

## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

Oregon State University	6	États-Unis
University of Melbourne	6	Australie
Shiraz University	6	Iran
School of Ecosystem and Forest Science	6	Australie

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Les résultats illustrés dans le Tableau 2.4 met en évidence les institutions éducatives les plus prolifiques dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt, les États-Unis se démarquant comme un leader dans ce domaine de recherche. Cela est attesté par quatre institutions de premier plan : le USDA Forest Service, le USDA ARS Rocky Mountain Research Station, le United States Geological Survey et l'Oregon State University, qui ont respectivement publié 31, 15, 8 et 6 articles.

Après les États-Unis, l'Australie se distingue par ses contributions, avec trois institutions : The Australian National University, University of Melbourne et la School of Ecosystem and Forest Science, chacune ayant contribué à 6 publications.

Au Canada, Natural Resources Canada et le Canadian Forest Service ont respectivement publié 7 et 6 articles.

Enfin, représentant l'Iran, l'Université de Shiraz a publié 6 articles.

Cette répartition met en évidence l'importance globale de la recherche sur les incendies de forêt, car ce phénomène ne se limite pas à une région ou à un pays spécifique, mais affecte des écosystèmes et des communautés dans le monde entier. Les institutions des pays comme les États-Unis, l'Australie, le Canada et l'Iran jouent un rôle clé dans la production de connaissances et le développement de nouvelles stratégies de gestion des incendies, adaptées à leurs contextes géographiques, climatiques et socio-économiques spécifiques.

### 2.3.4 Auteurs les plus prolifiques et leurs affiliations

Dans cette section, nous abordons la réponse à la question de recherche : Qui sont les auteurs les plus prolifiques dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt ? Cette analyse illustrée dans le tableau ci-dessous inclut le nombre de leurs publications et leurs affiliations, mettant en évidence les personnes clés qui stimulent la recherche et l'innovation dans ce domaine.

**Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche :  
approche bibliométrique et systématique**

**Tableau 2.5** Les 10 principaux auteurs dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt

<b>Auteur</b>	<b>Année de première publication</b>	<b>TP<sup>1</sup></b>	<b>H-index</b>	<b>TC<sup>2</sup></b>	<b>Affiliation actuelle</b>	<b>Pays</b>
<b>Pourghasemi, Hamid Reza</b>	2012	290	83	21,769	Shiraz University	Iran
<b>Eskandari, Saeedeh</b>	2010	37	14	552	Agricultural Research, Education & Extension Organization	Iran
<b>Hudak, Andrew T</b>	1996	210	54	10,225	USDA ARS Moscow Forestry Sciences Lab	États-Unis
<b>Ager, Alan A.</b>	1995	132	47	5,485	USDA ARS Rocky Mountain Research	États-Unis
<b>Barbati, Anna</b>	2006	66	28	4,674	Università degli Studi della Tuscia Viterbo	Italie
<b>Day, Michelle A</b>	2013	43	23	1,230	USDA ARS Rocky Mountain Research Station	États-Unis
<b>Dillon, Gregory K.</b>	2005	11	7	998	USDA ARS Rocky Mountain Research Station	États-Unis
<b>Holsinger, Lisa M.</b>	2006	44	24	1,866	USDA ARS Rocky Mountain Research Station	États-Unis
<b>Keane, Robert E.</b>	2007	82	27	3,044	USDA ARS Rocky Mountain Research Station	États-Unis
<b>Marchetti, Marco</b>	1995	217	44	7,378	Università degli Studi del Molise	Italie

Source : Scopus + traitement auteure 2024

L'auteur le plus prolifique est Pourghasemi, Hamid Reza, de l'Université de Shiraz en Iran, avec un total de 21,769 citations, 290 publications et un H-index de 83. Le suivant est Hudak, Andrew T, affilié au USDA ARS Moscow Forestry Sciences Lab aux États-Unis, qui compte 10,225 citations, 210 publications et un H-index de 54.

En Italie, Marchetti, Marco, affilié à l'Università degli Studi del Molise, a commencé ses publications en 1995 et a accumulé 7,378 citations, 217 publications et un H-index de 44. Parmi les autres auteurs notables des États-Unis, on trouve Ager, Alan A. (H-index de 47), Day, Michelle A. (H-index de 23), Dillon, Gregory K. (H-index de 7), Holsinger, Lisa M. (H-index de 24), et Keane, Robert E. (H-index de 27).

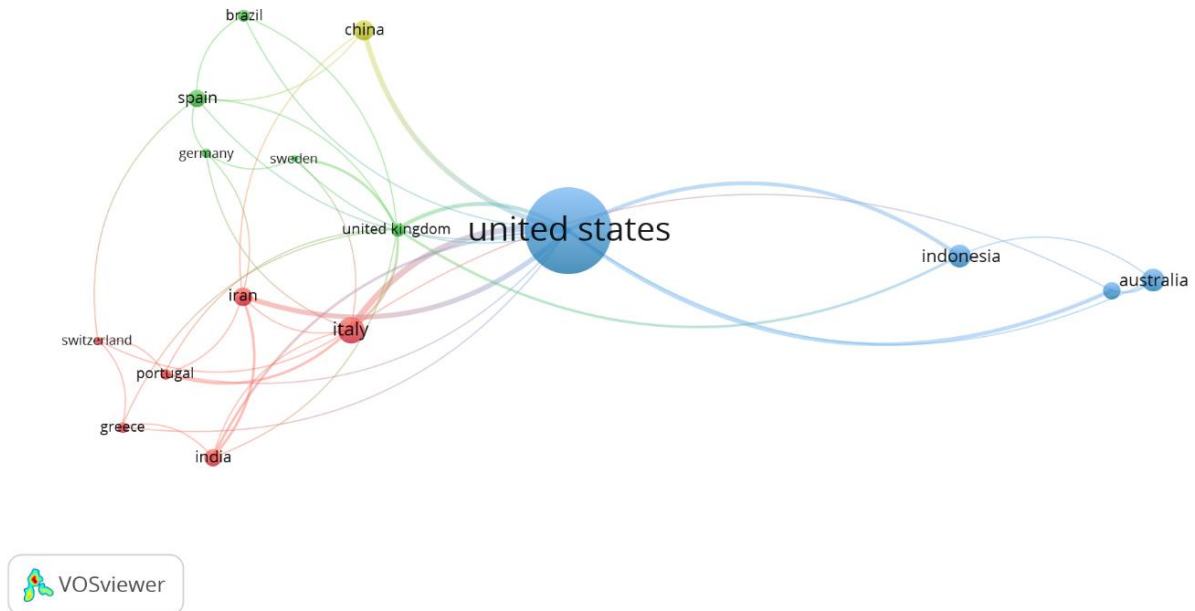
De plus, Eskandari, Saeedeh de l'Iran, a un total de 525 citations et un H-index de 14, tandis que Barbati, Anna d'Italie, a 4,674 citations et un H-index de 28. Ces auteurs contribuent de

<sup>1</sup> TP= Total des Publications

<sup>2</sup> TC= Total des citations

## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

manière significative à la recherche sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt, soulignant l'intérêt mondial et les efforts de collaboration dans ce domaine critique.



**Figure 2.5** Résultats de l'analyse des pays prolifiques dans la cartographie et la gestion des incendies de forêt.

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Les résultats analytiques des pays les plus productifs dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt illustré dans le tableau ci-dessus indique que les États-Unis sont le pays leader dans ce domaine de recherche. Ils sont suivis par l'Italie, l'Indonésie, l'Australie, la Chine, l'Inde, l'Iran, le Canada, l'Espagne et le Royaume-Uni, qui sont identifiés comme les dix principaux pays contribuant de manière significative à ce domaine



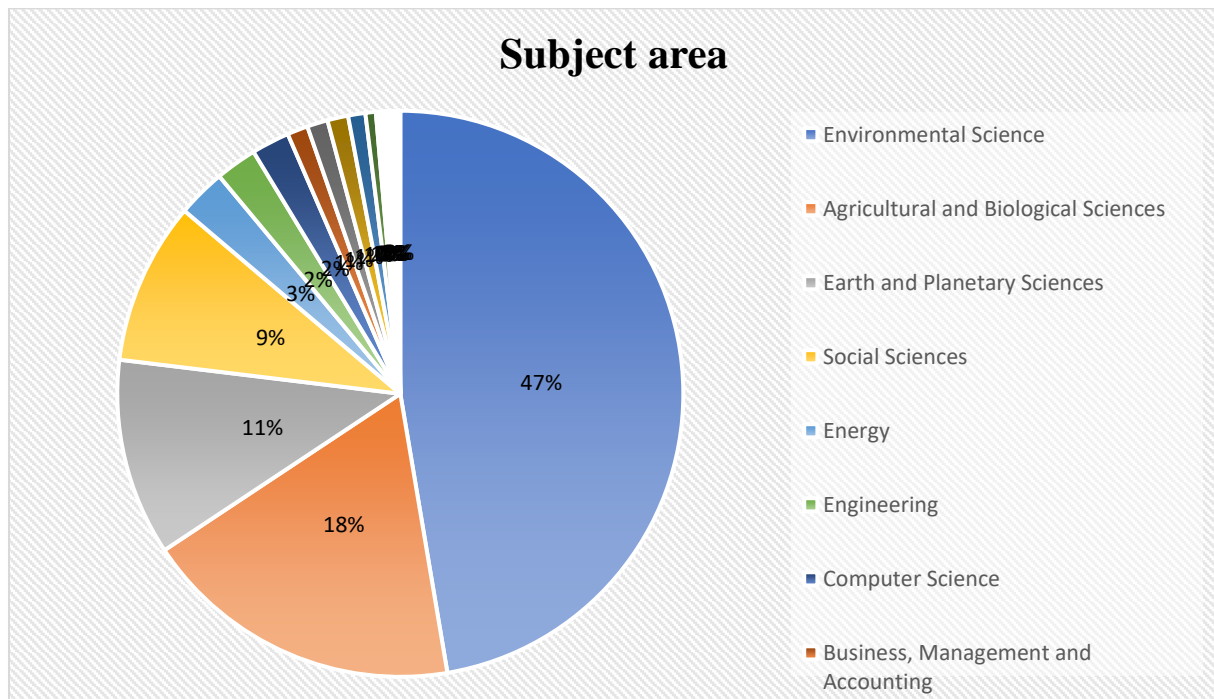


Figure 2.7 Domaine de la recherche

Source : Scopus + traitement auteure 2024

Les résultats illustrés par la Figure 2.7, présente la répartition des publications de recherche dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt à travers diverses disciplines scientifiques, avec les sciences de l'environnement en tête des contributions. Les sciences agricoles et biologiques, ainsi que les sciences de la Terre et des planètes, jouent également des rôles significatifs. Les sciences sociales, l'énergie, l'ingénierie et l'informatique contribuent dans une moindre mesure, mais restent essentielles pour fournir une compréhension complète et des stratégies de gestion des incendies de forêt. Cette répartition souligne la complexité des problèmes liés aux incendies de forêt, nécessitant des perspectives et une collaboration à travers diverses disciplines scientifiques.

### 2.3.6 Résumé des résultats

Le tableau 2.6 fournit un aperçu complet des aspects clés discutés, mettant en évidence les résultats, leurs implications, les tendances actuelles et les aspects futurs dans le domaine de la recherche sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt.

**Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche :  
approche bibliométrique et systématique**

**Tableau 2.6** Un aperçu complet des aspects clés

<b>Aspect</b>	<b>Résultats</b>	<b>Implications</b>	<b>Tendances</b>	<b>Aspect futur</b>
<b>Publications</b>	Augmentation significative des publications depuis 2019	Reflète un intérêt croissant et une urgence à traiter les incendies de forêt.	Croissance continue de la production de recherche.	Augmentation probable en raison de l'impact continu et croissant des incendies de forêt.
<b>Revue</b>	Revue principale inclut "Science of the Total Environment" et "Sustainability (Switzerland)."	Les revues à fort impact favorisent la diffusion et l'influence de la recherche.	Préférence pour la publication dans des revues interdisciplinaires à fort impact.	Reconnaissance accrue et soumissions aux revues axées sur les questions environnementales et de durabilité.
<b>Pays</b>	Pays principaux contributeurs : USA, Italie, Indonésie, Australie, Chine, Inde, Iran, Canada, Espagne, Royaume-Uni.	Indique une collaboration mondiale et une reconnaissance des défis liés aux incendies de forêt dans diverses régions.	Dominance des contributions provenant de pays fréquemment touchés par les incendies de forêt.	Plus de collaborations internationales et de contributions provenant de nouveaux centres de recherche.
<b>Institutions éducatives</b>	Institutions clés : USDA Forest Service, USDA ARS Rocky Mountain Research Station, Shiraz University.	Les institutions avec des programmes de recherche solides dirigent les avancées dans le domaine.	Concentration de la recherche dans des institutions ayant des programmes établis en environnement et en foresterie.	Financement et ressources accrues pour les institutions de premier plan, potentiellement plus de partenariats.
<b>Auteurs</b>	Auteurs prolifiques incluent Pourghasemi, Hamid Reza, et Hudak, Andrew T	Reconnaît les principaux contributeurs et leur influence sur le paysage de la recherche.	Taux de citation et de publication élevés pour les auteurs de premier plan.	Contributions continues des auteurs établis, émergence potentielle de nouveaux chercheurs influents.
<b>Mots-clés</b>	Thèmes centraux : gestion des incendies, changement climatique, télédétection, SIG.	Les mots-clés reflètent les principaux domaines de recherche et aident à orienter de nouvelles études.	Accent sur l'intégration technologique et les études d'impact environnemental.	Évolution des mots-clés avec les nouvelles technologies et les défis environnementaux émergents.

Source : Scopus+ traitement auteure 2024

Dans le domaine en évolution rapide de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt, disposer de cartes précises et actualisées créées à l'aide de technologies avancées est crucial. Ces cartes sont essentielles pour comprendre la situation actuelle, prévoir le comportement des incendies de forêt et identifier les zones à haut risque. Ces informations

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

sont inestimables pour mettre en œuvre des stratégies et des pratiques de gestion efficaces pour contrôler et prévenir les incendies de forêt.

Les résultats de cette revue de littérature mettent en évidence la productivité des auteurs et des institutions de diverses nations et organisations dans ce domaine de recherche.

### **2.4 Analyse croisée des résultats : Synthèse de la revue systématique et de l'analyse bibliométrique**

Cette section propose une analyse croisée des résultats obtenus à travers la revue systématique et l'analyse bibliométrique, en intégrant les principales tendances identifiées et en offrant une synthèse globale des contributions les plus significatives, des lacunes de la recherche, ainsi que des opportunités pour des travaux futurs dans le domaine de la gestion et de la cartographie des incendies de forêt.

#### **2.4.1 Modèles de publication et répartition géographique**

L'augmentation substantielle des publications dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt de 2013 à 2023 indique un intérêt croissant et important pour ce domaine de recherche. Cette augmentation est due à la prise de conscience croissante de l'impact destructeur des incendies de forêt sur les écosystèmes, l'environnement et les communautés humaines, notamment à partir de 2017. L'intérêt pour la publication d'articles dans ce domaine est réparti dans divers pays à travers le monde, avec des contributions particulièrement importantes des États-Unis, de l'Italie et de l'Indonésie, comme le démontre cette analyse bibliométrique.

#### **2.4.2 Revues et institutions académiques de premier plan**

Dans ce chapitre, nous avons mis en lumière les revues et les institutions académiques de premier plan qui sont à la pointe des publications dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt. En identifiant ces contributeurs clés, notre étude fournit des informations précieuses sur les sources de connaissance et d'innovation les plus influentes dans ce domaine. Ces informations sont particulièrement utiles pour les universitaires et les auteurs qui aspirent à participer et à contribuer à la recherche de pointe dans ce domaine. Comprendre quelles revues ont le plus grand impact et quelles institutions sont les plus prolifiques peut aider les chercheurs à cibler leurs soumissions et collaborations plus efficacement, faisant ainsi progresser la compréhension collective et la gestion des incendies de forêt.



## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

### **2.4.3 Auteurs productifs et mots-clés**

Les mots-clés fournis dans cette recherche peuvent aider les auteurs à identifier facilement les sujets pertinents et à offrir des perspectives précieuses sur le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt. L'inclusion de mots-clés tels que "changement climatique" et "gestion des catastrophes" est particulièrement pertinente pour ce domaine et peut influencer de manière significative les chercheurs. Ces mots-clés aident les auteurs à concentrer leurs études sur des sujets pertinents, garantissant que leur travail s'aligne sur les tendances actuelles et les enjeux critiques de la recherche sur les incendies de forêt.

### **2.4.4 Domaine de recherche et leur impact**

Cette recherche englobe une large gamme de domaines de recherche, soulignant la nature multidisciplinaire des études sur les incendies de forêt. Les disciplines clés incluent les sciences de l'environnement, qui traitent des effets écologiques et atmosphériques des incendies ; les sciences agricoles et biologiques, qui se concentrent sur l'impact des incendies sur la flore, la faune et les pratiques agricoles ; et les sciences de la Terre et des planètes, qui examinent les facteurs géologiques et climatiques influençant le comportement des incendies. En intégrant ces différents domaines, la recherche fournit une compréhension complète des incendies de forêt, de leurs effets environnementaux immédiats à leurs implications écologiques et géologiques plus larges.

La revue systématique de la littérature sur la cartographie et la gestion des incendies de forêt permet de dégager des méthodes significatives et des facteurs clés qui aident à identifier les zones à risque. Elle met en lumière les principaux résultats et tendances de ces recherches, ainsi que les défis auxquels ces études sont confrontées. En outre, elle souligne les directions futures pour améliorer ces méthodes et renforcer la gestion des incendies de forêt.

### **2.5.5 Les méthodes utilisées**

Les méthodes employées dans ces études montrent l'intégration croissante de technologies avancées pour améliorer la précision et l'efficacité des prévisions et des interventions.

#### **2.5.5.1 Télédétection**

Données satellites sentinel-1 et sentinel-2 : (Hosseini & Lim, 2023) démontrent l'efficacité de l'utilisation de la télédétection pour surveiller les incendies en temps réel et évaluer les zones touchées. Les images satellites offrent une vue d'ensemble des régions affectées et

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

permettent de suivre l'évolution des incendies sur de grandes étendues avec une haute résolution spatiale.

### **2.5.5.2 Algorithmes d'apprentissage Automatique**

Concernent l'utilisation de la télédétection et des algorithmes d'apprentissage automatique. Plusieurs auteurs dans cette revue de littérature, tels (Mohajane et al., 2021) (Nuthammachot & Stratoulis, 2021) (Hosseini & Lim, 2023), (Tiwari et al., 2021) , (Trucchia et al., 2023), (Tan & Feng, 2023), appliquent des technologies avancées telles que la télédétection, l'application d'algorithmes sophistiqués et l'utilisation de méthodes analytiques multicritères pour cartographier et prédire les incendies de forêt. (A1) Ces approches permettent de créer des cartes précises de susceptibilité aux incendies, améliorant ainsi la gestion et la prévention des incendies de forêt.

Les auteurs (Sismanis et al., 2023), (Parks et al., 2018) utilisent des indices pour l'évaluation post-incendie et l'analyse diachronique afin de détecter les changements dans l'occupation du sol et la dynamique de récupération. Ces indices permettent d'évaluer l'impact des incendies de forêt et de suivre la récupération écologique des zones affectées, offrant ainsi des informations précieuses pour la gestion et la restauration des écosystèmes touchés.

Comme le montrent les tendances et résultats des recherches analysées, les modèles hybrides et les algorithmes d'apprentissage automatique combinés à la télédétection se révèlent particulièrement efficaces pour la cartographie des incendies de forêt (Mohajane et al., 2021) L'importance des facteurs humains, tels que les infrastructures (routes, bâtiments), est également cruciale pour la prédiction des incendies de forêt. Ces infrastructures augmentent à la fois les risques d'ignition des feux et leur propagation, notamment dans les zones d'interface habitat-forêt.

### **2.5.5.3 Technologie LiDAR**

Parmi les recherches examinées dans cette revue de littérature, celles de (Badia & Gisbert, 2020) (Nuthammachot & Stratoulis, 2021), (Bartolucci et al., 2022) (Ahmed et al., 2020a) (Modugno et al., 2016) , (Argañaraz et al., 2017) ,(Conedera et al., 2015) , (Oliveira et al., 2021) , se distinguent par la cartographie des interfaces habitat-forêt. Ces études utilisent la technologie LiDAR et des méthodes spatiales avancées pour cartographier et gérer les zones à risque, en particulier les zones d'interface habitat-forêt en développant des stratégies de gestion efficaces pour la prévention des incendies dans ces zones critiques.

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

LiDAR est utilisé pour mesurer la hauteur de la végétation et la densité de la canopée, identifiant les zones à risque élevé (Badia & Gisbert, 2020) .

### **2.5.5.4 Approches Géospatiales**

Les Systèmes d'information géographique (SIG) et autres techniques de cartographie : ces méthodes sont cruciales pour identifier les zones vulnérables et planifier des interventions efficaces. (Bartolucci et al., 2022) , utilisent des techniques géospatiales pour créer des cartes détaillées des risques d'incendie, facilitant ainsi la planification et la gestion des ressources.

### **2.5.6 Variables utilisées**

Les études recensées utilisent un ensemble varié de variables pour comprendre et prédire les incendies de forêt. Les variables climatiques, topographiques, de couverture végétale et anthropiques jouent toutes un rôle crucial.

#### **2.5.6.1 Variables climatiques**

Précipitations, vent, température : Ces variables sont essentielles pour évaluer les conditions météorologiques qui favorisent ou inhibent les incendies de forêt. Par exemple, (Parks et al., 2018) , ont démontré que les conditions climatiques extrêmes, telles que les périodes de sécheresse prolongées, augmentent considérablement le risque d'incendie.

Évapotranspiration : Utilisée pour estimer la quantité d'eau transpirée par la végétation et évaporée du sol, influençant ainsi la susceptibilité à l'inflammation (Tan and Feng, 2023).

#### **2.5.6.2 Variables topographiques**

Pente, orientation du terrain, élévation : Ces facteurs influencent la vitesse de propagation des incendies et leur intensité. Les zones avec des pentes raides et une orientation spécifique sont plus susceptibles de subir des incendies intenses (Mohajane et al., 2021) La topographie joue également un rôle crucial dans les stratégies de lutte contre les incendies, en affectant l'accès et la sécurité des interventions.

#### **2.5.6.3 Couverture végétale**

Types de végétation, indices de végétation (NDVI, NDMI) : La densité et le type de végétation déterminent la quantité de combustible disponible. Les travaux (Sismanis et al., 2023) et (Modugno et al., 2016) , utilisent ces indices pour évaluer la susceptibilité des zones aux incendies. Une végétation dense et sèche constitue un combustible idéal pour les incendies de forêt.

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

### **2.5.6.4 Facteurs anthropiques**

Proximité des routes, bâtiments, infrastructures humaines : Les activités humaines dans les interfaces habitat-forêts augmentent le risque d'ignition et de propagation des incendies. (Modugno et al., 2016 ; Argañaraz et al., 2017) montrent que les infrastructures humaines, telles que les routes et les bâtiments, non seulement augmentent les risques d'incendie, mais facilitent également leur propagation. Les activités humaines comme l'agriculture, le tourisme, et l'industrie sont souvent à l'origine des incendies.

### **2.5.7 Tendances et Résultats**

Les principaux résultats des études montrent des avancées significatives dans la compréhension et la gestion des incendies de forêt.

#### **2.5.7.1 Impact des infrastructures humaines (Interfaces habitats-forêts) :**

Les infrastructures telles que les routes et les bâtiments sont des facteurs déterminants dans la prédiction des risques d'incendie. Leur inclusion dans les modèles prédictifs augmente la précision des évaluations (Modugno et al., 2016 ; Argañaraz et al., 2017).

#### **2.5.7.2 Variabilité régionale**

La fréquence et l'intensité des incendies varient considérablement selon les régions, influencées par des facteurs géo climatiques et anthropiques spécifiques (Trucchia et al., 2023). Cette variabilité souligne la nécessité de développer des méthodologies adaptées aux contextes régionaux.

#### **2.5.7.3 Dynamique de récupération**

Les indices post-incendie permettent de suivre la récupération écologique et de planifier les efforts de restauration. Ces méthodes sont cruciales pour comprendre l'impact à long terme des incendies sur les écosystèmes (Sismanis et al., 2023).

#### **2.5.7.4 Intégration des données diverses**

Combiner des données climatiques, topographiques, de couverture végétale et anthropiques est complexe et nécessite des approches méthodologiques robustes. Soulignent la difficulté d'intégrer ces diverses sources de données de manière cohérente.

#### **2.5.7.5 Précision des modèles :**

Assurer la précision des modèles prédictifs demande des données de haute qualité et des mises à jour fréquentes pour refléter les conditions changeantes. Les modèles doivent être ajustés régulièrement pour maintenir leur précision et leur pertinence (Badia & Gisbert, 2020)

### **2.5.7.6 Complexité des modèles :**

Les modèles sophistiqués nécessitent une puissance de calcul élevée, ce qui peut poser des défis pour leur mise en œuvre à grande échelle. La gestion de ces modèles exige des ressources techniques considérables (Hosseini & Lim, 2023).

- **Mises à jour fréquentes** : Les conditions environnementales changent rapidement, nécessitant des mises à jour régulières des modèles et des cartes pour maintenir leur précision et leur pertinence.
- **Affinement des modèles** : Continuer à affiner les modèles existants en intégrant des données plus dynamiques et à haute résolution pour améliorer la précision des prédictions. (Mohajane et al., 2021) recommandent l'intégration de nouvelles sources de données pour enrichir les modèles.
- **Expansion géographique** : Appliquer les méthodologies développées à d'autres régions pour renforcer la gestion globale des risques d'incendie. (Bartolucci et al., 2022) soulignent l'importance d'élargir les études pour inclure des régions sous-étudiées.
- **Intégration des facteurs socio-économiques** : Inclure des variables socio-économiques dans les modèles prédictifs pour une compréhension plus complète des risques d'incendie. (Nuthammachot et al. 2021 ; Bartolucci et al., 2022) proposent l'intégration de données socio-économiques pour améliorer la pertinence et l'efficacité des stratégies de gestion.
- **Développement de systèmes de surveillance en temps réel** : mettre en place des systèmes de surveillance permettant une réponse rapide aux incendies naissants, ce qui est essentiel pour limiter les dégâts et améliorer les efforts de lutte contre les incendies (Nuthammachot et al. 2021)

### **2.5.8 Les défis communs identifiés**

Dans cette littérature, l'intégration de diverses sources de données (climatiques, topographiques, anthropiques) reste un défi majeur, comme souligné dans les études de

(Conedera et al. 2015; Abdo et al. 2022) La nécessité de mises à jour fréquentes des cartes pour maintenir leur précision et leur pertinence est un autre défi récurrent.

La complexité des modèles, en particulier ceux nécessitant une puissance de calcul élevée, pose des difficultés pour leur mise en œuvre et leur utilisation pratique, comme indiqué dans les études utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique avancés.

## Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique

Les pistes de recherche et directions futures proposées par les études de cette revue de littérature incluent les recommandations suivantes :

- Continuer à affiner les modèles existants en intégrant des données plus dynamiques et à haute résolution, ainsi qu'en améliorant la précision des prédictions.
- Développer l'application de ces méthodologies à d'autres régions afin de renforcer la gestion globale des risques d'incendie de forêt.
- Intégrer les facteurs socio-économiques dans les modèles de prédiction pour mieux comprendre et gérer les risques d'incendie, comme proposé dans les études de (Nuthammachot et al. 2021; Bartolucci et al. 2022)

### 2.5.9 Perspectives de recherches

Les futures pistes de recherches dans cette revue de littérature devraient se concentrer sur :

- **Expansion Géographique :** Appliquer ces méthodologies à d'autres régions pour une gestion globale plus efficace des risques d'incendie (Bartolucci et al., 2022).
- **Intégration des Facteurs Socio-Économiques :** Incorporer des variables socio-économiques dans les modèles pour une compréhension plus complète des risques d'incendie (Nuthammachot et al. 2021; Bartolucci et al. 2022)
- **Développement de Systèmes de Surveillance en Temps Réel :** Mettre en place des systèmes de surveillance permettant une réponse rapide aux incendies naissants (Nuthammachot & Stratoulis, 2021) .

### Conclusion

Cette analyse bibliométrique et systématique a permis de mettre en lumière les tendances actuelles, les contributeurs majeurs, et les méthodes prédominantes dans le domaine de la cartographie et de la gestion des incendies de forêt. L'augmentation substantielle des publications au cours de la dernière décennie témoigne de l'importance croissante accordée à ce domaine, en réponse aux impacts dévastateurs des incendies de forêt sur les écosystèmes et les communautés humaines.

Les résultats montrent que les États-Unis, l'Italie, et l'Indonésie se distinguent par leur contribution significative à la recherche, soutenus par des institutions académiques de premier plan et des revues influentes. Les recherches se sont concentrées sur l'application de technologies avancées, telles que la télédétection, les algorithmes d'apprentissage automatique, et la technologie LiDAR, pour améliorer la précision des prévisions et la gestion des incendies. Ces méthodes ont été complétées par l'utilisation d'approches géospatiales et d'analyses post-incendie pour évaluer l'impact des feux et planifier des stratégies de restauration.

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

Les études ont pris en compte diverses variables pour comprendre et prédire les incendies de forêt, incluant des variables climatiques (comme les précipitations, le vent, et la température), des variables topographiques (telles que la pente, l'orientation du terrain, et l'altitude), la couverture végétale (types de végétation et indices de végétation comme le NDVI et le NDMI), ainsi que des facteurs anthropiques (proximité des infrastructures humaines telles que les routes et les bâtiments). Ces variables jouent un rôle crucial dans la modélisation des risques d'incendie et dans la planification des interventions.

Cependant, malgré les avancées méthodologiques, des défis persistants subsistent, notamment l'intégration de ces diverses sources de données, la nécessité de mises à jour fréquentes des modèles, et la gestion de la complexité des approches prédictives. Les études soulignent également l'importance de prendre en compte les facteurs humains et socio-économiques, ainsi que la variabilité régionale, pour une gestion plus holistique et adaptée des risques d'incendie.

Les perspectives de recherche futures devraient se concentrer sur l'affinement des modèles existants, l'expansion géographique des études, et l'intégration de systèmes de surveillance en temps réel, tout en incorporant les dimensions socio-économiques dans les stratégies de gestion. En adoptant ces orientations, il sera possible de renforcer la résilience face aux incendies de forêt et de mieux protéger les écosystèmes et les populations affectées.

Les résultats présentés ici servent de point de départ pour cette thèse de doctorat en identifiant les avancées significatives dans la gestion des risques naturelles. En soulignant ces progrès, ce chapitre permet de situer cette recherche dans le contexte global des études existantes, tout en mettant en évidence l'originalité du sujet traité.

Cependant, le fait de s'être appuyé uniquement sur Scopus incite à élargir notre champ de recherche. Il est donc nécessaire d'étendre cette analyse en intégrant des perspectives théoriques et historiques plus vastes, ainsi que des contributions majeures non couvertes par cette source, en particulier en ce qui concerne le positionnement disciplinaire. Cet aspect sera développé dans le chapitre suivant.

En réponse à ces lacunes, la thèse propose un cadre méthodologique innovant qui combine :

- Une approche multidisciplinaire intégrée : en fusionnant la géographie, la foresterie et les sciences de l'information numérique, incluant la logique floue, les SIG, et les données issues de la télédétection pour évaluer à la fois les facteurs naturels et anthropiques.

## **Chapitre II : Positionnement de la cartographie et la gestion des incendies de forêt dans la recherche : approche bibliométrique et systématique**

- Un modèle adapté au contexte sud-méditerranéen : cette recherche se concentre sur les conditions semi-arides et montagneuses de la région, en particulier sur les spécificités des interfaces habitat-forêt dans le massif de Djebel El Ouahch. Le cadre proposé permet de cartographier et de prédire les risques d'incendie tout en tenant compte des dynamiques locales.
- Le développement d'outils d'aide à la décision pratiques : la thèse vise à fournir des solutions concrètes pour les gestionnaires locaux en développant des outils opérationnels et adaptés à la gestion des incendies dans des régions vulnérables, en facilitant leur utilisation pour une prévention efficace.

Ainsi, cette approche novatrice permet de combler les lacunes identifiées dans la littérature et de proposer un modèle multidimensionnel, prédictif et pratique, spécifiquement adapté aux besoins locaux dans la gestion du risque incendie en région sud-méditerranéenne.





## **CHAPITRE III : ANALYSE MULTIDISCIPLINAIRE DU RISQUE D'INCENDIE DE FORET : DEFINITION, FACTEURS D'AGGRAVATION ET STRATEGIES DE GESTION**

### **Introduction**

Ce chapitre propose une exploration approfondie des multiples dimensions du risque d'incendie de forêt, un phénomène complexe entraînant des répercussions significatives tant sur les écosystèmes que sur les sociétés humaines. Il s'ouvre sur une clarification des concepts clés essentiels à la compréhension de cette thématique, en définissant les concepts clés de recherche.

Nous poursuivrons par une analyse du contexte global des incendies de forêt, en présentant des statistiques et des impacts à l'échelle mondiale, avec une attention particulière aux spécificités des régions méditerranéennes et algériennes. Ces sections offriront un cadre global permettant de situer l'ampleur et la diversité des incendies de forêt dans différentes régions du monde.

Le chapitre met ensuite en évidence les différentes disciplines scientifiques qui se penchent sur l'étude des incendies de forêt, notamment l'écologie, la foresterie, les sciences de l'environnement, la météorologie, la géographie, et les sciences sociales. Chacune de ces disciplines offre une perspective unique sur les causes, les effets et la gestion des incendies, enrichissant ainsi notre compréhension globale du phénomène. Cette approche multidisciplinaire permet également de déterminer le cadre théorique et méthodologique le plus pertinent pour orienter notre thèse.

Par ailleurs, nous examinerons en détail les facteurs qui influencent le risque d'incendie, qu'ils soient d'ordre topographique, climatique, liés à la couverture végétale ou encore aux activités humaines. La compréhension de ces facteurs est cruciale pour anticiper et atténuer les risques d'incendies.

Enfin, dans sa dernière partie, ce chapitre se penche sur les impacts écologiques, économiques et sociaux des incendies de forêt, avant de discuter des stratégies et des politiques de gestion mises en œuvre pour minimiser ces impacts. Nous explorerons également les interfaces habitat-forêt, un enjeu crucial pour la gestion du risque incendie, en particulier dans les zones résidentielles.

### **3.1 Définitions clés relatives à la thématique de recherche**

#### **3.1.1 La forêt**

Une forêt est un écosystème complexe dominé par une couverture végétale arborescente, où les arbres constituent la principale forme de végétation. En effet, la définition d'une forêt peut varier en fonction des critères tels que la densité des arbres, la hauteur des arbres, la superficie, et l'usage des terres, selon les normes établies par des organismes internationaux comme la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations).

Selon le guide du CEMAGREF sur la protection des forêts contre les incendies, la forêt est définie dans le contexte méditerranéen, en mettant particulièrement l'accent sur le contexte algérien comme « l'Ensemble des végétaux ligneux et autres dont la hauteur moyenne dépasse 7 m ». Ce critère (hauteur) utilisé pour distinguer les forêts des autres types de végétation comme les maquis ou les garrigues (Colin et al., 2001). Cette définition est essentielle dans le cadre de la protection des forêts contre les incendies, car elle permet d'identifier les zones forestières prioritaires pour les interventions préventives et de lutte contre le feu.

#### **3.1.2 Le risque naturel**

Se réfère à la probabilité qu'un phénomène naturel tel qu'une inondation, un tremblement de terre, ou un incendie de forêt cause des dommages importants aux populations humaines et aux infrastructures (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2009) . Ce concept englobe à la fois la fréquence potentielle de tels événements et la vulnérabilité des zones affectées, c'est-à-dire leur capacité à résister ou à s'adapter aux impacts.

D'après la Banque mondiale et Mécanisme mondial de réduction des effets des catastrophes et de relèvement (GFDRR), et le Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophes (UNDRR), le risque naturel est analysé à travers trois composantes principales,

- **L'aléa** : Il s'agit de la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel spécifique. Par exemple, dans le contexte des incendies de forêt, cela inclut la fréquence et l'intensité possibles des incendies dans une région donnée, influencées par des facteurs climatiques, topographiques, et biologiques.
- **La vulnérabilité** : Cela concerne la susceptibilité des communautés humaines, des écosystèmes et des infrastructures à subir des dommages en cas de phénomène naturel. La vulnérabilité est déterminée par des facteurs tels que la densité de population, la qualité des infrastructures, l'accès aux ressources, et la préparation aux situations d'urgence. Une région densément peuplée avec des bâtiments mal construits est plus vulnérable qu'une zone moins habitée ou mieux préparée. Ce sont les conséquences

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

potentielles d'un aléa, selon son intensité, sur les enjeux exposés. Ces impacts sont fonction du niveau d'exposition. (Field et al., 2014).

- **L'exposition** : Il s'agit de la présence de personnes, de biens, d'infrastructures, d'écosystèmes, ou d'activités économiques dans des zones susceptibles d'être touchées par un phénomène naturel. L'exposition est un facteur clé qui détermine l'ampleur des impacts potentiels d'un risque naturel. Par exemple, une zone urbaine située en bordure de forêt sera plus exposée au risque d'incendie que des zones urbaines éloignées des forêts.

#### **3.1.3 Incendie de forêt**

Un incendie de forêt est une combustion incontrôlée qui se propage rapidement ou lentement à travers la végétation naturelle, y compris les arbres, arbustes, et herbes, sur de grandes étendues de terrain. Ces incendies sont souvent exacerbés par des conditions climatiques défavorables, telles que des vents violents, des températures élevées, et une faible humidité (FAO, 2006).

Cette définition, met en avant l'interaction entre les facteurs naturels (végétation et climat) et le comportement du feu, ce qui est essentiel pour comprendre la dynamique des incendies de forêt. La référence aux « grandes étendues de terrain » implique une menace non seulement pour la nature mais aussi pour les activités humaines lorsque ces incendies atteignent des zones habitées ou exploitées.

Toutefois, pour (Pyne et al. 1996), un feu de forêt est un incendie non contrôlé qui brûle dans une région boisée, y compris les forêts et les terres naturelles adjacentes. Ces feux peuvent provoquer des dégâts considérables aux écosystèmes, à la faune et aux habitations humaines, en raison de la vitesse à laquelle ils peuvent se propager. Cette définition attire l'attention sur les conséquences écologiques et humaines des feux de forêt, ce qui est crucial pour les politiques de gestion et de prévention.

#### **3.1.4 La pyrologie forestière**

Selon (Chabot et al. 2009) la pyrologie forestière est la discipline scientifique dédiée à l'analyse des feux de forêt, abordant leurs caractéristiques et mécanismes. Tel que défini par le Gouvernement du Québec en 1981, elle se concentre sur le processus de combustion, les spécificités des feux de forêt, ainsi que les divers éléments qui déterminent leur naissance et leur croissance.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

Pour comprendre le comportement des incendies de forêt, il est essentiel de maîtriser d'abord les principes élémentaires de la combustion. Cette discipline joue un rôle crucial dans le développement de stratégies de prévention et de gestion des incendies de forêt. »

#### **3.1.5 Définition et caractéristiques du combustible**

Selon (Pyne et al., 1996) le combustible désigne toute matière susceptible de s'enflammer et de brûler lors d'un incendie de forêt. Il est essentiel de comprendre les caractéristiques du combustible pour prédire le comportement du feu. Ces caractéristiques incluent la composition chimique, la densité, la teneur en humidité, et la disposition physique du combustible (éparpillé au sol, en amas, ou en verticalité). La nature et la condition du combustible sont des déterminants cruciaux de l'intensité et de la propagation des incendies de forêt.

D'après (Hal E. Anderson, 1990), dans son travail sur la classification des combustibles, met en évidence que les combustibles forestiers peuvent être classés en plusieurs catégories, telles que les combustibles fins (comme les herbes et les aiguilles de pin) et les combustibles grossiers (comme les troncs d'arbres et les grosses branches). Les combustibles fins s'enflamment plus rapidement mais brûlent aussi plus vite, tandis que les combustibles grossiers brûlent plus lentement mais dégagent plus de chaleur.

En effet, la teneur en humidité est particulièrement importante : des combustibles secs sont plus inflammables et favorisent une propagation rapide du feu. (Rothermel, 1983) a démontré dans son modèle de comportement du feu que la quantité de combustible disponible, ainsi que son arrangement (continu ou discontinu), influencent directement la vitesse de propagation d'un incendie (Pyne et al., 1996).

#### **3.1.6 Les interfaces habitat-forêt : De la définition à la délimitation**

L'interface habitat-forêt ou également connue sous le terme anglais (Wildland Urban Interface) est le croisement de l'urbanisation avec le phénomène d'extension de la végétation forestière (Lampin-Maillet et al., 2010).

Le risque d'incendie de forêt est étroitement lié à l'interface habitat-forêt, où se rencontrent des zones habitées et des végétations potentiellement combustibles. Il se définit comme la convergence de ces espaces, créant une situation où la proximité entre les habitations humaines et la végétation inflammable augmente significativement la vulnérabilité aux incendies. Cette notion est soulignée par des recherches telles que celle de (Clément, 2005), qui mettent en évidence l'importance de cette interface dans l'évaluation et la gestion du risque d'incendie.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

Les incendies forestiers engendrent des dégâts étendus qui entraînent des conséquences considérables sur les plans écologique, social et économique, pouvant avoir un impact significatif (Lampin et al., 2011).

La densité élevée des zones d'interfaces habitat-forêt dans un espace donné peut avoir un impact sur la fréquence des incendies en raison de l'interaction continue entre les habitants et la végétation environnante ( Belkaid et al. 2012).

Les zones où l'habitat entre en contact avec la forêt représentent un danger et deviennent une réelle préoccupation pour les gestionnaires qui ont besoin d'outils de localisation pour agir et limiter les risques d'incendie dans ces territoires (Ahmed et al., 2020b).

La question des interfaces entre l'habitat et la forêt revêt une importance capitale dans les régions méditerranéennes. Dans ces zones, la proximité entre les zones habitées et les espaces forestiers susceptibles de s'embraser favorise l'apparition de feux de forêts dévastateurs. (Lampin et al., 2010)

Malgré cette importance cruciale, Il est difficile de repérer les interfaces habitat forêt en Algérie en raison du manque de données. Cependant, il est crucial d'étudier ces interfaces, car la plupart des incendies de forêt se produisent précisément dans ces zones (Ahmed et al., 2020b).

Selon l'étude proposé par (Lampin-Maillet, 2009), une méthode pour cartographier les interfaces habitat forêt qui se base sur l'analyse simultanée de la disposition des constructions et de la distribution de la végétation susceptible de brûler.

Cette approche croisant les types d'habitat et la composition du feuillage combustible permet une évaluation précise des risques à un niveau parcelle par parcelle, facilitant ainsi la priorisation des zones à risque. Cette priorisation guide ensuite les actions de prévention vers les zones les plus critiques. (Lampin-Maillet, 2009)

Selon le rapport de classification des zones bâties vulnérables aux incendies par INRAE et ONF (Ondine LE FUR et al., 2024), La note technique de 2015 recommande d'évaluer le risque incendie de forêt en croisant des données spatiales sur l'aléa avec cinq niveaux de risque, en déterminant la défendabilité des zones et en délimitant les secteurs urbanisés et non urbanisés. Les types d'habitats (isolé, diffus, groupé, dense) sont définis pour faciliter l'élaboration de cartes techniques et l'expertise des zones, souvent à l'échelle communale ou d'un projet spécifique. Cette approche est représentative des stratégies françaises de gestion et de prévention des incendies de forêt.

Tableau 3.1 Définitions des types d'habitats

Type d'habitat	Définition
<b>Habitat isolé</b>	Bâtiments situés à plus de 100 mètres de tout autre bâtiment ou groupe de bâtiments, considérés très vulnérables en raison de leur isolement.
<b>Habitat diffus</b>	Groupes de 4 à 50 bâtiments situés à moins de 100 mètres les uns des autres, mais à plus de 100 mètres d'un autre groupe, formant des ensembles dispersés.
<b>Habitat groupé dense</b>	Clusters de bâtiments étroitement regroupés, souvent dans de petits villages ou zones urbaines, offrant une certaine résilience mais restant vulnérables.
<b>Urbanisation complexe</b>	Zones où les bâtiments sont densément regroupés avec des limites irrégulières, compliquant les efforts d'évacuation et de lutte contre les incendies.
<b>Espace urbanisé</b>	Grandes zones urbaines densément peuplées avec des limites régulières, généralement mieux équipées mais exposées à des risques, surtout à leurs périphéries.

Source : (Ondine LE FUR et al., 2024)+ traitement auteure 2024

Cette classification permet de hiérarchiser les zones à risque et d'établir des priorités d'intervention en fonction de la gravité et de la probabilité d'occurrence des incendies. Ce processus est crucial pour la planification stratégique, car il aide à identifier les zones les plus vulnérables et à adapter les mesures de prévention et de protection en conséquence.

### 3.2 Contexte global des incendies de forêts

Les forêts occupent 31 % de la surface terrestre de la planète, contiennent environ 296 gigatonnes de carbone et hébergent la majorité de la biodiversité terrestre mondiale.

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'incidence des incendies de forêt se renforce globalement en fréquence, en intensité et en durée, soulignant l'importance de saisir les conséquences sanitaires liées à l'exposition aux feux. Les conditions de sécheresse extrême, comme les périodes de sécheresse, les canicules et les vents violents, augmentent le risque d'incendies.

#### 3.2.1 Statistiques et impacts mondiaux des incendies

En 2023, le service de surveillance de l'atmosphère Copernicus (CAMS) a rigoureusement suivi les incendies de forêt à travers le monde, offrant des informations fiables sur leur intensité et les émissions de CO<sub>2</sub> via son système global d'assimilation des feux (GFAS). Cette année a vu des niveaux d'activité d'incendies sans précédent dans plusieurs zones : les émissions de carbone des feux au Canada ont été les plus importantes depuis le début des enregistrements du CAMS en 2003. D'après le CAMS, les incendies de forêt ont engendré environ 2 170 mégatonnes d'émissions de carbone à l'échelle globale en 2023, avec une contribution significative des incendies au Canada, qui en représentent 22%. Décortiquons l'activité des feux de forêt de 2023 plus en détail, en analysant chaque région séparément.

**Tableau 3.2** Statistiques des émissions de carbones dues aux incendies de forêts

Région	Statistiques
<b>Global</b>	2 170 mégatonnes d'émissions de carbone en 2023, dont 22 % dues aux incendies de forêt canadiens.
<b>Amérique du Nord</b>	Canada : 18 millions d'hectares brûlés, 480 millions de tonnes d'émissions de carbone. Maui : 115 décès.
<b>Europe</b>	Grèce : Plus grand incendie de l'UE, presque 175 000 hectares brûlés, près de 2 mégatonnes d'émissions de carbone.
<b>Asie du Sud-Est</b>	Indonésie : Émissions d'incendie les plus élevées depuis 2019.
<b>Amérique du Sud</b>	Chili : 4 mégatonnes d'émissions de carbone en janvier-février, Argentine : activité d'incendie supérieure à la moyenne.
<b>Australie</b>	Activité saisonnière élevée de feux de brousse, plus de 150 mégatonnes d'émissions de carbone en septembre-novembre.
<b>Eurasie</b>	Russie : Activité d'incendie inférieure à la moyenne des 20 dernières années, impactant la qualité de l'air.
<b>Afrique du Nord</b>	Activité d'incendie autour de la moyenne, émissions juste en dessous de 60 mégatonnes en janvier.

Source : Copernicus Emergency Management Service (2023) + traitement auteure 2024

D'après le tableau ci-dessus, En Europe, la Grèce a connu le plus grand incendie de l'Union européenne, tandis qu'en Asie du Sud-Est, l'Indonésie a enregistré ses plus fortes émissions d'incendie depuis 2019. L'Australie a également fait face à une intense activité de feux de brousse, générant plus de 150 mégatonnes d'émissions en quelques mois. En contraste,



### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

la Russie a enregistré une activité d'incendie inférieure à la moyenne, bien que cela ait toujours affecté la qualité de l'air. En Afrique du Nord, l'activité des incendies était proche de la moyenne, avec des émissions légèrement inférieures à 60 mégatonnes en janvier.

Ce tableau souligne l'ampleur des impacts des incendies de forêt sur les émissions de carbone à l'échelle mondiale, variant fortement selon les régions et les conditions climatiques locales.

#### 3.2.2 Les incendies de forêts en Algérie

En se fondant sur les études approfondies de (Ouahiba Meddour-Sahar Bouisset., 2013; A. Madoui, 2022), qui retracent l'historique des incendies de forêts en Algérie, ainsi que sur les bilans fournis par la direction générale des forêts illustré dans le tableau 3.3 ci-dessous, indique une évolution inquiétante des incendies de forêt en Algérie, avec une récurrence croissante et des dégâts de plus en plus graves au fil des années. Les périodes antérieures, marquées par des troubles politiques, ont vu des incendies affecter entre 100 000 et 200 000 hectares par an. Les années récentes, notamment 2021, ont été particulièrement destructrices avec plus de 100 000 hectares brûlés et de lourdes pertes humaines. La tendance montre une intensification des incendies, probablement exacerbée par des facteurs climatiques et des insuffisances dans la gestion des risques.

**Tableau 3.3** Aperçu historique des incendies de forêts de Algérie de 1881-2023

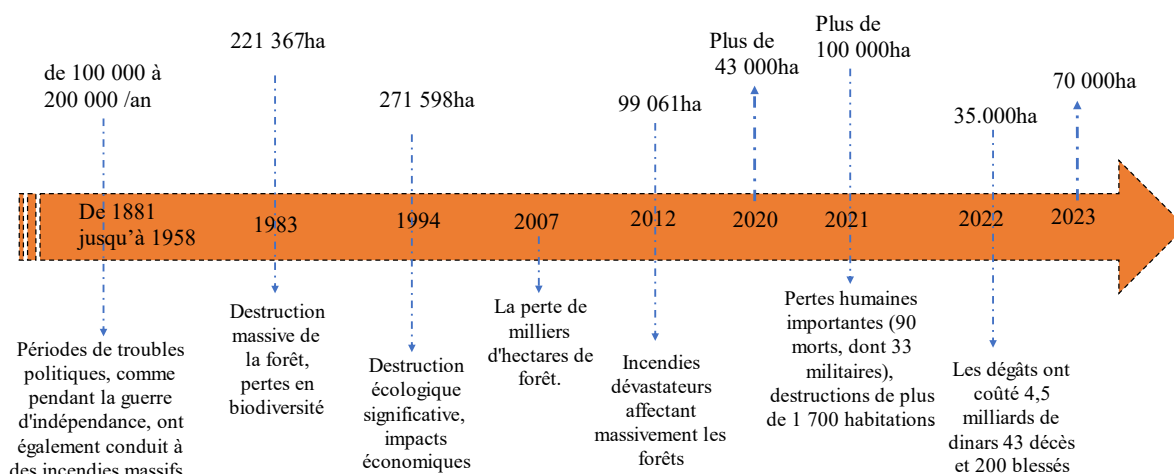
Date	Surface brûlée (hectares)	Dégâts
<b>1881, 1892, 1894, 1902, 1913, 1919, 1956, 1957, 1958</b>	de 100 000 à 200 000 /an	Périodes de troubles politiques, comme pendant la guerre d'indépendance, ont également conduit à des incendies massifs.
<b>1983</b>	221 367	Destruction massive de la forêt, pertes en biodiversité
<b>1994</b>	271 598	Destruction écologique significative, impacts économiques
<b>2007</b>	/	La perte de milliers d'hectares de forêt.
<b>2012</b>	99 061	Incendies dévastateurs affectant massivement les forêts
<b>2020</b>	Plus de 43 000	/
<b>2021</b>	Plus de 100 000	Pertes humaines importantes (90 morts, dont 33 militaires), destructions de plus de 1 700 habitations.
<b>2022</b>	35.000	Les dégâts ont coûté 4,5 milliards de dinars 43 décès et 200 blessés
<b>2023</b>	70 000	/

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

Source : auteure 2024 à partir des données de (Ouahiba Meddour-Sahar Bouisset., 2013; A. Madoui, 2022) et le bilan de la direction générale des forêts

En matière de récurrence des incendies de forêts, une augmentation significative de la fréquence et de l'intensité des incendies a été enregistré au cours des dernières années. Les incendies deviennent de plus en plus récurrents, touchant chaque année des milliers d'hectares, avec des pics d'activité particulièrement alarmants en 2020, 2021, 2022, et 2023.

De même, les incendies sont non seulement plus fréquents, mais aussi plus destructeurs. Les années récentes ont vu une augmentation du nombre de victimes humaines et des surfaces brûlées. Cette intensification peut être attribuée à plusieurs facteurs, dont le changement climatique, qui a exacerbé les conditions météorologiques extrêmes, rendant les forêts plus vulnérables.



**Figure 3.1** Axe chronologique des incendies de forêts de Algérie de 1881-2023

Source : auteure 2024 à partir des données de (Meddour-Sahar et al., 2013; A. Madoui, 2022) et le bilan de la direction générale des forêts

D'après l'analyse des bilans, les incendies de forêt en Algérie ont entraîné des pertes considérables :

- **Pertes humaines** : Outre les pertes matérielles, les incendies ont causé la mort de civils et de militaires, notamment en 2021.

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

- **Destruction écologique** : Dévastation des écosystèmes forestiers, perte de biodiversité, et dégradation des sols. Les incendies contribuent à la désertification en éliminant la végétation qui protège le sol.
- **Impact économique** : La destruction de ressources forestières, agricoles, et d'infrastructures résidentielles, ainsi que la perte de biens personnels, notamment en 2021 avec la destruction de plus de 1 700 habitations.

#### 3.2.2.1 Les Causes des incendies de forêt en Algérie

Les incendies en Algérie sont principalement d'origine anthropique, avec les causes suivantes identifiées les recherches citées précédemment

- **Causes humaines** : Les causes principales sont d'origine anthropique. Les feux volontaires (comme les changements d'utilisation des terres, la pyromanie, brûlage des déchets, écobuage, barbecues, et feux de camp mal éteints.) et les feux involontaires (reprises de feu, négligence dans les pratiques agricoles, allumage intentionnel pour des raisons diverses, notamment pour le défrichage ou des actes de vengeance.) sont les principaux contributeurs aux incendies.
- **Problèmes structurels** : L'urbanisation anarchique, le mitage des forêts, et l'utilisation imprudente du feu pour l'élimination des ordures ou des résidus agricoles ont exacerbé les risques d'incendie.
- **Instabilité politique** : Les périodes de troubles politiques, comme pendant la guerre d'indépendance, ont également conduit à des incendies massifs.
- **Causes naturelles** : Bien que rares, la foudre est l'une des seules causes naturelles identifiées, représentant entre 1 et 5 % des cas d'incendies.

Ces causes montrent une forte dépendance des incendies à l'activité humaine, exacerbée par une faible gestion et sensibilisation aux risques.

- **Le changement climatique** : Outre ces causes traditionnelles, le changement climatique est devenu une cause majeure de l'aggravation des incendies. Les vagues de chaleur, les sécheresses prolongées, et les vents violents, tous exacerbés par le réchauffement climatique, ont contribué à rendre les feux de forêt plus fréquents et plus intenses.

En résumé, la récurrence des incendies de forêt en Algérie a considérablement augmenté ces dernières années, avec des causes qui évoluent vers des facteurs climatiques plus graves, nécessitant des stratégies de gestion adaptées et renforcées.

### **3.2.2.2 Conséquences des Incendies de Forêt**

Les incendies de forêt en Algérie ont des conséquences multiples :

- **Écologiques** : La destruction des écosystèmes forestiers a un impact désastreux sur la biodiversité et contribue à la dégradation des sols, augmentant le risque de désertification.
- **Économiques** : La perte des forêts entraîne des coûts économiques significatifs, non seulement en termes de bois et de ressources perdues, mais aussi en matière de tourisme et d'agriculture.
- **Sociales** : Les incendies affectent directement les communautés locales, en détruisant les habitations et en mettant en danger des vies humaines. Les incendies de 2020, par exemple, ont exigé des interventions massives pour protéger les populations.

Ces conséquences aggravent les défis déjà présents en Algérie, notamment en matière de sécurité alimentaire et de protection de l'environnement.

### **3.2.3 Particularités des incendies dans les régions méditerranéennes**

Selon le document *"Protection des forêts contre l'incendie - Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen"* coordonné par (Colin, 2001), les incendies dans les régions méditerranéennes présentent des caractéristiques spécifiques dues à des facteurs climatiques et environnementaux propres à cette région :

#### **3.2.3.1 Les conditions climatiques particulière à la région méditerranéenne**

Le climat méditerranéen se distingue par des étés secs, ce qui augmente considérablement le risque de déclenchement et de propagation des incendies de forêt. Les vents forts, tels que le Mistral et le Sirocco, jouent un rôle crucial dans la propagation rapide des incendies, en alimentant les flammes et en dispersant les braises sur de longues distances.

Toutefois, avec le changement climatique, modifie les régimes de précipitations, avec des saisons sèches plus longues et des périodes de pluie plus intenses mais moins fréquentes. Cette variabilité accrue peut augmenter l'accumulation de combustible (végétation sèche) qui alimente les incendies. Les recherches de (Abatzoglou & Williams, 2016) ont révélé que plus de la moitié de l'augmentation de la gravité des incendies de forêt dans l'ouest des États-Unis entre 1984 et 2015 pouvait être attribuée aux effets du changement climatique sur l'humidité et les précipitations.

- **La Végétation inflammable**

La végétation typique de la région méditerranéenne, composée principalement de garrigue et de maquis, est particulièrement inflammable en raison de sa richesse en résines.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

Cette composition rend la végétation extrêmement vulnérable aux incendies. De plus, la structure souvent discontinue de la végétation facilite la propagation rapide des feux, qui peuvent se déplacer à travers les couches basses et atteindre les cimes des arbres, entraînant des incendies de cime.

- **La propagation des feux :**

Les types d'incendies courants dans le bassin méditerranéen incluent les feux de cime, les feux de surface, et les feux totaux. Les sautes de feu, causées par des projections de particules incandescentes, sont fréquentes et peuvent générer des foyers secondaires, compliquant encore davantage les efforts de lutte contre les incendies. La vitesse de propagation des incendies varie en fonction de la végétation, de la topographie, et des conditions météorologiques, et peut atteindre plusieurs kilomètres par heure, ce qui rend la gestion des incendies particulièrement complexe.

### **3.3 Variables influant sur les incendies de forêts**

Les incendies de forêts sont une perturbation naturelle dommageable qui affecte l'économie, le social et l'environnement et qui se produit dans plusieurs régions du monde, chaque année des millions d'hectares de forêts sont détruits par le feu, son déclenchement dépend sur plusieurs facteurs qui peuvent aggraver ce risque :

#### **3.3.1 Variables topographiques**

Les paramètres topographiques tels que, la pente, l'élévation et l'exposition sont des facteurs contribuant à la propagation des feux de forêts. Selon l'étude de (Chuvieco & Congalton, 1989) la topographie est l'un des facteurs importants inclus dans tous les systèmes de cotation de risque feu de forêt. La pente est considérée comme facteur principal, la déclivité des pentes augmente la propagation du risque incendie de forêts car elle peut augmenter la vitesse du feu. L'exposition de la pente au soleil rend celle-ci plus susceptible aux incendies de forêt (Reinhardt, 2001).

Les caractéristiques du terrain peuvent influencer la direction du vent, qui à leur tour impactent le comportement du feu (Rothermel, 1983)

#### **3.3.2 Variables climatiques**

Les facteurs climatiques jouent un rôle crucial dans l'augmentation du risque d'incendies de forêt. Selon (E. Rigolot, 2008) l'intensification de certains paramètres météorologiques, tels que le vent, la température, et les précipitations, favorise non seulement le déclenchement des incendies, mais aussi leur propagation rapide. Le vent, en particulier, est un facteur déterminant qui peut non seulement transporter des braises sur de grandes distances, initiant ainsi de

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

nouveaux foyers, mais aussi accélérer la vitesse de propagation du feu, rendant la lutte difficile (Richer *et al.*, 2006).

En outre, (Richer *et al.*, 2006) soulignent que certaines périodes de l'année, notamment l'été et l'automne, sont particulièrement propices aux incendies de forêt. Pendant ces saisons, les conditions climatiques sont souvent marquées par des températures élevées et une faible humidité, créant un environnement idéal pour le développement des feux. L'été, avec ses longues journées ensoleillées, favorise le dessèchement de la végétation, tandis que l'automne, bien que parfois plus humide, peut encore présenter des risques élevés en raison des vents forts et de la végétation déjà desséchée par l'été.

Par ailleurs, (Richer *et al.*, 2006) mettent en évidence l'impact des sécheresses, qui augmentent considérablement la probabilité d'incendies graves. Lorsque les périodes de sécheresse prolongée assèchent la végétation, celle-ci devient hautement inflammable, transformant les forêts en véritables poudrières prêtes à s'enflammer au moindre déclenchement. Les végétaux, privés d'eau, perdent leur résilience naturelle contre les incendies, ce qui rend non seulement leur ignition plus facile, mais aussi leur combustion plus intense.

Ainsi, il est clair que les conditions climatiques, à travers des phénomènes comme les vents forts, les hautes températures, et les sécheresses, agissent en synergie pour amplifier le risque d'incendies de forêt. Ces facteurs non seulement augmentent la probabilité d'apparition des feux, mais exacerbent également leur intensité et leur propagation, soulignant l'importance d'une surveillance météorologique constante et d'une gestion proactive des risques dans les régions vulnérables.

#### **3.3.3 Variables de la couverture végétale**

La végétation joue un rôle bien plus complexe que celui de simple combustible dans le contexte des incendies de forêt. Elle interagit de manière dynamique avec les processus écologiques et atmosphériques, modifiant ainsi le comportement des incendies de plusieurs façons. Comme l'ont souligné (Loudermilk *et al.*, 2022), la structure et la composition de la végétation influencent non seulement la propagation des feux, mais également les conditions microclimatiques locales, qui à leur tour peuvent avoir un impact sur l'évolution des incendies. Par exemple, la densité du couvert végétal peut créer des microclimats plus humides en dessous, retardant ainsi l'ignition, tandis que des végétations plus clairsemées peuvent favoriser un assèchement plus rapide et une propagation plus intense des flammes.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

En outre, la densité et l'humidité de la végétation interagissent directement avec les conditions météorologiques pour déterminer la sévérité des feux, comme l'ont montré (Fares et al., 2017). Une végétation dense et humide peut agir comme un tampon contre la propagation rapide du feu, tandis qu'une végétation sèche et clairsemée exacerbe les conditions propices à un incendie destructeur. Par conséquent, les interactions complexes entre la végétation et les conditions météorologiques créent un environnement où la sévérité des incendies peut varier de manière significative en fonction de la composition, de la structure, et de l'état hydrique de la végétation.

Ces observations mettent en lumière l'importance d'une gestion attentive de la végétation dans les zones à risque d'incendie. Comprendre comment différents types de végétation influencent non seulement la propagation des incendies, mais aussi les microclimats locaux, est essentiel pour développer des stratégies efficaces de prévention et de lutte contre les feux de forêt. Cela souligne également la nécessité d'une approche intégrée qui prend en compte les facteurs écologiques et climatiques dans la gestion des risques liés aux incendies de forêt.

#### **3.3.4 Variables anthropiques**

Le déclenchement des incendies de forêt est majoritairement attribué aux activités humaines. Selon (Guettouche et al., 2011), un mégot de cigarette mal éteint ou un barbecue mal géré peut à lui seul suffire à provoquer un incendie, faisant de ces facteurs humains des causes principales d'incendies de forêt. Ces événements sont particulièrement préoccupants dans les zones d'interface habitats-forêts, où la proximité des habitations avec la végétation accroît considérablement le risque.

Les zones d'interface habitats-forêts présentent une vulnérabilité accrue face aux incendies de forêt, comme le soulignent (Radeloff et al., 2005). C'est précisément dans ces zones que le danger pour la vie des habitants et des pompiers est le plus élevé. Le croisement entre les habitations et la végétation forestière constitue un facteur de risque majeur, et la majorité des décès liés aux incendies se produisent dans ces interfaces critiques, selon le Guide méthodologique sur la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt.

Il est donc crucial d'étudier ces interfaces en profondeur, car la plupart des incendies de forêt surviennent précisément dans ces zones vulnérables, comme l'indiquent (Ahmed et al., 2020a). Une meilleure compréhension de ces interfaces permettrait d'améliorer les stratégies de gestion et de prévention des incendies de forêt.

Ces éléments jouent un rôle prépondérant dans l'aggravation ou le déclenchement des incendies de forêt. Une étude approfondie de ces paramètres, notamment les comportements

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

humains, la gestion des interfaces habitats-forêts, et les conditions spécifiques à ces zones, s'avère donc essentielle pour une gestion efficace et une prévention renforcée des incendies forestiers.

#### **3.4 Impact des incendies sur les écosystèmes et les communautés**

Les forêts, en tant que ressource naturelle essentielle, jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre environnemental (Juvanhol et al., 2021) . Leur destruction par les incendies peut entraîner des dommages significatifs sur les plans écologique, économique, et social.

##### **3.4.1 Conséquences écologiques**

Les forêts sont des écosystèmes complexes qui abritent une biodiversité riche et jouent un rôle vital dans la régulation du climat, le cycle de l'eau, et la séquestration du carbone. Leur destruction par les incendies de forêt entraîne des perturbations écologiques majeures. Les incendies peuvent dévaster les habitats naturels, entraînant la perte d'espèces animales et végétales, certaines d'entre elles étant endémiques et vulnérables. Turner (2010) souligne que les incendies de forêt peuvent entraîner une réduction significative de la biodiversité, car certaines espèces ne peuvent pas se rétablir après un incendie en raison de la destruction de leur habitat naturel.

En outre, les incendies perturbent le cycle du carbone en libérant d'énormes quantités de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Cela contribue à l'aggravation du changement climatique, créant un cercle vicieux où les incendies de forêt deviennent de plus en plus fréquents et intenses. (Bowman et al., 2009) indiquent que les forêts, en tant que puits de carbone, perdent leur capacité à séquestrer le carbone à long terme après des incendies répétés, ce qui exacerbe le réchauffement climatique global.

##### **3.4.2 Economiques**

Les incendies de forêt ont également des conséquences économiques considérables. Les coûts directs incluent les dépenses pour combattre les incendies, les pertes de bois et autres produits forestiers, ainsi que la destruction des infrastructures. Par exemple, (Prestemon et al., 2002) estiment que les incendies de forêt aux États-Unis coûtent chaque année des milliards de dollars en termes de lutte contre les incendies, de pertes de bois commercialisable, et de réparation des infrastructures endommagées.

Les incendies peuvent également avoir des impacts économiques indirects, tels que la perte de revenus liés au tourisme dans les régions forestières et la baisse de la productivité agricole en raison de la dégradation des sols et de la pollution de l'air. (David T. et al., 2001) mentionnent que les incendies de forêt peuvent causer une détérioration à long terme des terres



### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

agricoles, entraînant une baisse des rendements et des pertes économiques pour les communautés locales.

#### **3.4.3 Sociales**

Les forêts jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre environnemental en tant que ressource naturelle primordiale (Juvanhol et al., 2021). Les impacts sociaux des incendies de forêt sont souvent dévastateurs pour les communautés touchées. Les incendies peuvent forcer des milliers de personnes à évacuer leurs maisons, entraînant des perturbations majeures dans leur vie quotidienne. (A.MALCOLM GILL et al., 2013) soulignent que les évacuations massives et la perte de biens personnels ont des conséquences psychologiques importantes, y compris des niveaux accrus de stress, d'anxiété, et de dépression parmi les survivants.

De plus, les incendies de forêt peuvent détruire des infrastructures critiques telles que les réseaux électriques, les routes, et les systèmes d'approvisionnement en eau, laissant les communautés isolées et sans accès aux services de base. (McGee & Russell, 2003) mentionnent que les incendies affectent de manière disproportionnée les populations les plus vulnérables, notamment les personnes âgées, les enfants, et les populations à faible revenu, qui ont moins de ressources pour se remettre des pertes et des perturbations causées par les incendies.

#### **3.5 L'impact des incendies de forêts sur le changement climatique**

Les incendies de forêt entraînent des répercussions significatives sur le climat global, exacerbant les effets du changement climatique de manière complexe et interconnectée. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la fumée générée par les feux de forêt contient des polluants atmosphériques dangereux tels que les particules fines PM2.5, le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), l'ozone, les hydrocarbures aromatiques, et le plomb. Ces substances toxiques ont des effets immédiats sur la qualité de l'air, posant des risques pour la santé humaine, mais elles ont aussi des implications plus larges sur l'environnement et le climat.

##### **3.5.1 Émission de Gaz à Effet de Serre**

L'un des impacts les plus directs des incendies de forêt sur le climat est la libération massive de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'autres gaz à effet de serre, tels que le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), dans l'atmosphère. Ces gaz contribuent au réchauffement global en augmentant l'effet de serre naturel de la Terre. Lorsqu'une forêt brûle, le carbone stocké dans la biomasse végétale est libéré sous forme de CO<sub>2</sub>, perturbant le bilan carbone des écosystèmes forestiers. (Bowman et al., 2009) estiment que les incendies de forêt contribuent de manière

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

significative aux émissions mondiales de carbone, accélérant ainsi le processus de changement climatique.

#### **3.5.2 Réduction de la Capacité de Séquestration du Carbone**

Les forêts agissent comme des puits de carbone, absorbant le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et contribuant à réguler le climat. Cependant, lorsque les forêts sont détruites par le feu, leur capacité à séquestrer le carbone est gravement réduite. La régénération des forêts après un incendie peut prendre des décennies, voire des siècles, ce qui signifie que les pertes de capacité de séquestration de carbone peuvent avoir des effets à long terme sur le climat. (Bond-Lamberty et al., 2014) notent que les forêts boréales, par exemple, qui sont souvent touchées par des incendies, sont des puits de carbone critiques et que leur perte peut entraîner un déséquilibre significatif dans le cycle global du carbone.

#### **3.5.3 Effets sur les Aérosols et la Réflectivité de la Terre**

Les particules fines (PM<sub>2.5</sub>) et autres aérosols produits par les incendies de forêt peuvent affecter la réflectivité de la Terre (albédo) en fonction de leur interaction avec les nuages et la lumière solaire. Ces aérosols peuvent avoir un double effet : certains peuvent refroidir la surface de la Terre en réfléchissant la lumière solaire, tandis que d'autres, comme le carbone noir, peuvent absorber la chaleur, contribuant ainsi au réchauffement localisé. (Spracklen et al., 2010) soulignent que l'impact net des aérosols sur le climat est complexe et dépend de nombreux facteurs, y compris la composition chimique des particules et leur distribution spatiale.

#### **3.5.4 Rétroactions Climatiques**

Les incendies de forêt peuvent également initier des rétroactions climatiques. Par exemple, les incendies dans les régions arctiques et boréales peuvent entraîner la fonte du pergélisol, libérant ainsi du méthane, un gaz à effet de serre très puissant. De plus, les incendies augmentent la probabilité de futurs feux en créant des conditions plus sèches et en modifiant la composition des écosystèmes. (Flannigan et al., 2009) mettent en garde contre ces rétroactions, soulignant que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies pourrait entraîner une accélération du changement climatique, créant un cercle vicieux difficile à briser.

En résumé, les incendies de forêt ont des répercussions profondes sur les écosystèmes, les économies locales, et les communautés humaines. La gestion efficace des forêts et la prévention des incendies sont donc cruciales pour atténuer ces impacts et préserver les fonctions vitales des forêts.

### **3.6 Disciplines et approches pour l'étude des incendies de forêt**

Dans le cadre de cette thèse, l'analyse multidisciplinaire revêt une importance capitale pour comprendre et gérer efficacement les incendies de forêt, en particulier dans les interfaces habitat-forêt situées en zones montagneuses. Les incendies de forêt, influencés par une multitude de facteurs environnementaux, sociaux, et économiques, nécessitent une approche intégrative qui englobe plusieurs disciplines pour appréhender pleinement les dynamiques en jeu et développer des stratégies de gestion adaptées.

#### **3.6.1 Écologie**

Cette discipline qui étudie l'impact des feux sur les écosystèmes et la biodiversité. Selon (Leduc et al., 2001), la forêt est perçue comme une perturbation naturelle influençant les écosystèmes forestiers. Cette perturbation joue un rôle crucial dans la régulation de la diversité au sein de ces écosystèmes, influençant ainsi la surface forestière, ainsi qu'à la composition, la dynamique et la diversité des communautés d'arbres.

L'étude de (C.Dominic, 2011) sur les incendies dans les forêts boréales met en lumière leur rôle crucial dans la création de mosaïques dynamiques de communautés forestières, un processus vital pour maintenir la résilience et la diversité écologique dans ces écosystèmes.

#### **3.6.2 Foresterie**

La foresterie est une discipline clé dans la gestion des ressources forestières, englobant une gamme d'activités allant de la conservation des forêts à leur exploitation durable. L'une des principales préoccupations de la foresterie est la prévention des incendies de forêt, un aspect crucial dans le maintien de la santé et de la résilience des écosystèmes forestiers.

La foresterie ne se limite pas à la conservation des ressources forestières ; elle joue également un rôle déterminant dans la prévention des incendies. Une gestion forestière durable, telle que décrite par Glück (1996), inclut non seulement la régulation de l'exploitation forestière, mais aussi des pratiques spécifiques comme la réduction des combustibles forestiers, essentielles pour diminuer le risque d'incendie.

#### **3.6.3 Science de l'environnement**

Cette discipline aborde les effets écologiques et économiques des incendies sur l'environnement et les méthodes de réhabilitation.

(Touffik Arfa et al., 2009) aborde le sujet des incendies de forêts et leurs impacts économiques en Algérie en analysant le bilan des incendies. Entre 1985-2006, les feux de forêt ont ravagé environ 779 872,11 hectares à travers 32 354 incidents distincts soit chiffrées à plus de 113 milliards de dinars algériens, soit environ 1,11 milliards d'euros de perte économiques.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

Cependant il est nécessaire d'impliquer le développement de plans d'aménagement et de lutte contre les incendies de forêt qui prennent en compte les besoins et attentes des habitants.

La recherche de (Meddour-Sahar et al., 2015) examine les origines des incendies de forêt à travers l'analyse effectuée par la protection civile algérienne. Cette étude vise à approfondir la compréhension des facteurs déclencheurs afin de mieux gérer les incidents d'incendies forestiers.

#### **3.6.4 Ingénierie et technologie**

Développe des outils et technologies pour la détection et la lutte contre les incendies. La compréhension de l'impact des feux de forêt sur la santé humaine et l'environnement est essentielle dans le cadre de la géo-ingénierie, nécessitant ainsi une gestion appropriée des incendies forestiers. À cet égard, des études ont été menées par (Herndon et al. 2018) pour analyser les causes, l'intensification, la combustibilité et l'expansion des incendies de forêt en Californie, aux États-Unis.

La recherche de (Richard, 2008) "Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité", examine le rôle des propriétés physiques des combustibles et de leur distribution hétérogène dans la propagation des feux de forêts. Cette étude met en lumière comment la compréhension des caractéristiques du combustible peut aider à prévoir et à gérer les feux de forêts, en mettant l'accent sur l'importance de la gestion des combustibles pour réduire le risque d'incendies majeurs.

#### **3.6.5 Sociologie et sciences humaines**

Cette discipline étudie l'impact des incendies sur les communautés, les comportements humains face aux catastrophes et les dynamiques sociales qui en découlent.

L'étude réalisée par Clément, 2005 explore la complexe interaction entre les incendies de forêt et les disciplines des sciences sociales et humaines. L'auteur a analysé les dynamiques historiques, culturelles, et sociales, révélant que, dans le contexte des sociétés méditerranéennes à travers l'histoire, le feu a été employé comme moyen de gestion des terres agricoles et des pratiques pastorales.

Bouisset et al., 2018 soulèvent l'importance de la résilience, qu'ils définissent comme la capacité d'une communauté à maintenir sa continuité tout en s'adaptant aux changements, en tant qu'objectif primordial dans la gestion des risques liés aux incendies de forêt. Ils mettent en évidence comment l'urbanisation et les changements dans l'utilisation des sols ont accru la vulnérabilité face aux incendies. Cependant, ils observent que les stratégies des acteurs locaux

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

privilégient souvent l'efficacité des réponses immédiates au détriment de l'adaptation et de la prévention sur le long terme, pourtant cruciales pour renforcer la résilience.

#### **3.6.6 Météorologie :**

La météorologie analyse les conditions climatiques favorisant les incendies. L'étude réalisée par (Adrien Orioux, 1974) se concentre sur l'analyse des facteurs météorologiques, tels que l'humidité de l'air, la direction et la force du vent, l'intensité et la durée des précipitations, ainsi que les orages, et leur influence sur les occurrences d'incendies de forêt. Cette recherche souligne particulièrement le rôle de la sécheresse et du vent, avec une attention spécifique sur le mistral en Provence, comme principaux contributeurs aux risques d'incendie. La méthodologie utilisée pour prévoir les risques d'incendie repose sur l'évaluation de la sécheresse de la végétation et les prévisions des conditions de vent, facilitant de ce fait la mise en place de systèmes d'alerte précoce.

L'étude réalisée par (E. Rigolot, 2008) examine l'impact du changement climatique sur les feux de forêt, mettant en avant que ce phénomène est influencé par des facteurs aggravants tels que les conditions climatiques, biologiques et anthropiques, qui augmentent le risque de déclenchement des incendies. Elle met également en évidence une potentielle hausse de la sévérité et de la fréquence des incendies à l'avenir, en raison des effets conjugués du changement climatique et des changements dans l'utilisation des terres.

#### **3.6.7 Science politique et politique publique**

Selon l'étude menée par (Ouahiba Meddour-Sahar et al. 2013) la question des incendies de forêt en Algérie est analysée à travers les défis humains et les politiques publiques. La gestion des risques liés aux incendies y est identifiée comme un problème majeur, aggravé par des ressources insuffisantes et des orientations stratégiques favorisant l'intervention d'urgence sur les feux actifs au détriment des mesures préventives.

Pour mener leur analyse, les auteurs adoptent une méthode empirique qui comprend la collecte de données statistiques et la réalisation d'entretiens avec des responsables de la gestion des incendies, tant au niveau national que local. Cette approche leur permet d'examiner en profondeur les politiques publiques en place, les pratiques courantes, ainsi que les perceptions et représentations des gestionnaires face à cette problématique.

L'article de Rigolot et al., 2020 aborde l'importance d'une gestion intégrée du risque d'incendie de forêt, qui prend en compte les aspects environnementaux, sociaux et politiques. Il met particulièrement l'accent sur la législation concernant les interfaces habitats -forêts comme moyen de réduire le risque associé. Cette approche comprend l'application stricte de la

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

réglementation sur le débroussaillage obligatoire, visant à renforcer la protection autonome des structures face au danger d'incendie.

#### **3.6.8 Géographie et télédétection**

Dans notre thèse, nous avons mis un point d'honneur sur le domaine de la géographie et de la télédétection : cette dernière utilise des technologies avancées pour cartographier et surveiller les incendies.

Dans leur article de (Desbois & Vidal, 1995) ont adopté l'usage de la télédétection, en s'appuyant spécifiquement sur la base de données Prométhée, qui répertorie tous les incendies de forêt survenus dans les départements méditerranéens. Leur principal intérêt réside dans la possibilité de spatialiser le risque associé à la végétation. Cette démarche visait à affiner les méthodes de prévision des incendies.

(ARFA Azzedine Mohamed Touffik, 2019) La recherche menée par ARFA Azzedine Mohamed Touffik en 2019 met en lumière l'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) comme outils efficaces pour la gestion des urgences, la détermination des zones à risque et la cartographie de la propagation des incendies. Cette étude met en évidence le rôle crucial de ces technologies dans l'élaboration des politiques forestières en Algérie. Elle détaille la méthode employée, notamment l'utilisation d'images satellitaires de très haute résolution pour la classification de l'occupation des sols, facilitant ainsi l'identification et la localisation précise des zones susceptibles d'être affectées par les incendies de forêt.

En intégrant ces diverses disciplines, cette thèse propose une approche holistique pour la gestion des incendies de forêt dans les interfaces habitat-forêt en zones montagneuses, où chaque discipline apporte une perspective essentielle pour comprendre et atténuer les risques associés.

#### **3.7 Stratégie et politique de gestion des incendies**

##### **3.7.1 Cadre institutionnel mondiale pour la gestion des risques des incendies de forêts**

Le cadre institutionnel mondial pour la gestion des risques d'incendies de forêt est principalement coordonné par plusieurs organismes internationaux et accords multilatéraux.

Parmi eux :

- **Organisation des Nations Unies (ONU)** : Par l'intermédiaire de ses agences comme le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), l'ONU soutient les pays dans

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

la prévention et la gestion des incendies de forêt, notamment par la sensibilisation, la formation, et l'assistance technique.

- **Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes (UNDRR)** : L'UNDRR aide à la coordination des efforts de réduction des risques de catastrophes, y compris les incendies de forêt, en développant des cadres d'action globaux comme le Cadre de Sendai pour la Réduction des Risques de Catastrophes (2015-2030). Ce cadre met l'accent sur la prévention, la préparation, et la résilience des communautés face aux risques d'incendies.
- **FAO** : La FAO travaille spécifiquement sur la gestion des feux de forêt, en fournissant des directives techniques, en soutenant les programmes de gestion intégrée des incendies, et en facilitant la coopération internationale pour partager les bonnes pratiques et les technologies.
- **Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC)** : En abordant les impacts du changement climatique, qui aggravent la fréquence et l'intensité des incendies de forêt, la CCNUCC soutient des mesures d'atténuation et d'adaptation qui incluent la gestion des incendies.
- **Partenariats publics-privés** : Divers partenariats entre gouvernements, organisations non gouvernementales, et entreprises privées contribuent à la gestion des risques d'incendies, en particulier à travers le développement de technologies avancées pour la détection précoce, la prévention, et la lutte contre les incendies.

Ces institutions travaillent ensemble pour renforcer les capacités locales et nationales, promouvoir l'échange de connaissances, et intégrer les risques d'incendies de forêt dans les politiques globales de gestion des risques de catastrophes.

Chaque pays élabore et met en œuvre ses propres lois pour la gestion des risques d'incendies de forêt, en tenant compte de son contexte géographique, des caractéristiques spécifiques de sa couverture végétale, des facteurs topographiques, ainsi que des conditions climatiques propres à son territoire.

A titre d'exemple, La gestion des interfaces habitat-forêt (Wildland Urban Interface - WUI) est indispensable pour la réduction et la prévention des risques d'incendies de forêts. La réglementation dans ces zones est donc nécessaire et varie d'un pays à l'autre, bien qu'elle partage des principes communs pour la gestion de ces zones vulnérables.

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

**Tableau 3.4** Exemples des Stratégie de gestion des incendies de forêts dans les interfaces habitat forêt

Pays	Stratégie de gestion des incendies de forêts dans les interfaces habitat forêt
États-Unis	Code of Federal Regulations, Title 44, Part 204 : Le Federal Register stipule la nécessité de cartographier et d'identifier les zones WUI par les agences fédérales afin de permettre l'allocation de fonds pour la prévention des incendies.
Californie	California Building Standards Code (Title 24) Cette loi exige l'utilisation de matériaux résistants au feu pour la construction, notamment pour les toitures, les fenêtres et les murs extérieurs dans les zones WUI. L'objectif est de réduire l'inflammabilité des bâtiments et d'augmenter leur résistance au feu.
Australie	Bushfire Management Overlay (BMO) Cette réglementation insiste sur la sensibilisation et l'éducation des habitants sur les comportements à adopter et les mesures préventives à mettre en place pour réduire les risques dans les zones WUI.
Canada	Forest and Prairie Protection Act Les lois canadiennes encouragent la coordination entre les différentes agences gouvernementales, les communautés locales et les organisations non gouvernementales pour une gestion efficace des risques dans les zones WUI.
France	Code Forestier (Article L131-10) Cette loi impose aux propriétaires fonciers de débroussailler autour des bâtiments afin de créer des zones tampons. Cela vise à gérer la végétation pour réduire les risques d'incendie.
Espagne	Plan de Protection Civil ante Emergencias por Incendios Forestales (INFOCA) Ce plan exige l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies spécifiques de prévention dans les zones WUI, telles que des routes d'évacuation et des points d'eau, pour une gestion optimale des risques d'incendie

Source : auteure 2024

Le tableau 3.4 présenté ci-dessus met en évidence les différentes approches adoptées par divers pays pour gérer les interfaces habitat-forêt, également connues sous le nom de zones WUI (Wildland-Urban Interface). Il illustre une diversité de stratégies, reflétant les priorités et les contextes spécifiques de chaque pays. Tandis que certains se concentrent sur des mesures structurelles comme la résistance au feu des bâtiments (Californie) ou le débroussaillage (France), d'autres mettent l'accent sur l'éducation et la sensibilisation (Australie), ou encore sur la coopération interinstitutionnelle (Canada). Cette diversité d'approches souligne l'importance d'adapter les stratégies de gestion des incendies aux réalités locales, tout en reconnaissant que

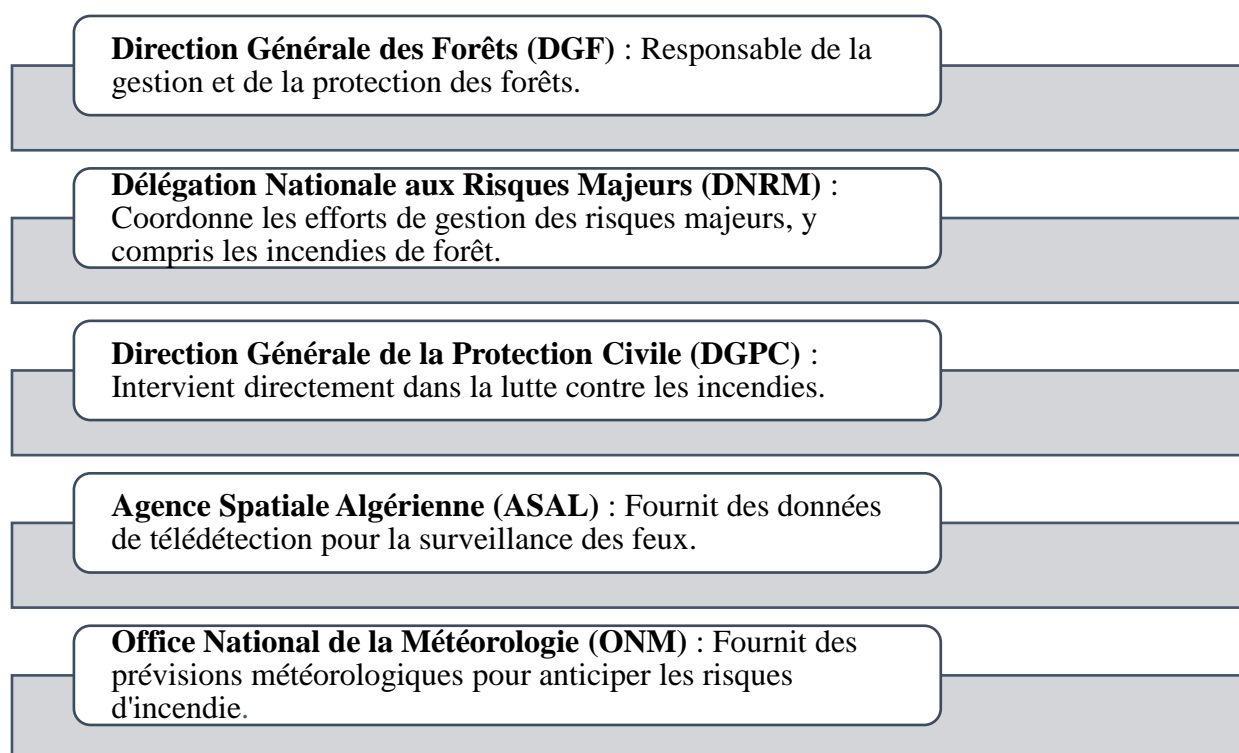


### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

la prévention, la préparation et la résilience communautaire sont des éléments clés dans la protection des zones WUI contre les incendies de forêt.

#### 3.7.2 Cadre institutionnel pour la gestion des incendies de forêts en Algérie

La gestion des incendies de forêts en Algérie est une tâche complexe qui nécessite une approche multidisciplinaire et une collaboration étroite entre diverses institutions. La stratégie intégrée de protection, de lutte et de prévention, soutenue par la coordination des principaux acteurs, est essentielle pour minimiser les risques d'incendies et protéger les ressources forestières du pays. Cette approche proactive et collaborative permet non seulement de réagir rapidement en cas d'incendie, mais aussi de prendre des mesures préventives pour réduire la fréquence et la gravité des feux de forêt.



**Figure 3.2** Cadre institutionnel pour la gestion des incendies de forêts en Algérie.

Source : Conservation des forêts de la wilaya de Constantine+ traitement auteure 2024

Malgré le manque de ressources et l'insuffisance des infrastructures, la lutte contre les incendies de forêt est assurée par les services de la Direction Générale des Forêts, en collaboration avec d'autres organismes, notamment la protection civile, spécialisée dans ce domaine. Cette coordination se fait conformément aux dispositions du décret n° 87-45 du 10 février 1987, qui régit l'organisation et la coordination des actions de lutte contre les incendies de forêt au niveau national.

### **3.7.2.1 Le décret n° 87-45 du 10 février 1987**

C'est l'un des textes fondateurs qui organise et coordonne les actions contre les incendies dans le domaine forestier national. Parmi ses principales orientations :

#### **❖ Stratégies de prévention**

La prévention est un axe majeur contre les incendies de forêt. Elle inclut plusieurs mesures :

- **Sensibilisation et formation** : Des campagnes de sensibilisation sont menées pour informer le public des dangers des feux de forêt et des moyens de prévention. La formation des personnels impliqués dans la lutte contre les incendies est également une priorité.
- **Surveillance et détection** : L'utilisation de tours de guet, de patrouilles terrestres, et de technologies de télédétection pour la surveillance continue des zones à risque est essentielle pour détecter rapidement les départs de feu.
- **Aménagement forestier** : Des mesures telles que le débroussaillage, la création de pare-feu, et la gestion des combustibles sont mises en œuvre pour réduire la vulnérabilité des forêts aux incendies.

#### **❖ Stratégies de gestion en cas d'incendie**

Lorsque des incendies se déclarent, plusieurs stratégies sont activées pour en minimiser les impacts :

- **Coordination inter-agences** : la coordination entre la DGF, la Protection Civile, et d'autres acteurs est cruciale. Des plans d'intervention d'urgence sont établis pour mobiliser rapidement les ressources humaines et matérielles nécessaires.
- **Utilisation de moyens aériens et terrestres** : Les moyens aériens, tels que les hélicoptères bombardiers d'eau, et les moyens terrestres, comme les camions de lutte contre les incendies, sont déployés pour combattre les feux de manière efficace.
- **Assistance internationale** : en cas d'incendies majeurs, l'Algérie peut solliciter l'assistance internationale, notamment dans le cadre des accords de coopération avec d'autres pays méditerranéens.

❖ **Gestion Post-Incendie et Reboisement**

Après les incendies, des efforts de restauration des écosystèmes sont entrepris :

- **Reboisement** : Des programmes de reboisement sont mis en place pour restaurer les zones détruites, avec une attention particulière à l'utilisation d'espèces locales adaptées aux conditions climatiques.
- **Evaluation des Impacts** : Les dégâts sont évalués en termes de perte de biodiversité, d'impact économique, et de dégradation des sols. Ces évaluations sont essentielles pour planifier les actions futures de restauration et de gestion des risques.

❖ **Défis et Perspectives**

Malgré ces mesures, l'Algérie fait face à plusieurs défis dans la gestion des incendies de forêt, notamment le manque de ressources financières et matérielles, la nécessité de renforcer les capacités techniques, et l'impact croissant du changement climatique. Pour l'avenir, il est crucial de renforcer la résilience des forêts algériennes face aux incendies, en intégrant de manière plus systématique les nouvelles technologies et en renforçant la coopération internationale.

**3.7.2.2 La loi n° 19-02 relatif aux règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique**

Le décret (n° 87-45 du 10 février 1987) est renforcé par diverses lois et décrets, dont le plus récent est, qui établit les règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique. Cette loi met en place des obligations pour les constructeurs, les exploitants, et les propriétaires d'établissements en termes de sécurité incendie.

❖ **Stratégies de prévention et de gestion**

- **Plans de prévention et d'intervention** : Chaque wilaya est tenue d'élaborer des plans de prévention et d'intervention pour les risques d'incendie. Ces plans sont approuvés par le Wali , après avis des services de la protection civile. Les exercices de simulation sont également obligatoires pour tester l'efficacité des plans d'intervention.
- **Commissions de prévention des risques** : Des commissions de prévention des risques d'incendie existent au niveau national et wilayal. Ces commissions sont chargées de la consultation, de l'élaboration et de l'approbation des mesures de sécurité contre les

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

incendies. Elles sont également responsables de la délivrance des autorisations d'exploitation des établissements publics.

- **Sanctions administratives et pénales** : En cas de non-respect des mesures de sécurité, des sanctions administratives, telles que la fermeture provisoire ou définitive, peuvent être appliquées. Des sanctions pénales sont également prévues pour les infractions graves, telles que l'exploitation sans autorisation ou l'obstruction des sorties de secours.

#### **❖ Approches technologiques**

L'utilisation de technologies avancées comme la télédétection est recommandée pour surveiller les incendies en temps réel et prévenir les catastrophes. Des efforts sont également déployés pour moderniser les équipements de lutte contre les incendies et former les équipes de la protection civile.

#### **❖ Mesures de sensibilisation**

Des campagnes de sensibilisation sont menées pour éduquer la population sur les risques d'incendie et les comportements à adopter pour prévenir les feux, notamment dans les zones d'interface habitat-forêt, qui sont particulièrement vulnérables.

#### **❖ Reboisement et restauration des forêts**

Après les incendies, des initiatives de reboisement sont mises en œuvre pour restaurer les écosystèmes détruits. Le Plan National de Reboisement est une de ces initiatives, visant à réhabiliter les zones touchées par les feux de forêt et à réduire le risque de futurs incendies.

Ces mesures témoignent d'une approche intégrée de la gestion des incendies en Algérie, qui combine prévention, intervention rapide, sanctions et restauration écologique pour faire face à ce fléau récurrent. La loi algérienne établit des plans de prévention et d'intervention au niveau des wilayas, constituant une base solide pour la gestion des risques. Cependant, cette législation reste encore principalement axée sur la réaction aux incendies plutôt que sur une prévention proactive et systématique.

À l'échelle mondiale, des stratégies plus avancées, telles que celles mises en œuvre en Australie ou aux États-Unis, ont démontré l'efficacité d'une approche davantage tournée vers la prévention. Ces stratégies incluent l'intégration de systèmes de surveillance en temps réel, des infrastructures robustes de détection précoce, et des campagnes de sensibilisation continue qui engagent directement les communautés locales dans la prévention des incendies.

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

Bien que des efforts notables aient été faits pour renforcer la gestion des incendies en Algérie, le document souligne l'absence d'un système prédictif pleinement développé pour anticiper les incendies. Actuellement, les initiatives se concentrent principalement sur la réponse aux incendies, avec un projet de mise en place d'un système d'information géographique (SIG) pour le suivi des incendies qui est encore en phase d'approbation.

En outre, la loi prévoit des sanctions administratives et pénales pour le non-respect des mesures de sécurité incendie, un aspect essentiel de la gestion des risques. Cependant, la mise en œuvre de ces sanctions semble manquer de transparence et d'efficacité. Par ailleurs, la responsabilisation des acteurs clés, tels que les propriétaires terriens, les autorités locales et les entreprises, pourrait être davantage renforcée pour se conformer aux meilleures pratiques mondiales. Cela permettrait de garantir une application plus rigoureuse des mesures de prévention et une meilleure protection des écosystèmes forestiers vulnérables.

#### **3.7.2.3 Les instruments d'aménagement : SNAT, SRAT et PAW de Constantine :**

Les orientations du SNAT, SRAT et du PAW de Constantine, concernant la gestion des incendies de forêt dans les interfaces habitat-forêt, se focalisent sur la préservation des espaces naturels et la gestion des risques environnementaux, notamment à travers les axes suivants :

❖ **Orientations du SNAT (Schéma National d'Aménagement du Territoire) :** le SNAT met l'accent sur :

- **La protection des écosystèmes fragiles :** Le développement doit être compatible avec la capacité de charge environnementale des territoires, ce qui inclut la préservation des forêts contre l'urbanisation incontrôlée qui pourrait dégrader ces espaces.
- **La prévention des risques majeurs :** L'une des priorités est la prévention des incendies de forêt, en particulier dans les zones où les interfaces habitat-forêt sont vulnérables à de tels risques. Cela implique de renforcer les mesures de lutte contre les incendies et de protéger les zones forestières des activités humaines nuisibles.

❖ **Orientations du SRAT (Schéma Régional d'Aménagement du Territoire)**

Le SRAT pour la région Nord-Est, qui inclut Constantine, met en avant :

- **La préservation des milieux naturels :** La conservation des forêts et la gestion des risques liés aux incendies de forêt sont des priorités. Le SRAT préconise la mise en place de stratégies pour protéger les zones forestières en périphérie des agglomérations

### Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion

urbaines, ainsi que la sensibilisation des populations locales sur les risques environnementaux.

- **La gestion des interfaces habitat-forêt** : Le SRAT encourage un développement urbain qui tient compte des risques environnementaux, notamment en évitant l'étalement urbain dans les zones forestières et en assurant la protection de ces interfaces critiques.

#### ❖ Orientations du PAW (Plan d'Aménagement de la Wilaya) de Constantine

Le Plan d'Aménagement de la Wilaya se concentre sur :

- **La maîtrise de l'urbanisation** : Il est essentiel de limiter l'expansion urbaine dans les zones proches des forêts pour protéger les écosystèmes. Le PAW recommande de canaliser la croissance urbaine vers des zones moins sensibles et de mettre en œuvre des mesures spécifiques pour la gestion durable des forêts, y compris la création de tranchées pare-feu et le développement de pistes forestières.
- **La protection des zones forestières** : Le PAW insiste sur la nécessité de protéger les forêts contre les incendies, en renforçant les infrastructures de surveillance et de lutte contre les feux de forêt. Ceci inclut des actions comme l'installation de postes de vigie et la sensibilisation des populations à la protection des espaces naturels.

En somme, les politiques et stratégies algériennes en matière de gestion des incendies de forêt sont fondées sur une combinaison de prévention, de réponse rapide, et de restauration post-incendie. Ces efforts sont soutenus par un cadre juridique robuste, mais des améliorations sont nécessaires pour faire face aux défis croissants posés par le changement climatique et les limitations institutionnelles.

### Conclusion

Les feux de forêt, bien que faisant partie des perturbations naturelles des écosystèmes, représentent aujourd'hui un risque accru en raison de multiples facteurs anthropiques et environnementaux. Ce chapitre a mis en lumière la complexité de ce phénomène, en explorant non seulement les définitions et les statistiques globales, mais aussi les particularités régionales, notamment dans les zones méditerranéennes où ces incendies sont particulièrement fréquents et destructeurs.

L'analyse des facteurs d'aggravation, qu'ils soient topographiques, climatiques, ou humains, souligne l'interdépendance de ces éléments dans la propagation des feux. De même,

### **Chapitre III : Analyse multidisciplinaire du risque d'incendie de forêt : Définition, facteurs d'aggravation et Stratégies de gestion**

les impacts dévastateurs sur les écosystèmes, les économies locales, et les communautés humaines démontrent l'urgence d'adopter des stratégies de gestion et de prévention plus efficaces.

En examinant les politiques et les technologies actuelles, comme la télédétection, ce chapitre a également montré les progrès réalisés dans la détection, la prévention, et la gestion des incendies de forêt. Cependant, il reste crucial de continuer à améliorer ces outils et à renforcer les cadres législatifs et institutionnels, en particulier dans les régions les plus vulnérables.

En Algérie, bien que la gestion des incendies de forêt soit prise en compte dans la législation existante, il pourrait être nécessaire de renforcer les dispositions spécifiques aux interfaces habitat-forêt pour s'aligner sur les meilleures pratiques mondiales. Cela inclut l'amélioration des infrastructures, l'application stricte des règlements d'urbanisme, et l'implication active des communautés locales dans la prévention des incendies. Toutefois, dans le cadre des instruments d'aménagement tels que le SNAT, le SRAT, et le PAW, cette thématique n'est pas toujours traitée de manière explicite.

Dans le cadre du PDAU de Constantine, le nombre d'habitats, la population concernée, ainsi que la typologie des habitats sont des informations manquantes. Ces données sont pourtant cruciales pour élaborer une stratégie efficace de gestion des incendies de forêt dans les interfaces habitat-forêt. Leur absence souligne la nécessité d'un approfondissement de cette thématique pour garantir une meilleure protection des zones sensibles de la région.

Pour cette raison, nous avons choisi d'aborder cette thématique, afin de combler les lacunes existantes et de proposer des solutions concrètes pour la gestion des incendies de forêt dans les interfaces habitat-forêt.

En conclusion, la gestion des feux de forêt requiert une approche multidisciplinaire intégrée, combinant science, technologie, et politiques publiques. Une telle approche est essentielle non seulement pour atténuer les risques et les impacts des incendies, mais aussi pour préserver les écosystèmes forestiers, qui jouent un rôle vital dans la régulation du climat et la biodiversité mondiale





## CHAPITRES IV : ANALYSE CARTO THEMATIQUE DU MILIEU BIOPHYSIQUE, PHYSIQUE DU MASSIF DE DJEBEL EL OUAHCH

### Introduction

L'analyse carto-thématique joue un rôle crucial dans l'identification des caractéristiques géographiques spécifiques de la zone d'étude, telles que les formations géologiques, les reliefs topographiques, et les réseaux hydrographiques. Elle permet également d'analyser la distribution spatiale des éléments naturels et anthropiques, tels que la végétation. Les résultats de cette analyse fournissent des informations précieuses pour les décideurs et les planificateurs.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse cartographique thématique du massif de Djebel El Ouahch représentant la zone de notre étude. Il vise à fournir une compréhension détaillée des aspects biophysiques et physiques de cette région. En utilisant la cartographie comme élément principal de cette étude, nous allons délimiter la zone d'étude, analyser la topographie, la géologie, l'hydrographie, le couvert végétal. De plus, une étude climatique approfondie sera réalisée pour comprendre les influences climatiques sur cette région. L'objectif principal de ce chapitre est de créer une base de données cartographiques détaillée qui servira de fondement pour les analyses et les recherches ultérieures dans le cadre de cette thèse.

#### 4.1 Présentation de la wilaya de Constantine :

La wilaya de Constantine est l'une des plus importantes du pays, jouant un rôle stratégique en tant que carrefour entre l'est et le centre du pays, et entre les régions du Tell et les Hauts Plateaux dans l'Est de l'Algérie. Ce positionnement géographique fait de Constantine un nœud central pour les échanges économiques, culturels et humains. Voir figure 4.1

La wilaya de Constantine est délimitée par plusieurs autres wilayas, ce qui renforce son rôle de carrefour régional :

- Au nord, elle est bordée par la wilaya de Skikda.
- À l'est, elle partage ses frontières avec la wilaya de Guelma.
- Au sud, elle est limitée par la wilaya d'Oum El Bouaghi.
- À l'ouest, elle est voisine de la wilaya de Mila.
- Au nord-ouest, elle est adjacente à la wilaya de Jijel.

La wilaya compte une population de **1 291 579 habitants** répartis sur une superficie de **2 187 km<sup>2</sup>**. Cette densité de population témoigne de la diversité et de la dynamique de la région, où se côtoient urbanisation et espaces naturels. La wilaya est divisée en **6 daïras** et **12**

**communes**, chacune ayant ses spécificités administratives et socio-économiques. Voir figure 4.1

Avec un taux d'urbanisation de plus de 94 %, la wilaya de Constantine est hautement urbanisée. Ce fort taux d'urbanisation est révélateur de l'importance de la ville de Constantine et de ses environs en tant que centres économiques et sociaux, où se concentrent la majorité des infrastructures et des services publics.

Cette localisation stratégique permet à Constantine de bénéficier d'un accès facile à diverses régions, renforçant ainsi son importance en tant que centre régional.

La wilaya de Constantine est caractérisée par une diversité géographique marquée, avec trois principales zones :

- **La zone montagneuse** : Située au nord de la wilaya, cette zone est le prolongement de la chaîne tellienne. Elle est dominée par des formations montagnardes telles que le mont de Chettaba et le massif de Djebel Ouahch. Le point culminant de cette zone, le mont Sidi Driss, atteint une altitude de 1 364 mètres.
- **Les bassins intérieurs** : Cette région est constituée d'une série de dépressions qui s'étendent de Ferdjioua (wilaya de Mila) à Zighoud Youcef. Elle est délimitée au sud par les hautes plaines et est composée de basses collines entrecoupées par les vallées du Rhummel et de Boumerzoug, offrant un paysage varié et fertile.
- **Les hautes plaines** : Situées au sud-est de la wilaya, ces plaines s'étendent entre les chaînes de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien. Elles couvrent les communes de Aïn Abid et Ouled Rahmoune. Cette région est caractérisée par un climat plus aride et des terres souvent utilisées pour l'agriculture extensive.

#### **4.2 Présentation de la zone d'étude :**

Le point central de cette recherche se concentre sur la vaste étendue de Djebel El Ouahch, située dans la région nord-est de Constantine Figure 4.1 et couvrant une superficie de 577 km<sup>2</sup>. Ce vaste territoire s'étend sur sept municipalités, comprenant deux arboretums et six forêts. Djebel El Ouahch connaît un climat typiquement méditerranéen, caractérisé par des étés torrides et arides suivis d'hivers doux et humides. Notamment, les principales espèces d'arbres dans cette région forestière comprennent le gommier bleu (*Eucalyptus globulus* Labill.), le chêne-liège (*Quercus suber* L.), le pin d'Alep (*Pinus halepensis* M.), et le cyprès méditerranéen (*Cupressus sempervirens* L.).

#### 4.2.1 Le choix de la zone d'étude :

Le choix de Djebel El Ouahch comme zone d'étude a été motivé par son exceptionnelle diversité écologique, abritant une multitude d'espèces rares. Cependant, l'importance de la région est encore accentuée par la récurrence annuelle alarmante des incendies de forêt. Ces incendies dévastateurs balayent implacablement le paysage, laissant dans leur sillage la destruction de millions d'hectares chaque année. Cette réalité malheureuse renforce l'urgence de notre recherche, nous incitant à approfondir la compréhension des complexités de cet écosystème et de ses vulnérabilités.

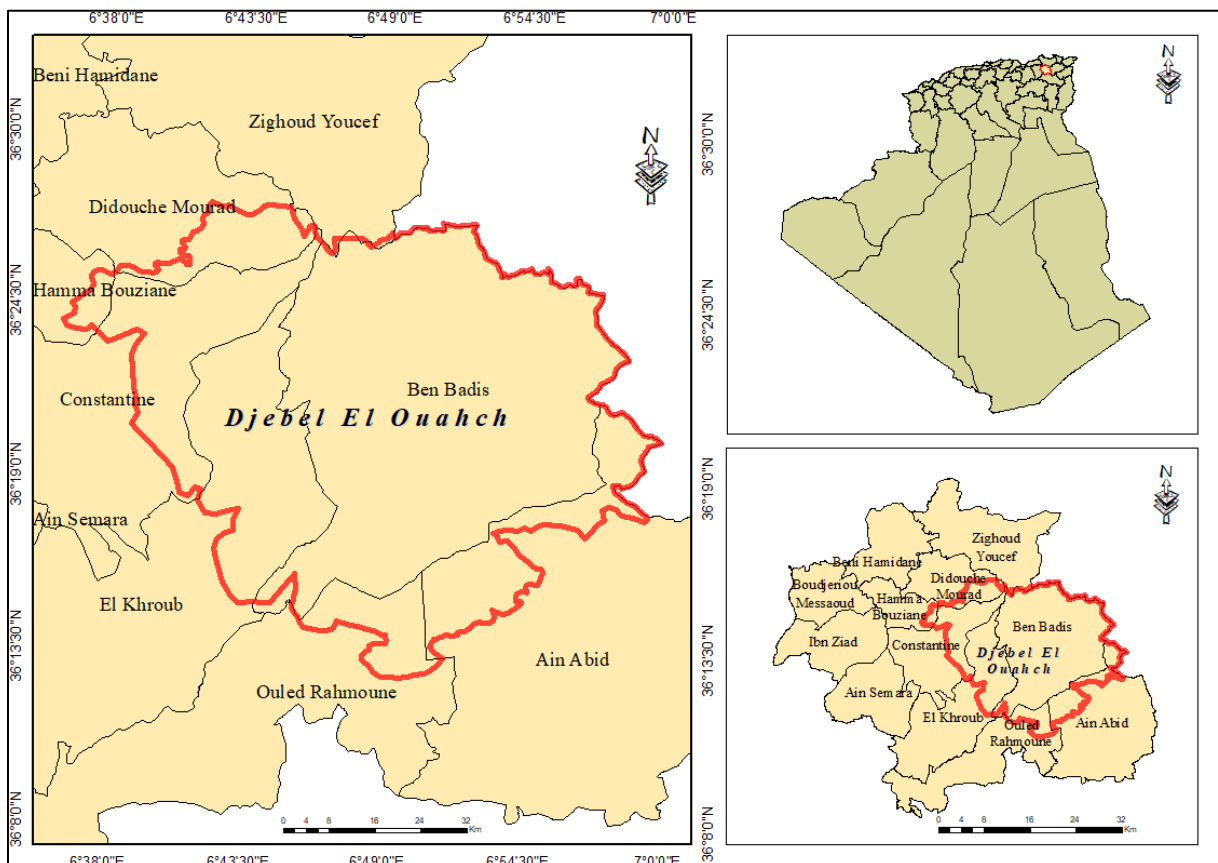


Figure 4.1 Localisation de la zone d'étude

Source : conservation de forêts de Constantine + traitement auteure 2024

#### 4.2.2 Délimitation de la zone d'étude

Le grand massif de Djebel El Ouahch est une région montagneuse située dans la wilaya de Constantine, au nord-est de l'Algérie. Cette zone est particulièrement significative en raison de sa topographie, sa biodiversité, et son importance écologique et économique pour la région.

Le grand massif de Djebel El Ouahch se trouve au nord-est de la wilaya de Constantine. Il est entouré par d'autres zones géographiques importantes, telles que les collines de Zardezas et la dépression agricole de El Aria. Ce massif est l'une des régions les plus élevées de la wilaya,

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

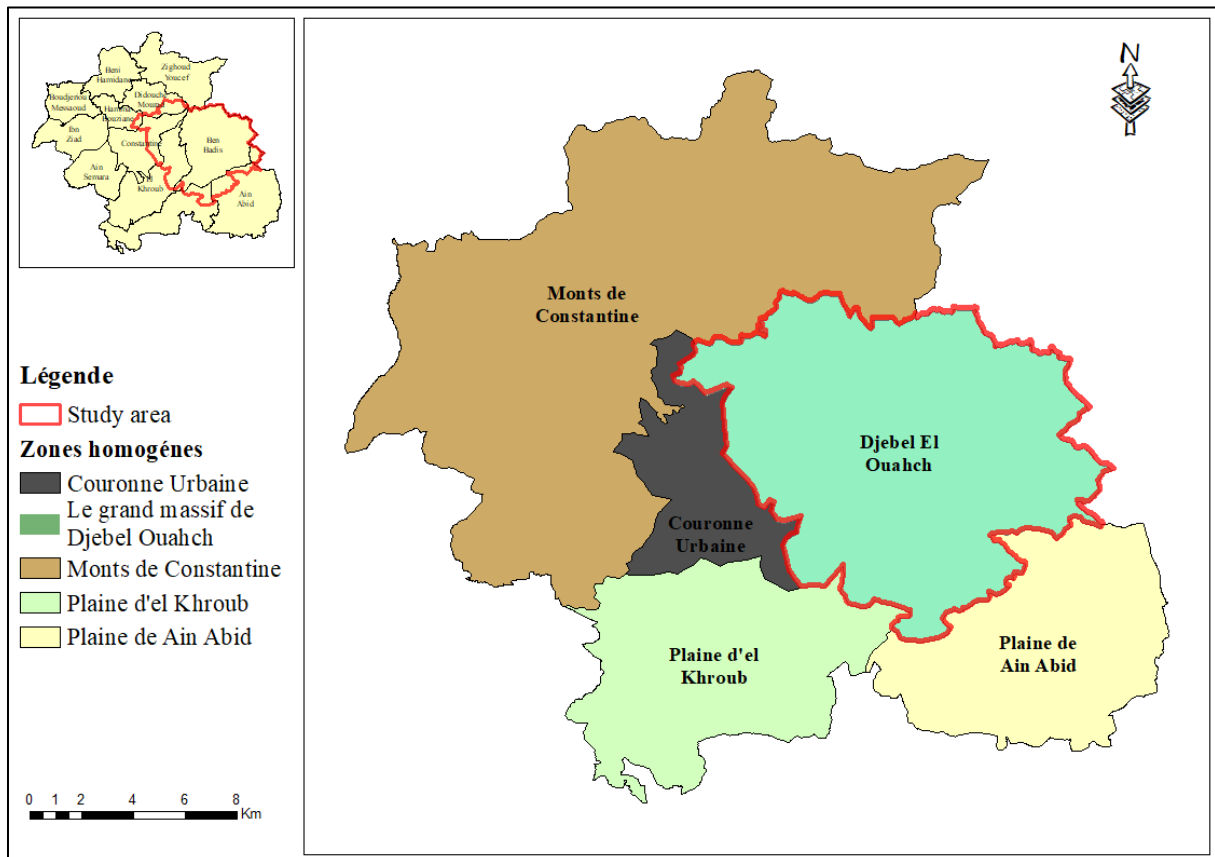
avec des sommets culminant à des altitudes significatives. Le point culminant du massif est le mont Sidi Driss, qui atteint 1 364 mètres d'altitude.

Le relief est accidenté, avec des pentes raides et des vallées profondes, ce qui en fait une région difficile d'accès, mais aussi une barrière naturelle contre les phénomènes météorologiques extrêmes.

Le massif est couvert de forêts méditerranéennes, principalement composées de chênes verts, de pins d'Alep, et d'autres espèces typiques de cette région. Ces forêts jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité locale et sont un habitat pour de nombreuses espèces animales.

Les montagnes du massif sont une source importante de ressources en eau, alimentant les rivières et les cours d'eau de la région, qui sont essentiels pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable des communautés environnantes.

En raison de la densité de sa végétation et des conditions climatiques, le massif de Djebel El Ouahch est particulièrement vulnérable aux incendies de forêts, qui représentent une menace majeure pour son écosystème. La prévention et la gestion de ces incendies sont donc cruciales pour la préservation de cette zone.

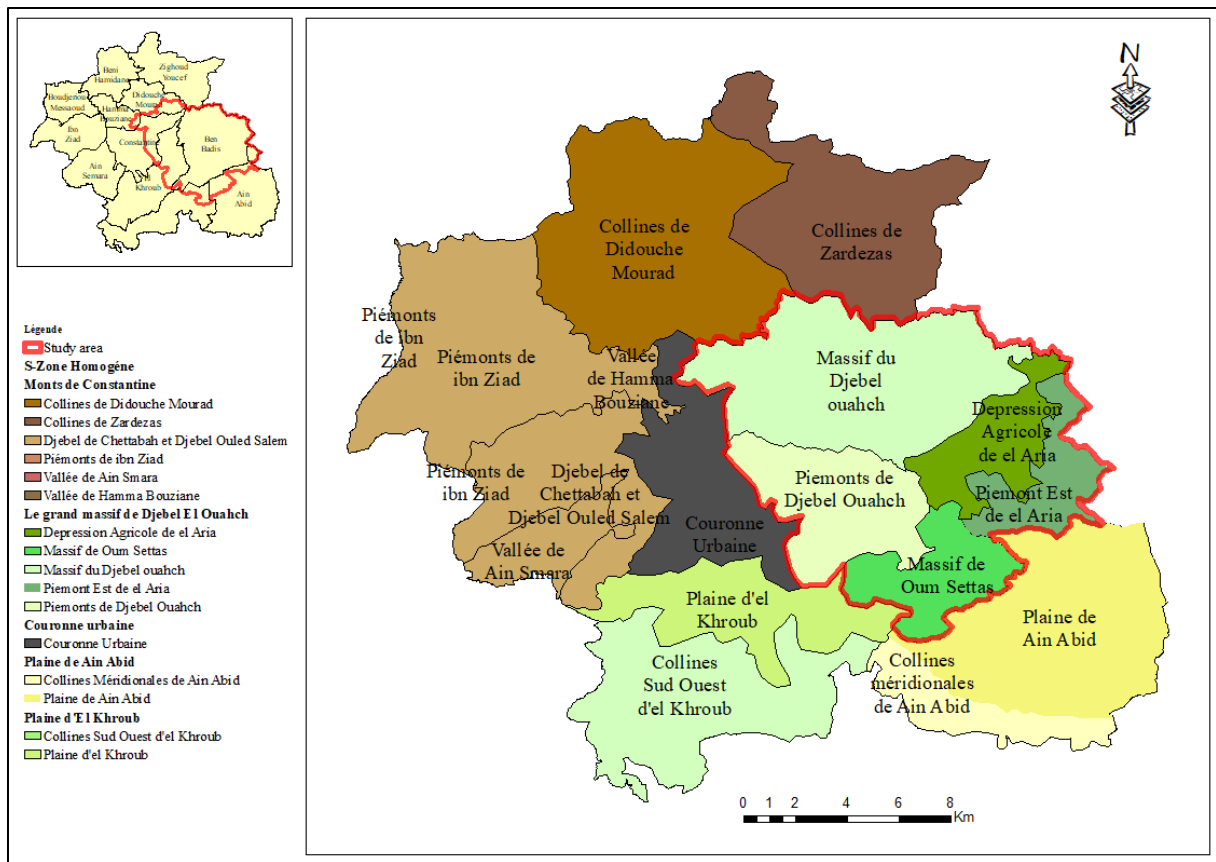


**Figure 4.2** Les zones homogènes de Constantine

Source : conservation de forêts de Constantine + traitement auteure 2024

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

La répartition des sous-zones homogènes dans la zone d'étude de Djebel El Ouahch, représenté dans la carte ci-dessous indiquant qu'il constitue la zone d'étude principale. Ce par un relief montagneux significatif.



**Figure 4.3** Les sous zones homogènes de Constantine

Source : conservation de forêts de Constantine + traitement auteure 2024

Le massif du Djebel Ouachch : cette sous-zone couvre la majorité de la zone d'étude.

Les piémonts de Djebel Ouachch : situés au sud et au sud-est du massif, ils servent de zones de transition entre le massif montagneux et les plaines environnantes, et sont moins accidentés, mais néanmoins importants pour la gestion des eaux et des sols.

Les zones périphériques et contiguës sont réparties comme suit :

- **Massif de Oum Settas** : Ce massif, à proximité immédiate du Djebel El Ouahch. Il partage certaines caractéristiques géographiques avec Djebel El Ouahch, mais est géographiquement distinct.
- **Vallée de Hamma Bouziane** : Cette vallée, se trouve à l'ouest de la zone d'étude. La vallée de Hamma Bouziane joue un rôle crucial dans le drainage naturel et la production agricole en raison de leur sol fertile et de l'accès à l'eau.

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

- **Dépression Agricole d'El Aria et Collines de Zardezas** : Ces zones montrent une diversité d'utilisations des terres, allant de l'agriculture intensive dans les dépressions aux activités moins intensives dans les collines. Elles constituent des zones complémentaires aux activités dans le massif.

Le tableau ci-dessous présente une répartition détaillée des superficies forestières dans cinq sous-zones principales du territoire de la Wilaya. Il met en évidence la concentration des formations forestières dans ces régions, représentant 91 % de la couverture forestière totale :

**Tableau 4.1** Les sous zones principales de la wilaya de Constantine

Sous-zones	Superficie totale (ha)	Type de Forêt et superficie
<b>Massif de Djebel Ouahch</b>	7 275	- Forêt domaniale de Beni Selline : 959 ha - Forêt domaniale de Constantine : 487 ha - Deux forêts de type T2 : 1 438 ha
<b>Collines de Zardezas</b>	6 386	- Forêt T2 dans la commune de Zighout Youcef
<b>Piémonts d'El Aria</b>	4 032	- Forêt T2 dans les communes de Benbadis et d'Ain Abid
<b>Djebel Chettabah et Ouled Sellam</b>	4 728	- Forêt domaniale de Chettabah : 2 970 ha - Quatre forêts de type T2 : 1 758 ha
<b>Massif de Oum Settas</b>	2 573	- Forêt T2 dans les communes de Benbadis, Ain Abid et Ouled Rahmoun

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008 + traitement auteure 2023

Le grand massif de Djebel El Ouahch présente une diversité géographique, dominée par des zones montagneuses et leurs piémonts, mais aussi par des vallées et des dépressions agricoles. Cette diversité exige une gestion territoriale adaptée, tenant compte des spécificités écologiques de chaque sous-zone pour assurer un développement durable et la conservation des ressources naturelles.

### 4.3 Étude du milieu physique

Cette étude se concentre sur la présentation de la topographie et la géologie de la zone d'étude :

### 4.3.1 Topographie et géologie des sous-zones homogènes de l'aire d'étude

#### 4.3.1.1 Occupation du sol de la zone d'étude :

Pour l'ensemble de Djebel Ouahch, qui inclut les sous-zones mentionnées dans le tableau 4.2, l'occupation du sol la plus dominante est l'agriculture et l'agropastoralisme. Cette occupation est particulièrement marquée dans les piémonts et dans le massif lui-même, où les activités agropastorales couvrent une grande partie de la superficie.

**Tableau 4.2** Répartition des sous-zones homogènes de Djebel El Ouahch par utilisation des sols et superficie

Zone	Sous zone	Superficie (ha)	Superficie (%)	Occupation du sol
<b>Djebel Ouahch</b>	Dépression Agricole d'El Aria	7 238	3%	Agricole
	Massif de Oum Settas	8090	4%	Montagneuse
	Massif du Djebel Ouahch	24005	11%	Agro pastorale et Forestière
	Piémont Est d'El Aria	6382	3%	Forestière
	Piémonts de Djebel Ouahch	11970	5%	Agricole

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008

Dans l'ensemble, les pratiques économiques telles que l'agriculture et l'agropastoralisme, combinées à la typologie des terres, influencent à la fois les facteurs de déclenchement (liés aux activités humaines) et les facteurs de propagation (liés à la couverture forestière). Les zones avec une forte couverture forestière présentent des risques accrus de propagation rapide en cas d'incendie, tandis que les zones plus agricoles sont exposées à des risques d'allumage liés aux pratiques humaines. La gestion des interfaces entre ces terres agricoles et les zones forestières est donc cruciale pour prévenir et limiter les incendies dans cette région.

**Tableau 4.3** Répartition des utilisations des terres par superficie dans la zone d'étude

Utilisation des Terres	Superficie (ha)
Cultures	17 619
Cultures érodées (C+E)	5 985
Cultures de parcours (C+P)	9 929
Forêt	4 819
Maquis	3 951
Maquis supplémentaires	323
Parcours	9 050
Plan d'eau	45

#### Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

Reboisement	5 494
Urbanisation	470

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008

La répartition des utilisations des terres dans la zone d'étude influence significativement le risque d'incendie de forêt en fonction des activités économiques et des types de couvert végétal présents.

La prédominance des cultures (30,54 %) et des parcours agricoles (17,21 % combinant cultures et pâturage) présente un risque modéré de départ de feu, car les pratiques agricoles peuvent inclure des brûlis pour le nettoyage des terres ou l'élimination des résidus de récolte. Cependant, en raison de la faible couverture forestière dans ces zones, le risque de propagation rapide des incendies est limité, bien que les interfaces entre terres agricoles et forêts soient des points critiques. Les parcours à eux seuls, représentant 15,69 %, sont souvent des zones ouvertes où l'activité pastorale peut augmenter le risque d'incendie, notamment si des pratiques de brûlis sont mal contrôlées.

Les terres affectées par l'érosion (10,38 %) posent également un problème pour la régénération post-incendie. La dégradation des sols peut rendre la végétation plus vulnérable aux incendies, réduisant la capacité des sols à retenir l'humidité et augmentant ainsi le risque d'ignition dans des conditions sèches. De plus, l'érosion empêche une restauration efficace des terres après un incendie, augmentant les risques de désertification dans certaines zones.

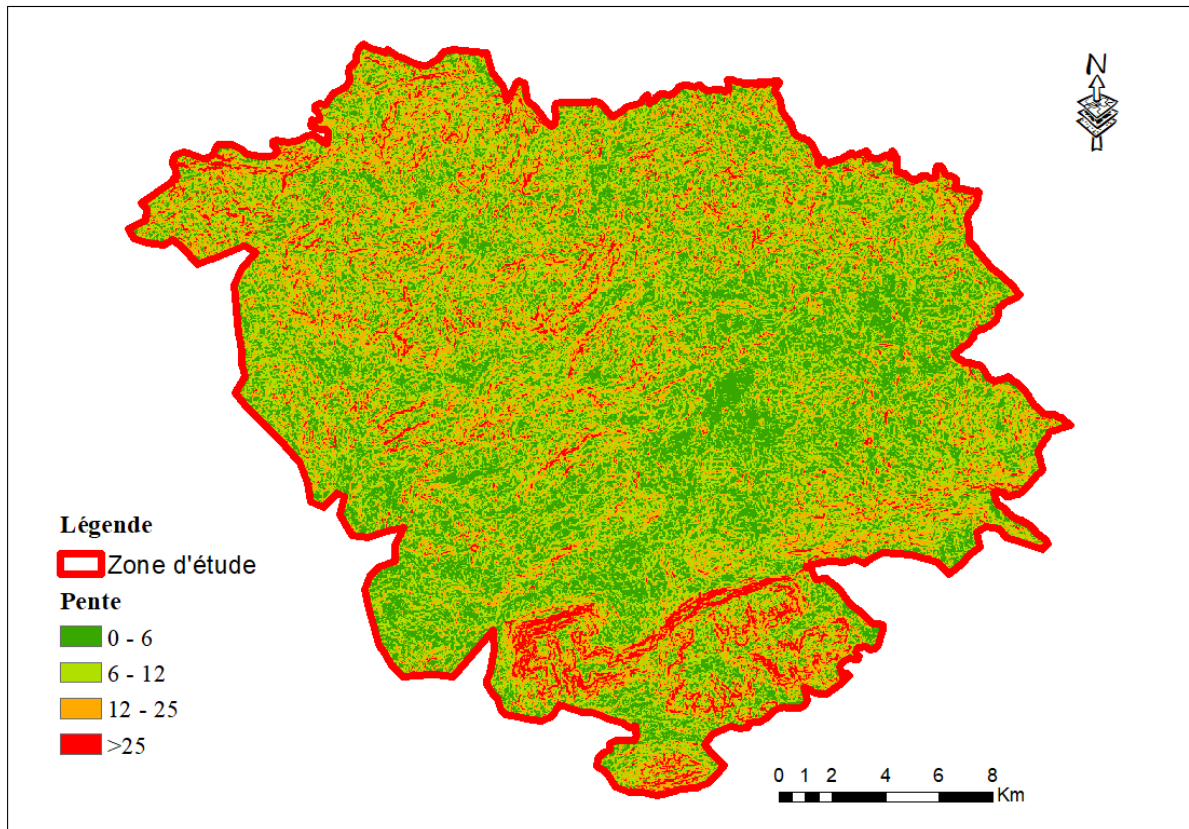
Les forêts (8,35 %), bien que couvrant une petite proportion de la superficie, constituent une source majeure de combustible en cas d'incendie. Leur présence dans une zone à forte pression agricole et à interface avec des parcours et des cultures augmente les risques de départs de feux accidentels. La faible proportion de maquis et maquis supplémentaires (7,41 %) peut être un facteur aggravant, car ces formations végétales sont souvent denses et inflammables, contribuant à la propagation rapide des incendies.

Le reboisement (9,52 %), bien que positif pour la restauration des terres, peut augmenter temporairement le risque d'incendie, notamment si les jeunes plantations ne sont pas correctement gérées et que des zones ouvertes créent des conditions favorables à la propagation du feu. Le faible pourcentage d'urbanisation (0,81 %) signifie une faible pression urbaine sur les terres naturelles, ce qui est un point positif pour la réduction des risques d'incendie en zones habitées, bien que cela ne diminue pas forcément les risques pour les zones forestières elles-mêmes.



#### 4.3.1.2 Caractéristiques et potentiels du relief de la zone d'étude par sous-zone :

Le relief du massif de Djebel El Ouahch et ses sous-zones à un impact direct sur les risques d'incendie de forêt, influençant à la fois la propagation des feux et la vulnérabilité des différents types de végétation et d'activités économiques.



**Figure 4.4:** Carte des pentes du grand massif de Djebel El Ouahch

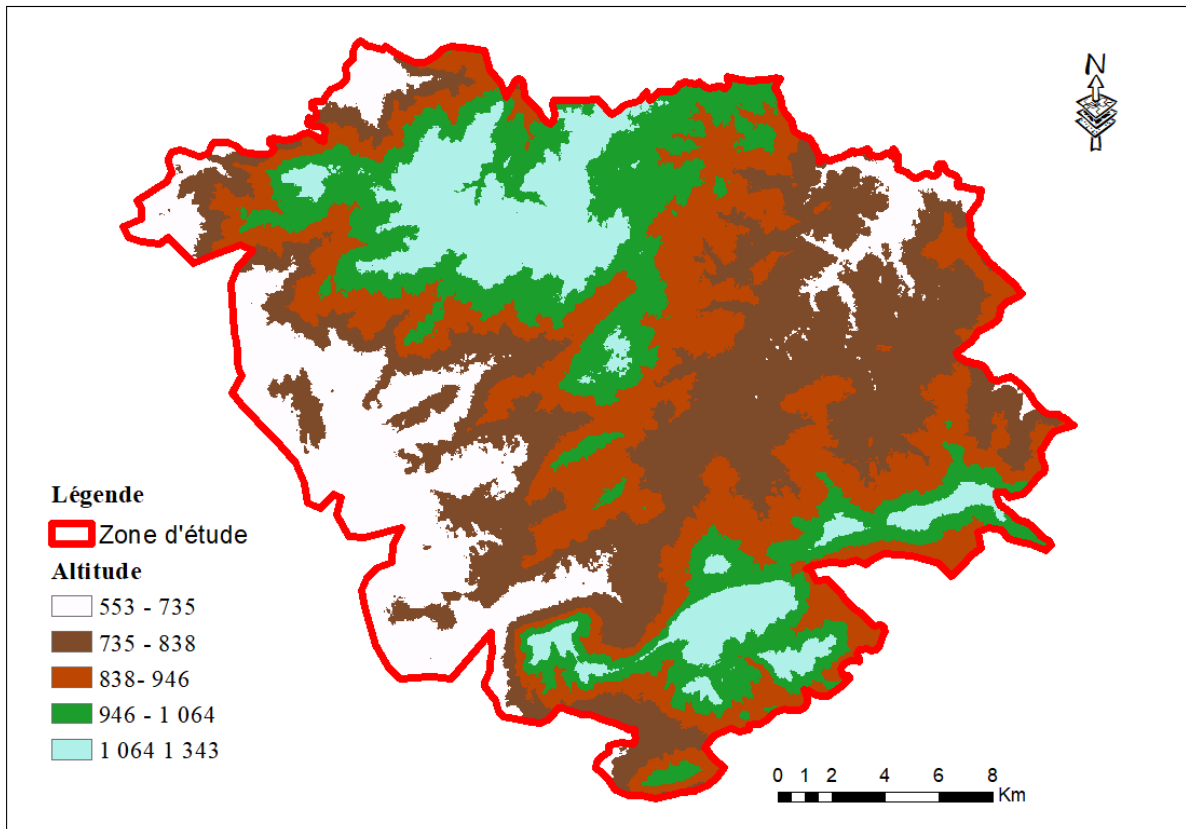
Source : OpenDEM (2022)

+ traitement auteure 2023

Dans le massif de Oum Settas, le relief montagneux accidenté avec des altitudes variant entre 800 et 1 000 mètres et un terrain rocheux constitue une zone particulièrement vulnérable aux incendies. Les pentes abruptes et la forte altitude facilitent la propagation rapide des incendies, car les feux ont tendance à monter plus vite sur les terrains escarpés, ce qui complique les efforts de contrôle et d'extinction. De plus, la topographie difficile rend l'accès aux équipes d'intervention plus complexe, augmentant le temps de réponse en cas d'incendie. Cela en fait une zone à haut risque, notamment dans les périodes de sécheresse.

Les piémonts du massif de Djebel Ouahch, avec des pentes fortes (12 à 25%), présentent également un risque élevé de propagation des feux, en particulier dans les zones situées à proximité du massif principal. Les feux se propagent plus facilement sur ces pentes, et les pentes

douces (inférieures à 12%) dans les piémonts sud offrent moins de résistance à la propagation des incendies, mais facilitent en revanche les efforts de lutte et d'accès pour les équipes.



**Figure 4.5** Carte d'altitudes

Source : OpenDEM (2022)

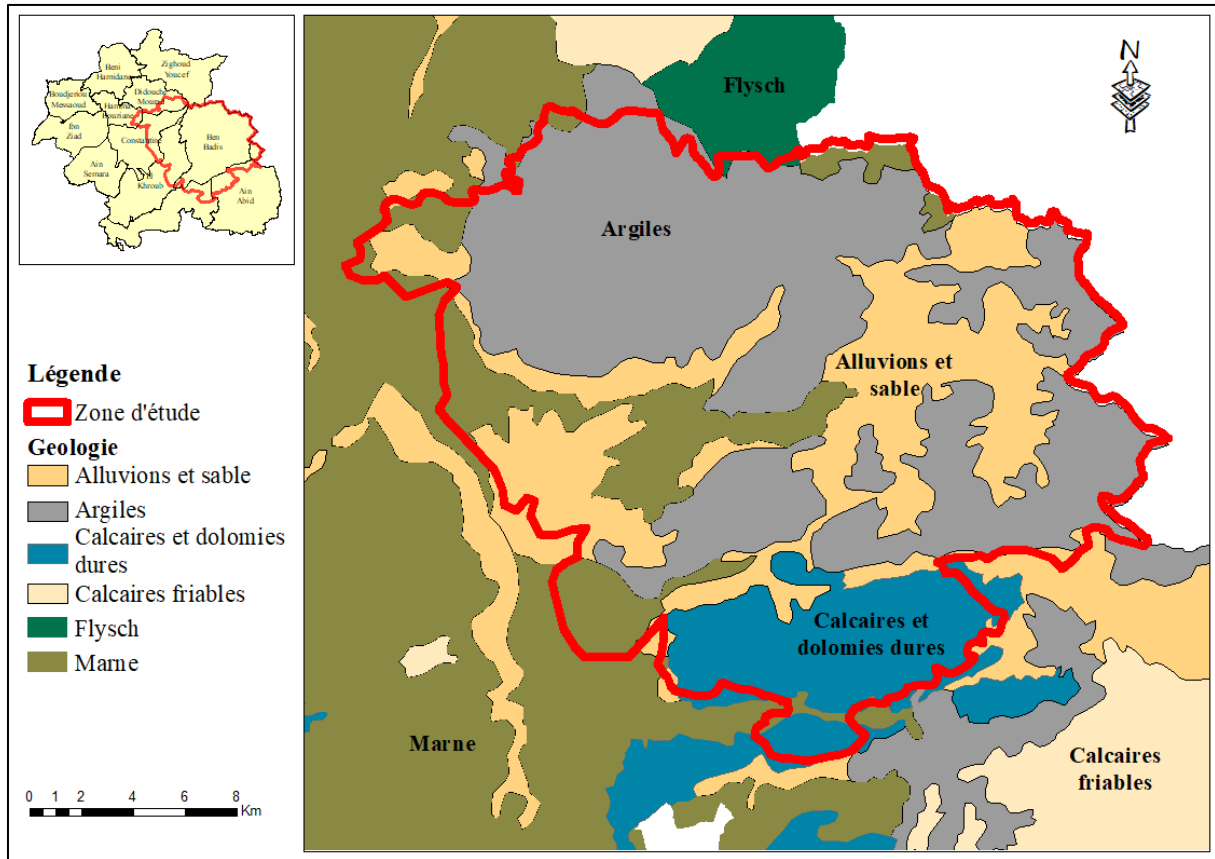
+ traitement auteure 2023

L'altitude plus basse (600 à 800 mètres) dans les piémonts sud les rend potentiellement moins vulnérables aux incendies de haute altitude, mais ces zones nécessitent toujours une gestion proactive pour éviter les départs de feu liés aux activités agropastorales.

La dépression agricole d'El Aria, avec ses pentes faibles inférieures à 12%, présente une situation relativement moins risquée pour la propagation des incendies, car les terrains plats ralentissent la progression des feux. Cependant, cette zone reste vulnérable aux départs de feu accidentels liés aux activités agricoles, qui y sont prédominantes. Le relief de collines favorise également l'agriculture, mais la couverture végétale clairsemée dans certaines parties pourrait accroître le risque d'ignition pendant les périodes de sécheresse prolongée.

#### 4.3.1.3 Caractéristique géologique du grand massif de Djebel El Ouahch

La lithologie de la zone d'étude est diverse, reflétant la complexité géologique de la région :



**Figure 4.6** Carte géologique de la zone d'étude

Source : conservation des forêts de Constantine+ traitement auteure 2023

Ces données illustrées par la carte ci-dessus mettent en évidence une variété de formations rocheuses, chacune ayant des implications spécifiques sur la stabilité des sols, l'érosion, et la gestion des ressources naturelles.

Dans le massif de Oum Settas, les calcaires et dolomies dominent. Ces roches dures et résistantes jouent un rôle crucial dans la stabilité des sols de la région. Leur forte perméabilité peut favoriser l'infiltration des eaux et contribuer à la formation d'aquifères souterrains, mais dans le même temps, elle réduit la quantité d'eau de surface disponible, ce qui peut avoir un impact sur la végétation locale et la régénération après des incendies. En revanche, les piémonts du Djebel Ouahch sont constitués principalement de grès, une roche sédimentaire plus tendre et sujette à l'érosion. Ce type de substrat influence fortement les propriétés des sols, rendant ces zones plus vulnérables à l'érosion sous l'effet de précipitations intenses. Ces caractéristiques géologiques peuvent compliquer la gestion des ressources et des infrastructures dans les zones piémontaires, surtout en ce qui concerne la stabilisation des sols.

La région sud du massif, où prédominent les argiles, marnes, et alluvions, est particulièrement sensible à l'érosion. Les argiles et marnes, en raison de leur faible perméabilité et de leur capacité à retenir l'eau, créent des terrains instables lors des périodes de fortes pluies, augmentant les risques de glissements de terrain et dégradations du sol. Cela influence directement la végétation et la vulnérabilité aux incendies, car ces sols instables ne favorisent pas une couverture végétale dense, augmentant ainsi l'exposition aux risques d'incendies.

Les alluvions et sables dans cette région, ainsi que dans la dépression agricole d'El Aria, sont des dépôts sédimentaires issus de l'activité fluviale. Ces sols sont légers et peu consolidés, ce qui les rend propices à l'agriculture mais vulnérables à l'érosion éolienne et à la perte de nutriments, affectant ainsi la capacité de la région à régénérer rapidement après des perturbations telles que les incendies de forêt.

### 4.3.1.4 Typologie des utilisations des terres et des activités économiques dans le grand massif de Djebel el Ouahch

Les caractéristiques de l'utilisation des terres et des activités économiques dans le massif de Djebel El Ouahch influencent directement le risque et la propagation des incendies de forêt de plusieurs façons, en fonction de la typologie des zones et de leur couverture végétale. Voici comment ces caractéristiques impactent les risques d'incendie dans chaque sous-zone :

1. **Massif de Oum Settas** : Cette zone, caractérisée par des parcours de montagne et une forte couverture forestière, présente un risque important d'incendies. Les parcours de montagne, où les activités pastorales sont courantes, peuvent augmenter la vulnérabilité au feu en raison des pratiques de brûlis ou d'incendies involontaires provoqués par les activités humaines. La forte densité forestière favorise également la propagation rapide du feu, notamment dans les périodes sèches ou subhumides.
2. **Massif de Djebel Ouahch (Piémonts)** : Les terres agropastorales de cette zone sont utilisées pour l'agriculture et l'élevage, ce qui peut accroître les risques d'incendies à travers des pratiques comme le brûlage des résidus agricoles ou le défrichage. Bien que cette région bénéficie d'une certaine humidité, la présence de forêts et d'espaces agropastoraux crée des conditions favorables à la propagation du feu si un incendie survient. La proximité entre les terres agricoles et les forêts rend les interfaces entre les zones agricoles et forestières particulièrement vulnérables.
3. **Piémonts de Djebel Ouahch (Sud)** : Cette région étant principalement agricole avec une faible couverture forestière, les risques d'incendie sont généralement plus faibles. Cependant, les terres agricoles subhumides peuvent être sujettes à des pratiques agricoles qui, si elles ne sont pas bien contrôlées, peuvent provoquer des incendies,

notamment lors des périodes de sécheresse. La faible couverture forestière réduit la propagation rapide des feux, mais l'utilisation intensive des sols pour l'agriculture peut rendre certaines zones plus vulnérables aux départs de feu liés à l'activité humaine.

4. **Dépression Agricole d'El Aria** : La dépression agricole est dominée par des activités agricoles et agropastorales, avec une faible présence de maquis et de reboisements. Cette configuration rend la zone moins susceptible à de grands incendies de forêt, mais les pratiques agropastorales, comme l'utilisation du feu pour le nettoyage des terrains ou le défrichage, peuvent poser des risques d'incendies locaux. La faible couverture végétale réduit la possibilité de propagation à grande échelle, mais les zones de maquis clairs peuvent tout de même constituer des foyers pour des départs d'incendie.

**Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch**

**Tableau 4.4** Récapitulation des caractéristiques de la zone d'étude : Grand massif de Djebel El Ouahch

Sous zone	Superficie	Relief	Lithologie	Climat	Occupation du sol	Typologie
<b>Massif de Oum Settas</b>	8 090 Ha (4%)	Massif montagneux accidenté et rocheux. Altitude 800 à 1 000 mètres.	Calcaires et dolomies dures.	Subhumide doux. Pluviométrie = 500 à 600 mm/an.	- Dominance des parcours de montagne et de piémonts 4 866 Ha, soit 60% de la sous zone. - Superficies forestières = 2 573 Ha soit 32% de la sous zone de maquis clairs sur pentes fortes (forêt T <sub>2</sub> Benbadis, Ain Abid et Ouled Rahmoun).	<b>Montagne subhumide avec dominance de parcours de montagne.</b>
<b>Dépression agricole d'El Aria</b>	7 238 Ha (3%)	Collines à pentes faibles (< 12%).	Alluvions et sables.	Bonne pluviométrie de 600 à 700 mm/an.	- Sous zone agricole et agropastorale - Occupation forestière insignifiante : 328 Ha de reboisement et 115 Ha de maquis clair.	<b>Dépression agricole subhumide.</b>
<b>Piémonts de El Aria</b>	6 382 Ha (3%)	Piémonts à pentes fortes > 12%.		Bonne pluviométrie de 600 à 700 mm/an.	- Occupation du sol à dominance forestière constitué essentiellement de reboisement appartenant à la forêt T <sub>2</sub> communes de Benbadis, Ain Abid (4 032 Ha).	<b>Piémonts forestiers subhumides.</b>
<b>Massif de Djebel Ouahch</b>	24 005 Ha (11%)	Piémonts à pentes fortes (12 à 25%).	Substrat à base de grés.	Humide doux. Pluviométrie = 700 à 1 000 mm/an.	- Occupation du sol à dominance agropastoral (70%). - Occupation forestière = 7 275 Ha soit 30% de la sous zone. F.D de Beni Selline = 959 Ha. F.D de Constantine = 4 878 Ha.	<b>Piémonts humides à caractère dominant agropastoral.</b>

**Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch**

					Deux (02) forêts de type T <sub>2</sub> totalisant 1 438 Ha.	
<b>Piémonts de Djebel Ouahch</b>	<b>11 970 Ha (5%)</b>	<b>Piémonts à dominance de pentes faibles (&lt; 12%). Altitude : 600 à 800 mètres.</b>	<b>- Argiles et marnes. - Alluvions et sables. - Terrain instables sensibles à l'érosion.</b>	<b>Subhumide doux. Pluviométrie = 600 à 800 mm/an.</b>	<b>- Occupation du sol essentiellement agricole. - Occupation forestière = 264 Ha (cantour Meridj de la F.D de Constantine).</b>	<b>Piémonts agricoles subhumides.</b>

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008

### 4.3.2 Hydrographie

La wilaya de Constantine appartient à la région hydrographique de Constantine – Seybouse – Mellegue, réputée pour ses nombreuses zones humides, avec un total de 159 recensées. Le bassin versant du Côtier Constantinois comprend la majorité de ces zones humides. Ces zones maintiennent une biodiversité remarquable grâce à une accumulation d'eau permanente. Les abords des cours d'eau et des oueds sont riches en forêts galerie composées d'espèces ligneuses à feuilles caduques.

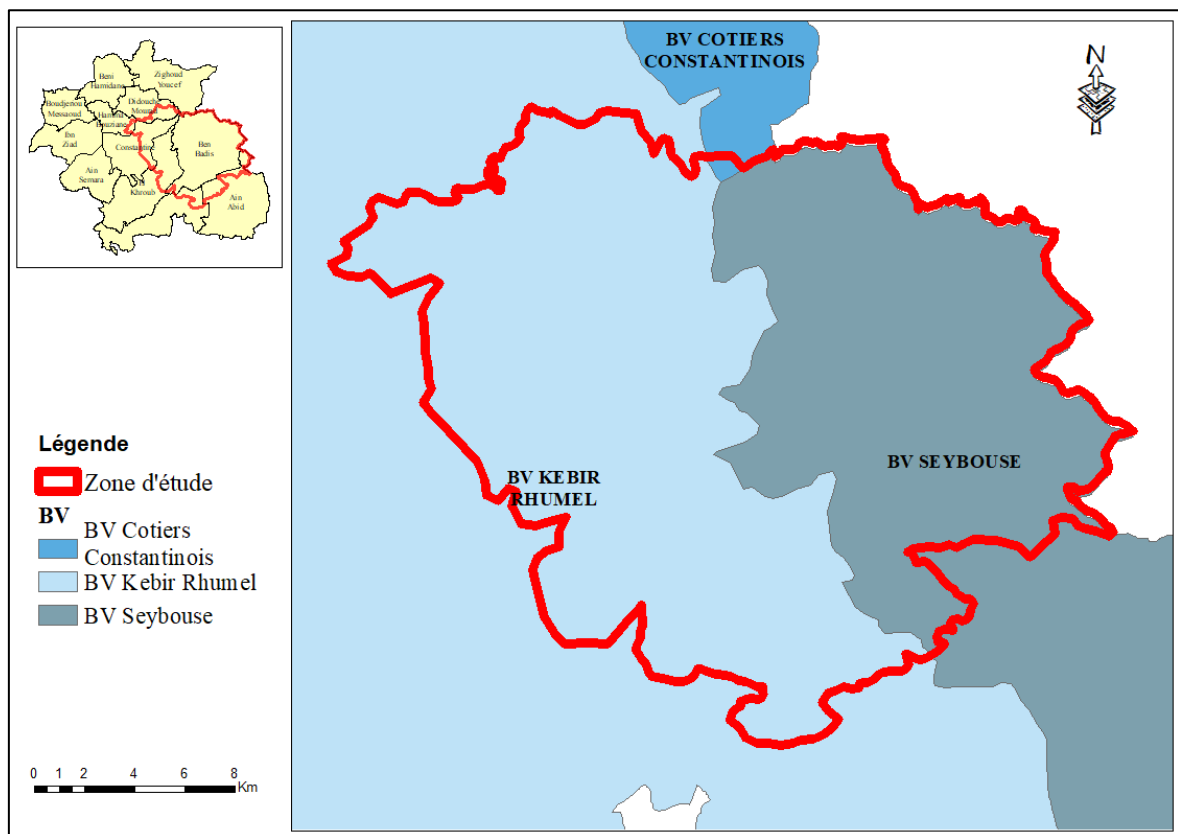


Figure 4.7 Carte du bassin versant du massif de Djebel El Ouahch

Source : conservation des forêts de Constantine + traitement auteure 2024

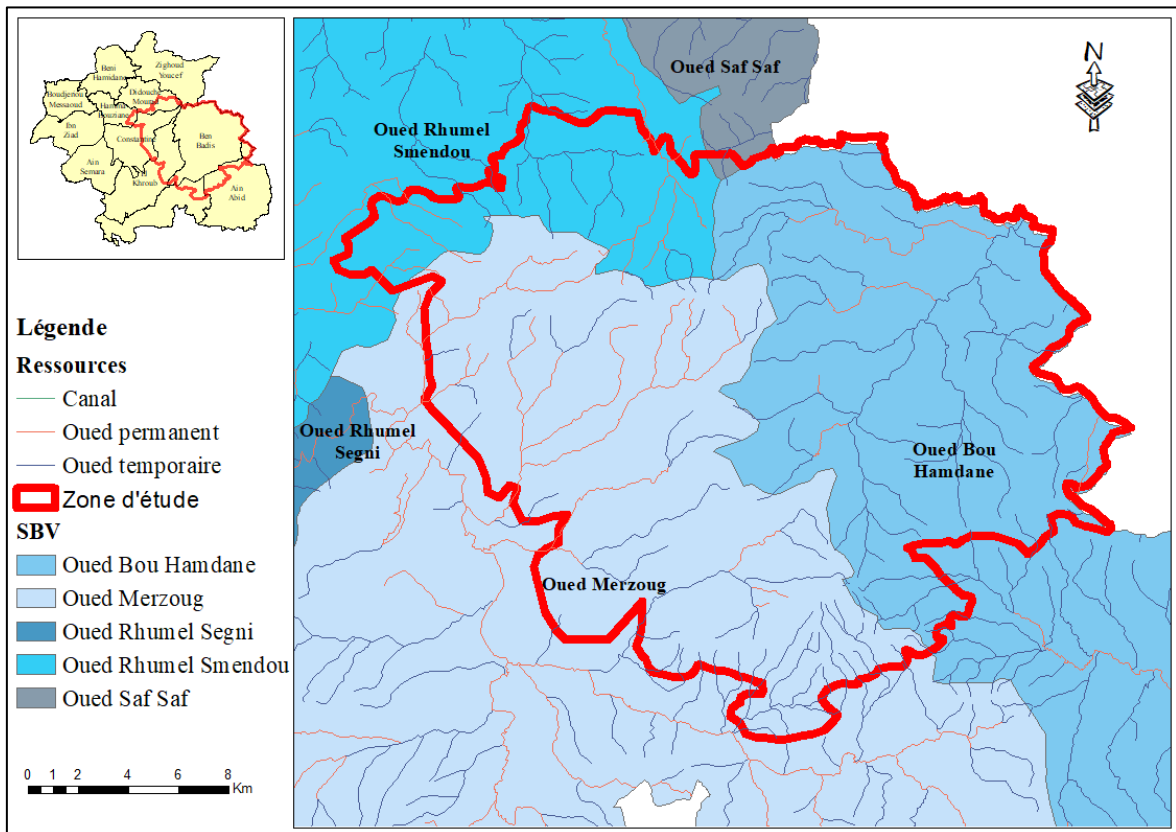
Le bassin versant Côtier Constantinois contient les deux tiers des réservoirs et retenues de la région, presque tous les marais et marécages, ainsi que les trois quarts des cours d'eau et des estuaires. En revanche, Le bassin versant de Kebir-El-Rhumel est l'un des plus vastes et importants de la région de Constantine, en Algérie. Il abrite une grande partie des réservoirs et retenues hydrauliques qui alimentent en eau potable et en irrigation les zones agricoles environnantes. Ce bassin versant comprend également une majorité des cours d'eau de la région, dont l'oued Rhumel, qui traverse les gorges de Constantine, et l'oued



## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

Kebir, qui s'étend jusqu'à la Méditerranée. Les écosystèmes fluviaux du bassin sont caractérisés par la présence de nombreux oueds, de zones humides intermittentes, ainsi que de sites de confluence qui jouent un rôle essentiel dans le contrôle des crues et la préservation de la biodiversité locale.

Le bassins de Seybouse est relativement moins riches en zones humides, avec seulement neuf recensées, dont la moitié sont des barrages ou de grandes retenues collinaires.



**Figure 4.8** Carte des sous bassins versant du massif de Djebel El Ouahch

Source : conservation des forêts de Constantine + traitement auteure 2024

Le grand massif de Djebel El Ouahch fait partie intégrante du bassin versant de Kebir-El-Rhumel, qui comprend un réseau complexe de sous-bassins versants, tels que l'oued Bou Hamdane, l'oued Merzoug, l'oued Rhumel Segni, et l'oued Saf Saf. Ces principaux cours d'eau, marqués sur la carte, jouent un rôle essentiel en agissant comme des barrières naturelles pouvant ralentir la propagation des incendies. Les zones riveraines, en particulier là où l'eau est présente en permanence, maintiennent une humidité suffisante qui réduit la combustibilité et donc les risques de feu.

Cependant, après un incendie, les pentes abruptes du massif de Djebel El Ouahch deviennent extrêmement vulnérables à l'érosion, surtout dans les secteurs où la végétation a été détruite.

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

Les oueds, tels que Rhumel Segni et Saf Saf, peuvent alors subir une augmentation significative des sédiments, altérant la qualité de l'eau et augmentant les risques de glissements de terrain.

### 4.3.3 Étude du couvert végétal

Les forêts de Constantine jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre environnemental.

La couverture forestière de la wilaya de Constantine s'étend sur une superficie de 28 074 hectares, représentant un taux de boisement de 12 % de la superficie totale de la région. Cette proportion souligne l'importance des espaces boisés dans l'écosystème local, contribuant à la biodiversité, à la régulation climatique et à la protection des sols contre l'érosion.

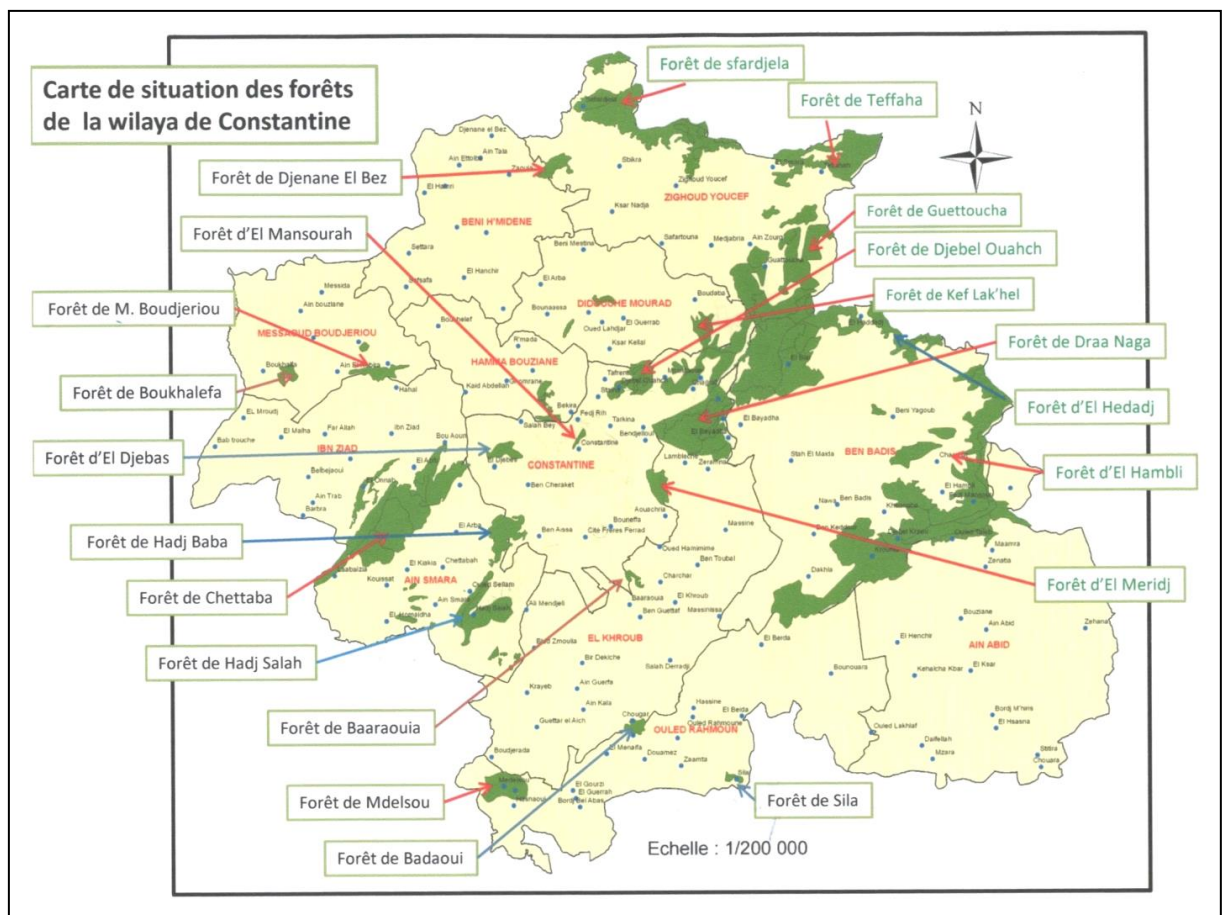


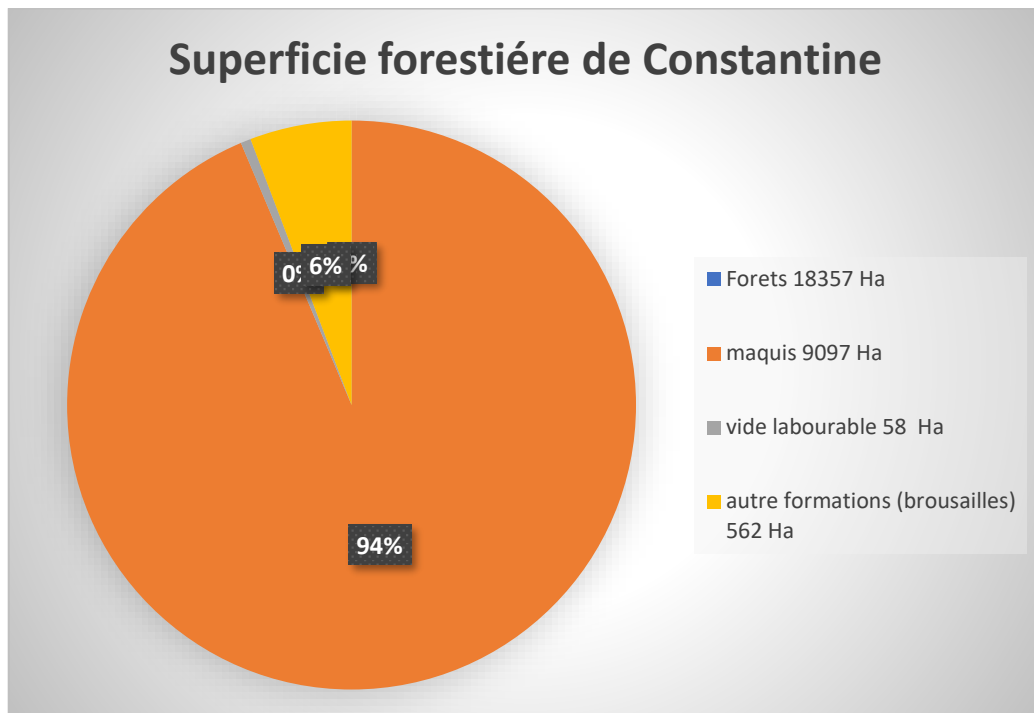
Figure 4.9 situation des forêts de Constantine

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008

Elle compte 21 unités forestières, dont les plus vastes se trouvent dans les communes de Constantine, El Khroub et Ain Smara. Ces unités forestières abritent une grande diversité

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

d'espèces fauniques qui vivent en harmonie avec leur environnement, et qu'il est essentiel de recenser. (SDATW).



**Figure 4.10** Superficie forestière de Constantine.

Source : schéma directeur d'aménagement de la wilaya de Constantine 2008

La répartition des différentes couvertures végétales dans la wilaya de Constantine se présente comme suit : les forêts occupent une superficie de 18 357 hectares, représentant 65,40 % de la couverture totale. Les maquis couvrent 9 097 hectares, soit 32,4 % de la superficie. Les zones vides labourables s'étendent sur 58 hectares, représentant 0,2 %, tandis que les autres formations, telles que les broussailles, occupent 562 hectares, ce qui correspond à 2 % de la surface totale.

**Tableau 4.5** Superficie d'essence forestiers

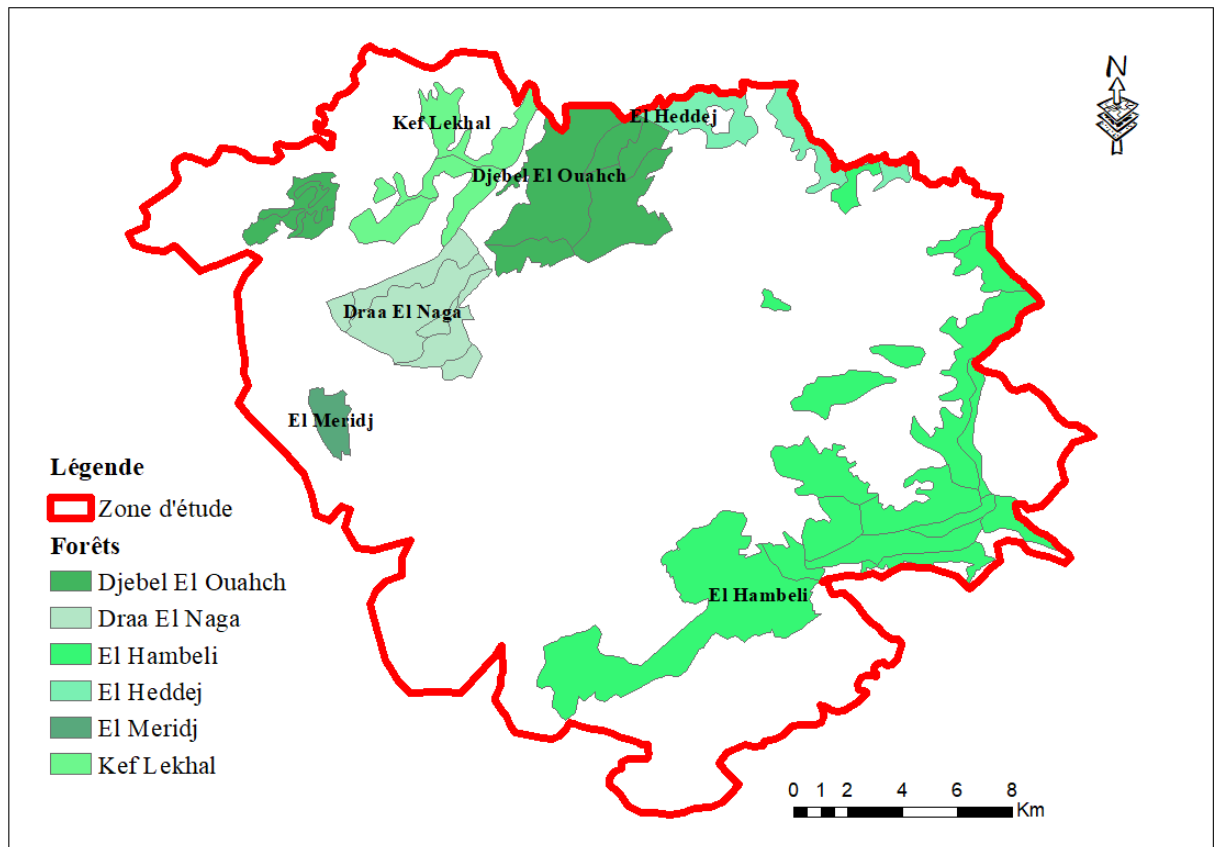
Type d'essence	Superficie
Pin d'Alep	5 173Ha
Chêne liège	2 258 Ha
Pin pignon	1 226 Ha
Eucalyptus	1 249 Ha
Cyprès	785 Ha
Autres	427 Ha

Source : Conservation des forêts de Constantine 2008

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

Le pin d'Alep est l'essence forestière dominante, couvrant environ 5173 hectares, suivi par une chênaie s'étendant sur 2258 hectares. D'autres essences enrichissent ce patrimoine noble, telles que le pin pignon, le cyprès et l'eucalyptus.

Les boisements, principalement composés de résineux tels que le pin d'Alep et le pin pignon, sont particulièrement vulnérables aux incendies. La régénération naturelle de ces espèces devient extrêmement difficile après deux incendies successifs, ce qui nécessite une attention et des mesures de protection accrues pour préserver ces forêts.



**Figure 4.11** Carte de localisation des forêts dans le massif de Djebel El Ouahch

Source : conservation des forêts de Constantine + traitement auteure 2024

### 4.3.3.1 Les caractéristiques des différentes essences forestières :

Ce tableau 4.6 présente un aperçu des principales espèces végétales présentes dans les régions méditerranéennes, en mettant l'accent sur leurs habitats, morphologies, adaptations physiologiques, ainsi que leurs rythmes de croissance. Chaque espèce est adaptée aux conditions spécifiques de leur environnement, notamment en matière de faible disponibilité en eau et de résistance aux incendies.

**Tableau 4.6** Caractéristiques des essences forestières

Type d'essence	Habitat et répartition	Morphologie	Physiologie	Croissance	Source
<b>Chêne-liège (Quercus suber)</b>	Se trouve spécifiquement dans les régions méditerranéennes Pousse souvent en zones montagneuse	Jusqu'à 20mètres de hauteur, De feuilles persistantes Ecorce épaisse, fissuré	Adapté aux conditions de faible disponibilité en eau	Lente croissance, Ce qui rend la gestion durable des chênes lièges essentielle	Quinto-Canas et al. 2021(Quinto-Canas et al., 2021) Simonson et al. 2014(Simonson & Allen, 2014)
<b>Cyprès (Cupressus sempervirens)</b>	Principalement dans le bassin méditerranéen	-De 20 à 40mètres -Caractérisé par des petites feuilles, et une écorce épaisse	-grâce à leur feuilles écailleuse, ce type de végétation réduisent l'évaporation de l'eau	Relativement lente mais se régénèrent bien après les incendies.	Aljos Farjon 2005(Aljos Farjon, 2005) Walter Larcher 2003(Walter Larcher, 2003)

#### Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

<b>Eucalyptus</b>	Sont originaires d'Australie, mais on les trouve également en Nouvelle-Guinée, en Indonésie, aux Philippines et dans d'autres régions tropicales et tempérées.	De 10 à 100mètres. Longues feuilles et étroite. Ecorce lisse et fibreuse.	Une capacité à réduire l'évaporation de l'eau.	Croissance rapide	Ian Brooker 2006(Ian Brooker, 2006)  Whitehead et al. 2004(Whitehead & Beadle, 2004)
<b>Maquis</b>	Principalement en zone méditerranéen	Composé des arbustes : Arbousier (Arbutus unedo) Ciste (Cistus spp.) Romarin (Rosmarinus officinalis) Genêt (Genista spp.) Bruyère (Erica spp.) Chêne vert (Quercus ilex) Olivier sauvage	Résistant aux incendies grâce à ces adaptation à réduire la perte d'eau	Croissance relativement lente	Naveh et al. 1980(Naveh & Whittaker, 1980)
<b>Pin d'Alep (Pinus halepensis)</b>	Bassin méditerranéen, poussant principalement en Espagne, France, Italie, Grèce, Turquie et Afrique du Nord	hauteur de 15 à 25 mètres, Feuille et écorce fines	Adaptation à la sécheresse grâce à ces racines profonde	Croissance rapide	P. Quezel 1992(P. Quezel, 1992)  Nathan 2004(Nathan, 2004)

#### Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

<b>Pin pignon (Pinus pinea)</b>	Bassin méditerranéen, poussant principalement en Espagne, France, Italie, Grèce, Turquie et Afrique du Nord	Hauteur de 20 à 25 mètres. Couronne large en forme de parasole	Résistant aux conditions de sécheresses	Croissance rapide	Mutke et al. 2005(Mutke et al., 2005)  Lindner et al. 2010(Lindner et al., 2010)
---------------------------------	---	---	---	-------------------	--

Source : Auteure 2024

Le **chêne-liège** et le **cyprès** montrent une forte résilience grâce à leur écorce épaisse et leur capacité à limiter l'évaporation de l'eau. Bien que leur croissance soit lente, ces espèces jouent un rôle important dans la durabilité des forêts méditerranéennes. L'**eucalyptus**, quant à lui, se distingue par sa croissance rapide et son adaptation à divers environnements, bien qu'il soit originaire d'Australie.

Le **maquis** méditerranéen, composé de diverses espèces d'arbustes, est particulièrement résistant aux incendies grâce à des adaptations spécifiques pour réduire la perte d'eau. Les **pins** (pin d'Alep et pin pignon) sont bien adaptés à la sécheresse et se caractérisent par une croissance rapide, ce qui les rend précieux dans les zones sujettes aux incendies, où la régénération rapide est cruciale pour la stabilisation des sols.

#### **4.3.4 Étude climatique**

Lors de l'analyse climatique de notre zone d'étude de 577 km<sup>2</sup>, nous avons dû utiliser 24 stations météorologiques situées en dehors de la zone d'étude en raison de l'absence d'infrastructures météorologiques internes. L'utilisation de ces stations externes a permis de couvrir adéquatement l'ensemble de la région et de disposer de données représentatives.

Pour pallier l'absence de données internes, nous avons appliqué la technique de l'interpolation spatiale, et plus précisément la méthode du Kriging, une méthode géostatistique couramment utilisée dans ArcMap. Le Kriging permet de prédire les valeurs d'une variable continue dans un espace géographique en utilisant les corrélations spatiales des données disponibles. Autrement dit, cette méthode repose sur l'idée que des points géographiques proches auront des valeurs plus similaires que des points éloignés.

Cette technique est particulièrement utile pour des applications telles que la cartographie des précipitations, des températures, de la qualité de l'air, et d'autres données environnementales.

Les stations situées hors de la zone d'étude fournissent non seulement une couverture géographique adéquate, mais elles disposent également d'historiques de données plus longs et plus complets, ce qui est crucial pour des analyses climatiques à long terme. Ainsi, grâce à l'interpolation spatiale par Kriging, nous avons pu estimer les données manquantes de manière fiable et réaliser une analyse climatique exhaustive de notre zone d'étude.

##### **4.3.4.1 Les stations climatiques**

Pour entamer cette étude climatique, nous avons collecté des données détaillées sur les précipitations, les températures maximales et les températures minimales provenant de 24 stations météorologiques. Ces données couvrent une période de 31 ans et ont été fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Cette vaste période d'observation permet d'obtenir une analyse climatique approfondie et représentative des tendances et variations climatiques régionales.

**Tableau 4.7** Les caractéristiques des stations météorologiques

Nom des stations	Latitude	Longitude	Période d'observation
<b>El Milia</b>	36°8'	6°28'333	1990-2021
<b>Ain Kechera</b>	36°75'	6°43'	1990-2021
<b>Ouled Messaouda</b>	36°71'102	6°08'2352	1990-2021
<b>Sidi Marouf</b>	36°63'921	6°27'4001	1990-2021
<b>Hamala</b>	36°57'	6°34'	1990-2021
<b>Beni Aziz</b>	36°46'67	5°65'	1990-2021



<b>El Kheneg</b>	36°45'803	6°47'6833	1990-2021
<b>Hamma Bouziane</b>	36°43'33	6°56'667	1990-2021
<b>Fourchi</b>	36°35'626	6°59'8548	1990-2021
<b>Koudiat Tendart</b>	36°31'811	5°90'957	1990-2021
<b>Chebabta (El Hammam)</b>	36°31'332	5°63'1771	1990-2021
<b>Fedj Mzala (Ferdjioua)</b>	36°28'3	6°61'7	1990-2021
<b>Boumalek M, C,</b>	36°28'	6°23'	1990-2021
<b>Constantine ANRH</b>	36°28'	6°62'	1990-2021
<b>Belaa</b>	36°18'3	5°25'	1990-2021
<b>Chelghoum Laid Ville</b>	36°16'	6°17'	1990-2021
<b>Mechta Serradj</b>	36°15'878	7°07'746	1990-2021
<b>Bir El Arch</b>	36°13'	5°84'	1990-2021
<b>Tadjenanet</b>	36°12'	5°99'	1990-2021
<b>Ouled Naceur</b>	36°11'192	6°88'3341	1990-2021
<b>Mechta Melha (Mchira)</b>	36°09'355	6°23'9336	1990-2021
<b>Bir Drimil</b>	36°03'525	6°41'2485	1990-2021
<b>Oum El Bouaghi</b>	35°88'	7°12'	1990-2021
<b>Batna</b>	35°6'	6°2'	1990-2021

Source : ANRH + traitement auteure 2024

#### 4.3.4.2 Les Paramètres climatiques :

Pour discuter des paramètres climatiques en se basant sur un échantillon représentatif des stations météorologiques, il est nécessaire de définir des critères de sélection pertinents (Voir tableau 4.8 ci-dessous).

Parmi ces critères, on trouve d'abord les critères géographiques. Il est essentiel d'inclure une répartition spatiale des stations, afin qu'elles représentent différentes zones géographiques et couvrent ainsi une diversité de conditions climatiques régionales. Cela implique de sélectionner des stations situées en altitude, dans des zones côtières, ainsi que dans des zones intérieures. La proximité des reliefs ou des grandes étendues d'eau est également un facteur important, car les stations situées près des montagnes ou des rivières peuvent révéler des variations climatiques particulières qui méritent d'être analysées.

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

En ce qui concerne les critères climatiques, la variabilité des précipitations est un élément clé. Les stations présentant des variations significatives des précipitations, qu'elles soient annuelles ou saisonnières, permettent d'avoir un aperçu des différents régimes pluviométriques. De plus, il est pertinent de choisir des stations qui enregistrent des températures maximales et minimales extrêmes, afin d'identifier des tendances liées aux événements climatiques exceptionnels.

Les critères temporels sont également importants, notamment la durée d'observation. Les stations doivent fournir des données continues sur toute la période d'étude, de 1990 à 2021, afin d'éviter les biais dans l'analyse. Enfin, il est nécessaire de prendre en compte des critères spécifiques à la variabilité régionale. Cela inclut l'influence locale de facteurs comme l'urbanisation, l'agriculture ou la proximité des interfaces forêt-habitat, qui peuvent influencer sur la variation des paramètres climatiques. De plus, il est utile de sélectionner des stations appartenant à des zones climatiques distinctes, telles que les zones arides, semi-arides ou méditerranéennes, pour couvrir une large gamme de conditions climatiques.

**Tableau 4.8** Critères des stations météorologiques

Critères géographiques	Critères climatiques	Critères temporels
Répartition spatiale	Variabilité des précipitations	Durée d'observation
La proximité des reliefs ou des grandes étendues d'eau	Températures maximales et minimales extrêmes	Influence locale
/	/	Zones climatiques distinctes

Source : auteure 2024

Ainsi, quatre stations représentatives ont été sélectionnées : Elles offrent une diversité intéressante sur le plan de la topographie, avec **El Milia** située en montagne, **Batna** dans les Hauts Plateaux, et **Constantine** dans une zone urbaine. De plus, elles englobent différents types de climats. El Milia permet d'analyser l'influence de l'altitude, tandis que Batna représente un climat continental plus sec, et Constantine reflète les effets de l'urbanisation. Enfin la station d'El Hamma peut être considérée comme complémentaire en raison de sa situation géographique et de ses caractéristiques climatiques intermédiaires.

### 4.3.4.2.1 Précipitation :

Pour analyser les précipitations mensuelles sur une période de 31 ans (de 1990 à 2021), nous avons sélectionné quatre stations climatiques représentatives. Cette sélection nous permet de comparer les valeurs des précipitations mensuelles entre les stations et d'identifier les mois les plus secs au cours de cette période pour chacune d'elles. En analysant ces données, nous

## Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch

pouvons mieux comprendre les variations saisonnières et les périodes de sécheresse spécifiques à chaque station.

**Tableau 4.9** Les précipitations mensuelles selon chaque station

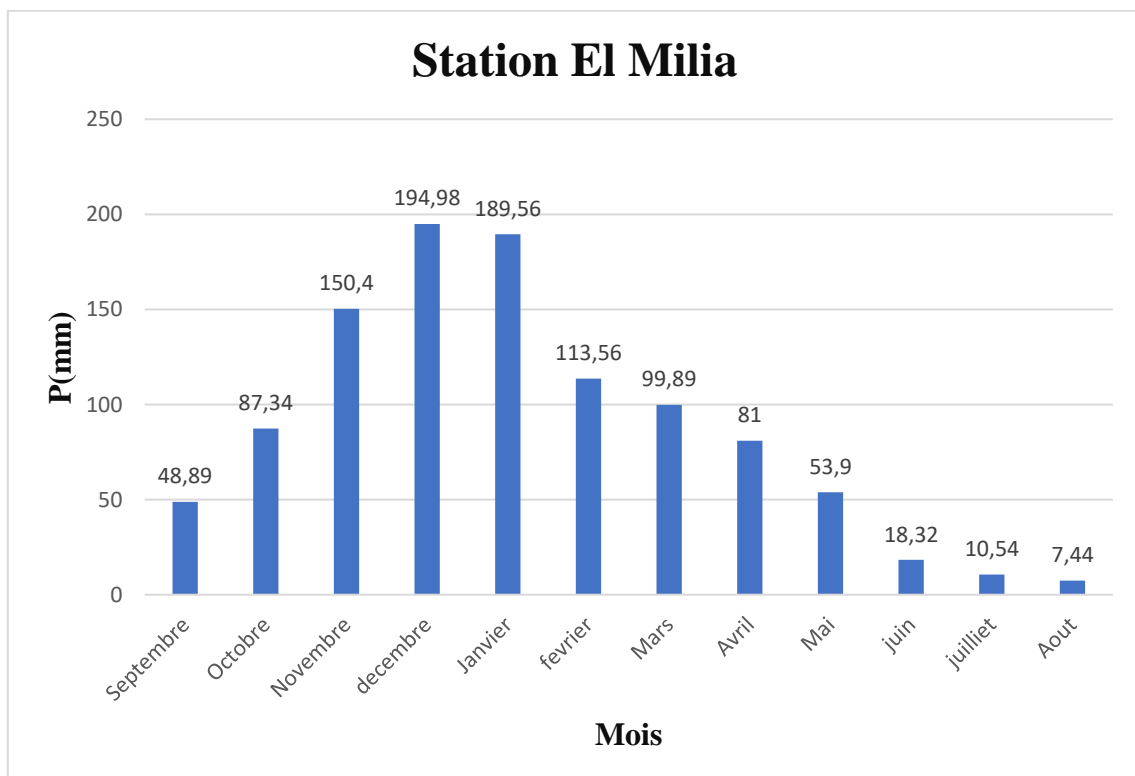
Station	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	juil.	Aout
El Milia	48,89	87,34	150,40	194,98	189,56	113,56	99,89	81,00	53,90	18,32	10,54	7,44
ANRH	36,51	44,29	68,72	79,55	74,14	52,74	64,67	57,94	42,49	15,18	9,25	9,36
Hamma Bouziane	37,57	54,13	82,57	107,09	108,19	69,94	71,33	60,84	48,63	15,35	9,40	8,44
Batna	40,49	25,34	38,59	34,98	30,63	23,63	38,98	35,89	33,04	14,74	11,07	14,80

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Le tableau 4.9 présente les valeurs de précipitations mensuelles des quatre stations sélectionnées pour l'étude :

- **La station d'El Milia :**

Le graphique présente les valeurs mensuelles des précipitations. Les précipitations sont maximales en hiver et au début du printemps, atteignant 194 mm en décembre.



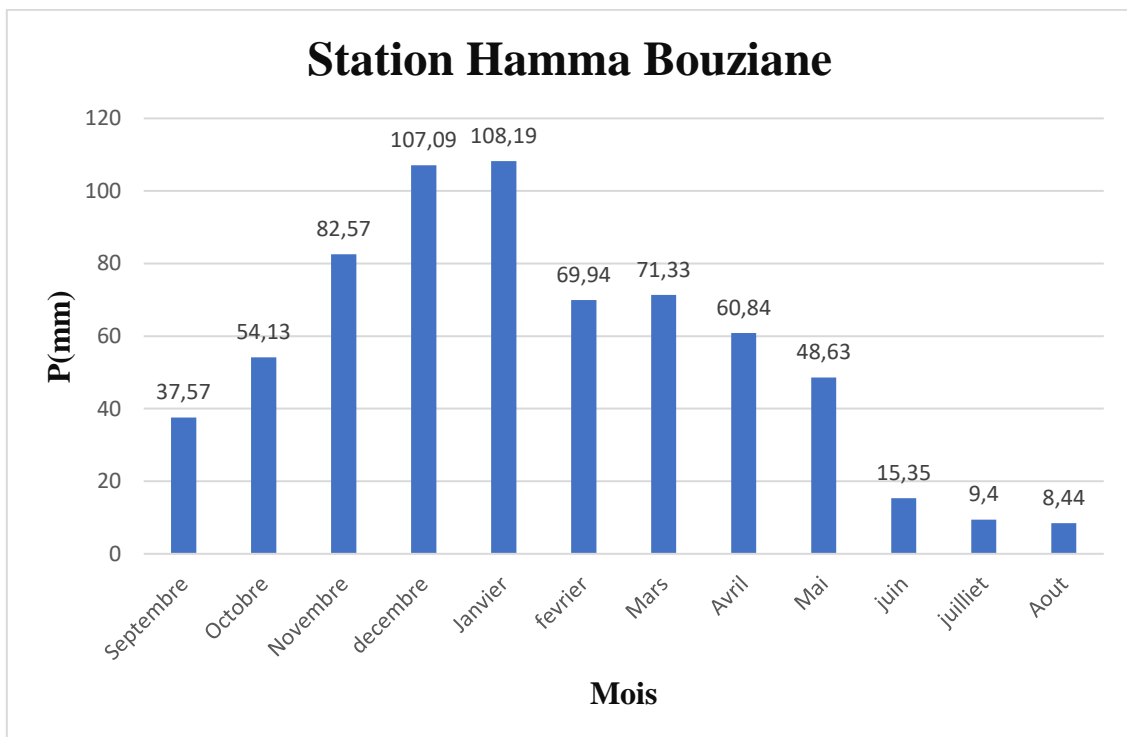
**Figure 4.12** Valeurs mensuelles des précipitations à la station El Milia

Source : ANRH + traitement auteure 2024

La forte diminution des précipitations durant les mois d'été, Atteignant sa valeur minimale en août, suggère une période de sécheresse estivale typique des climats méditerranéens.

- **La station de Hamma Bouziane :**

Les valeurs du graphique représentent les précipitations mensuelles. En hiver, les précipitations atteignent un maximum de 108 mm en janvier, tandis qu'en été, elles diminuent considérablement, atteignant un minimum de 8,44 mm en août.



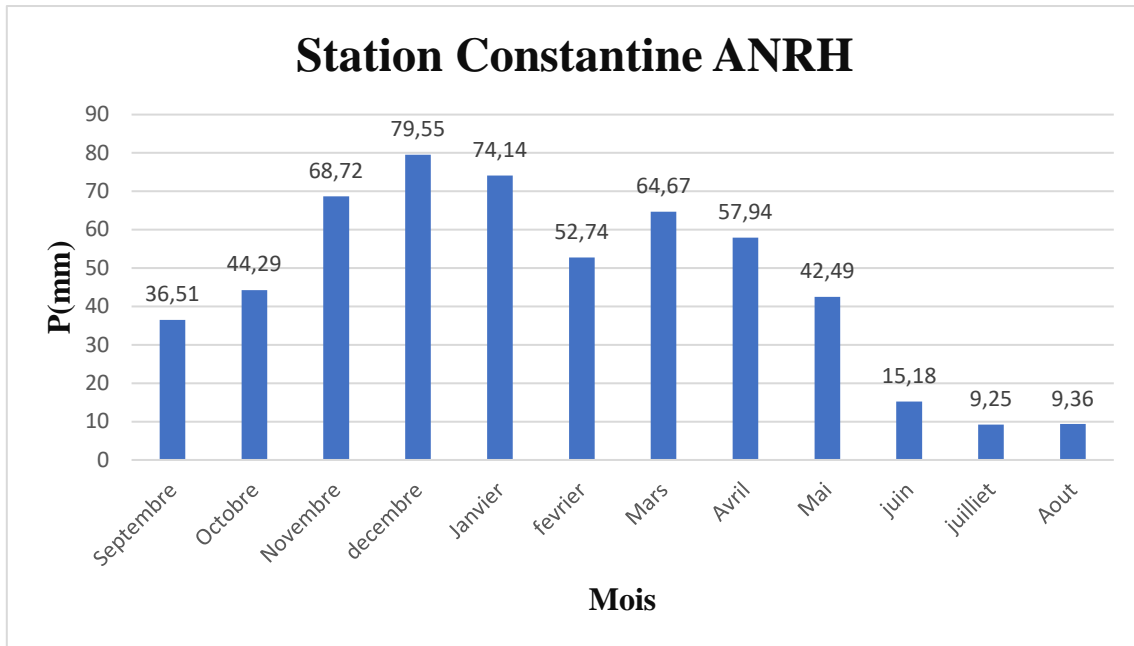
**Figure 4.13:** Valeurs mensuelles des précipitations à la station climatique de Hamma Bouziane

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Les données décrivent un régime pluviométrique typique d'un climat méditerranéen. Ce type de climat est caractérisé par des hivers humides et des étés secs.

- **La station de Constantine ANRH :**

Les valeurs mensuelles des précipitations à la station climatique ANRH montrent une variation saisonnière notable. En hiver, les précipitations atteignent un maximum de 79,75 mm en décembre.



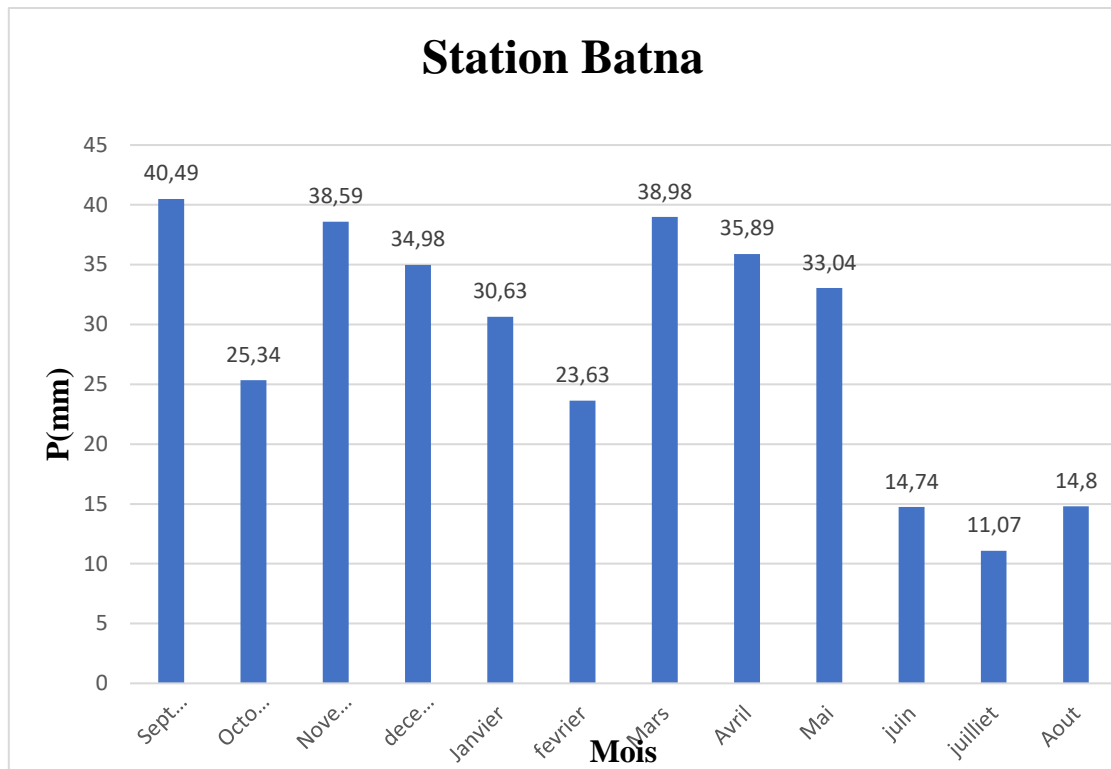
**Figure 4.14** Valeurs mensuelles des précipitations à la station climatique ANRH

Source : ANRH + traitement auteure 2024

En revanche, durant l'été, les précipitations diminuent de manière significative, atteignant un minimum de 9,25 mm en juillet. Cette variation souligne l'influence des saisons sur le régime pluviométrique, avec des hivers plus humides et des étés beaucoup plus secs, typiques du climat méditerranéen de la région.

- **La station de Batna :**

Pour cette station, les précipitations ne sont pas très élevées. Elles atteignent un maximum de 40,49 mm en septembre et un minimum de 11,07 mm en juillet. Cette variation montre une faible pluviosité annuelle avec un pic à la fin de l'été et une période de sécheresse marquée en été.



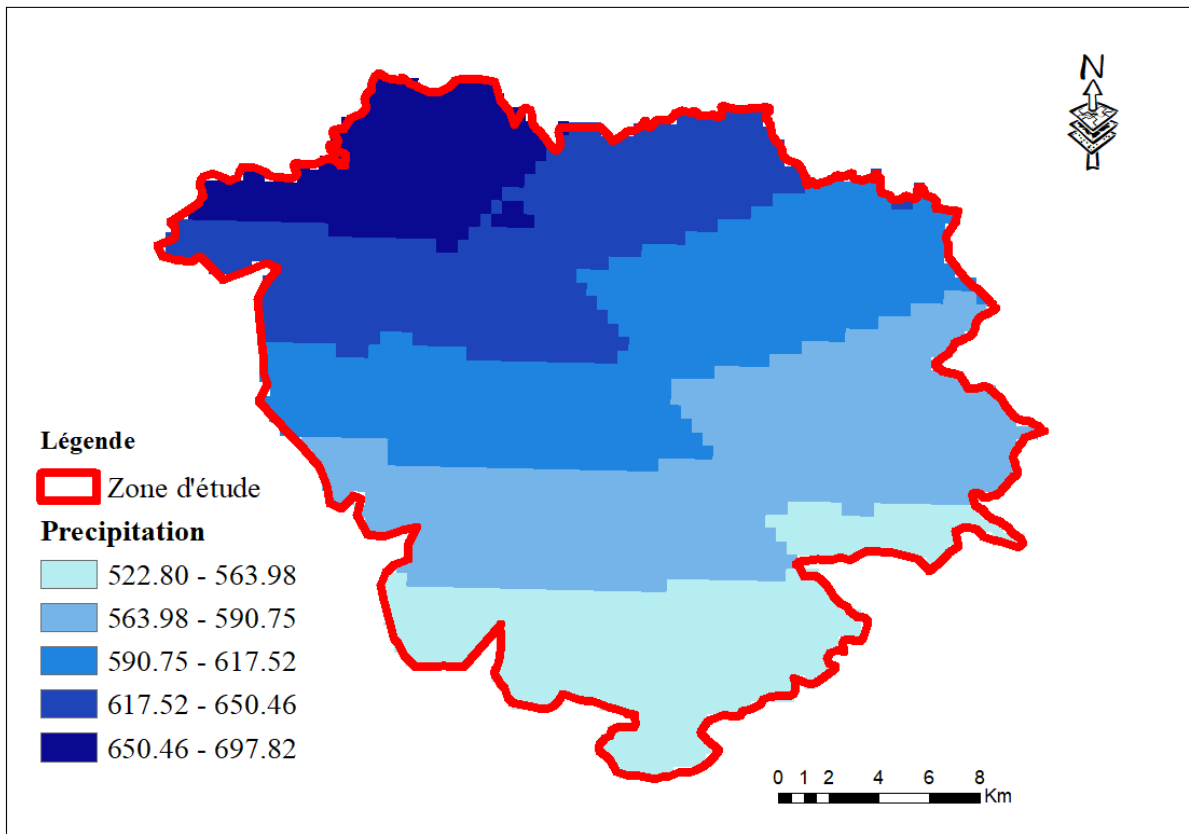
**Figure 4.15:** Valeurs mensuelles des précipitations à la station climatique de Batna

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Les quatre stations montrent une variation saisonnière marquée des précipitations, typique des climats méditerranéens. Les précipitations sont généralement maximales en hiver et au début

du printemps, avec des valeurs significativement plus faibles en été. Cette tendance est observée dans toutes les stations, bien que l'intensité et les périodes précises des précipitations varient.

La carte présente les précipitations annuelles moyennes dans le massif de Djebel El Ouahche sur une période de 31 ans.



**Figure 4.16:** Carte des précipitations de la zone d'étude

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Les précipitations maximales enregistrées sont de 697,82mm et les minimales de 522,80 mm. La partie nord du massif reçoit les précipitations les plus élevées, tandis que les zones sud reçoivent les précipitations les plus faibles.

#### 4.3.4.2.2 Température :

Dans cette recherche, nous avons analysé les températures maximales, minimales et moyennes sur une période de 31 ans (de 1990 à 2021), enregistrées dans 24 stations climatiques. Pour une évaluation mensuelle détaillée des températures, nous avons sélectionné quatre stations spécifiques. Ces données nous permettent de comprendre les variations saisonnières et d'identifier les tendances climatiques de cette région.

Tableau 4.10 Températures moyennes mensuelles

		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	jui	Aou
EL Milia	Max	27,9	24,4	24,4	15,5	14,6	15,4	17,6	19,6	23,4	26,8	30,4	30,2
	Min	18,2	14,3	14,3	10,7	6,5	6,7	7,9	10,5	13,3	17,2	19,9	20,5
	Moy	23,1	19,3	19,3	13,1	10,5	11,1	21,5	15,1	18,3	22	25,1	25,3
Haùia Bouzia	Max	29,5	24,2	24,2	14,1	13,4	14,3	16,8	19,5	24,6	29,3	33,9	33
	Min	16,9	12,2	12,2	8,4	4,1	4,75	6,1	8,9	11,9	16,4	19,3	19,7
	Moy	38	18,2	30,3	18,3	15,4	16,6	19,8	24	30,6	37,5	43,5	42,8
CONST ANTINE	Max	28,5	22,6	22,6	12,3	11,8	12,7	15,7	18,6	24,4	29,7	34	32,8
	Min	15,4	10,8	10,8	6,7	2,6	2,8	4,6	7,4	10,9	15,5	18,7	18,8
	Moy	36,2	16,7	28,1	15,7	13,1	14,1	18,1	22,3	29,9	37,4	43,3	42,2
BATNA A	Max	25,3	19,7	19,7	9,8	9,3	10,3	13,6	17,2	21,9	27,3	30,9	29,1
	Min	13,7	9,3	9,3	5,6	0,9	1,5	3,2	6,4	9,1	14,2	16,7	16,4
	Moy	32,2	14,5	24,3	12,6	9,7	11,1	15,2	20,4	26,5	34,4	39,3	37,4

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Le tableau ci-dessus présente les températures moyennes mensuelles maximales et minimales des quatre stations climatiques sélectionnées.

Nous avons analysé les variations mensuelles des températures pour les stations climatiques d'El Milia, Hamma Bouziane, Constantine ANRH et Batna :

- **Station d'El Milia**

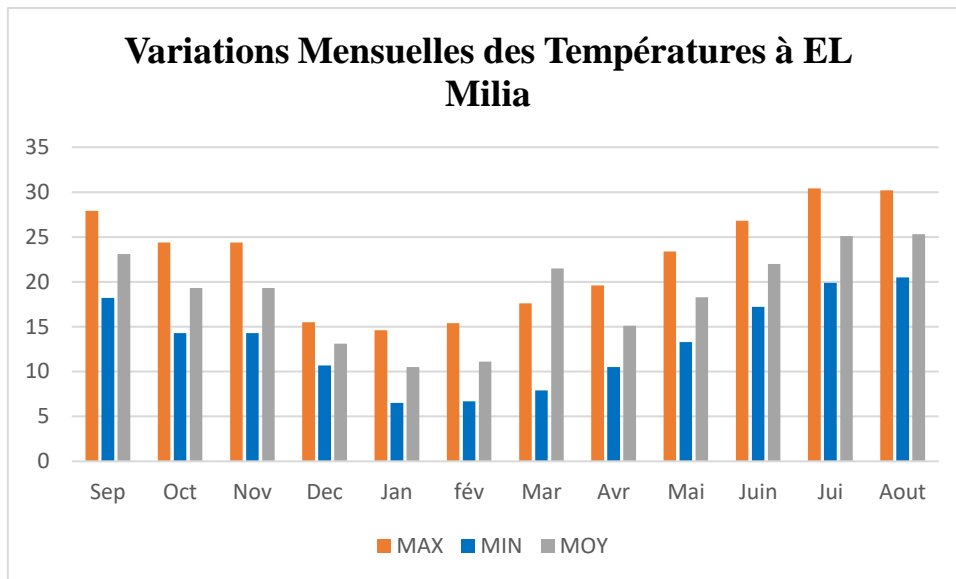
Les données de température de la station El Milia indiquent un climat avec une variation saisonnière marquée, ce qui est typique des régions tempérées ou méditerranéennes.

Les étés dans cette région sont caractérisés par une chaleur notable, avec des températures maximales atteignant 30,4°C en juillet, le mois le plus chaud de l'année. Ce climat est probablement sec, marqué par de longues journées ensoleillées, ce qui laisse penser à une influence continentale ou subtropicale, dominée par des masses d'air chaud.

En hiver, les températures minimales descendent à 6,5°C, janvier étant le mois le plus froid. Bien que ce soit la période la plus froide de l'année, les températures restent relativement douces, sans gel intense, reflétant un climat méditerranéen typique, où les hivers sont frais mais modérés.

Enfin, l'amplitude thermique saisonnière, avec une différence d'environ 24°C entre les températures maximales de l'été et les minimales de l'hiver, met en évidence un contraste important entre les saisons. Ce phénomène est représentatif d'un climat où les étés sont chauds et les hivers, bien que modérés, présentent une baisse significative des températures.



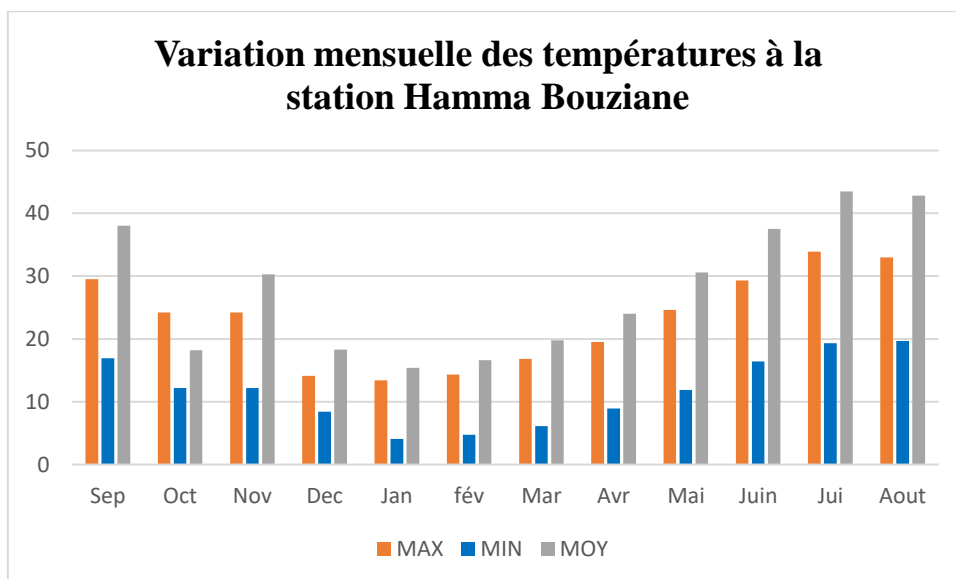


**Figure 4.17:** Variations mensuelles des températures à EL Milia

Source : ANRH + traitement auteure 2024

- **Station de Hamma Bouziane**

Les données de température pour la station de Hamma Bouziane révèlent des caractéristiques climatiques qui semblent typiques d'un climat méditerranéen avec une influence continentale, marqué par des étés chauds et des hivers modérément froids.



**Figure 4.18:** Variation mensuelles des températures à la station Hamma Bouziane

Source : ANRH + traitement auteure 2024

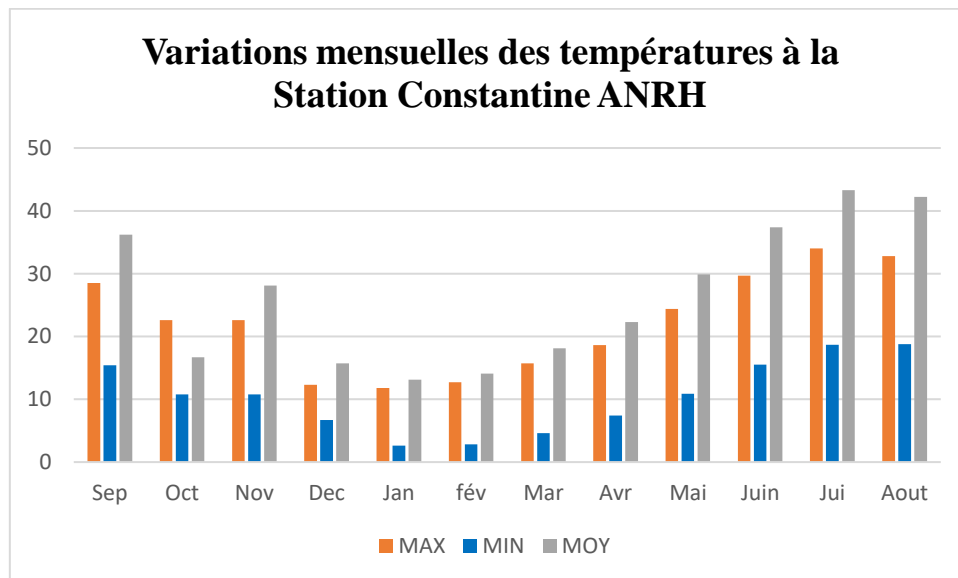
Les étés dans cette région sont marqués par des températures très élevées, atteignant 33,9°C en juillet, le mois le plus chaud de l'année. Cette chaleur intense est typique des zones méditerranéennes continentales, où l'influence des masses d'air chaud se fait sentir

de manière prononcée. Ces conditions estivales, souvent accompagnées de sécheresse, rendent le climat assez rigoureux, notamment en termes de confort thermique.

En hiver, les températures minimales descendent à 4,1°C, avec janvier comme le mois le plus froid. Bien que ces températures ne soient pas extrêmes, elles indiquent des hivers relativement frais, pouvant être perçus comme froids, surtout en l'absence de moyens de chauffage adéquats. Cette fraîcheur hivernale rappelle l'influence des zones continentales voisines, où les températures peuvent chuter de manière plus prononcée en hiver.

L'amplitude thermique, qui atteint environ 29,8°C entre les températures maximales estivales et minimales hivernales, est notable. Ce contraste marque des variations saisonnières importantes, caractéristiques des régions où les étés sont très chauds, tandis que les hivers, bien que modérés, apportent des nuits fraîches.

- **Station de Constantine ANRH :** Les données fournies station de Constantine ANRH pour les températures maximales et minimales à la station indiquent un climat avec des caractéristiques saisonnières marquées, soulignant des étés très chauds et des hivers frais à froids.



**Figure 4.19:** Variations mensuelles des températures à la Station Constantine ANRH

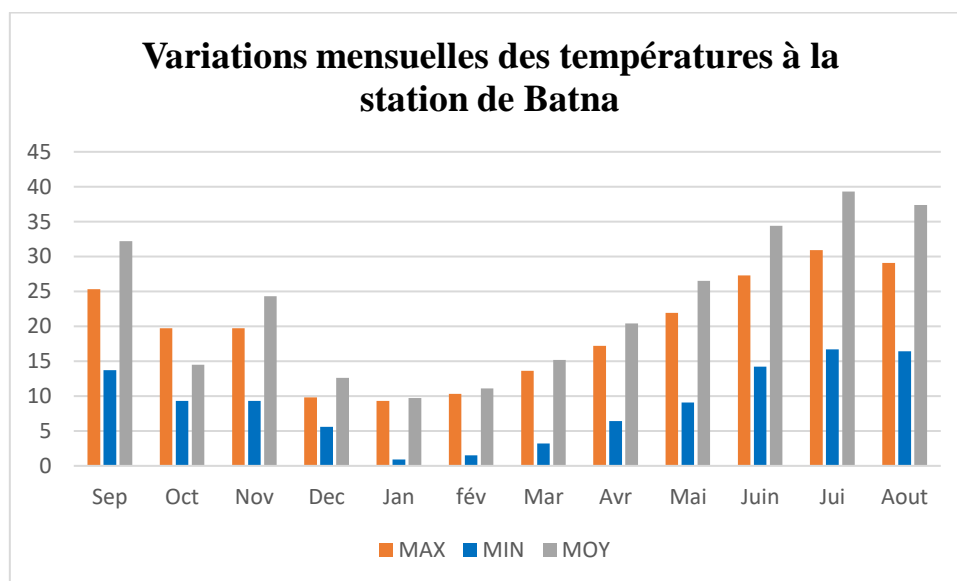
Source : ANRH + traitement auteure 2024

Les étés dans cette région sont extrêmement chauds, avec des températures maximales atteignant 34°C en juillet, le mois le plus chaud. Cette chaleur intense est typique des climats méditerranéens ou semi-arides, où les journées estivales sont souvent marquées par des périodes prolongées de temps sec. Ces conditions peuvent poser des défis importants pour la végétation et la gestion des ressources en eau, en raison du stress hydrique.

En hiver, les températures minimales descendent à 2,6°C, notamment en janvier, le mois le plus froid. Ces températures, proches du point de gel, témoignent de nuits froides, suggérant que les hivers, bien que modérément froids, nécessitent des mesures de protection contre le froid, particulièrement durant la nuit. Ces conditions sont fréquemment rencontrées dans les zones intérieures ou à une altitude modérée.

L'amplitude thermique, qui atteint environ 31,4°C entre l'été et l'hiver, est significative. Ce contraste marqué entre les saisons est typique des climats méditerranéens avec une influence continentale, où les écarts thermiques sont importants. De telles variations saisonnières exigent des adaptations spécifiques, que ce soit en matière de mode de vie, de pratiques agricoles ou de gestion des ressources pour faire face aux exigences climatiques distinctes de chaque saison.

- **Station de Batna :** Les données de température pour cette station indiquent un climat avec une nette variation saisonnière, mettant en évidence des étés modérément chauds et des hivers froids.



**Figure 4.20:** Variations mensuelles des températures à la station de Batna  
Source : ANRH + traitement auteure 2024

Les étés dans cette région sont modérément chauds, avec des températures maximales atteignant 30,9°C en juillet, le mois le plus chaud. Ces températures, bien que chaudes, restent relativement confortables, surtout lorsque l'humidité est faible, ce qui rend les conditions estivales plus agréables et tolérables par rapport à des climats plus torrides. En hiver, les températures minimales descendent à 0,9°C, notamment en janvier, le mois le plus froid. Ces températures proches du point de gel indiquent des hivers assez froids,

surtout pendant la nuit, et présentent un risque de gel, en particulier pour la végétation sensible. Ce climat hivernal nécessite des précautions, telles que des systèmes de chauffage adéquats ou des protections pour les cultures, afin de faire face aux gelées nocturnes.

L'amplitude thermique marquée, avec une différence d'environ 30°C entre les températures estivales et hivernales, reflète une forte variation saisonnière. Ce contraste est typique des climats méditerranéens influencés par des conditions continentales, où les étés chauds et les hivers froids cohabitent, exigeant des ajustements en termes d'agriculture, de gestion des ressources et de confort thermique tout au long de l'année.

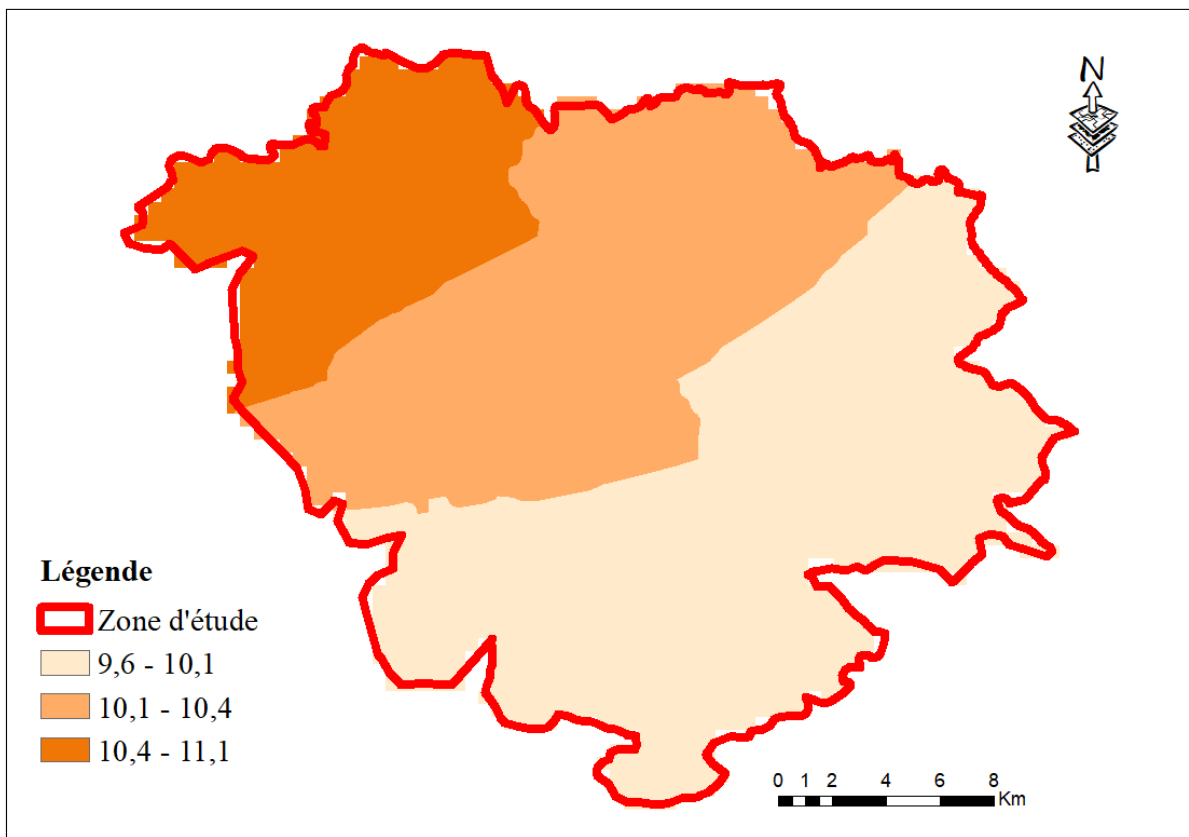


Figure 4.21: Carte des températures mensuelles minimales

Source : ANRH + traitement auteure 2024

L'analyse des températures mensuelles dans ces quatre stations climatiques met en évidence des tendances saisonnières similaires, caractérisées par des hivers froids et des étés chauds.

- Toutes les stations enregistrent leurs températures maximales en juillet, ce qui est typique des climats méditerranéens et semi-arides où les étés sont chauds et secs.

- Janvier est le mois le plus froid dans toutes les stations, avec des températures minimales pouvant descendre en dessous de zéro, notamment à Batna, qui enregistre la température minimale la plus basse ( $0,9^{\circ}\text{C}$ ).
- Il existe une différence notable entre les températures maximales et minimales, particulièrement en hiver, ce qui indique des nuits froides et des journées relativement plus chaudes.

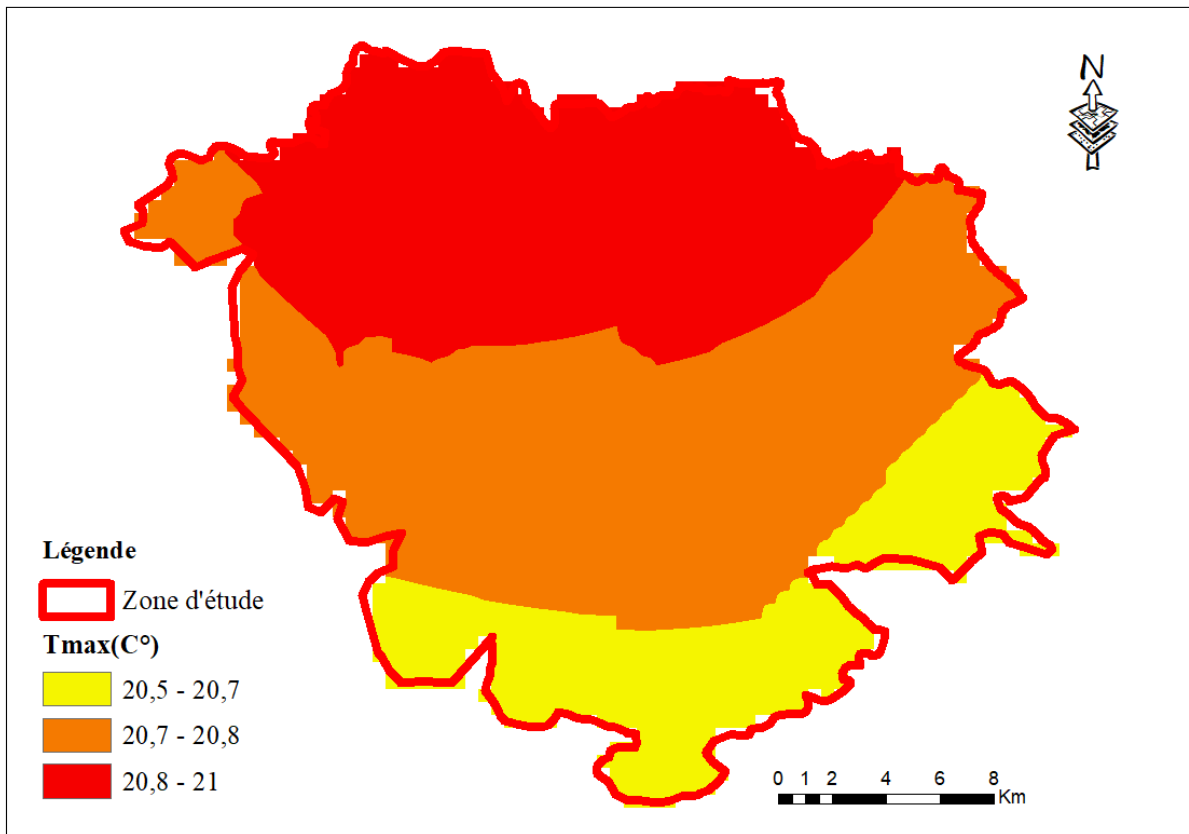


Figure 4.22: Carte des températures mensuelles maximales

Source : ANRH + traitement auteure 2024

- **Climogramme d'Emberger :**

Le quotient pluviométrique d'Emberger est largement reconnu et utilisé dans les régions méditerranéennes pour caractériser les climats. En 1969, Stewart a amélioré cette formule pour la rendre plus adaptée aux conditions climatiques spécifiques de l'Algérie (BOUZEKRI Abdelhafid, 2014)

Le calcul de l'indice d'Emberger, permet de classer les différentes stations climatiques en étages bioclimatiques distincts. Cet indice, basé sur des paramètres climatiques tels que les précipitations annuelles et les températures minimales et maximales, est essentiel pour comprendre et analyser la distribution des zones bioclimatiques.

$$Q2 = \frac{3.43 * P}{M - m}$$

**Q2** : Coefficient pluviométrique d'Emberger.

**P** : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

**M** : Température moyenne des maximas du mois le plus chaud.

**m** : Température moyenne des minima du mois le plus froid.

Nous avons déterminé les étages bioclimatiques en utilisant une classification adaptée :

- Aride :  $Q2 < 40$
- Semi-aride :  $40 \leq Q2 < 100$
- Sub-humide :  $100 \leq Q2 < 200$
- Humide :  $Q2 \geq 200$

**Tableau 4.11** Valeurs de l'indice d'Emberger et classification des étages bioclimatiques

Station	P (mm)	T (min) (°C)	T (max) (°C)	Q2	Étage bioclimatique
El Milia	1055,887	6,55	30,4	151,8529	Humide
Ain Kechera	973,5681	5,95	31,05	133,0414	Sub-humide
Ouled Messaouda	1063,617	5,075	29,425	149,8237	Humide
Sidi Marouf	940,5041	5,825	31,925	123,5988	Sub-humide
Hamala	932,9494	3,8	32	113,4758	Sub-humide
Beni Aziz	802,5776	2	32,1	91,45652	Semi-aride
El Kheneg	679,6252	4,525	33,975	79,15499	Semi-aride
Hamma Bouziane	673,5446	4,125	33,9	77,59053	Semi-aride
Fourchi	598,8324	3,725	33,55	68,86824	Semi-aride
Koudiat Tendart	623,2131	2,225	32,825	69,85689	Semi-aride
Chebabta (El Hammam)	580,9105	2,25	33,175	64,43082	Semi-aride
Fedj Mzala (Ferdjioua)	554,9053	2,6	34	60,61546	Semi-aride
Boumalek M,C,	597,5407	1,725	33,15	65,22083	Semi-aride
Constantine ANRH	554,9053	2,6	34	60,61546	Semi-aride
Belaa	427,5227	1,3	34,85	43,70798	Semi-aride
Chelghoum Laid Ville	471,016	1,75	33,575	50,76465	Semi-aride
Mechta Serradj	510,1392	1,725	34,625	53,18473	Semi-aride
Bir El Arch	516,1756	0,975	32,55	56,07228	Semi-aride
Tadjenanet	469,1529	1,325	33	50,80329	Semi-aride
Ouled Naceur	478,2758	1,7	35,475	48,57102	Semi-aride
Mechta Melha (Mchira)	474,0234	1,475	33,725	50,41551	Semi-aride
Bir Drimil	442,0685	1,35	33,8	46,72712	Semi-aride

Oum El Bouaghi	473,6826	0,95	34,475	48,46328	Semi-aride
Batna	342,2348	0,9	30,975	39,03127	Aride

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Le tableau ci-dessus présente les valeurs de l'indice d'Emberger pour chaque station climatique :

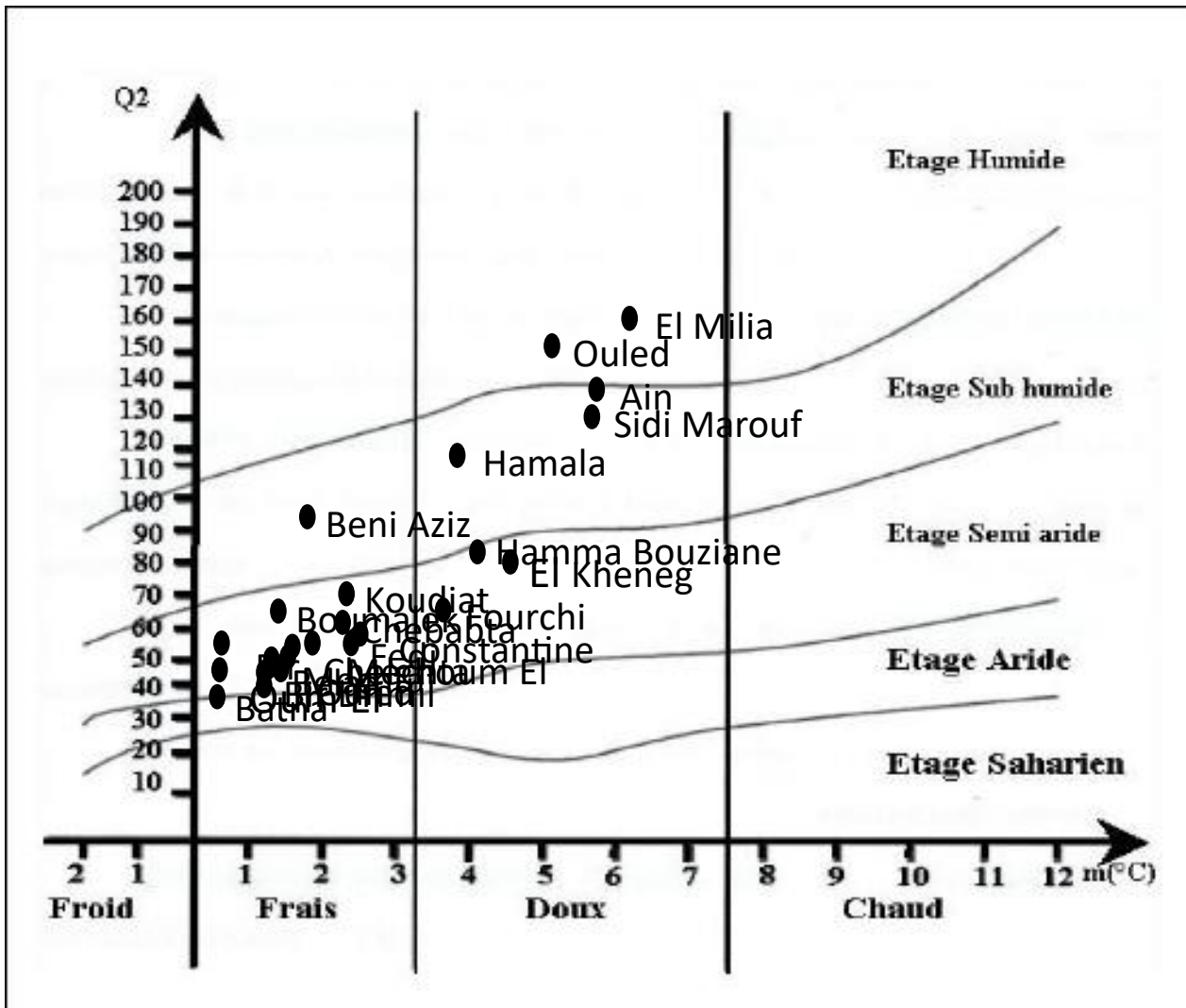


Figure 4.23: Climagramme d'Emberger

Source : ANRH + traitement auteure 2024

Le climagramme d'Emberger a permis de définir trois étages bioclimatiques distincts : sub-humide, semi-aride et aride, en fonction des données recueillies par les stations climatiques. Les zones sub-humides se caractérisent par des précipitations abondantes et des températures modérées. À l'inverse, les zones semi-arides présentent des précipitations faibles et des températures plus extrêmes.

Les hivers dans ces zones varient également, pouvant être frais, tempérés ou chauds, selon l'étage bioclimatique et la localisation spécifique de chaque station. Ces variations climatiques

#### **Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch**

influencent de manière significative la disponibilité en eau, la végétation et les activités agricoles de ces régions.



## **Conclusion**

Cette étude a permis de créer un portrait détaillé du massif de Djebel El Ouahch à travers une analyse cartographique des aspects biophysiques, physiques et urbains de la région. En délimitant précisément la zone d'étude et en explorant ses caractéristiques topographiques, géologiques, hydrographiques et végétales, nous avons mis en évidence la complexité et la richesse de cet environnement. Par ailleurs, l'analyse démographique et urbaine a révélé les dynamiques humaines qui influencent cette région, tandis que l'étude climatique a fourni des informations cruciales sur les variations météorologiques locales.

Les résultats obtenus soulignent l'importance de cette région non seulement en raison de sa biodiversité, mais aussi pour les enjeux socio-économiques qu'elle représente. Cette analyse approfondie constitue une base essentielle pour les recherches futures, en offrant des fondations solides pour l'évaluation des risques d'incendie et la mise en œuvre de stratégies de gestion territoriale adaptées. Les informations recueillies serviront de référence pour les chapitres suivants, où nous explorerons plus en détail les méthodes de prévention et de gestion des risques dans ce contexte complexe et vulnérable.

Dans cette section, plusieurs dimensions fondamentales ont été explorées pour offrir une compréhension approfondie de la zone étudiée.

Tout d'abord, l'étude topographique a permis de cartographier le relief et les variations d'altitude, fournissant des informations précieuses sur les pentes, les vallées, et les plateaux qui influencent les écoulements hydrologiques, l'érosion des sols, et l'occupation humaine. En parallèle, l'analyse géologique a révélé la composition et la structure des sous-sols, mettant en évidence des formations géologiques particulières qui jouent un rôle déterminant dans la disponibilité des ressources naturelles telles que les minéraux et les nappes phréatiques.

L'étude hydrographique a ensuite permis de détailler le réseau fluvial de la région, en identifiant les principales rivières, les bassins versants, ainsi que les zones humides. Ces informations sont essentielles pour la gestion des ressources en eau, la prévision des risques d'inondation, et le maintien de la biodiversité aquatique.

Sur le plan végétal, la cartographie a révélé une diversité d'écosystèmes, allant des zones de végétation dense, comme les forêts, aux régions plus arides où la végétation est clairsemée. Cette diversité biologique souligne la richesse écologique de la région et indique des zones prioritaires pour la conservation de la faune et de la flore.

#### **Chapitres IV : Analyse Carto thématique du milieu biophysique, physique du massif de Djebel El Ouahch**

En outre, l'analyse climatique a apporté des insights clés sur les variations météorologiques saisonnières et annuelles, telles que les précipitations, les températures et les vents dominants. Ces informations sont cruciales pour comprendre l'impact des conditions climatiques sur l'agriculture, la gestion des incendies de forêt, et les activités économiques locales.

Enfin, l'étude démographique a mis en lumière les dynamiques humaines, en analysant la répartition de la population, les densités, les taux de croissance, et les mouvements migratoires. Cette dimension sociale est essentielle pour comprendre comment les activités humaines, telles que l'urbanisation, l'agriculture et l'exploitation des ressources, influencent et sont influencées par l'environnement naturel.

En somme, l'intégration de ces différentes analyses a permis de créer un portrait détaillé et multidimensionnel de la région étudiée, offrant une base solide pour le développement de stratégies de gestion durable et la planification territoriale.



**CHAPITRE V : ANALYSE DIACHRONIQUE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL SUITE AUX INCENDIES DE FORET DANS LE MASSIF DE DJEBEL EL OUHACH : UNE APPROCHE PAR TELEDETECTION ET CLASSIFICATION SUPERVISEE**

**Introduction**

L'étude diachronique des feux de forêt consiste à examiner l'évolution temporelle des incendies, en analysant comment leurs caractéristiques telles que l'intensité, la fréquence et la distribution géographique ont évolué au fil des années.

La réalisation de cartes détaillant les zones touchées par les incendies de forêt devient complexe dans les zones à relief accidenté, où les techniques de relevé sur le terrain s'avèrent inefficaces. Face à ces contraintes, la télédétection se présente comme une solution efficace (Tariq et al., 2021).

D'après (Liu et al., 2024) La télédétection consiste à acquérir des informations sur des objets ou des zones à distance, généralement à partir d'avions ou de satellites. Elle est cruciale pour la surveillance de l'environnement, la recherche terrestre et atmosphérique, les domaines agricoles, les études sur le changement climatique et la surveillance militaire.

L'observation de l'évolution de l'occupation du sol a considérablement bénéficié de l'utilisation de l'imagerie spatiale au cours des dernières décennies. Cette méthode a significativement contribué à la compréhension des changements dans l'aménagement spatial. Les images capturées par satellite offrent des ressources essentielles pour détecter les variations d'une région spécifique en procédant à des observations à divers moments (Thierry Agbanou. 2020)

Ce chapitre dont l'objectif est d'examiner les changements de l'usage du sol au sein du massif de Djebel El Ouahch sera structuré en deux parties. Dans un premier temps, nous avons analysé et calculé divers indices de télédétection permettant d'évaluer la santé, l'humidité de la végétation et les zones brûlées, en utilisant des images satellites correspondant à trois moments clés d'incendies dans notre étude de cas. Par la suite, nous avons focalisé notre étude sur une zone plus restreinte, la zone de Draa El Naga, pour effectuer une classification supervisée. Cette démarche s'appuie sur trois catégories pour trois dates différentes, dans le but d'évaluer l'évolution du sol au cours du temps.

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

### **5.1 Analyse diachronique : Méthodologie et choix des outils**

#### **5.1.1 Rôle de la télédétection dans l'analyse des changements d'occupation du sol**

La télédétection est devenue un outil indispensable pour l'analyse des changements d'occupation du sol à travers le temps (Oad et al., 2023). Grâce à la collecte de données spatiales sur de vastes zones géographiques, la télédétection permet de suivre les modifications écologiques qui surviennent dans les écosystèmes naturels et anthropisés. Les technologies de télédétection exploitent différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique, capturant des images multispectrales qui fournissent des informations précieuses sur la composition et la santé des surfaces terrestres (Guo et al., 2024)

De même, l'analyse diachronique des images satellites permet de suivre l'évolution des paysages sur de longues périodes (Driss, 2023). En comparant les indices de différence normalisée calculés à partir de données collectées à différentes dates, les chercheurs peuvent identifier les changements dans l'occupation du sol, comme la conversion de forêts en terres agricoles, l'expansion urbaine, ou la régénération naturelle après des événements perturbateurs comme les incendies de forêt (Sandal Erzurumlu & Yıldız, 2024).

Ces analyses sont essentielles pour la gestion des ressources naturelles, car elles fournissent des informations précises et actualisées sur l'état des écosystèmes. Les décideurs peuvent ainsi prendre des mesures pour protéger les habitats critiques, restaurer les zones dégradées, et planifier un développement durable qui minimise l'impact sur l'environnement. En résumé, la télédétection et les indices de différence normalisée jouent un rôle crucial dans la surveillance et l'analyse des changements d'occupation du sol, offrant une vue d'ensemble dynamique et en temps réel des transformations environnementales ((Qi et al., 2024)).

#### **5.1.2 Importance des indices NDVI, NBR, NDWI**

Les indices de différence normalisée, tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), le NBR (Normalized Burn Ratio), et le NDWI (Normalized Difference Water Index), sont particulièrement efficaces pour détecter les variations de l'occupation du sol. Ces indices sont calculés en combinant les valeurs de réflectance de différentes bandes spectrales, permettant ainsi de révéler des changements subtils dans la végétation, l'humidité du sol, et la couverture terrestre (Zahoor Abdul Rehmanand Khan, 2023).

## Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

### 5.1.2.1 L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

Des études antérieures ont fréquemment utilisé l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) pour mesurer le contenu en biomasse de la végétation, avec des valeurs variant de -1 à 1 (Escuin et al., 2008). L'évaluation des indices de végétation, notamment l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), s'est affirmée comme l'une des approches les plus fructueuses, répandues et classiques en matière de recherche biogéographique. (Driss, 2023)

L'utilisation du NDVI permet de mesurer la densité et la santé de la végétation en exploitant la différence entre la réflectance dans le proche infrarouge, où la végétation saine reflète fortement, et la lumière rouge, qui est absorbée par la chlorophylle des plantes (S. Escuin & Fernández, 2008). Cela aide non seulement à identifier les zones où la végétation est en déclin ou en croissance, mais aussi à suivre les impacts des activités humaines, telles que l'agriculture intensive, la déforestation, ou encore l'urbanisation rapide (Cañete-Salinas et al., 2024).

L'indice de végétation par différence normalisée est calculé par la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Où :

- PIR : proche infrarouge réfléchi par la végétation.
- R : rouge est la lumière rouge visible absorbée par la végétation.

### 5.1.2.2 Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) :

Le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) a été largement appliqué pour évaluer l'état et la gravité des incendies, représentant un rapport de bande entre le proche infrarouge et le moyen infrarouge (Guo et al., 2024).

NBR est calculé en utilisant des données infrarouges proches (NIR) et des infrarouges à ondes courtes (SWIR) issues de l'imagerie satellite. Il est sensible aux changements de couverture végétale, en particulier dans l'évaluation de la sévérité des brûlures.

L'indice de ratio de brûlure normalisé est calculé par la formule suivante :

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

Où :

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

- NIR (Near-Infrared) : Bande proche infrarouge
- SWIR (Shortwave Infrared) : Bande infrarouge à ondes courtes

### **5.1.2.3 Indice d'eau de Différence Normalisé NDWI :**

NDWI est utilisé pour surveiller l'humidité du sol et identifier les zones humides ou les étendues d'eau. Il est calculé à partir de la réflectance dans les bandes du proche infrarouge (NIR) et dans le vert, mettant en évidence les zones avec une teneur en eau plus élevée dans la végétation et le sol. (Zahoor Abdul Rehman and Khan, 2023)

Cet indice est idéal pour la gestion des ressources en eau, l'identification des zones d'irrigation, la détection des changements d'humidité dans les écosystèmes, et la surveillance des zones inondées.

L'indice d'eau de différence normalisé est calculé par la formule suivante :

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

où :

- Green : Réflectance dans la bande du vert
- NIR (Near-Infrared) : Réflectance dans la bande proche infrarouge

Cette méthodologie combine l'analyse d'indices spécifiques dérivés de l'imagerie satellite et des techniques de classification supervisée pour étudier les effets des incendies de forêt sur la végétation. Cette approche permet une évaluation précise de l'impact des incendies et aide à comprendre les changements dans les couvertures terrestres au fil du temps.

Dans cette étude, nous avons choisi de nous concentrer sur les indices NDVI, NBR, et NDWI, car ils sont directement liés à l'état de santé de la végétation et à la sévérité des incendies.

### **5.1.3 Sélection et prétraitement des images satellitaires**

Dans cette étude, nous avons effectué une analyse multi-indicateurs dérivés de l'imagerie satellite, incluant l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), le Ratio Normalisé de Brûlure (NBR) et l'Indice de Différence Normalisée de l'Eau (NDWI). Cette démarche visait à mettre en lumière les schémas de végétation en lien avec les risques d'incendies de forêt. Pour ce faire, nous avons sélectionné trois dates clés associées à d'importants incendies, afin d'évaluer l'impact de ces événements en calculant les indices NDVI, NBR, et NDWI avant et après chaque incendie.

## Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

Les images satellites ont été acquises via la mission Sentinel-2, faisant partie du programme Copernicus. Le prétraitement de ces images, réalisé avec le logiciel QGIS, a impliqué le calcul des indices NBR, NDVI et NDWI selon leurs formules respectives. Ce processus a généré quatre cartes distinctes, facilitant ainsi une analyse détaillée.

Pour la classification supervisée, nous avons utilisé les images satellites fournies par la plateforme USGS LANDSAT 8 OLI, en ciblant spécifiquement la zone de Draa El Naga pour notre étude. Cette méthode a permis une exploration plus approfondie et ciblée.

### 5.1.4 Définition des classes d'occupation du sol et échantillonnage : Techniques de classification supervisée appliquée

Afin de réaliser notre échantillonnage, nous avons défini les catégories d'occupation du sol suivantes :

**Tableau 5.1** Classe d'occupation du sol et échantillonnage

Classe	Définition
<b>Forêt dense</b>	Zones principalement couvertes d'arbres
<b>Régénération naturelle</b>	Zones en cours de recouvrement végétal après une perturbation, montrant des signes de croissance spontanée de la végétation
<b>Zone brûlée</b>	Secteurs affectés par des incendies, caractérisés par la présence de sols nus, de cendres, et de végétation détruite ou endommagée.

Source : auteure 2024

Les techniques de classification supervisée, employées dans le cadre de la télédétection et de l'analyse des images satellitaires, permettent de catégoriser les pixels des images en différentes classes d'occupation du sol ou de couverture terrestre. Ces méthodes exigent une phase d'entraînement durant laquelle l'algorithme apprend à identifier les classes à partir d'échantillons de terrain ou de pixels préalablement classifiés.

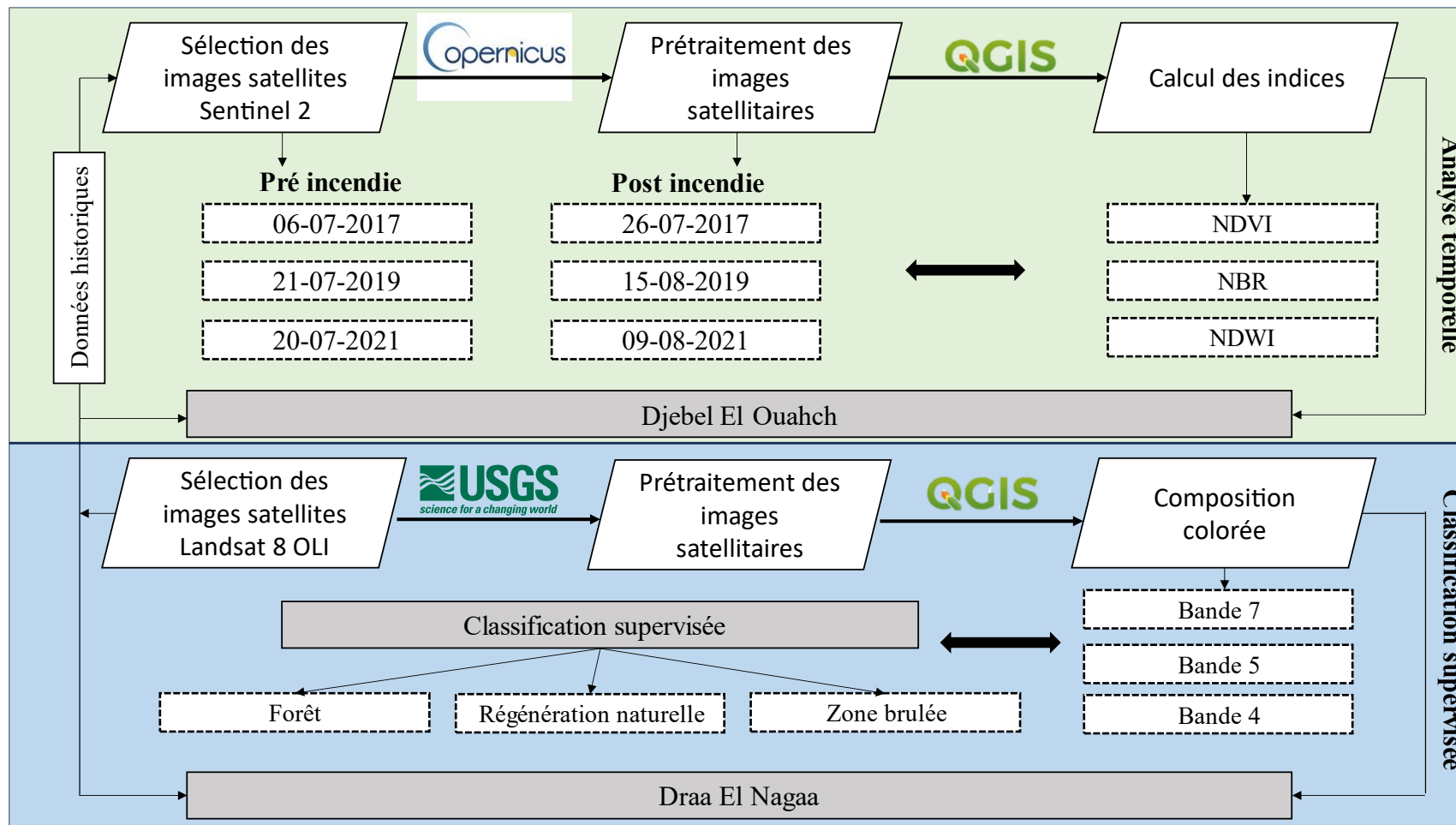
**Tableau 5.2** Les principaux incendies du grand massif de Djebel El Ouahch : Dates clés

Date d'incendie de forêt	Pré-incendie	Post-incendie
<b>12-07-2017</b>	06-07-2017	26-07-2017
<b>01-08-2019</b>	21-07-2019	15-08-2019
<b>27-07-2021</b>	20-07-2021	09-08-2021

Source : Conservation des forêts de Constantine + traitement auteure 2024



**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**



**Figure 5.1:** Organigramme de la méthode utilisée pour l'analyse diachronique

Source : Auteure 2024

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouahch : Une approche par télédétection et classification supervisée**

**5.2 Historique des incendies de forêts dans le grand massif de Djebel El Ouahch**

Le tableau 5.2 présente un historique des incendies de forêt ayant touché le massif de Djebel El Ouahch et ses environs, notamment les forêts de Djebel El Ouahch, Draa el Naga, et El Hadaj. Ces incendies, recensés de 2012 à 2022, montrent une récurrence préoccupante, en particulier durant la période estivale. Les feux ont affecté différents types de végétation, tels que les pins d'Alep, les broussailles, les chênes-lièges, ainsi que les eucalyptus, soulignant la diversité écologique de la zone.

**Tableau 5.3** Historique des incendies de forêts dans le grand massif de Djebel El Ouahch

<b>Forêt</b>	<b>Date incendie</b>	<b>Type de végétation</b>	<b>Superficie brûlée Ha</b>
<b>Djebel el Ouahch</b>	18-08-2012	Pin pignon – broussailles- jeune reboisement	216
<b>Djebel el Ouahch</b>	23-09-2012	Broussailles- jeune reboisement	12.5
<b>Djebel el Ouahch</b>	25-08-2014	Maquis	1.5
<b>Draa el Naga</b>	22-07-2016	Maquis	1.5
<b>Djebel el Ouahch</b>	27-07-2016	Broussailles– cyprès pin d’Alep	1.5
<b>El Meridj</b>	30-07-2016	Broussailles	22
<b>Djebel el Ouahch</b>	03-09-2016	Broussailles- pin pignon- eucalyptus	6
<b>Draa el Naga</b>	17-09-2016	Broussailles	2
<b>Draa el Naga</b>	25-10-2016	Broussailles	1
<b>Djebel el Ouahch</b>	12-07-2017	Broussailles- eucalyptus- pin d’Alep	12
<b>Draa el Naga</b>	28-08-2017	Pin d’Alep- eucalyptus- broussailles	66
<b>Djebel el Ouahch</b>	29-08-2017	Broussailles	8
<b>Djebel el Ouahch</b>	01-08-2019	Broussailles- forêts	380
<b>Djebel el Ouahch</b>	28-08-2019	Forêts	2
<b>El hadaj</b>	29-07-2020	Chene liege	16
<b>El hadaj</b>	02-08-2020	Chene liege	67
<b>Djebel el Ouahch</b>	15-08-2020	Broussailles	15
<b>Draa el Naga</b>	06-09-2020	Eucalyptus	40
<b>Draa el Naga</b>	07-10-2020	Cypres	3.5
<b>Draa el Naga</b>	23-10-2020	Eucalyptus	4
<b>El hadaj</b>	20-06-2021	Broussaille	0.5
<b>Draa el Naga</b>	27-07-2021	Eucalyptus -pin d alep	80
<b>Draa el Naga</b>	28-07-2021	Eucalyptus -pin d alep	50

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

<b>Draa el Naga</b>	29-07-2021	Ha eucalyptus -pin d alep	85
<b>Draa el Naga</b>	30-07-2021	Eucalyptus -pin pignon)	507
<b>El Haddej</b>	31-07-2022	Chêne liege	18.5
<b>El Haddej</b>	17-08-2022	Chene liege -pin pignon -eucalyptus - cypre	678
<b>El Haddej</b>	17-08-2022	Chene liege -pin pignon	612
<b>Total</b>			<b>2908.5</b>

Source : conservation des forêts de Constantine+ traitement auteure 2022

La fréquence des incendies dans le massif est élevée, avec plusieurs feux enregistrés chaque année, surtout pendant l'été. Les années 2016, 2017, 2019, 2020 et 2021 ont été particulièrement marquées par des incendies récurrents, démontrant la vulnérabilité accrue de la région pendant la saison chaude.

Les superficies brûlées varient considérablement, allant de petites parcelles de moins de 2 hectares à des zones dévastées de plus grande ampleur. Par exemple, l'incendie du 1er août 2019 à Djebel El Ouhach a ravagé 380 hectares, tandis que les feux de 2021 à Draa el Naga ont détruit jusqu'à 507 hectares. Les incendies de 2022 à El Hadaj sont particulièrement notables, affectant jusqu'à 678 hectares de végétation, y compris des espèces essentielles comme les chênes-lièges et les pins pignons.

Au fil des années, la fréquence et l'ampleur des incendies semblent augmenter, avec des impacts plus sévères sur les écosystèmes forestiers locaux. Les incendies de 2020 et 2021 ont notamment touché des forêts matures, aggravant la dégradation environnementale de la région.

### **5.3 Cartographie des Indices Pré- et Post-Incendies**

#### **5.3.1 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (06-07-2017) / Post-Incendie (26-07-2017)**

##### **5.3.1.1 NDVI**

Le NDVI est un indicateur important pour évaluer la santé de la végétation, les cartes ci-dessous représentent l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), avant et après un incendie qui s'est déroulé le 12 juillet 2017.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

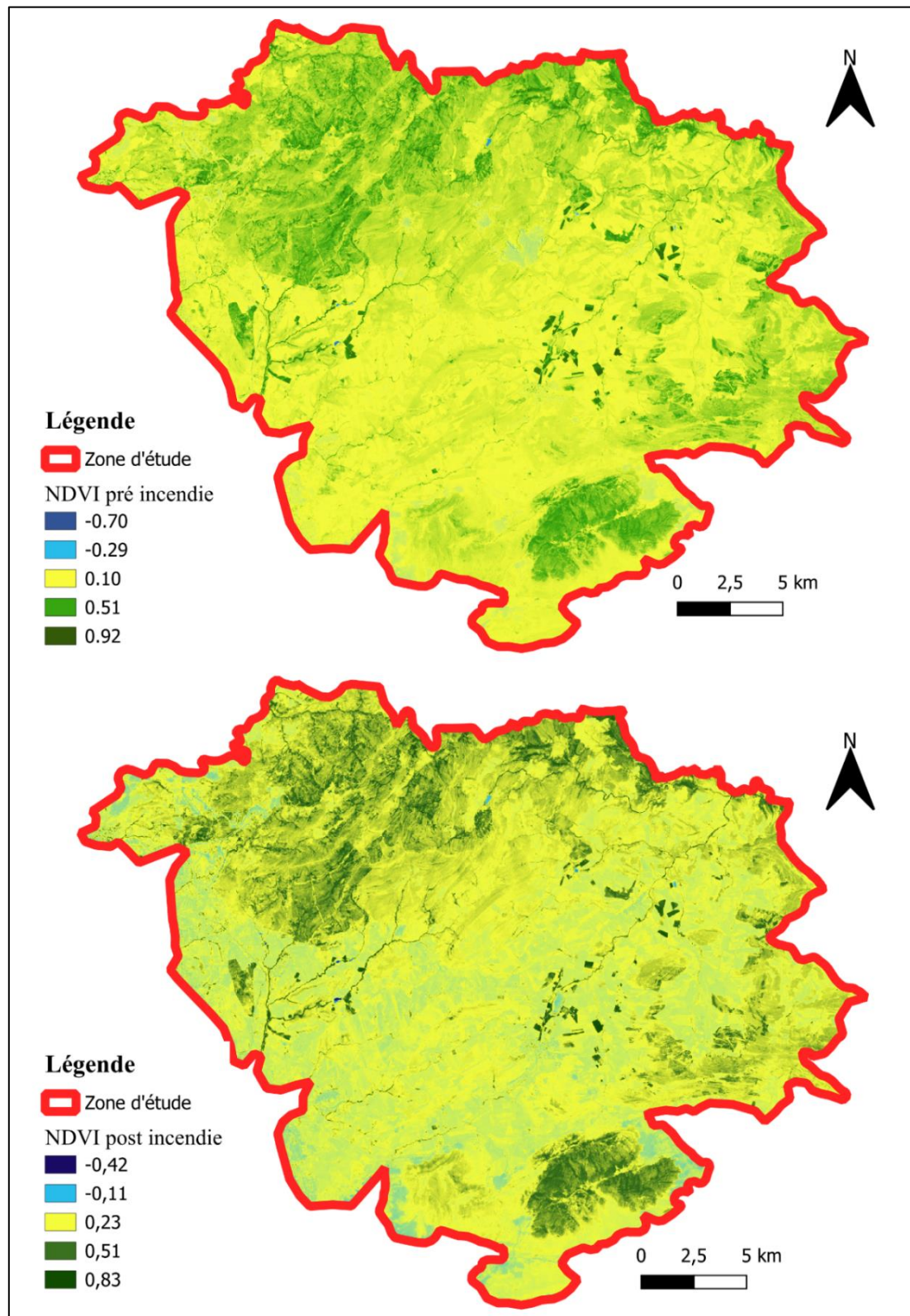


Figure 5.2: carte NDVI pré et post incendie (2017)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub

(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

Les valeurs de NDVI avant l'incendie varient de -0.70 à 0.92, Les zones avec des valeurs proches de 0.92 indiquent une végétation dense et en bonne santé, les zones avec des valeurs autour de 0.10 à 0.51 représentent des zones avec une végétation plus clairsemée ou moins saine. Tandis que les zones en bleu avec des valeurs négatives allant jusqu'à -0.70 peuvent indiquer des zones sans végétation, comme des sols nus, ou des zones fortement dégradées.

Les valeurs de NDVI après l'incendie varient de -0.42 à 0.83, on observe une diminution générale dans les valeurs NDVI. Ce qui suggère que certaines zones de végétation dense ont été touchées par l'incendie. Les zones en bleu représentant des valeurs NDVI négatives, sont présentes, mais elles semblent être moins étendues qu'avant l'incendie. Cela pourrait suggérer que certaines zones sans végétation auparavant ont été légèrement recolonisées par la végétation post-incendie

La disparité entre les valeurs pré-incendie et post-incendie indique vraisemblablement les zones impactées par le feu, où la végétation a subi une diminution significative.

### **5.3.1.2 NBR :**

Les deux cartes ci-dessous montrent l'indice NBR (Normalized Burn Ratio) avant et après l'incendie, ce qui permet d'évaluer l'impact de l'incendie sur la végétation de la zone d'étude.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

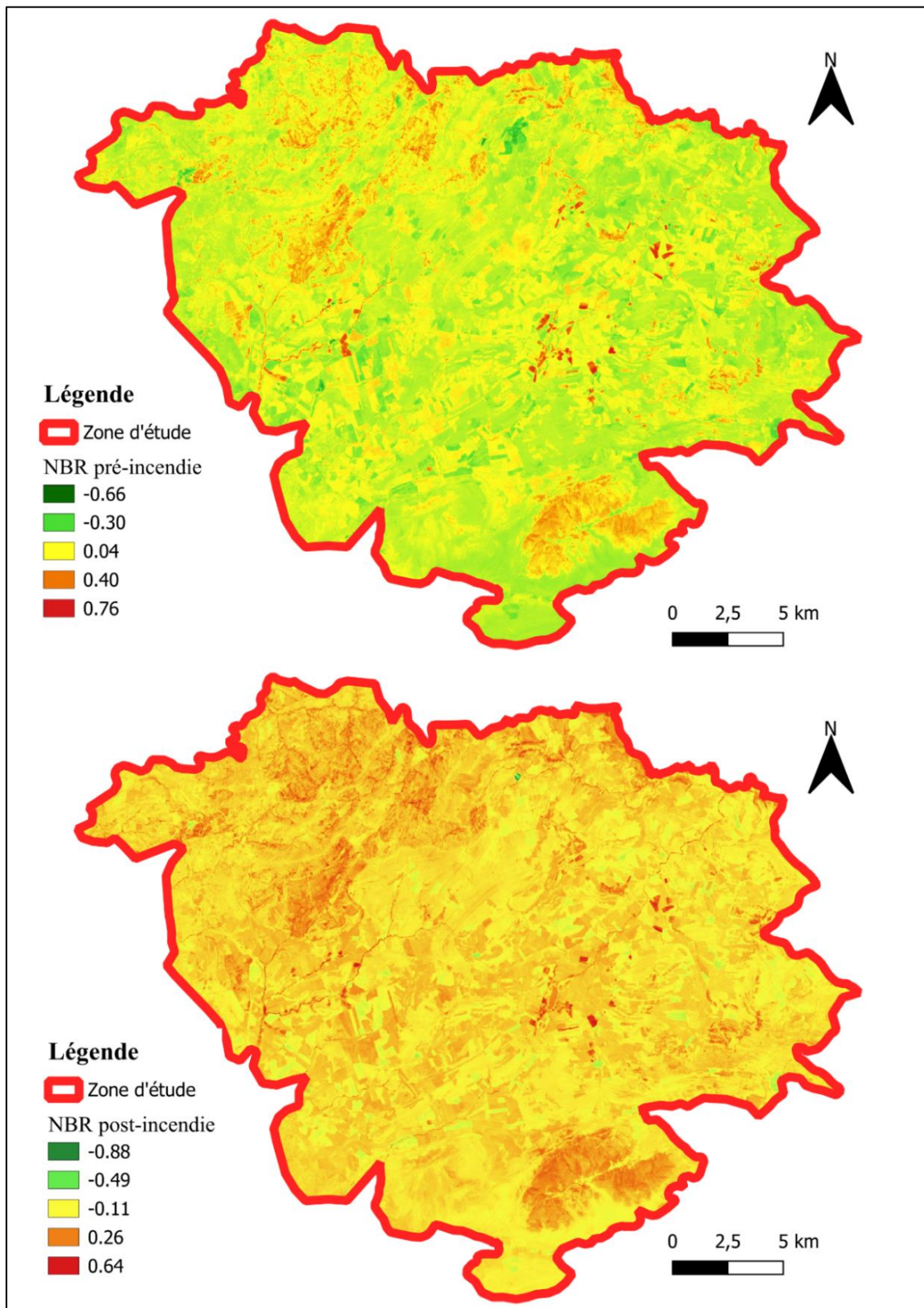


Figure 5.3: Carte NBR Pré et post Incendie (2017)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub

(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouahch : Une approche par télédétection et classification supervisée**

En ce qui concerne l'indice NBR avant l'incendie , la zone d'étude montre une bonne couverture végétale avec des valeurs NBR élevées dans plusieurs régions -0.66 à 0.76. Cela indique une végétation saine et dense.

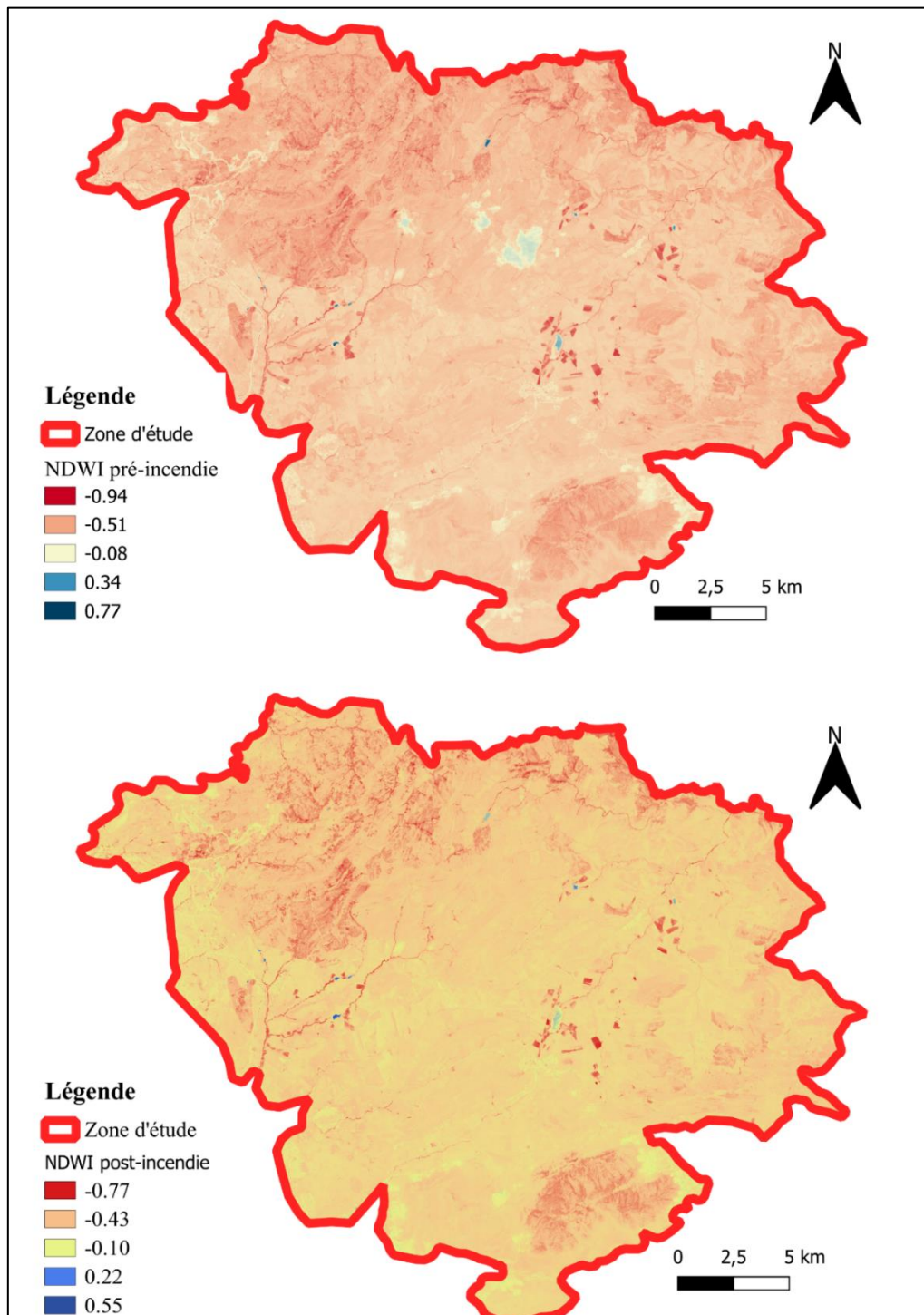
Après l'incendie on remarque une diminution des valeurs de NBR dans l'ensemble de la zone d'étude (-0.88 à 0.64), avec une augmentation des zones ayant des valeurs négatives. Cela indique que l'incendie a significativement réduit la densité et la vitalité de la végétation.

Ces cartes illustrent efficacement la gravité des dégâts causés par l'incendie et peuvent être utilisées pour orienter les efforts de réhabilitation ou de gestion post-incendie.

- **NDWI**

L'indice de l'eau est utilisé pour surveiller les changements dans le contenu en eau des feuilles des plantes et peut également être utile pour délimiter et caractériser les zones ouvertes d'eau. Les cartes ci-dessous représentent les valeurs de NDWI dans le grand massif de Djebel El Ouahch :

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée



**Figure 5.4:** Carte NDWI Pré et post-Incendie (2017)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub  
(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024



## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

Les valeurs de cet indice avant l'incendie oscillent entre -0.94 et 0.77. Les valeurs signalent des zones riches en eau, avec une végétation humide ou des étendues ouverte d'eau. Les valeurs moyennes représentent des zones avec une végétation sèche, des zones urbaines ou rocheuses. Les valeurs négatives et très basses caractérisent une végétation très sèche, brûlée ou présentant un faible taux d'humidité dans le sol.

On observe une diminution générale des valeurs NDWI après l'incendie -0.77 à 0.55. La zone d'étude montre plus de zones avec des valeurs négatives, ce qui suggère une perte d'humidité due à l'incendie. Les zones avec des valeurs NDWI positives sont moins étendues, ce qui indique une réduction de la teneur en eau, probablement en raison de la destruction de la végétation et de l'évaporation causée par la chaleur de l'incendie.

### **5.3.2 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (21/07/2019 / Post-Incendie (15/08/2019)**

- **NDVI**

Les images satellitaires exposent l'indice de végétation calculé avant et après l'incendie survenu le 1er août 2019.

La carte pré-incendie présente des valeurs allant de -0,17 à 0,81. Les valeurs élevées correspondent aux zones de couleur vert foncé, indiquant une végétation en bonne santé. Les valeurs moyennes à faibles, représentées en jaune à rouge sur la carte, signalent des zones de végétation moins dense, des zones agricoles ou des zones dépourvues de végétation.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

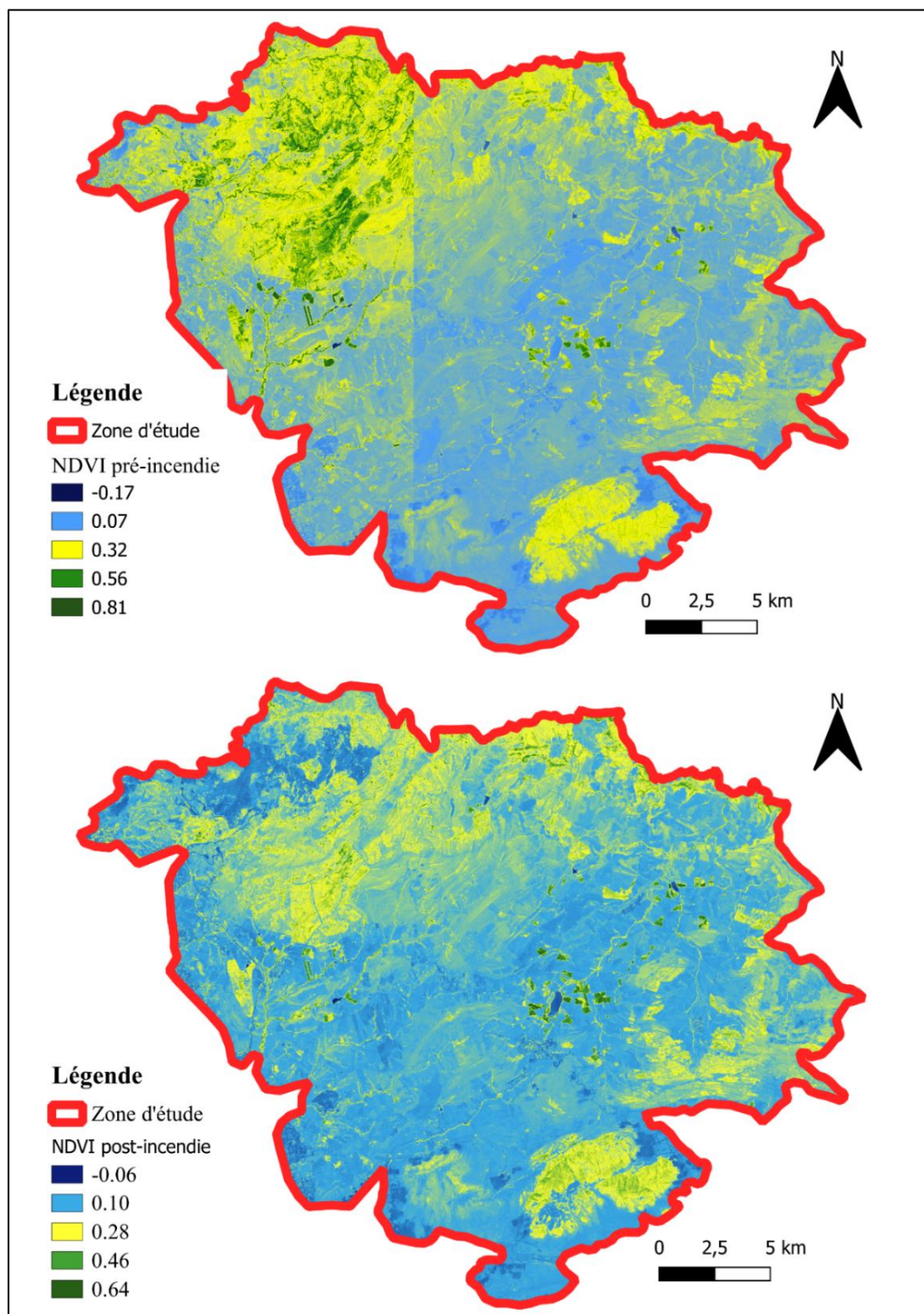


Figure 5.5: Carte NDVI Pré et post-incendie (2019)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub  
(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

La deuxième carte post-incendie, illustrant l'indice NDVI, dépeint l'impact de l'incendie sur la végétation. On observe une diminution de la végétation, symbolisée par les couleurs jaune, orange et rouge sur la carte, ce qui suggère des dommages causés par l'incendie de forêt. En revanche, les zones vertes indiquent que la végétation n'a pas été affectée ou est en cours de rétablissement.

- **NBR**

Les images satellitaires employées, conjointement avec le calcul de l'indice des zones brûlées (NBR), sont exploitées dans l'analyse des répercussions de l'incendie du 1er août 2019. La carte pré-incendie indique que les zones vertes correspondent à une végétation en bonne santé, tandis que les zones jaunes et rouges signalent des zones endommagées ou brûlées.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

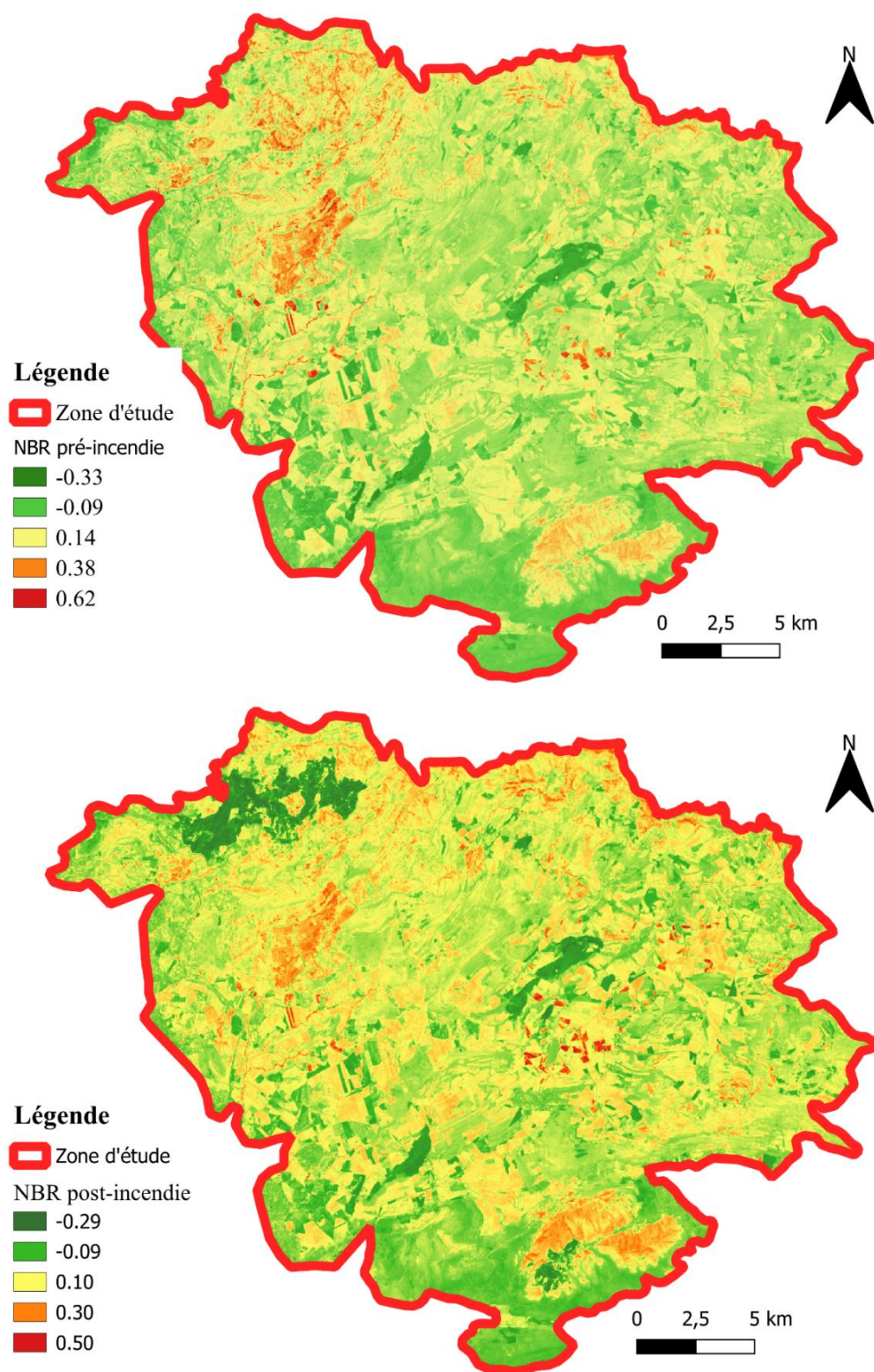


Figure 5.6: Carte NBR pré et post-incendie (2019)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub

(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

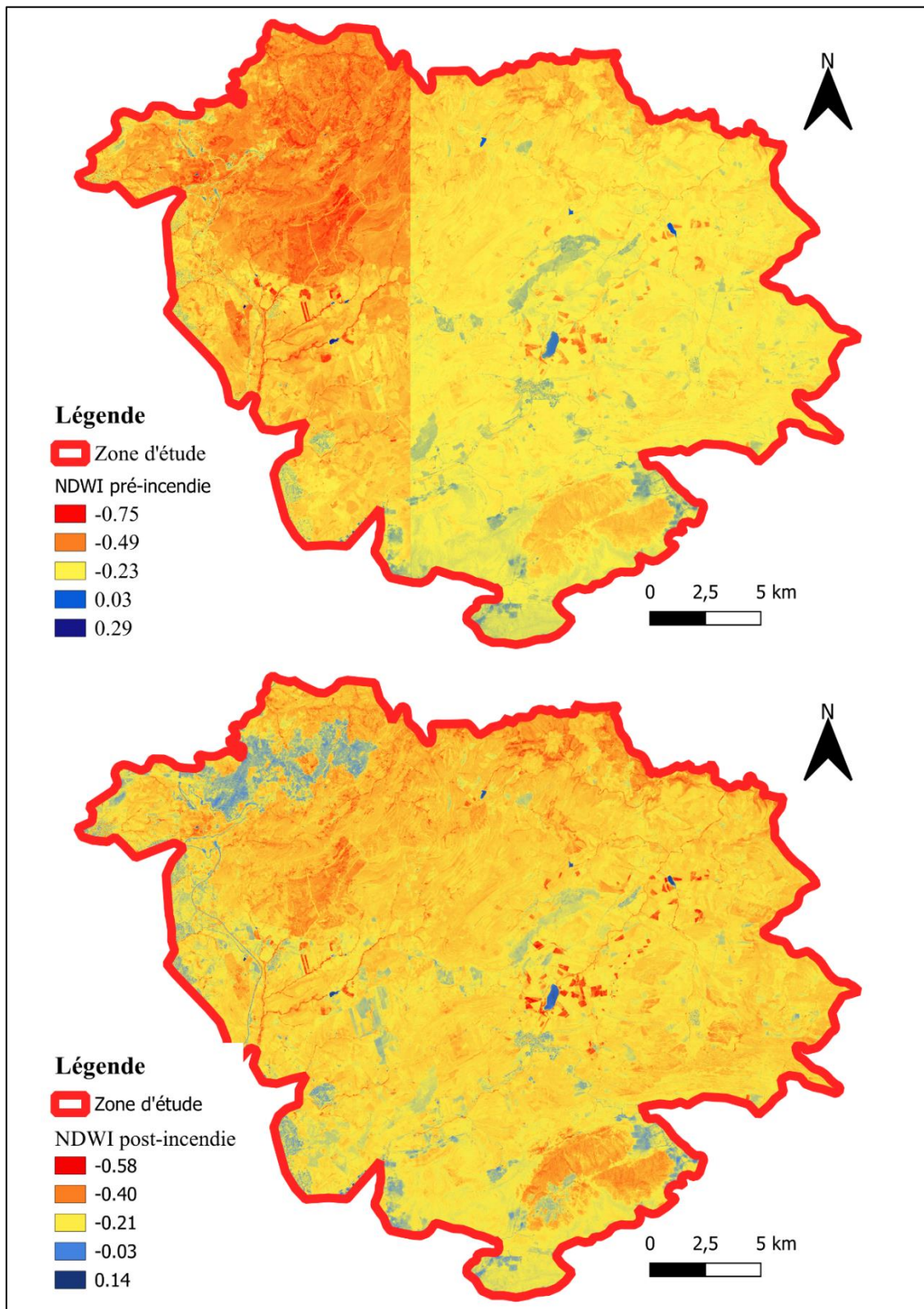
La carte post-incendie de l'indice NBR révèle des valeurs plus basses en rouge, ce qui signifie que ces zones ont été touchées par le feu.

Les zones où la valeur de NBR a baissé le plus sont celles qui ont été les plus touchées par l'incendie. Ces zones peuvent montrer une perte de végétation et la présence de sol nu ou de cendres.

- **NDWI**

L'utilisation de l'indice NDWI avant et après l'incendie permet d'évaluer les changements dans l'humidité de la végétation.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée



**Figure 5.7:** Carte NDWI Pré et post-incendie (2019)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub  
(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

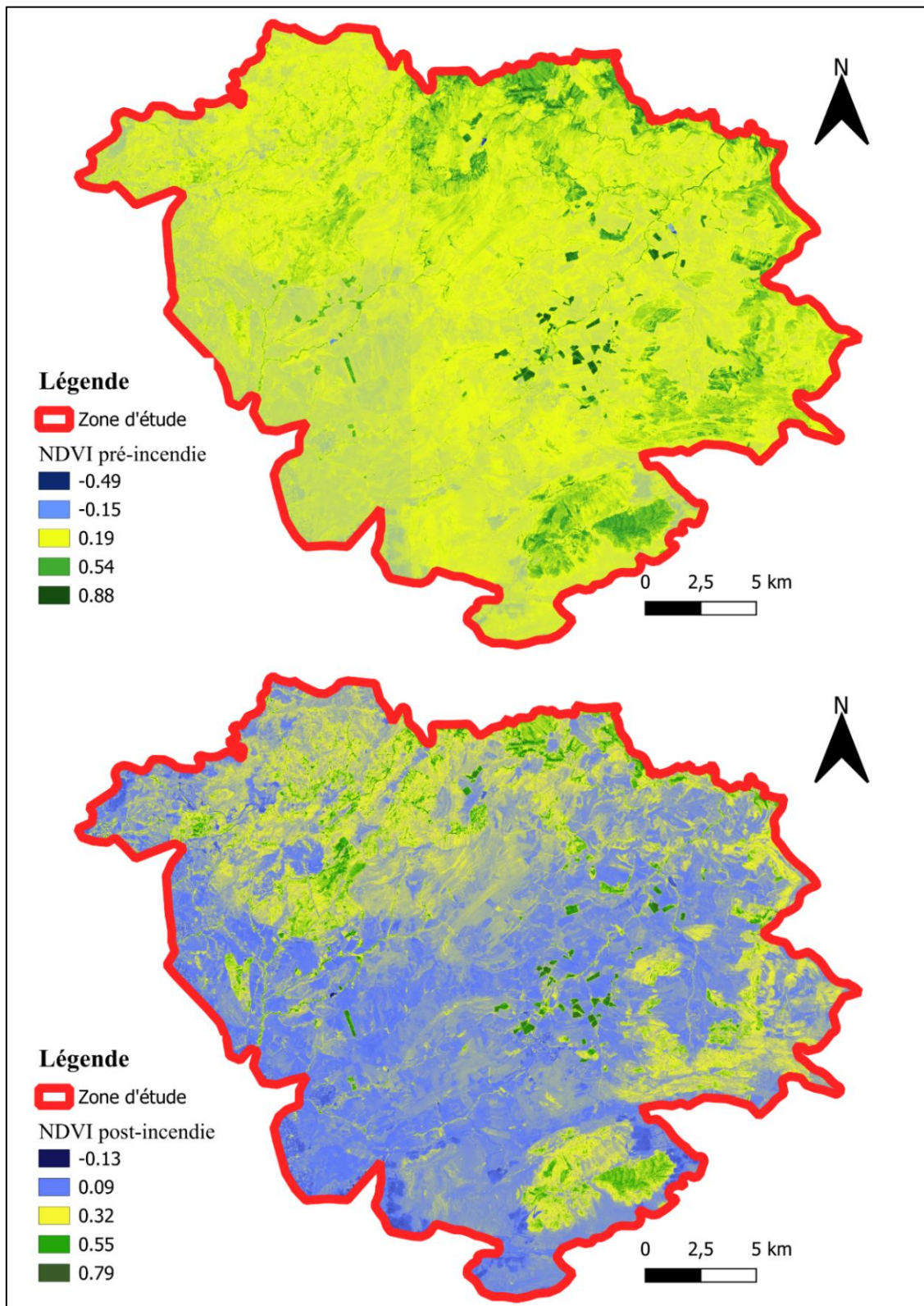
La carte pré-incendie, avec des valeurs élevées de NDWI, indique des zones avec une végétation humide ou des plans d'eau. En revanche, dans la carte post-incendie, une diminution des valeurs de NDWI suggère une réduction de l'humidité dans la végétation, signalant ainsi les effets de l'incendie sur la santé de la végétation. Cela peut être dû à des dommages directs causés par le feu ou à des changements dans l'environnement après l'incendie.

### **5.3.3 Résultat du calcul de l'indice NDVI, NBR et NDWI du GMDO: Pré -Incendie (20/07/2021 / Post-Incendie (09/08/2021)**

- **NDVI**

Les images satellitaires capturées avant et après l'incendie survenu le 27 juillet 2021 présentent les valeurs de l'indice de végétation. Avant l'incendie, la carte dépeint une végétation généralement saine, caractérisée par des valeurs élevées de l'indice.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée



**Figure 5.8:** Carte NDVI pré et post-incendie (2021)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub

(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024



## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

Postérieurement à l'incendie, on observe une diminution significative de la végétation, avec certaines zones prenant une teinte jaune plus prononcée, témoignant de l'impact de l'incendie sur ces régions.

### **5.3.3.1 NBR**

Les images satellitaires prises avant et après l'incendie du 27 juillet 2021 présentent les valeurs de l'indice NBR (Normalized Burn Ratio). La carte pré-incendie de l'indice NBR affiche une plage de valeurs entre -0,45 et 0,71. Les zones rouges sur cette carte représentent les zones endommagées par les incendies, tandis que les zones vertes indiquent une végétation saine.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

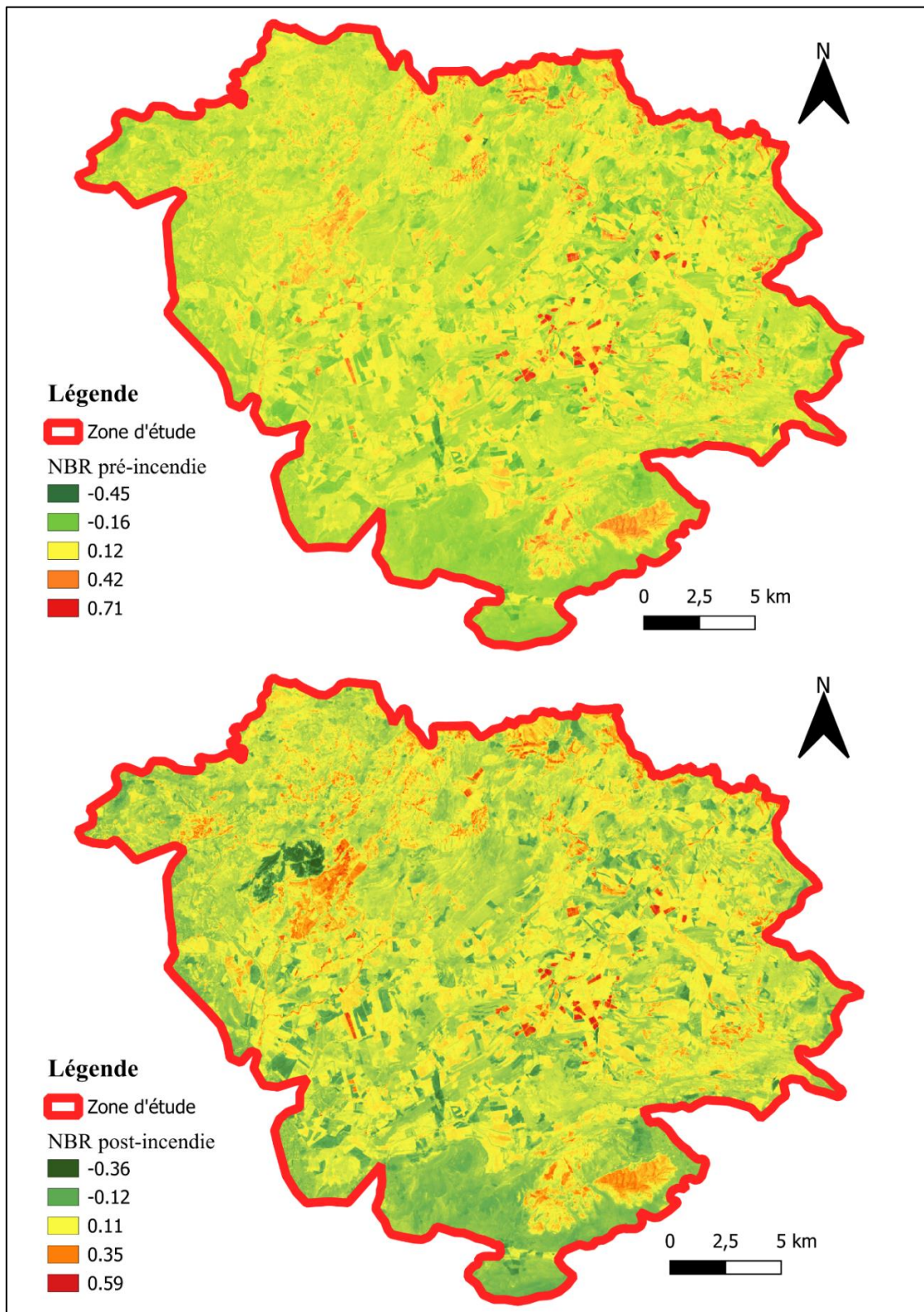


Figure 5.9: Carte NBR pré-incendie 20-07-2021

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub  
(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

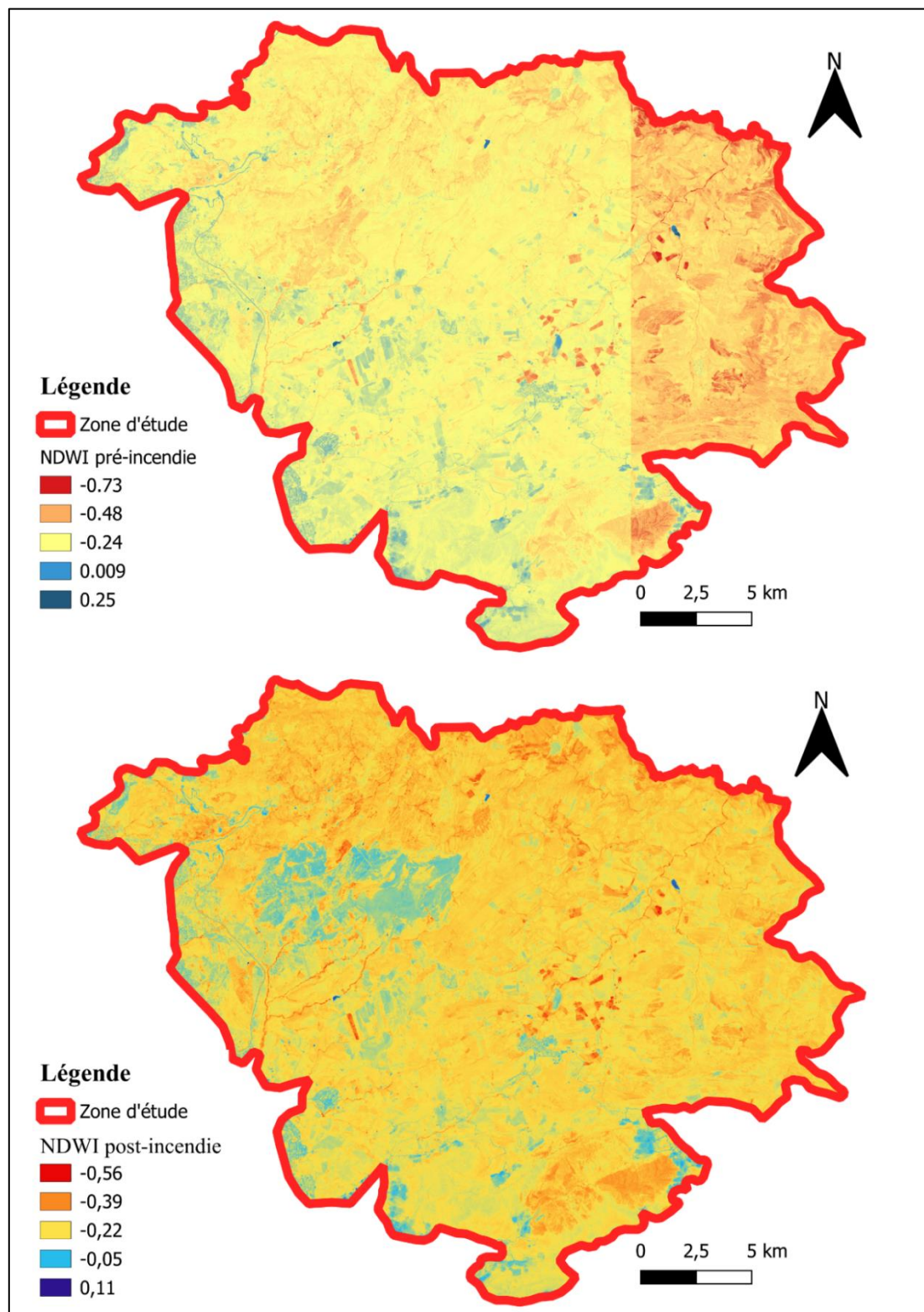
## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

Quant à la carte post-incendie de l'indice NBR, elle révèle une diminution significative dans la végétation, suggérant ainsi que ces zones ont été impactées par l'incendie. Cette observation souligne l'utilité de l'indice NBR pour évaluer les dommages causés par les incendies sur la végétation.

### **5.3.3.2 NDWI**

Sur la carte postérieure à l'incendie, les indices de l'Eau Normalisés par Différence (NDWI) tendent à être inférieurs à ceux observés avant l'incendie, manifestés par une dominance des teintes allant du jaune au rouge. Ceci suggère une probable réduction de la couverture végétale et/ou des surfaces aquatiques, entraînant une baisse de l'humidité dans la région examinée. Les zones affichant les valeurs NDWI les plus basses, marquées en rouge, sont celles qui ont subi le plus de dommages à cause de l'incendie.

Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée



**Figure 5.10:** Carte NDWI préet post-incendie (2021)

Source : Images Sentinel-2 depuis Copernicus Open Access Hub  
(<https://scihub.copernicus.eu/>) + traitement auteure 2024

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

La carte pré-incendie présente, en comparaison, des valeurs NDWI plus élevées, avec une dominance de la couleur bleue, ce qui indique une humidité accrue due à la présence de végétation en bonne santé et/ou de plans d'eau.

### **5.4 Analyse des indices de végétation et d'humidité : Impact de la réduction de l'humidité et stratégies de restauration post-incendie**

L'analyse comparative des cartes révèle une baisse notable de l'humidité associée à la végétation ou suite à l'incendie. Cette réduction d'humidité peut entraîner des répercussions négatives sur l'écosystème, y compris une diminution de la diversité biologique et une perturbation des habitats naturels.

Les secteurs affichant une transition marquée du bleu vers le jaune ou le rouge identifient les régions directement touchées par l'incendie, nécessitant potentiellement une attention particulière pour leur réhabilitation écologique.

Des valeurs NDWI légèrement réduites pourraient signaler des zones où la végétation présente un potentiel de récupération naturelle avec le temps.

Ces données jouent un rôle crucial pour les responsables politiques et les gestionnaires fonciers, car elles fournissent des informations précises et quantifiables sur l'impact des incendies sur les écosystèmes. Grâce à l'analyse des indices tels que le NDWI (Normalized Difference Water Index), les décideurs sont en mesure d'identifier les zones les plus gravement touchées, prioriser les interventions de restauration, et allouer efficacement les ressources disponibles.

En intégrant ces données dans la planification stratégique, il devient possible d'établir des mesures ciblées pour restaurer la biodiversité, préserver les habitats endommagés et prévenir de futures dégradations. Ces informations permettent également de formuler des stratégies adaptées aux spécificités écologiques locales, en tenant compte des capacités de régénération naturelle de certaines zones. Ainsi, la hiérarchisation des efforts de réhabilitation devient plus précise et les stratégies de gestion post-incendie plus efficaces, assurant une récupération durable des terres affectées et une meilleure résilience des écosystèmes face aux futurs incendies.

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouahch : Une approche par télédétection et classification supervisée**

**Tableau 5.4** Valeurs des indices Avant /Après des incendies

<b>Date de l'incendie</b>	<b>NDVI avant</b>	<b>NDVI après</b>	<b>NBR avant</b>	<b>NBR après</b>	<b>NDWI avant</b>	<b>NDWI après</b>
<b>12/07/2017</b>	0.8598	0.9273	0.4156	0.3547	0.6421	0.5538
<b>01/08/2019</b>	0.8100	0.7401	0.4890	0.4023	0.6587	0.5000
<b>27/07/2021</b>	0.8791	0.8105	0.5213	0.4008	0.6780	0.5254

Source : auteure 2024

**5.5 L'observation de l'évolution de l'occupation du sol : Classification supervisée de la forêt de Draa El Naga**

**5.5.1 Choix de la zone d'étude**

Nous avons sélectionné la zone de Draa El Naga pour réaliser une cartographie de l'occupation du sol à trois dates différentes, afin d'observer l'évolution du sol. Cette zone a été choisie pour plusieurs raisons :

L'analyse et la classification de l'occupation du sol sont plus précises dans des zones de petite superficie, ce qui permet de mieux identifier les changements.

La collecte de données dans la région du Djebel el Ouahch est ardue et complexe, présentant un risque plus élevé d'erreurs par rapport à Draa El Naga.

## Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

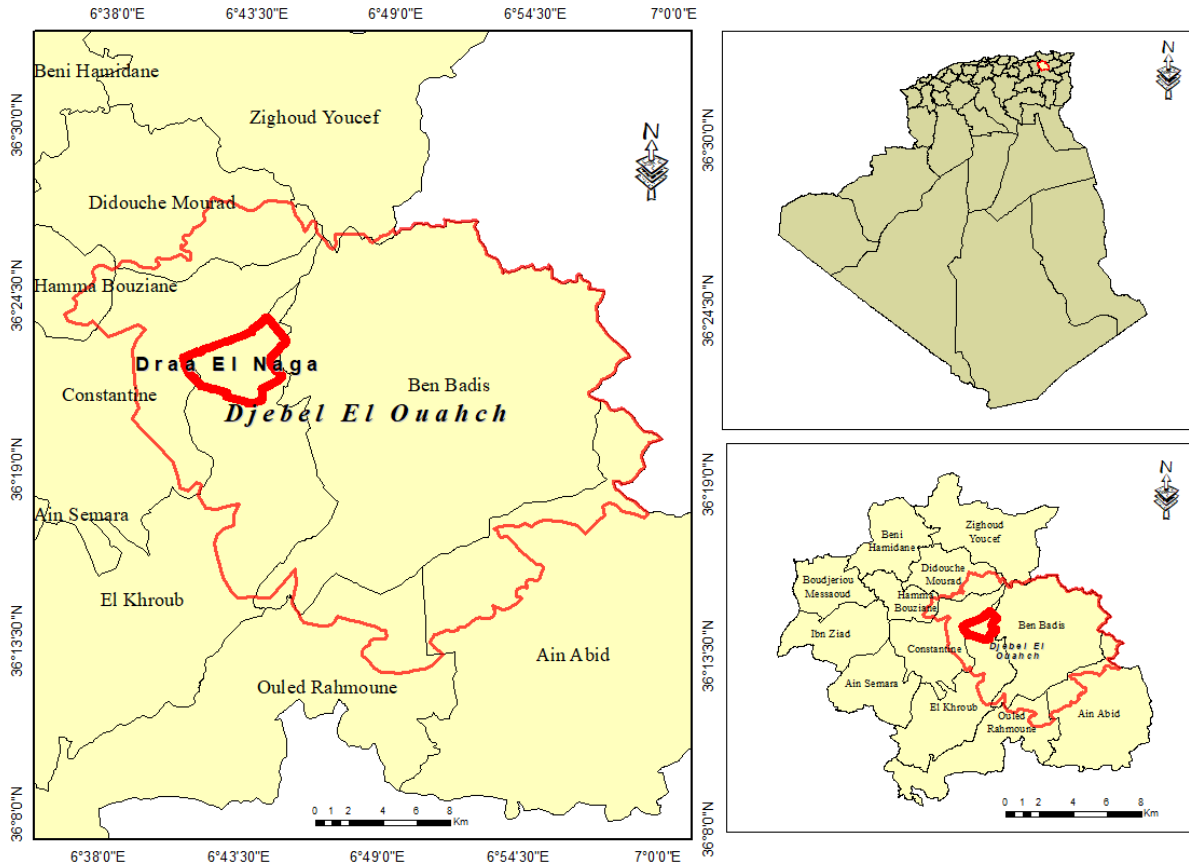


Figure 5.11: Carte de situation Draa El Naga

Source : auteure 2023

### 5.5.2 Caractéristiques des Bandes Spectrales de l'Operational Land Imager (OLI) de LANDSAT 8 :

Depuis 1972, les satellites Landsat ont continuellement acquis des images de la surface terrestre de la Terre, fournissant des données ininterrompues pour aider les gestionnaires de terrains et les décideurs politiques à prendre des décisions éclairées concernant les ressources naturelles et l'environnement. Les données acquises par les satellites Landsat sont distribuées par le Centre d'Observation et de Science des Ressources Terrestres de l'USGS (EROS) à Sioux Falls, Dakota du Sud.

Voici les caractéristiques des bandes spectrales de l'Operational Land Imager (OLI) de LANDSAT 8 :

## Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

**Tableau 5.5** caractéristiques des bandes spectrale l'Operational Land Imager (OLI) de LANDSAT 8

Bande	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale (m)
1 Aérosols Côtiers	0.43 - 0.45	30
2 Bleu	0.450 - 0.51	30
3 Vert	0.53 - 0.59	30
4 Rouge	0.64 - 0.67	30
5 Proche-Infrarouge	0.85 - 0.88	30
6 SWIR 1	1.57 - 1.65	30
7 SWIR 2	2.11 - 2.29	30
8 Panchromatique (PAN)	0.50 - 0.68	15
9 Cirrus	1.36 - 1.38	30
10 TIRS 1	10.6 - 11.19	100
11 TIRS 2	11.5 - 12.51	100

Source: U.S. Geological Survey. Landsat 8. Consulté le [20/03/2024] sur

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

- Les deux principaux capteurs du Landsat 8 sont l'Operational Land Imager (OLI) et le Thermal Infrared Sensor (TIRS).
- L'Operational Land Imager (OLI) génère 9 bandes spectrales (Bande 1 à 9) avec des résolutions de 15, 30 et 60 mètres.
- Ensuite, le Thermal Infrared Sensor (TIRS) comprend 2 bandes thermiques ayant une résolution spatiale de 100 mètres.

### 5.5.3 La Composition colorée

Jean-Paul Donnay a défini la composition colorée comme une image en couleur préparée en projetant des images multispectrales individuelles en noir et blanc, chacune à travers un filtre de couleur différent. Lorsque les images projetées sont superposées, il en résulte une image composite en couleur.

L'utilisation de la combinaison de couleurs 7,5,4 du satellite LANDSAT 8 repose sur les propriétés des bandes spectrales ainsi que sur les caractéristiques physiques et d'occupation du sol, notamment pour distinguer la végétation saine de celle brûlée.



## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

L'utilisation de cette composition colorée se base sur les protocoles de la mission Landsat de USGS ( U.S geological survey) et EROS ( Earth Resources Observation & Science Center ). Cette composition est dérivée de l'exploitation des réponses spectrales de ces bandes aux variations d'humidité, à la structure de la végétation et aux changements d'absorption de la chlorophylle dus aux incendies.

- **Bande 7 : (SWIR 2 Courte longueur d'onde infrarouge)**

Celle-ci est extrêmement sensible aux variations d'humidité. Après un feu, la végétation se dessèche, entraînant une diminution notable d'humidité qui se manifeste par une augmentation de la réflectivité dans les zones incendiées, capturée par la bande SWIR. De ce fait, cette bande joue un rôle clé dans la détection des zones brûlées.

La bande SWIR peut détecter la fumée et la brume, ce qui peut donner une vue plus claire dans le cas d'un feu actif ou post incendie.

- **Bande 5 (NIR - Proche-Infrarouge)**

Santé de la végétation : La végétation saine réfléchit fortement la lumière NIR en raison de la structure interne de ses feuilles. Cela fait du NIR une bande clé pour évaluer la santé et la vigueur de la végétation. En contraste, les zones brûlées ou la végétation en mauvaise santé réfléchissent moins la lumière NIR, apparaissant plus sombres dans cette bande.

Contraste avec les zones brûlées : Le contraste entre la haute réflectance de la végétation saine et la réflectance plus faible des zones brûlées dans la bande NIR aide à distinguer les deux.

- **Bande 4 (Rouge)**

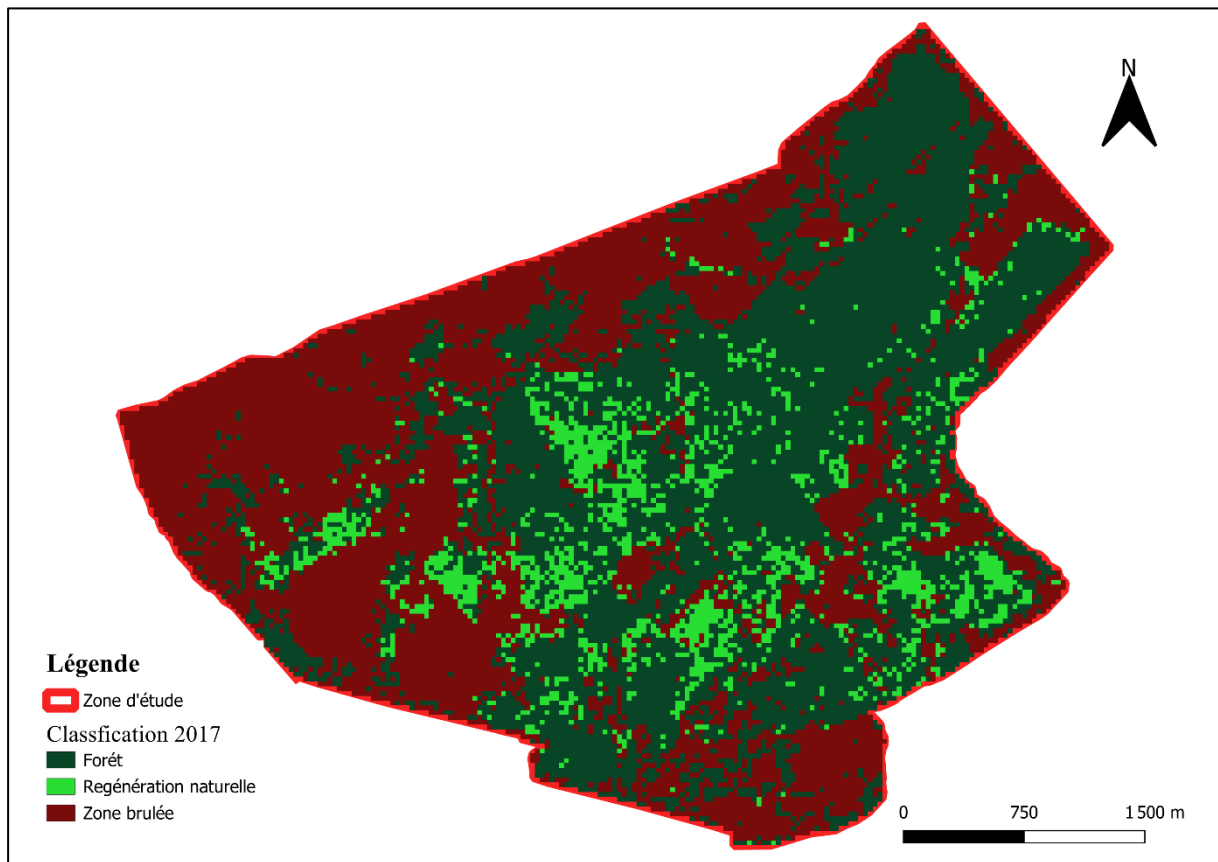
Absorption de la chlorophylle : La bande rouge est celle où se produit l'absorption de la chlorophylle, ce qui la rend précieuse pour évaluer la santé des plantes. La végétation saine et verte absorbe plus de lumière rouge pour la photosynthèse, tandis que les zones brûlées ou les zones avec moins ou sans végétation réfléchissent plus de lumière rouge, apparaissant plus brillantes dans cette bande.

### **5.5.4 Résultats de la classification supervisée: Impact des incendies sur la forêt de Draa El Naga**

À travers l'analyse des trois cartes réalisées via QGIS avec les images satellites LANDSAT 8 OLI à des dates différentes, nous avons noté des modifications significatives dans l'occupation

## Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée

du sol concernant la forêt dense, la régénération naturelle, et les zones affectées par les incendies :



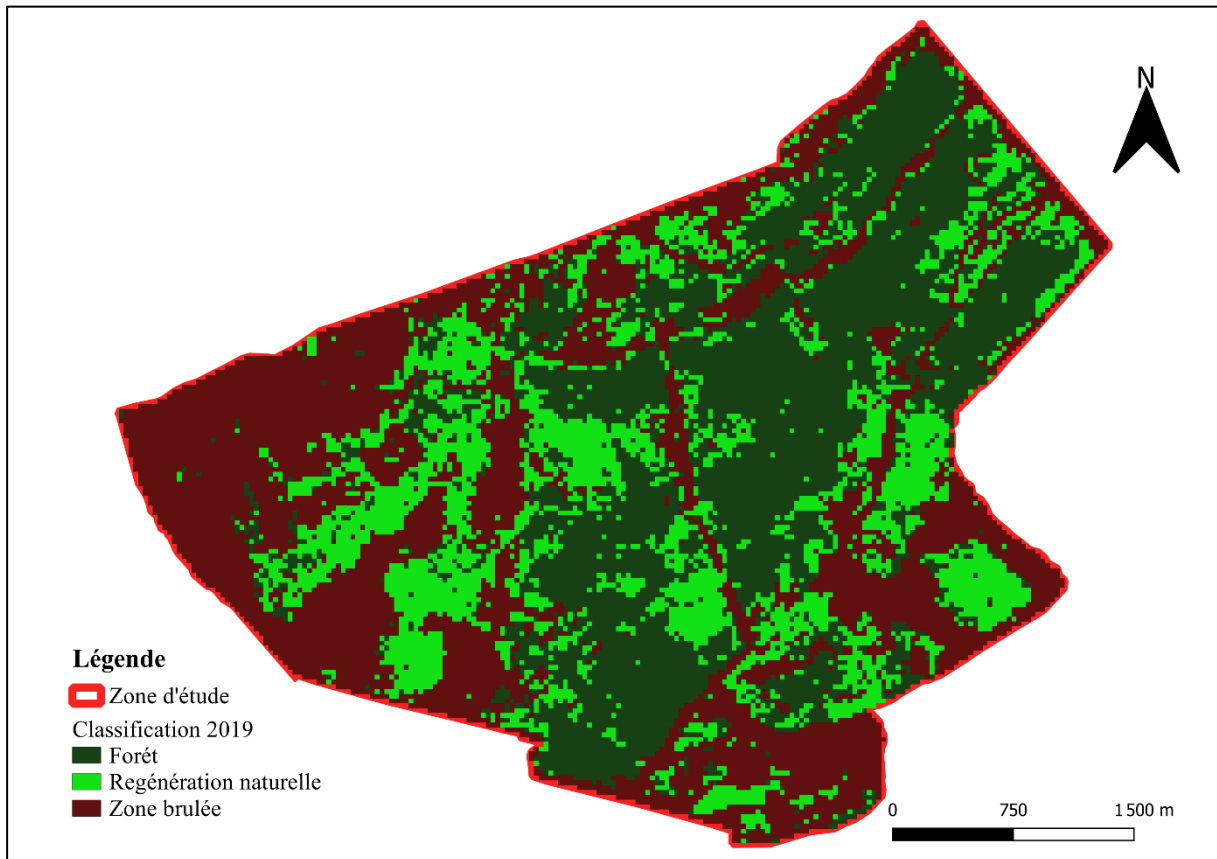
**Figure 5.12:** Carte d'occupation du sol 2017

Source : images Landsat 8 OLI fournies par l'US Geological Survey (USGS)

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>) + traitement auteure 2024.

Concernant les zones brûlées, il est apparu clairement que l'étendue de ces zones a augmenté au fil des trois années observées, une expansion qui peut être attribuée aux fréquents incendies survenus dans la région. Cette observation souligne l'impact croissant des feux sur l'écosystème de la forêt Draa El Naga, mettant en évidence la nécessité de stratégies de gestion et de prévention des incendies plus efficaces pour protéger ces habitats vulnérables.

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

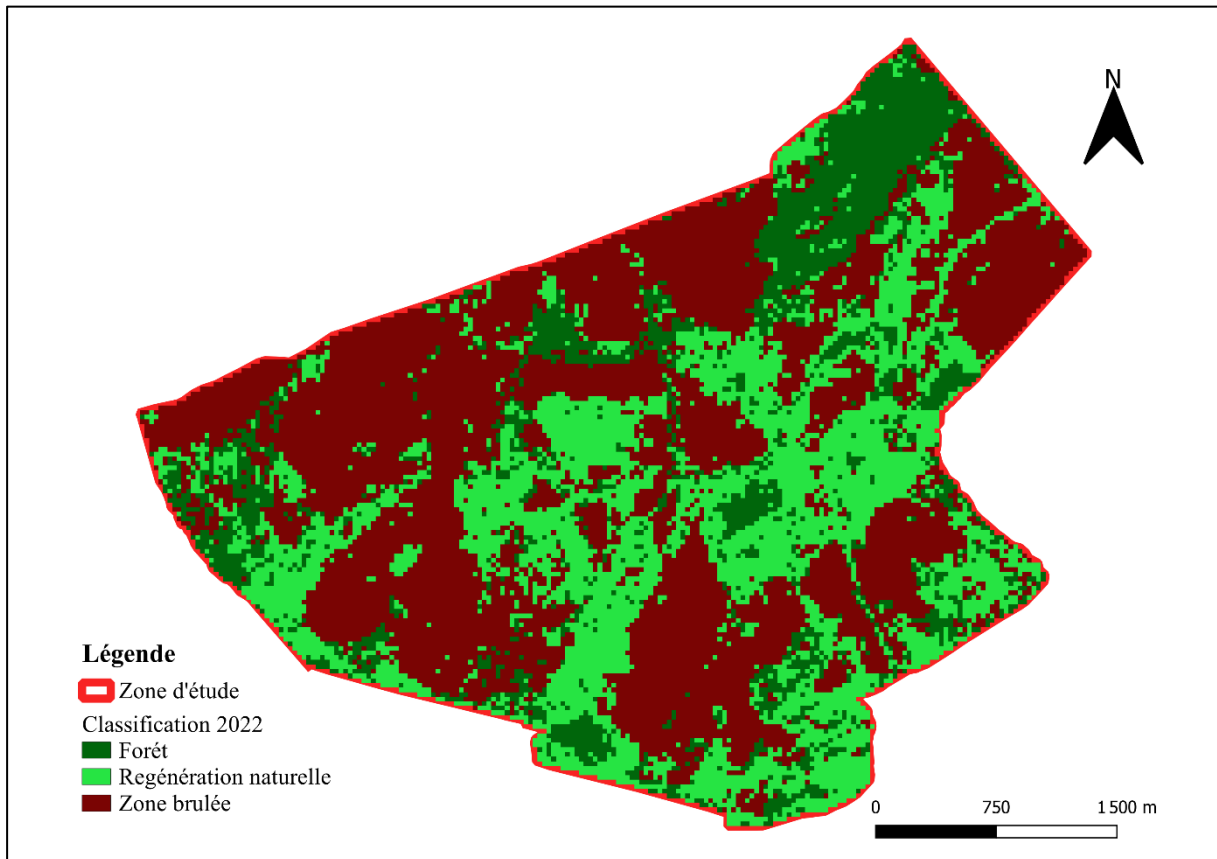


**Figure 5.13:** Carte d'occupation du sol 2019

Source : images Landsat 8 OLI fournies par l'US Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) + traitement auteure 2024.

Notre analyse a mis en évidence une diminution de la végétation dense au sein de ces zones forestières au fil des ans, attribuable à diverses perturbations environnementales. Cependant, certaines sections de la forêt ont réussi à préserver leur densité et leur intégrité écologique malgré ces défis.

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**



**Figure 5.14:** Carte d'occupation du sol 2022

Source : images Landsat 8 OLI fournies par l'US Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) + traitement auteure 2024.

En ce qui concerne la régénération naturelle, les données indiquent une reprise et un renouvellement de la végétation après les incendies. Cette régénération traduit la capacité de l'écosystème à se restaurer après des perturbations, soulignant l'importance des cycles naturels de feu et de régénération pour la santé et la dynamique de la forêt à long terme.

Ces observations fournissent des insights précieux sur les dynamiques de l'occupation du sol dans la forêt Draa El Naga, mettant en lumière les défis et opportunités pour la gestion forestière et la conservation de la biodiversité dans cette région.

## **Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

### **Conclusion et perspectives**

L'utilisation judicieuse des images satellitaires dans notre étude a été cruciale pour le calcul précis des indices de végétation tels que le NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée), le NBR (Ratio de Brûlure Normalisé) et le NDWI (Indice de Différence Normalisée de l'Eau). Ces indices nous ont permis d'évaluer de manière approfondie l'impact des incendies de forêt sur la végétation, en mettant en évidence non seulement la sévérité des dommages causés par les incendies mais aussi les variations dans l'hydratation et la santé de la végétation environnante. Le NDVI, en particulier, a révélé des informations précieuses sur la densité de la végétation et sa vigueur post-incendie, tandis que le NBR a aidé à délimiter clairement les zones affectées par les feux. Le NDWI, d'autre part, a fourni des insights significatifs sur les modifications dans l'humidité du sol et la présence d'eau, essentiels pour comprendre les changements écologiques après un incendie.

À travers la réalisation de trois cartes d'occupation du sol, correspondant à trois dates différentes marquées par d'importants incendies de forêt, nous avons pu observer l'évolution dynamique de l'usage du sol au fil du temps. Ces cartes d'occupation du sol ont été essentielles pour visualiser non seulement les étendues des zones impactées directement par les incendies mais aussi les zones de régénération et de transformation de la végétation suite à ces perturbations. En étudiant ces transformations, notre analyse a révélé des patterns de rétablissement de la végétation ainsi que des modifications à long terme dans la composition et la distribution des écosystèmes forestiers.

L'apport de cette analyse va au-delà de la simple identification des zones affectées par les incendies. Elle offre une base solide pour le développement de stratégies de gestion des forêts plus informées et adaptées. En comprenant les impacts spécifiques des incendies sur la végétation et l'occupation du sol, les gestionnaires et les décideurs peuvent élaborer des politiques plus ciblées pour la prévention des incendies, la gestion des terres post-incendie, et la conservation des habitats naturels. Cela inclut des initiatives pour la reforestation, la gestion durable des zones à haut risque d'incendie, et le renforcement de la résilience des écosystèmes forestiers face aux changements climatiques.

En conclusion, notre utilisation approfondie de la télédétection et des indices spécifiques de végétation a non seulement enrichi notre compréhension de l'impact des incendies de forêt sur les écosystèmes concernés mais a également posé les bases pour une gestion forestière plus éclairée et efficace. En continuant sur cette voie, nous pouvons espérer mieux préserver la

**Chapitre V : Analyse diachronique des changements d'occupation du sol suite aux incendies de forêt dans le massif de Djebel el Ouhach : Une approche par télédétection et classification supervisée**

biodiversité de nos forêts, protéger les ressources naturelles et soutenir les communautés dépendantes de ces écosystèmes vitaux.



**CHAPITRES VI : MODELISATION PREDICTIVE DES RISQUES  
D'INCENDIE DE FORET PAR LOGIQUE FLOUE : UNE APPROCHE  
FLEXIBLE POUR UNE EVALUATION SPATIALE PRECISE**

**Introduction**

La prédiction des feux de forêt représente un domaine critique de la recherche et de la gestion environnementale, visant à prévenir les catastrophes naturelles qui peuvent avoir des impacts dévastateurs sur les écosystèmes, les communautés humaines, et les économies locales et mondiales. L'objectif principal de la prédiction des feux de forêt est de développer des modèles et des stratégies permettant d'identifier les zones à risque de feu de forêt avant qu'ils ne se produisent, afin de permettre une intervention précoce pour prévenir, ou du moins minimiser, les dommages.

D'après (Iliadis et al., 2002 ;2010) , les systèmes de logique floue, un outil de modélisation polyvalent, réputés pour leur adaptabilité, ont trouvé des applications répandues dans des domaines divers tels que la modélisation, la prévision et la classification.

La logique floue, une forme de logique multi valeur qui permet de traiter l'incertitude et l'ambiguïté, s'adapte parfaitement aux défis complexes et aux données souvent imprécises ou incomplètes associées à la prédiction des feux de forêt. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui exigent des données claires et définies, la logique floue peut gérer des informations vagues ou partielles, ce qui est courant dans l'évaluation des risques environnementaux.

Un exemple d'application pourrait être un système de prédiction qui évalue le risque d'incendie en fonction de plusieurs facteurs environnementaux. Chacun de ces facteurs est associé à un degré d'appartenance à des ensembles flous tels que "faible", "moyen", "élevé". Le système combine ensuite ces évaluations en utilisant des règles floues pour produire une estimation globale du risque d'incendie.

La logique floue dans la prédiction des feux de forêt illustre l'importance des approches interdisciplinaires dans la résolution de problèmes environnementaux complexes. En embrassant l'incertitude et la complexité, elle permet de créer des outils de gestion des risques plus sophistiqués et efficaces.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les éléments multifacettes contribuant au risque d'incendie de forêt dans le nord-est de l'Algérie. Ainsi il sera structuré en quatre sections il vise: en premier lieu à étudier le rôle des facteurs environnementaux, y compris la densité de la végétation et la topographie, dans la propagation du feu ; à examiner l'impact des activités



## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

humaines, telles que les pratiques agricoles et l'empiétement urbain, sur l'initiation et la propagation des incendies de forêt en second lieu; à développer un modèle de prédiction des risques complet utilisant la logique floue et les techniques de SIG ; et enfin à évaluer l'efficacité des stratégies d'atténuation existantes et proposer des recommandations fondées sur des preuves pour améliorer la préparation et la réponse aux incendies de forêt dans la région de Constantine

### **6.1 La logique floue dans le contexte de la prédiction environnementale : Fondements méthodologiques**

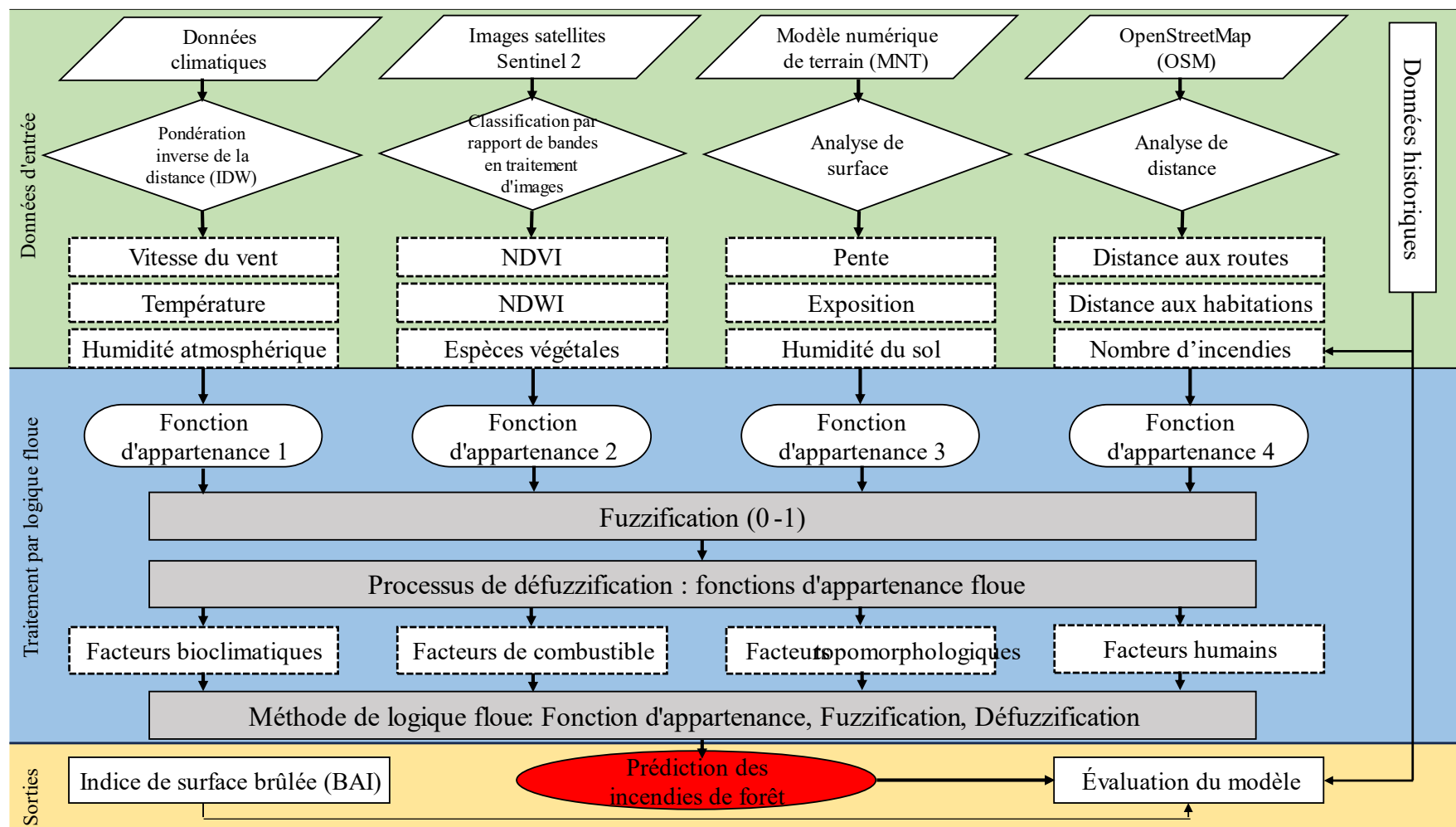
Dans le contexte du paysage forestier de l'Algérie, cette étude se lance dans une exploration complète, exploitant le potentiel synergique de la logique floue et des SIG pour modéliser et cartographier les zones à risque d'incendie de forêt. En fusionnant ces méthodologies avancées, cette recherche s'efforce d'améliorer notre compréhension des modèles de risque d'incendie de forêt dans la région de Constantine.

À travers une analyse et une modélisation minutieuse, l'objectif était de contribuer de manière significative au développement de stratégies proactives, permettant aux communautés locales et aux autorités d'atténuer efficacement l'impact dévastateur des incendies de forêt. Cette approche interdisciplinaire représente non seulement une entreprise scientifique mais se présente également comme un témoignage de notre engagement collectif à préserver notre patrimoine naturel et à garantir la sécurité et le bien-être des communautés habitant ces zones vulnérables.

#### **6.1.1 Description de l'approche par logique floue**

Le diagramme ci-dessous, illustre un processus de prédiction des incendies de forêt en utilisant des techniques de logique floue. Ce processus débute par la collecte de données variées, qui servent de base à la prédiction.

## Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise



**Figure 6.1** Organigramme de la méthode générale utilisée pour la cartographie de prédiction des incendies de forêt.

Source : auteure 2024

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

- Images satellites Sentinel 2 : Utilisées pour obtenir des informations détaillées sur la couverture terrestre et la végétation via des techniques de traitement d'images telles que le ratio de bandes et la classification.
- Données climatiques : Comprenant la vitesse du vent, la température et l'humidité atmosphérique, ces données sont essentielles pour évaluer les conditions propices aux incendies.

Ces données sont ensuite soumises à différents types d'analyses :

- Pondération par la distance inverse (IDW) : Méthode utilisée pour interpoler des données spatiales en fonction de la distance inverse des points connus.
- Modèle numérique de terrain (MNT) : Fournit des informations sur la pente et l'exposition du terrain, des facteurs importants qui affectent le comportement des feux de forêt.
- Carte Open Street Map (OSM) : Utilisée pour l'analyse de distance, comme la proximité aux routes et aux habitats, ainsi que pour évaluer l'historique des départs de feu dans la région.

### **6.1.2 Collecte et traitement des données**

Les données utilisées dans cette étude étaient une compilation de diverses sources. La Figure 6.1 illustre la source des données et le facteur généré. Pour recueillir des informations sur les variables climatiques telles que la température, la vitesse du vent et l'humidité atmosphérique, un jeu de données couvrant 31 ans a été acquis auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), en tirant des données des stations météorologiques réparties dans la zone d'étude (36°17'N, 6°37'E, 694 m).

Des images satellites du programme Sentinel-2, une mission satellitaire développée par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus (<https://dataspace.copernicus.eu/>), ont été utilisées. Ces images ont été traitées à travers la plateforme SISPPEO (Satellite Imagery & Signal Processing Packages for Earth Observation), exploitée par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAE) en France (<https://inrae.github.io/SISPPEO/>), pour obtenir l'indice de végétation normalisé et l'indice de l'eau normalisé. De plus, la cartographie de l'occupation des sols et la distribution spatiale des espèces végétales ont été extraites directement des images satellites Sentinel-2.

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

En tenant compte des considérations topographiques, nous avons intégré des facteurs tels que la pente, l'orientation de la pente et l'altitude, tous dérivés d'un modèle numérique de terrain haute résolution avec des bandes spécifiques capables de fournir des images avec une résolution de 30 mètres ([https://www.opendem.info/link\\_dem.html](https://www.opendem.info/link_dem.html)).

De plus, des facteurs liés à l'activité humaine, tels que la proximité des routes et des établissements, ont été obtenus à partir d'OpenStreetMap (OSM) (<https://www.openstreetmap.org/#map=5/28.413/1.653>). Cette compilation de données multifacettes a sous-tendu les efforts de recherche de cette étude.

### **6.1.3 Traitement par logique floue**

- Fuzzification (0-1) : Cette étape transforme les valeurs numériques précises en degrés d'appartenance flous, permettant de gérer l'incertitude inhérente aux données d'entrée.
- Fonctions d'appartenance : Elles sont définies pour chaque facteur pertinent, tel que les facteurs de carburant (combustibles), bioclimatiques, géomorphologiques et humains, pour évaluer leur contribution au risque d'incendie.
- Processus de défuzzification : Convertit les résultats flous en une sortie nette et quantifiable, comme l'Indice de zone brûlée (BIA), qui est une mesure de l'impact potentiel d'un feu de forêt.

### **6.1.4 Intégration et prédiction**

Les différentes fonctions d'appartenance sont combinées selon la méthode de logique floue qui intègre les différentes variables (carburant, climat, topographie, facteurs humains) pour évaluer le risque d'incendie. Le résultat de cette combinaison est l'Indice de zone brûlée (BIA), qui estime la probabilité et l'impact potentiel des feux de forêt dans la région étudiée.

### **6.1.5 Évaluation du modèle**

La dernière étape consiste à évaluer la précision et la fiabilité du modèle de prédiction. Cette évaluation est cruciale pour valider l'application pratique du modèle dans la gestion et la prévention des feux de forêt.

Ce processus complexe illustre la méthodologie avancée utilisée pour prédire les feux de forêt. En intégrant des techniques de télédétection, d'analyse spatiale et de logique floue, le modèle cherche à fournir des prédictions précises et utiles pour la gestion des risques de feux de forêt

## **6.2 Classification et pondération des facteurs et variables retenus dans le processus de la logique floue**

### **6.2.1 Les variables des facteurs bioclimatiques**

La forêt de Djebel El Ouahch, située dans la chaîne montagneuse de l'Atlas Tellien, se caractérise par une divergence entre les influences du climat méditerranéen de l'Atlas Tellien au nord et les influences sahariennes de l'Atlas Saharien au sud, avec des étages bioclimatiques variant du type semi-aride au sud au subhumide au nord (Mrad et al., 2018).

Pendant la période estivale (juillet-août), **la température** est généralement très élevée, variant de 25°C à 30°C ; par conséquent, les incendies de forêt à cette période de l'année sont stimulés en particulier par la vague de chaleur diurne qui déclenche l'apparition des incendies. Dans ce cas, les valeurs maximales de température sont le déclencheur de l'apparition des incendies de forêt.

**L'humidité de l'air** est considérée comme un prédicteur météorologique de l'apparition et de la propagation des incendies (Konca-Kędzińska et al. 2018). Dans la région de Constantine, pendant la période estivale, l'aridité a un effet négatif sur le contenu en eau de la végétation et son humidité, en particulier la couverture végétale du sol de la forêt, ce qui conduit à la disponibilité de matière combustible, car la diminution de l'humidité du sol de la forêt entraîne l'augmentation du nombre d'allumages et la sensibilité des incendies de forêt.

**La vitesse du vent** est considérée comme un facteur déterminant de la propagation des incendies et le principal responsable des incendies catastrophiques (Koutsias et al., 2012). En été, l'Algérie subit un vent sec et chaud soufflant du sud vers le nord du pays, qui coïncide avec les températures élevées des forêts de montagne. La carte mensuelle de la vitesse du vent utilisée dans cette étude a été établie par le centre de développement des énergies renouvelables de l'Algérie.

### **6.2.2 Les facteurs de combustible**

Les variables retenues pour estimer la charge de combustible de bois, la phytotaille et la phytomasse le long de la zone d'étude sont les suivantes (voir tableau 6.1) :

- **Teneur en eau de la végétation** : Mesurée à l'aide de l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index), elle indique le niveau d'humidité de la végétation, un facteur crucial pour évaluer sa combustibilité.

## Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise

- **Couverture terrestre** : La classification des types de couverture terrestre aide à définir les unités de végétation disponibles pour brûler. Elle regroupe le matériel combustible en quatre types, en fonction de la couverture et des classes forestières.
- **Distribution spatiale des espèces végétales** : Les différentes espèces présentent des caractéristiques spécifiques qui influencent la **propagation du feu**. Par exemple, les **pins résineux** ont des feuilles d'aiguille qui augmentent la flammabilité, tandis que le **chêne-liège**, grâce à son écorce épaisse, retient l'humidité et réduit la combustibilité.

Le Tableau 6.1 présente les types de couverture terrestre utilisés pour évaluer la combustibilité, et un modèle développé par (Mariel, 1995), est utilisé pour estimer la **susceptibilité des arbres à la combustibilité** selon les espèces.

### 6.2.3 Les facteurs topo morphologiques

Les variables retenues pour analyser l'impact sur la propagation des incendies dans la zone d'étude sont les suivantes :

- **Classes de pente** : Cinq classes ont été retenus, basées sur leur impact potentiel sur la propagation du feu. La carte de pente, générée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), montre que la classe des pentes raides est la plus répandue dans la zone d'étude. Les pentes influencent directement la vitesse de propagation du feu.
- **Aspect topographique** : L'aspect, qui correspond à l'orientation d'une pente par rapport au soleil, est un facteur topographique crucial. Il influence la survenue et la propagation des incendies en fonction des conditions d'ensoleillement et d'humidité. La prise en compte de l'aspect est essentielle pour comprendre les dynamiques des feux de forêt.

La contribution des différents aspects à la propagation des incendies, représentée par des poids. Cela permet d'évaluer quels aspects favorisent davantage la propagation du feu et d'ajuster en conséquence les stratégies de gestion.

### 6.2.4 Les facteurs humains

Les **variables retenues** pour évaluer l'impact du facteur humain sur la **vulnérabilité des forêts aux incendies** sont les suivantes :

- **Distance par rapport aux routes** : Les zones forestières situées à proximité des **routes** sont plus vulnérables aux départs de feu. Cette vulnérabilité est liée à des comportements humains tels que le **jet de cigarettes**, les **barbecues**, les **excursions**

**Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

touristiques et les pique-niques (Eugenio et al., 2016 ; Ganteaume et al., 2013). Ces activités, qu'elles soient accidentelles ou délibérées, augmentent le risque d'incendie.

- **Distance par rapport aux zones habitées** : Les **zones proches des habitats** sont également identifiées comme à risque, en raison des **mauvaises pratiques culturelles** et des **habitudes d'habitation** des populations locales, susceptibles de provoquer des incendies accidentels (Jaiswal et al., 2002). La **proximité des habitations** augmente la probabilité de départs de feu.

**Tableau 6.1** Classification et pondération des facteurs de risque d'incendie de forêt

<b>Facteurs</b>	<b>Classes (Variables)</b>	<b>Risque</b>	<b>Poids</b>
<b>Occupation du sol</b>	Corps d'eau / zones urbaines	Faible	1
	Agriculture et arboriculture	Modéré	2
	Broussailles et pâturages	Élevé	3
	Forêt et maquis	Très élevé	4
<b>Espèces végétales</b>	Absence de végétation	Très faible	1
	Forêt de chêne-liège	Faible	2
	Cypress méditerranéen–prairie	Modéré	3
	Pin d'Alep–Maquis de chêne vert	Elevé	4
	Forêts pures et mixtes d'eucalyptus, de cyprès, de pin et de cèdre	Très élevé	5
<b>NDWI</b>	-1—0.20	Très faible	1
	0.20–0.33	Faible	2
	0.33–0.46	Modéré	3
	0.46–0.60	Elevé	4
	0.60–0.97	Très élevé	5
<b>Température (°C)</b>	15–15.25	Très faible	1
	15.25–15.39	Faible	2
	15.39–15.52	Modéré	3
	15.52–15.70	Elevé	4
	15.70–16	Très élevé	5
<b>Humidité de l'air</b>	7.62-7.65	Très faible	1
	7.65-7.68	Faible	2
	7.68-7.71	Modéré	3
	7.71-7.75	Elevé	4
	7.75-7.78	Très élevé	5
<b>Vitesse du vent (m/s)</b>	2.65–3.70	Très faible	1
	3.70–4.34	Faible	2
	4.34–4.93	Modéré	3
	4.93–5.61	Elevé	4
	5.61–7.45	Très élevé	5
<b>Degré de pente (%)</b>	0–5	Faible	1
	6–15	Modéré	2
	16–35	Elevé	3
	<36	Très élevé	4

**Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

<b>Orientation de la pente</b>	Nord, Nord Est	Faible	1
	Ouest, Ouest Sud	Modéré	2
	Est, Est Sud, Est Nord	Elevé	3
	Sud Est, Sud-Ouest	Très élevé	4
<b>Humidité du sol</b>	-1 – -0.25	Très faible	1
	-0.25 – -0.14	Faible	2
	-0.14 – -0.04	Modéré	3
	-0.04 – 0.09	Elevé	4
	0.09 – 1	Très élevé	5
<b>Distance par rapport aux routes(m)</b>	0–305	Très faible	1
	305–771	Faible	2
	771–1430	Modéré	3
	1430–2363	Elevé	4
	2363–4100	Très élevé	5
<b>Distance par rapport aux habitations(m)</b>	0–1390	Très faible	1
	1390–2853	Faible	2
	2853–4390	Modéré	3
	4390–6036	Elevé	4
	6036–9328	Très élevé	5
<b>Nombre d'incendies</b>	0-1	Faible	1
	1-3	Modéré	2
	3-8	Elevé	3

Source : auteure 2023

### 6.3 Cartographie des variables et classes retenues dans les incendies de forêt

Les données des stations climatiques et les techniques de pondération par distance inverse ont été utilisées pour cartographier la distribution spatiale des paramètres bioclimatiques responsables de la survenue et de la propagation des incendies.

La distribution spatiale de la fuzzification de ces paramètres (température, humidité atmosphérique et vitesse du vent) est illustré par la figure 6.2. Les résultats de la température varient de 15 à 16°C, les valeurs les plus élevées étant observées dans le nord de la zone d'étude.

La légère différence d'humidité de l'air moyenne entre 7,62 et 7,78 nécessite de prendre en compte comment ces variations correspondent au comportement des incendies de forêt.

Les données de la vitesse du vent correspondent à la morphologie, avec une augmentation à 7 m/s dans les zones montagneuses du nord et une diminution à 3 m/s dans la partie sud-ouest de la zone d'étude.



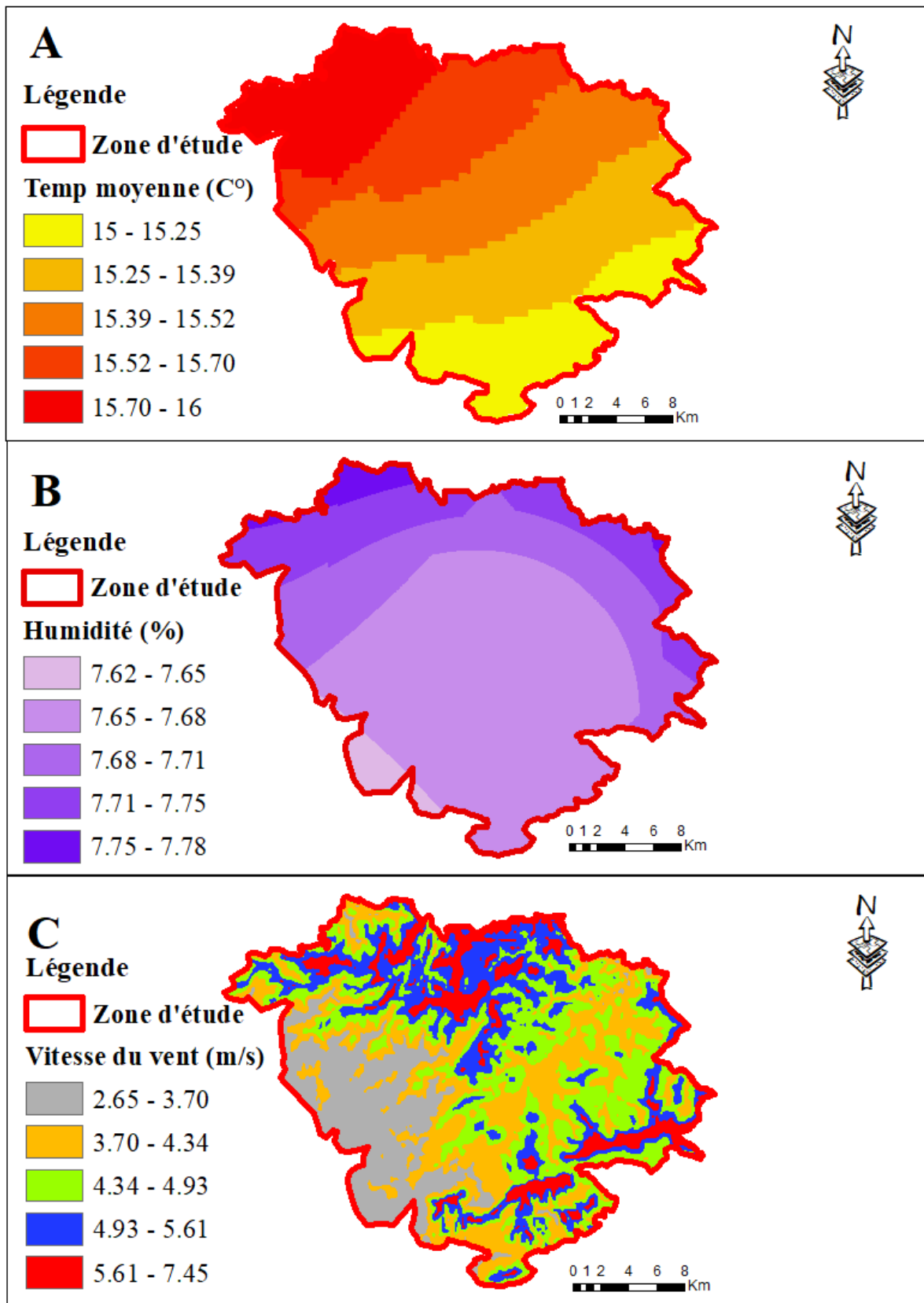


Figure 6.2 Classification des facteurs climatiques, A : température (en °C), B : humidité atmosphérique (en %), et C : vitesse du vent (en m/s).

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

L'étude de (Gana et al. 2017), les efforts de conservation des forêts, ainsi que l'investigation sur le terrain ont permis de classer les classes de couverture du sol et les espèces végétales. Le traitement des images satellites de Sentinel 2, a permis de calculer la teneur en eau sur la végétation ; cela est affiché sur la figure 6.3 et montre la prédominance des terres agricoles en première place, suivies des terres pastorales, puis des forêts et des maquis.

La plage des valeurs du NDWI, allant de -0,86 à 0,71, reflète la variabilité de la teneur en humidité de la végétation dans toute la zone d'étude. Les zones à forte teneur en eau peuvent être identifiées par des valeurs de NDWI positives plus élevées. En revanche, les zones à faible teneur en eau présentent des valeurs de NDWI plus basses ou négatives.

Les espèces végétales ont été regroupées dans les classes suivantes : forêts pures et mixtes d'eucalyptus et/ou de cyprès avec du pin d'Alep et du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ; forêt de chênes-lièges et maquis de chênes verts (forêt de chênes dégradée) ; prairies plantées de cyprès ; et terres nues (sans végétation). Rejoignent celles répertoriées par (Gana et al.,2017) qui soulignent également la présence marquée de ces espèces dans la région montagneuse de Djebel El Ouahch.

Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise

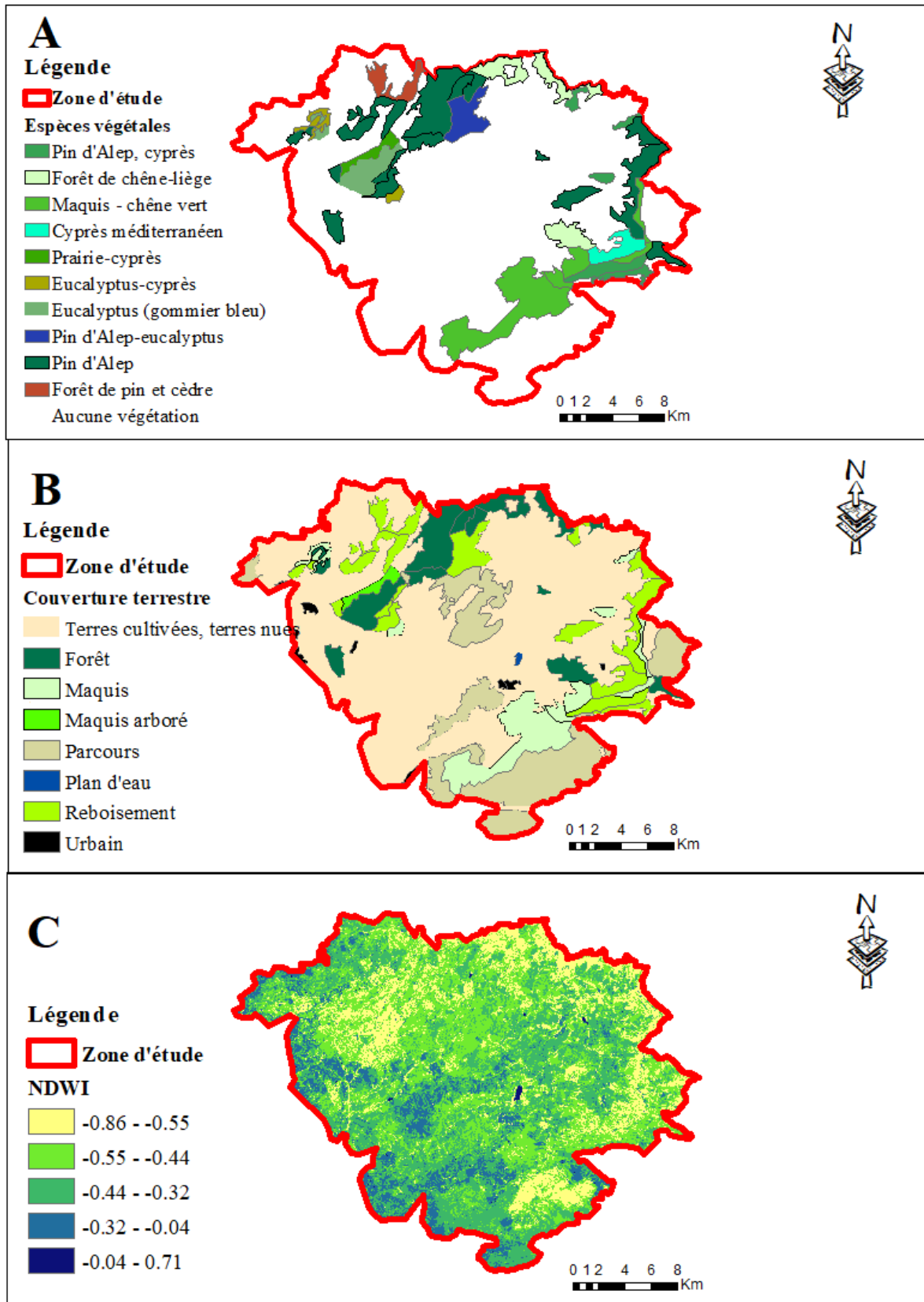


Figure 6.3: Classification des facteurs de combustible liés à la végétation, A : espèces végétales, B : couverture terrestre, C : NDWI.

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

L'analyse de surface du modèle numérique d'élévation (DEM) de la zone d'étude donne deux couches des paramètres géomorphologiques, à savoir, la pente et l'exposition, montrées respectivement sur la figure 6.4A et 6.4B. Ces deux facteurs sont largement utilisés pour prédire le déplacement et la propagation des incendies dans les forêts.

La couche de pentes s'étend de 0 à 53,97 degrés, montrant la diversité de la raideur du terrain, avec des valeurs plus élevées représentant une pente plus raide qui se trouve dans le sud de la zone d'étude, ce qui peut être lié à l'intensité des incendies de forêt.

Le massif de Djebel El Ouahch est principalement orienté vers le sud-est et le sud, les deux aspects ensemble couvrant plus de 31 % de la superficie totale. Cette information est utile pour comprendre comment le feu peut se propager en fonction de la direction du vent. La zone orientée vers le nord-est et le nord couvre plus de 22 % de la superficie totale ; ces aspects sont susceptibles d'être plus frais et plus humides en raison d'une exposition moindre au soleil, ce qui peut avoir un impact sur la vitesse de propagation du feu.

L'aspect oriental (les zones qui sont orientées vers l'est) couvre environ 8,58 % de la superficie totale, et l'aspect occidental (les zones orientées vers l'ouest) couvre environ 10,98 % de la superficie totale de la forêt, ces deux aspects combinés couvrant un peu moins de 20 % de la superficie forestière. Les zones plates couvrent plus de 9 %. Les zones plates ont généralement de faibles pentes, ce qui peut entraîner une propagation lente des incendies.

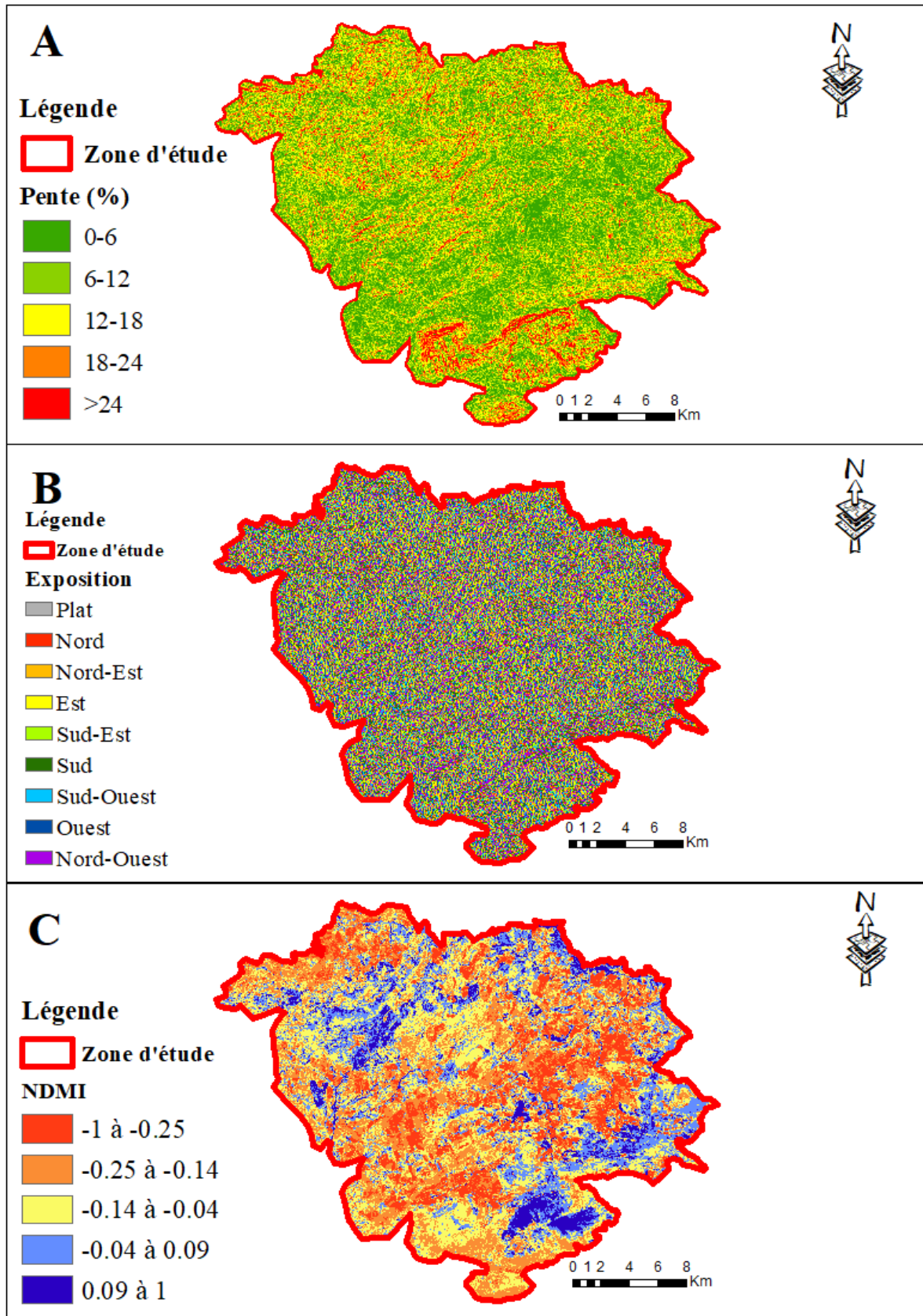


Figure 6.4: Classification des facteurs géomorphologiques, incluant : pente en % (A), exposition (B), et NDMI (C).

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

Les activités humaines et les actes criminels des personnes dans ou près des forêts de la région méditerranéenne sont considérés comme la cause des départs d'incendie et des allumages. A cet effet, la carte OpenStreetMap de la province de Constantine a été utilisée pour créer les cartes de distance par rapport aux routes et aux zones habitées, qui sont montrées respectivement sur la figure 6.5A et 6.5B.

Les données historiques et statistiques des incendies de la zone d'étude au cours des dix dernières années ont été utilisées pour créer une carte du nombre de départs d'incendie par unités administratives, montrant que la région superposée de routes denses et d'agglomérations a souffert d'un nombre élevé d'incendies.

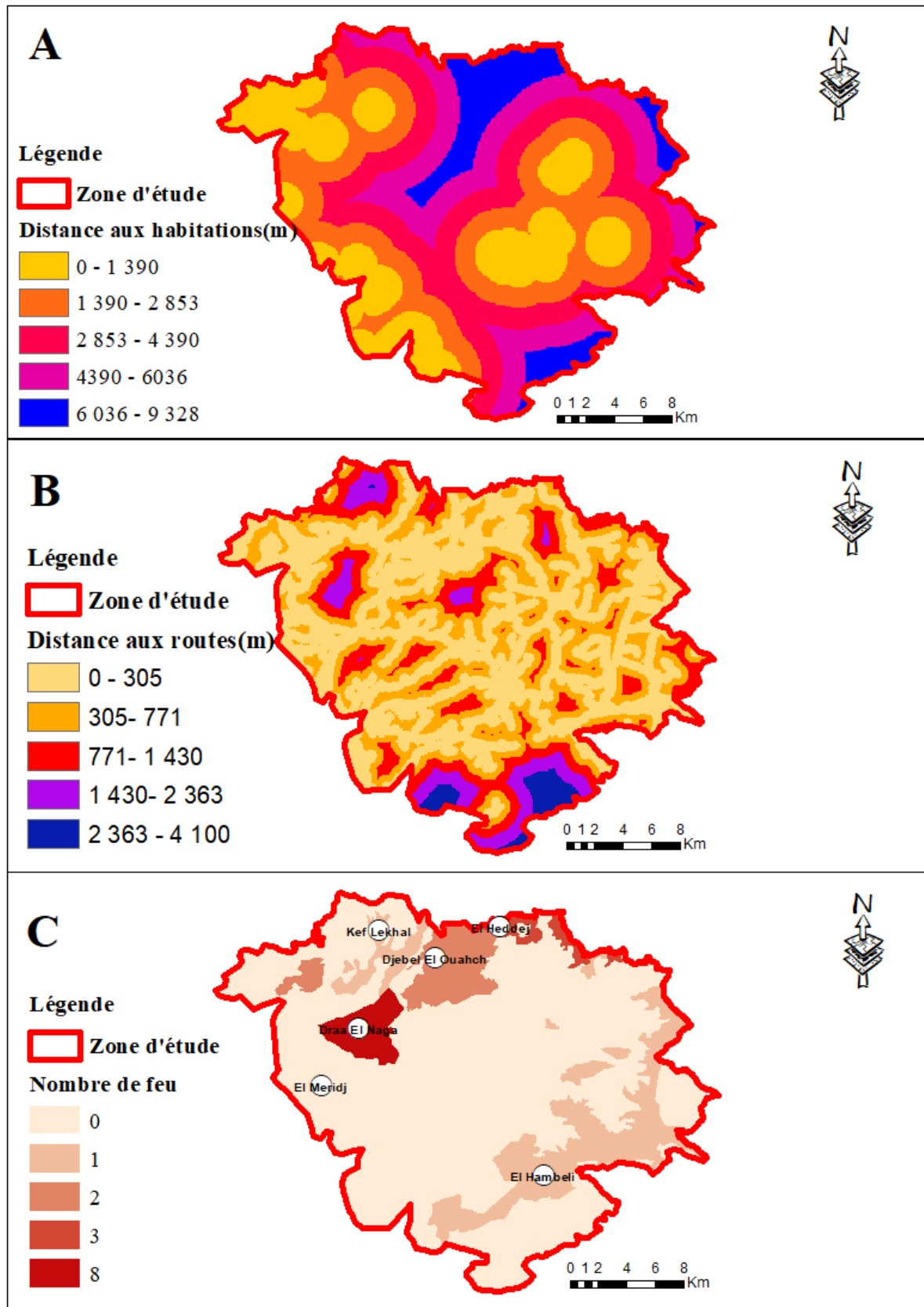


Figure 6.5:classification des facteurs humains. A : Distance aux habitations (en m), B : distance aux routes (en m), et C : nombre de départs de feux de forêt.

**6.4 Modélisation des incendies de forêt par Logique floue et pondération des paramètres : Cas du massif de Djebel El Ouahch**

**6.4.1 Application du système de logique floue au massif de Djebel El Ouahch**

La logique floue est une méthode multicritère qui utilise des fonctions d'appartenance pour élaborer un système de référence basé sur des valeurs floues. Les fonctions d'appartenance sont utilisées pour déterminer le degré d'appartenance de tous les pixels des couches thématiques sur la carte finale de prédiction des incendies de forêt. Cette valeur d'appartenance varie de 0 (pas d'appartenance) à 1 (appartenance totale), indiquant dans quelle mesure un élément appartient à un ensemble flou (Bellman & Zadeh, 1970). Dans cette recherche, une fonction d'appartenance linéaire est utilisée pour la fuzzification et le remappage des 12 facteurs responsables de la prédiction des incendies de forêt, calculée comme décrit dans l'équation suivante :

$$A = \{x_1 / \mu(x_1), x_2 / \mu(x_2), \dots, X_n / \mu(x_n)\}$$

où  $\mu_A(x)$  est l'association de  $x$  dans  $A$ , et  $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1]$

Les douze facteurs causatifs, à savoir la température (T), l'humidité atmosphérique (AH), la vitesse du vent (WS), la couverture du sol (LC), la teneur en eau sur la végétation (WCV), les espèces végétales (VS), la pente (S), l'aspect (AS), l'humidité du sol (SM), la distance par rapport à la route (DR), la distance par rapport aux habitations (DS), et le nombre d'incendies de départ (NSF), ont été combinés pour créer une carte de prédiction des incendies de forêt à l'aide d'un modèle de logique floue basé sur la description de l'influence de chaque facteur sur le processus global de survenue et de déclenchement des incendies. Le Tableau 6.2 décrit les comparaisons par paires entre les facteurs.

**Tableau 6.2** Échelle floue de l'importance relative entre les facteurs.

<b>Nombre floue</b>	<b>Linguistique</b>	<b>Echelle triangulaire de nombre floue</b>
<b>9</b>	Importance absolue	(8,9,10)
<b>8</b>	Valeur médiane entre 7 et 9	(7,8,9)
<b>7</b>	Très forte importance	(6,7,8)
<b>6</b>	Valeur médiane entre 5 et 7	(5,6,7)
<b>5</b>	Forte importance	(4,5,6)
<b>4</b>	Valeur médiane entre 3 et 5	(3,4,5)
<b>3</b>	Faible importance	(2,3,4)
<b>2</b>	Valeur mediane entre 1 et 3	(1,2,3)



## Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise

1	Importance égale	(1,1,1)
---	------------------	---------

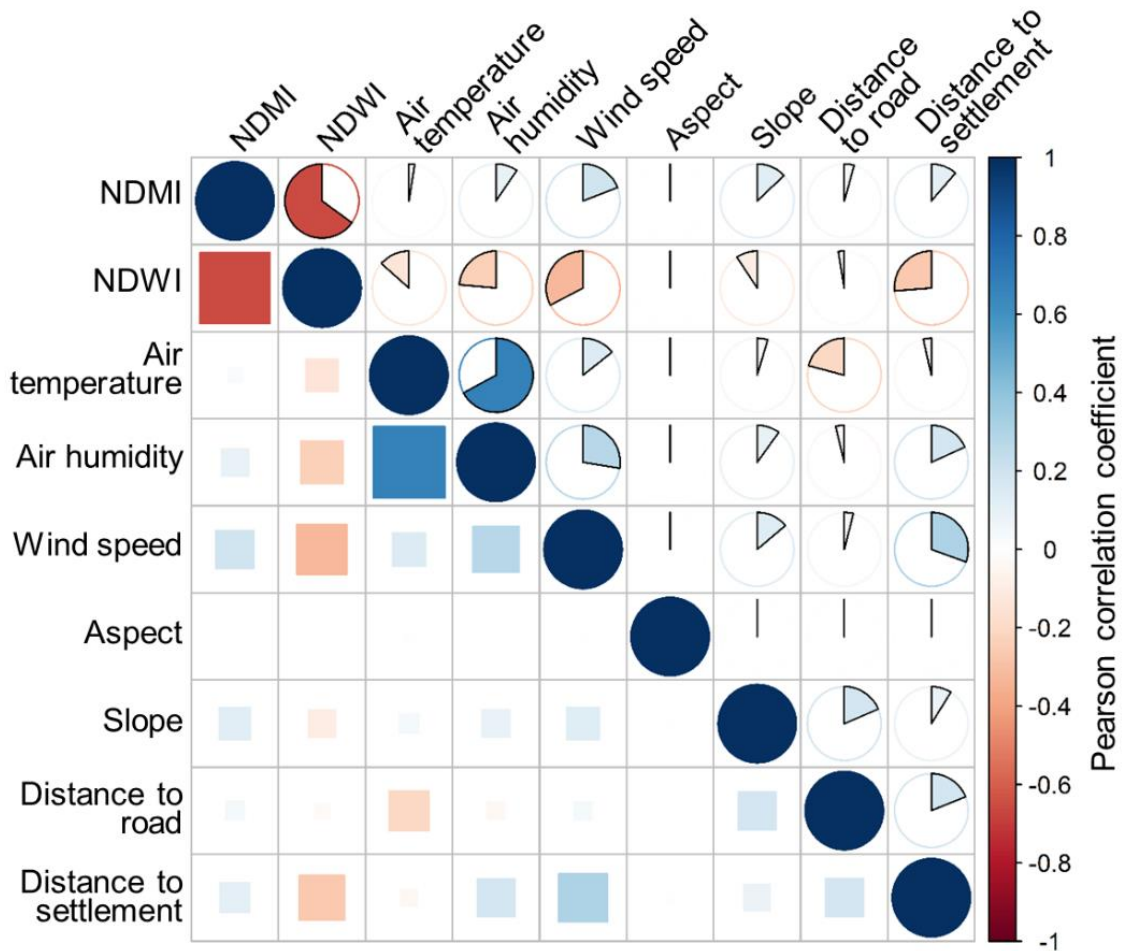
Source : Auteure 2024

Le système d'inférence floue utilisé pour attribuer à chaque facteur son poids a été construit en fonction des modèles et de l'expertise liés à la prédiction des incendies de forêt, où les relations entre les facteurs ont été évaluées en fonction de l'importance de chaque facteur pour les modèles d'incendies, comme illustré dans les tableaux 6.3 et 6.4 élaborés à partir de la revue de la littérature suivante : (Carrega, 1991; Chuvieco & Salas, 1996; Alexandrian et al., 1999; Carrega, 2008; Adab et al., 2013; Arpaci et al., 2014; Argañaraz et al., 2015; Feizizadeh et al., 2015; Eugenio et al., 2016; Onur Satir & Donmez, 2016); Abedi Gheshlaghi, 2019).

L'opérateur utilisé dans le processus de défuzzification de l'ensemble flou est la somme algébrique et les poids étaient compris entre 0,0 et 1,0, leur somme étant toujours égale à 1. Ils peuvent être interprétés comme des pourcentages.

Les couches thématiques fuzzifiées obtenues ont été combinées dans un logiciel SIG en fonction de leurs poids, selon l'équation suivante :

**Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**



**Figure 6.6:**Matrice de corrélation de Pearson des variables quantitatives avant le prétraitement du modèle de logique floue.

Source : auteure 2024

$$FFRP = \sum_{i=1}^{10} w_i \times A_i$$

Où : FFRP est la moyenne des fonctions d'appartenance floues ;  $W_i$  est la valeur du poids du facteur  $i$  ; et  $A_i$  est la fonction d'appartenance du facteur  $i$ . Les valeurs du processus flou final varient de 0 à 1.

**Tableau 6.3** Échelle floue d'importance relative entre les facteurs.

Facteur bioclimatique			Facteur de combustibilité				Facteur géo morphologique				Facteur humain				
T	AH	WS	LC	WCV	VS	S	AS	SM	DR	DS	NSF				
<b>T</b>	1	7	9	LC	1	3	5	S	1	3	5	DR	1	5	7
<b>AH</b>		1	5	WCV		1	7	AS		1	9	DS		1	9
<b>WS</b>			1	VS			1	SM			1	NSF			1

Source : Auteur 2023

**Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

(AH : humidité atmosphérique, AS : aspect, DR : distance par rapport à la route, DS : distance par rapport aux zones habitées, LC : couverture du sol, NSF : nombre d'incendies de départ, S : pente, SM : humidité du sol, T : température, VS : espèces végétales, WCV : teneur en eau sur la végétation, WS : vitesse du vent)

**Tableau 6.4** Croisement de la pondération des facteurs utilisés dans la modélisation et la prédiction du risque d'incendie de forêt dans le nord-est de l'Algérie

Catégorie de facteur	Facteur bioclimatique	Facteur de combustibilité	Facteur géomorphologique	Facteur humain
Facteur climatique	1	7	3	7
Facteur de combustibilité		1	5	9
Facteur géomorphologique			1	3
Facteur humain				1

Source : Auteur 2023

**6.4.2 Pondération floue des paramètres spécifiques dans la modélisation des incendies de forêt dans le nord-est de l'Algérie**

Les couches cartographiées, obtenues par numérisation, traitement d'images satellites ou interpolation, ont été transformées en données floues, échelonnées de 0 à 1, où les valeurs plus proches de 1 indiquent une association plus forte avec l'occurrence des incendies.

Le système flou fonctionne en se basant sur les relations entre différents facteurs et les indicateurs de prédiction des incendies. Des cartes prédites pour chaque facteur ont été créées en les combinant mathématiquement en utilisant des critères d'ensembles flous. Le tableau 6.5 fournit les poids utilisés pour superposer différentes couches afin de prédire et d'évaluer le risque d'incendie.

Le processus de défuzzification des trois facteurs bioclimatiques, en utilisant les poids obtenus à partir de la fonction d'appartenance, donne la carte finale du facteur climatique (Fig. 7A) :

$$\text{Facteur bioclimatique} = (0,67 \times \text{Température}) + (0,23 \times \text{Humidité atmosphérique}) + (0,10 \times \text{Vitesse du vent})$$

La combinaison des classes de couverture du sol, des estimations de la teneur en eau sur la végétation et de la répartition des espèces végétales fournit des informations sur la

## Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise

disponibilité potentielle de combustible et la susceptibilité de la végétation aux incendies et aux départs de feu :

$$\text{Facteur combustible} = (0,54 \times \text{Couverture du sol}) + (0,35 \times \text{NDWI}) + (0,11 \times \text{Espèces végétales})$$

L'agrégation des couches représentant la pente, l'aspect et l'humidité du sol identifie l'influence géomorphologique sur la prédiction des modèles d'incendie :

$$\text{Facteurs géomorphologiques} = (0,54 \times \text{Pente}) + (0,35 \times \text{Aspect}) + (0,11 \times \text{Humidité du sol})$$

La combinaison des cartes de distance par rapport aux routes et aux zones habitées, ainsi que la couche indiquant le nombre de départs de feu, est utilisée pour déterminer l'impact humain final sur le risque d'incendie en forêt :

$$\text{Facteur humain} = (0,61 \times \text{Distance par rapport à la route}) + (0,29 \times \text{Distance par rapport aux zones habitées}) + (0,10 \times \text{Nombre de départs de feu})$$

**Tableau 6.5** Les poids flous des paramètres spécifiques utilisés dans la modélisation des incendies de forêt dans le nord-est de l'Algérie

Catégories des variables	Paramètres	Poids
<b>Facteurs bioclimatiques</b>	Température	0.67
	Humidité atmosphérique	0.23
	Vitesse du vent	0.10
<b>Facteur combustibles</b>	Couverture du sol	0.54
	La teneur en eau de végétation	0.35
	Les espèces végétales	0.11
<b>Facteurs géomorphologique</b>	Pente	0.54
	Aspect de la pente	0.35
	Hydratation du sol	0.11
<b>Facteurs humain</b>	Distance par rapport à la route	0.61
	Distance par rapport aux habitations	0.29
	Nombre de départs de feu	0.10

Source : auteure 2024

### 6.5 Prédiction des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch : Modélisation par logique floue et identification des zones à risque

La carte de prédiction des incendies a été générée par défuzzification en fonction de l'influence des facteurs bioclimatiques, des facteurs de combustible, des facteurs géomorphologiques et des facteurs humains. Les valeurs du Tableau 6.6 montrent les poids flous finaux ( $w_i$ ) pour les facteurs qui indiquent l'impact important du facteur bioclimatique,

## Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise

suivi de l'impact du combustible disponible à brûler, de la géomorphologie et des effets humains.

Les facteurs environnementaux et humains ont été rendus flous par la probabilité gaussienne et les techniques SIG pour prédire la sensibilité du massif de Djebel El Ouahch aux incendies de forêt pendant la période estivale. Les poids flous obtenus ( $w_i$ ) pour les facteurs bioclimatiques, de combustible, géomorphologiques et humains étaient respectivement de 0,57, 0,26, 0,11 et 0,06. Par conséquent, le modèle de prédiction obtenu pour les incendies de forêt était le suivant :

$$\text{Prédiction des incendies de forêt} = (0,57 \times \text{Facteur bioclimatique}) + (0,26 \times \text{Facteur de combustible}) + (0,11 \times \text{Facteur géomorphologique}) + (0,06 \times \text{Facteur humain})$$

**Tableau 6.6** Catégorisation des zones et pourcentages de risque d'incendie forestier correspondants.

Prédiction floue	Classe de risque	surface (km <sup>2</sup> )	SURFACE (%)
<b>0.35–0.58</b>	Very low	61.74	10.96
<b>0.58–0.67</b>	Low	120.49	21.39
<b>0.67–0.76</b>	Moderate	142.38	25.27
<b>0.76–0.86</b>	High	133.17	23.64
<b>0.86–0.97</b>	Very high	105.52	18.73

Source : auteure 2024

La Figure 6.7 illustre différentes situations de sensibilité aux incendies de forêt, allant du risque non potentiel à la situation critique, commençant par des zones à très faible risque, entourées de zones à faible risque, suivies de zones modérément sensibles aux incendies de forêt et de zones hautement susceptibles d'incendies, tandis que le très haut risque se trouve dans la dernière classe, marquée en rouge.

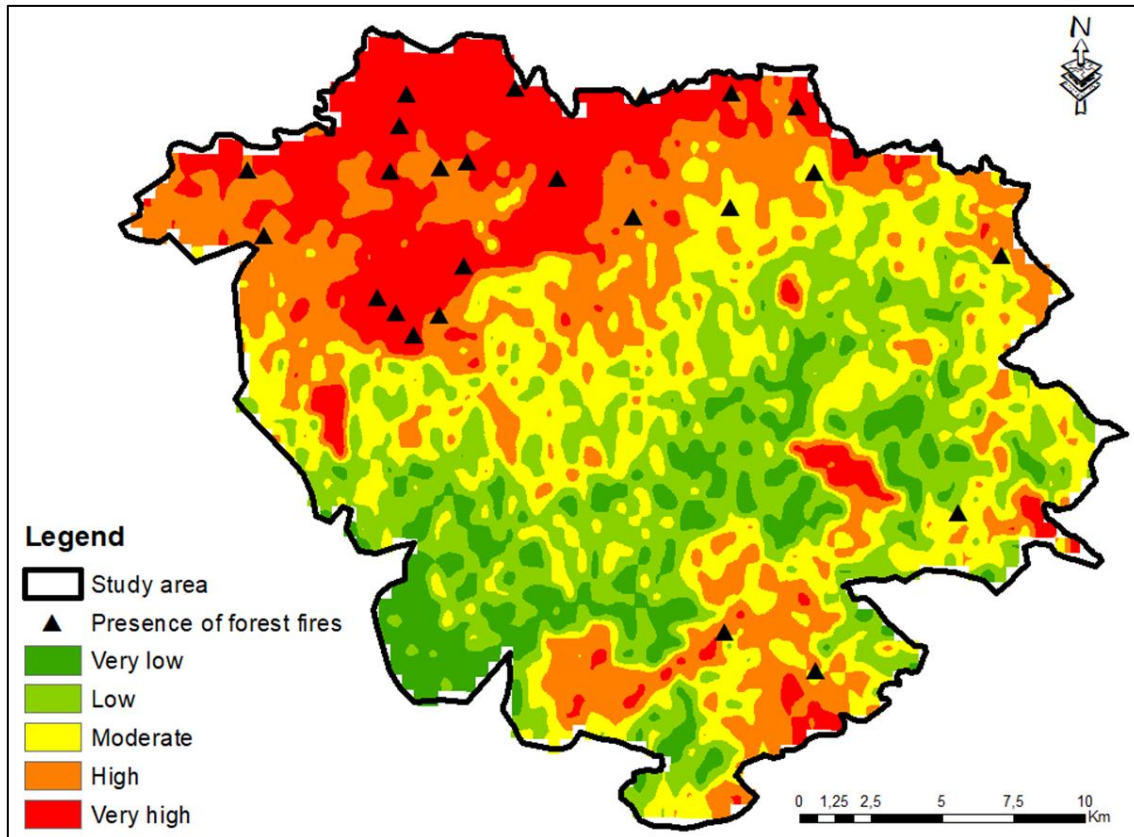


Figure 6.7 La carte de prédiction des incendies de forêt de la région de Djebel El Ouahch.

Source : auteure 2024

La carte de prédiction des incendies de forêt est calculée par un modèle de logique floue et classée en fonction des valeurs de prédiction floue suivantes (0,35–0,58), (0,58–0,67), (0,67–0,76), (0,76–0,86) et (0,86–0,97), qui sont classées dans les classes thématiques suivantes : très faible, faible, modéré, élevé et très élevé, respectivement, pour les zones de sensibilité aux incendies de forêt. Les zones à très faible risque d'incendie de forêt se trouvent au centre de la zone d'étude et correspondent aux terres rocheuses et nues, tandis que les zones ayant enregistré une sensibilité faible ou légère aux incendies sont dominées par une végétation clairsemée et des systèmes de culture d'été.

La vulnérabilité modérée au risque d'incendie représente un quart (25 %) de la superficie totale de la zone d'étude, correspondant aux zones de maquis et de plantations d'eucalyptus avec une pente légère entre 6 % et 11 % et une exposition dominée par l'aspect nord-ouest qui reçoit moins d'ensoleillement. Vingt-quatre pour cent de la zone d'étude présentent un niveau élevé de danger d'incendie de forêt, ce qui représente une superficie de 13 317 ha, principalement

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

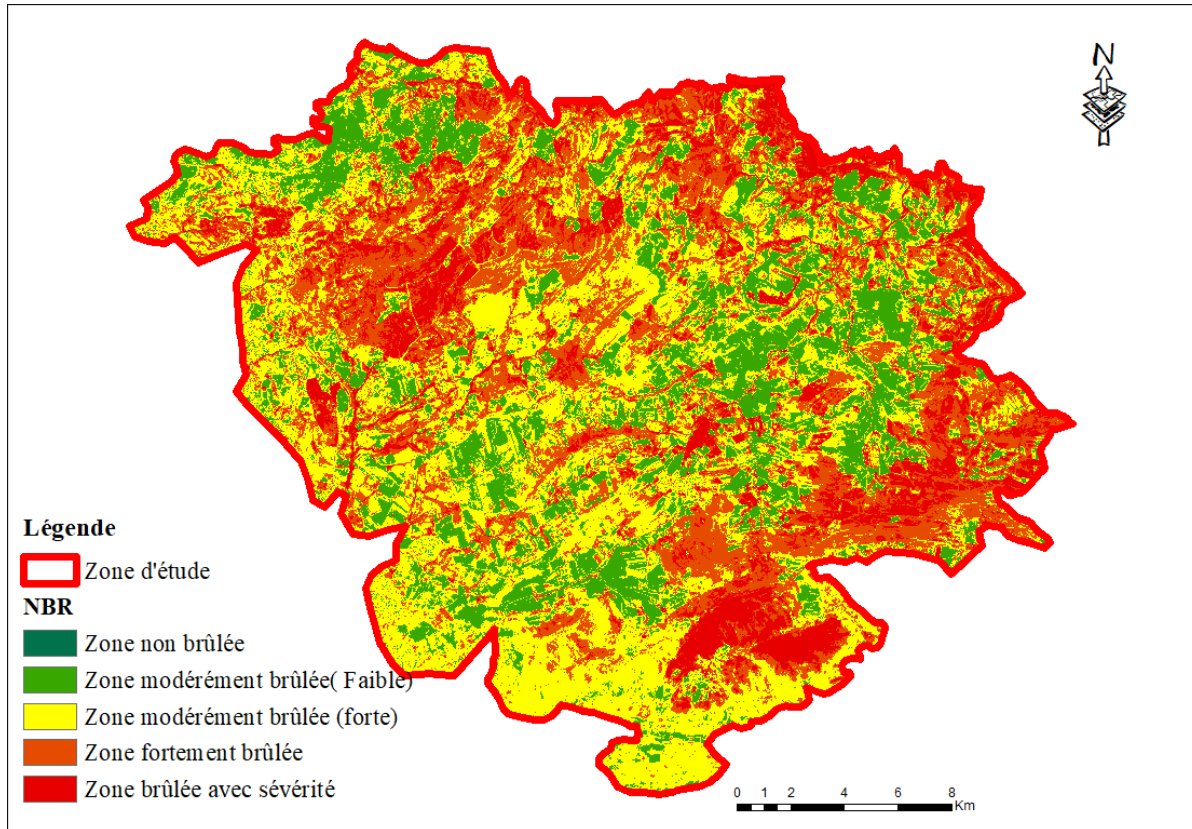
située au pied ou au piémont du mont Djebel El Ouahch. Cela est dû à la prédominance des maquis boisés en présence des résineux tels que le pin d'Alep mélangé au cyprès.

Les situations critiques d'incendie de forêt se trouvent en montagne et couvrent 19 % de la superficie totale de la zone d'étude, avec une très grande sensibilité aux incendies. Cela peut s'expliquer par la nature accidentée et fortement inclinée de la région, favorisant le saut de turbulence des incendies et l'accélération du front de feu, notamment dans des conditions climatiques sèches avec des températures élevées et une grande vitesse des vents.

De plus, l'impact humain est important en raison du nombre élevé de départs de feu au cours des dix dernières années, créant des incendies graves et causant des dommages importants à la couverture végétale dense de chênes et de cèdres. Ces degrés de vulnérabilité aux incendies dépendent de l'intensité de la couverture végétale et de son type, où l'humidité de la végétation et sa quantité d'eau sont sensibles aux conditions climatiques estivales très sèches. L'apparition des départs de feu est fortement liée à la présence humaine et à l'influence négative élevée de la population proche des routes et des agglomérations.

Les valeurs de l'indice de la zone brûlée ont été transformées en carte thématique par le logiciel QGIS, comme le montre la figure 6.8. Cette carte présente les différents niveaux de gravité des incendies, allant des zones non brûlées aux incendies graves.

La distribution spatiale indique que plus de la moitié de la zone d'étude a été touchée par des incendies graves, répartis dans toutes les directions cardinales de la zone d'étude, notamment dans les zones abritant le pin d'Alep, une espèce végétale vulnérable aux incendies.



**Figure 6.8** Carte des indices de zone brûlée.

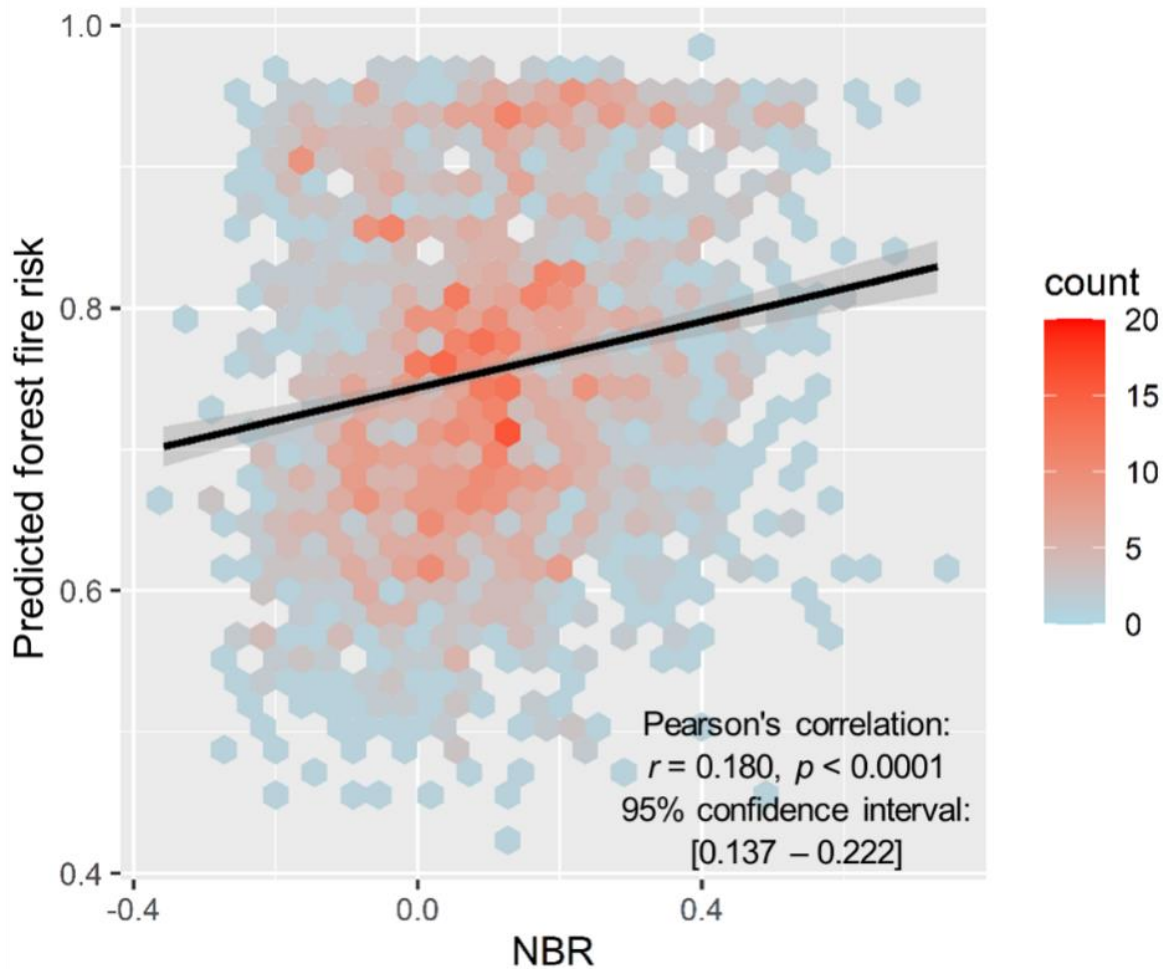
Source : auteure 2024

Les résultats de l'évaluation de l'exactitude de la prédiction de la logique floue ont révélé une relation positive et statistiquement significative entre les données observées (représentées par le NBR) et les valeurs prédites (Figure. 6.9).

Le coefficient de corrélation de Pearson a indiqué une association positive, suggérant que plus le risque d'incendie de forêt prédit augmentait, plus les zones brûlées observées augmentaient. La valeur  $p$  étant très faible ( $< 0,0001$ ) renforce la signification statistique de cette relation.

Avec un intervalle de confiance de 95 % [0,137–0,222], l'exactitude est confirmée, ce qui soutient davantage la fiabilité du modèle de logique floue dans la prédiction du risque d'incendie de forêt.





**Figure 6.9** Corrélation entre les données observées et prédites.

Source : auteure 2024

La distribution spatiale des paramètres bioclimatiques, notamment la température, l'humidité atmosphérique et la vitesse du vent, éclaire les conditions climatiques qui influencent les déclenchements d'incendies de forêt. Les températures plus élevées dans les régions nordiques de la zone d'étude intensifient la vulnérabilité aux incendies, surtout lorsqu'elles sont associées à des variations d'humidité et de vitesse du vent.

La diversité des pentes et des aspects, en particulier les versants exposés au sud, a un impact significatif sur la propagation des incendies. Les pentes plus raides et les conditions plus sèches dans ces zones créent des conditions idéales pour une propagation rapide du feu.

Les facteurs humains, représentés par la proximité des routes et des agglomérations, mettent en évidence l'influence significative des activités humaines sur les départs de feu. Ces facteurs mettent en évidence l'interaction complexe entre les éléments environnementaux et humains dans la dynamique des incendies de forêt.

## **Chapitres VI : Modélisation prédictive des risques d'incendie de forêt par logique floue : une approche flexible pour une évaluation spatiale précise**

En utilisant la logique floue, l'étude a intégré ces différents facteurs, en leur attribuant des poids appropriés en fonction de leur importance dans la prédiction des incendies (Jain et al., 2020). La carte finale de prédiction des incendies de forêt, dérivée d'une combinaison de facteurs bioclimatiques, de combustible, géomorphologiques et humains, montre la sensibilité variable de différentes régions à l'intérieur du massif de Djebel El Ouahch.

Les zones caractérisées par une végétation clairsemée, un terrain rocheux et une faible présence humaine présentent un risque d'incendie moins élevé. En revanche, les régions densément végétalisées, notamment celles dominées par le pin d'Alep et le cyprès, associées à des pentes raides et à la proximité des activités humaines, présentent un risque plus élevé. La carte des zones brûlées confirme ces prédictions, montrant des incendies graves dans les zones à forte vulnérabilité.

## **Conclusion**

Ce chapitre présente une analyse détaillée des schémas de risque d'incendie de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch, en intégrant des facteurs bioclimatiques, de combustible, géomorphologiques et humains à l'aide de la logique floue et des techniques SIG.

Les cartes prédictives résultantes ont révélé une compréhension nuancée des niveaux de vulnérabilité, allant des zones à végétation clairsemée indiquant un faible risque aux pentes densément végétalisées près des habitations humaines signalant un risque élevé.

Ces résultats soulignent l'influence cruciale du climat, du relief et des activités humaines sur la susceptibilité aux incendies de forêt. Les implications sont profondes : une attention immédiate est impérative pour les zones à haut risque, nécessitant des mesures de prévention des incendies adaptées, des initiatives d'engagement communautaire et une planification urbaine stratégique pour atténuer les risques d'origine humaine.

Reconnaître l'interaction détaillée entre les facteurs naturels et anthropiques permet de formuler des politiques fondées sur des données probantes, améliorant la préparation aux incendies de forêt, la préservation de la biodiversité et la sécurité des communautés. Cette recherche fait progresser non seulement la compréhension scientifique de la dynamique des incendies de forêt, mais elle constitue également un outil crucial pour la gestion durable des forêts et les efforts mondiaux de prévention des catastrophes.

À l'avenir, il est essentiel de se concentrer sur la modélisation dynamique intégrant des données climatiques en temps réel pour améliorer la précision des prédictions. De plus, approfondir les facteurs socio-économiques qui façonnent les activités humaines peut fournir des informations inestimables, garantissant la conservation des écosystèmes nord-africains et le bien-être des communautés dans les zones vulnérables.



**CHAPITRES VII : GESTION DES INTERFACES HABITAT-FORET ET  
PREDICTION DES RISQUES D'INCENDIE : APPROCHE INTEGREE  
POUR LA PREVENTION ET LA PROTECTION DANS LE MASSIF DE  
DJEBEL EL OUAHCH**

## **Introduction**

Les incendies de forêt représentent un défi majeur tant sur le plan environnemental que socio-économique, particulièrement dans les zones où les interfaces habitat-forêt sont prédominantes. Ces interfaces, désignées par le terme anglophone *Wildland Urban Interface (WUI)*, se caractérisent par la rencontre entre les zones habitées et la végétation forestière. Ce phénomène résulte de l'expansion simultanée de l'urbanisation et de la végétation forestière, créant ainsi des zones à risque élevé d'incendies (Vince et al., 2005).

Le risque d'incendie de forêt est étroitement lié à la présence de ces interfaces, où la convergence de la végétation combustible avec les zones habitées augmente la probabilité et la fréquence des incendies. Du fait de la concentration d'enjeux anthropiques sur ces zones, les incendies d'interface peuvent entraîner des conséquences écologiques, sociales et économiques considérables, comme le soulignent plusieurs études (Belkaid & Carrega, 2012; Lampin-Maillet, 2011). Par ailleurs, la densité élevée du bâti de ces interfaces dans certaines régions exacerbe la pression anthropique sur l'environnement, augmentant ainsi la vulnérabilité des écosystèmes concernées.

Dans les régions méditerranéennes, la question des interfaces habitat-forêt revêt une importance particulière en raison de la fréquence des incendies dans ces zones. En Algérie, cette problématique est aggravée par le manque de données, rendant difficile la cartographie précise de ces interfaces (Ahmed et al., 2020). Néanmoins, il est essentiel de cartographier ces interfaces, car elles constituent des indicateurs du risque global et, dans certains cas, permettent d'estimer différentes composantes de ce risque, telles que l'aléa, la vulnérabilité et/ou l'exposition.

Selon l'étude de (Lampin-Maillet, 2009), une méthode efficace pour cartographier les interfaces habitat-forêt repose sur l'analyse conjointe de la disposition des constructions et de la distribution de la végétation inflammable. Cette approche permet une évaluation précise des risques, facilitant ainsi la priorisation des zones à risque et l'orientation des actions de prévention vers les secteurs les plus vulnérables.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

Le massif de Djebel El Ouahch, en raison de sa topographie complexe et de sa végétation dense, est particulièrement exposé à ces risques. L'objectif de ce chapitre est de cartographier et d'analyser les interfaces habitat-forêt dans cette région en utilisant des outils géospatiaux et des indices de végétation, afin de produire des indicateurs du risque global et de certaines de ses composantes à l'échelle locale. Cette analyse vise à évaluer les zones à risque et à proposer des stratégies de gestion adaptées.

Pour ce faire, le logiciel QGIS a été utilisé pour cartographier et classifier les zones d'interfaces dans le massif de Djebel El Ouahch. Les données issues du programme Sentinel-2 de l'ESA, traitées via la plateforme SISPPEO gérée par l'INRAE, ainsi que des relevés de terrain, ont permis une analyse détaillée et contextuelle de la région, mettant en lumière les enjeux spécifiques liés aux incendies dans cette zone.

### **7.1 Méthodologie d'identification des interfaces habitat forêt dans le grand massif de Djebel El Ouahch:**

Le présent chapitre adopte une méthodologie développée par l'équipe l'INRAE, spécialement conçue pour l'étude des interfaces habitats- forêts dans le contexte des risques d'incendie en milieu méditerranéen. Cette méthode s'appuie sur les développements récents de la méthode WUIMAP qui résulte d'une amélioration de l'approche INRAE et ONF.

La méthode WUIMAPII développe les classifications précédentes par une approche globale qui considère à la fois la structure spatiale des bâtiments et leur intégration dans l'environnement végétal environnant. Elle prend en compte les retours d'expérience et les données accumulées depuis les dernières grandes études, en ajustant les paramètres de classification pour mieux refléter les risques actuels.

L'originalité de notre approche réside dans son application du modèle WUIMAPII au grand massif de Djebel El Ouahch, où elle a été mise en œuvre pour analyser spatialement les interfaces, en conjugaison avec l'examen de données historiques relatives aux incendies de forêt dans la région de Constantine. Cette approche permet une compréhension approfondie dans cette zone.

#### **7.1.1 Collecte et sources des données**

Dans le cadre de cette recherche, la cartographie des espèces végétales a été effectuée en utilisant des images satellites de Sentinel-2, fournies par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus (disponibles sur <https://dataspace.copernicus.eu/>). Ces images ont été complétées par des données acquises via la plateforme SISPPEO (Satellite

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

Imagery & Signal Processing Packages for Earth Observation), gérée par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAE) en France. Ces données ont été comparées avec celles issues du Bureau National d'Études pour le Développement Rural (BNEDER) pour affiner l'analyse.

De plus, Les informations relatives aux bâtiments ont été extraites de la plateforme OpenStreetMap (OSM) (<https://www.openstreetmap.org/#map=5/28.413/1.653>), utilisée pour la collecte et l'extraction des données géospatiales nécessaires à cette étude. L'intégration de ces données satellitaires et de relevés de terrain contribue à une évaluation plus complète et précise de la zone étudiée.

### **7.1.2 Outils et techniques analytiques**

Cette analyse repose principalement sur l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), en particulier à travers le logiciel QGIS 3.32.2. Ce dernier est utilisé pour la cartographie détaillée et la classification des zones d'interfaces habitats -forêts. Le processus de classification est itératif, incluant des ajustements basés sur les consultations avec des experts. Cette technique offre une visualisation précise et une compréhension approfondie des zones étudiées.

Les résultats obtenus sont destinés à guider les politiques publiques et les gestionnaires pour tenir compte de la vulnérabilité du grand massif de Djebel El Ouahch. Afin de mieux comprendre et de gérer ce type de risques dans les interfaces entre habitats -forêts.

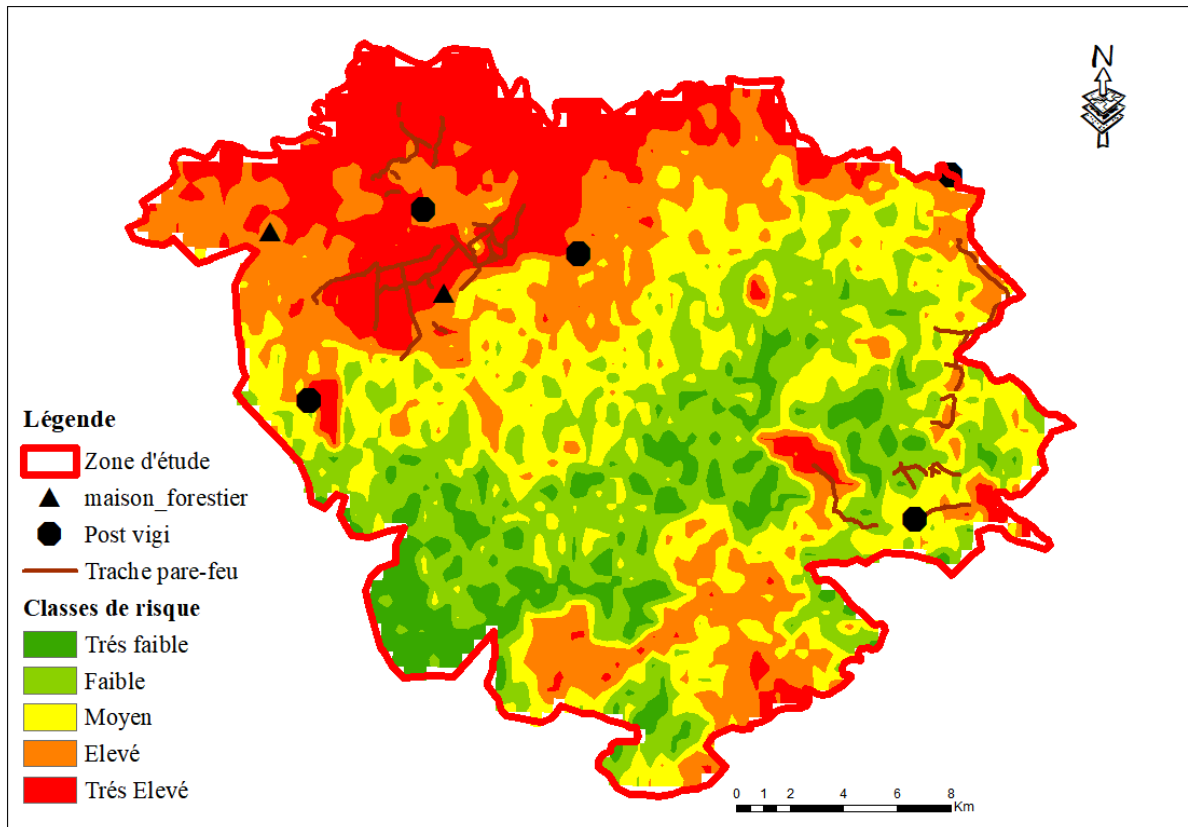
## **7.2 Identification des structures forestières**

Selon le rapport de la conservation des forêts de la wilaya de Constantine, la forêt de Constantine est équipée en infrastructures forestières, certains tronçons nécessitent encore des travaux d'aménagement. Le réseau de pistes et de TPF (tranchées pare-feu) comprend :

- Pistes : 570 km
- TPF : 211 hectares
- Bassins, bâches à eau et autres points d'eau : 16 unités, dont 20 bâches à eau
- Postes de vigie : 6 unités

Les maisons forestières et les postes de surveillance sont essentiels pour la surveillance continue des forêts, permettant une intervention rapide en cas d'incendie et servant de bases pour les opérations de conservation.

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch



**Figure 7.1** Superposition des structures forestières avec la carte de prédiction des incendies dans le massif de Djebel El Ouahch

Source : auteure 2024

Le croisement de la carte des structures forestière avec la carte de prédiction montre que les zones à risque très élevé d'incendie (en rouge) se concentrent dans la partie nord et dans certaines parties de l'est du massif de Djebel El Ouahch. Cependant, la carte des infrastructures montre que les tranchées pare-feu (TPF) sont plus présentes dans certaines zones, mais sont absentes ou insuffisantes dans les zones les plus à risque, notamment au nord et au nord-est, où le risque est critique. Cela indique une sous-couverture des mesures préventives dans les zones à très haut risque, créant un potentiel de propagation rapide des incendies.

Les postes de surveillance et les maisons forestières semblent être placés de manière stratégique dans la carte des infrastructures, mais leur distribution n'est pas pleinement alignée avec les zones à haut risque. Par exemple, bien qu'il y ait des postes de vigie dans le centre et au sud, où le risque est relativement modéré, les zones à risque très élevé au nord manquent de postes de surveillance et de maisons forestières. Une couverture de surveillance plus dense dans ces zones pourrait permettre une détection plus rapide des incendies et une réponse plus efficace.



## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

La carte des infrastructures forestières montre une forte concentration de tranchées pare-feu dans des zones où la végétation est composée d'espèces à haut risque d'inflammabilité (comme le pin d'Alep et le maquis). Cependant, il reste plusieurs zones à très haute densité de végétation inflammable dans le nord et le nord-ouest qui ne sont pas suffisamment couvertes par ces tranchées. L'absence de ces tranchées dans les zones critiques pourrait favoriser la propagation rapide des incendies, en particulier dans les périodes de vents forts.

### 7.3 Identification de l'indice d'agrégation de la végétation (AI)

La première phase de ce projet implique l'utilisation d'une carte de végétation divisée en deux catégories, dans le but de déterminer l'indice d'agrégation de la végétation. Pour ce faire, nous avons développé un modèle de combustibilité basé sur la carte des types de végétation, attribuant à chaque type une valeur de combustibilité variant de 0 (non combustible) à 1 (combustibilité maximale).

Le tableau 7.1 présente le modèle de combustibilité que nous avons développé, avec des poids attribués pour refléter le potentiel de chaque type à alimenter un incendie :

**Tableau 7.1** Modèle de combustible

#CODE	CLASSE	POIDS	LIBELLE
ARB	2	0.3	Arboretum
QSUB	2	0.7	Chêne-liège ( <i>Quercus suber</i> )
CLAI	1	0.1	Clairière
CSEM	3	0.9	Cyprès ( <i>Cupressus sempervirens</i> )
EUC	3	1.0	Eucalyptus
MAQ	2	0.6	Maquis
MAQARB	2	0.7	Maquis arboré
CYPEUC	3	0.95	Mélange (Cyprès, Eucalyptus)
CYPALP	3	0.9	Mélange (Cyprès, Pin d'Alep)
EUCMIX	3	0.95	Mélange (Eucalyptus, Pin d'Alep, Cyprès)
DIVMIX	3	0.95	Mélange (Eucalyptus, Pin pignon, Cyprès, Cèdre,...)
PINHA	3	0.9	Pin d'Alep ( <i>Pinus halepensis</i> )
PINPI	2	0.8	Pin pignon ( <i>Pinus pinea</i> )
PRAR	1	0.3	Prairie

Source : conservation de forêts + traitement auteure 2024

#### 7.3.1 Description des types de végétations :

- Arboretum : Comme c'est souvent une collection d'arbres, un poids moyen, car cela dépend des espèces présentes.
- Clairière : Ayant généralement peu ou pas de végétation, un poids faible.
- Eucalyptus : Connue pour être hautement inflammable, se voit attribuer le poids maximal.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

- Maquis et Maquis arboré : Ces types de végétation méditerranéenne peuvent être assez denses et sont souvent inflammables, d'où les poids de 0.6 et 0.7.
- Mélanges : Les mélanges contenant de l'eucalyptus et/ou du cyprès, qui sont très inflammables, se voient attribuer des poids élevés.
- Prairie : Habituellement moins inflammable que les forêts ou les maquis, donc un poids plus faible.

### **7.3.2 Les classes de végétations**

Les types de végétation sont classés en trois groupes, probablement en fonction de leur structure et densité :

- **Classe 1** : Cette catégorie comprend des types de végétation moins denses, comme les Clairières (CLAI) et les Prairies (PRAR), qui ont une faible combustibilité (poids 0.1 à 0.3). Ces types d'habitats sont souvent plus ouverts, avec une biomasse moindre, réduisant ainsi le risque de propagation d'un incendie.
- **Classe 2** : les végétations comme le Maquis (MAQ) et le Chêne-liège (QSUB) montrent une combustibilité intermédiaire (poids 0.6 à 0.8). Ces zones ont une densité végétative modérée, avec une biomasse suffisante pour alimenter un feu, mais sans atteindre les niveaux des zones les plus denses.
- **Classe 3** : Les types de végétation les plus combustibles se trouvent dans cette catégorie, incluant des forêts denses comme celles d'Eucalyptus (EUC) et des mélanges complexes (par exemple, CYPEUC et DIVMIX) avec des poids allant jusqu'à 1.0. Ces zones sont particulièrement vulnérables aux incendies en raison de leur forte densité végétale et de la présence de types d'arbres hautement inflammables.

### **7.3.3 Pondération de la combustibilité de la couverture végétale**

Les poids attribués<sup>3</sup>, variant de 0.1 à 1.0, indiquent le potentiel de chaque type de végétation à alimenter un incendie :

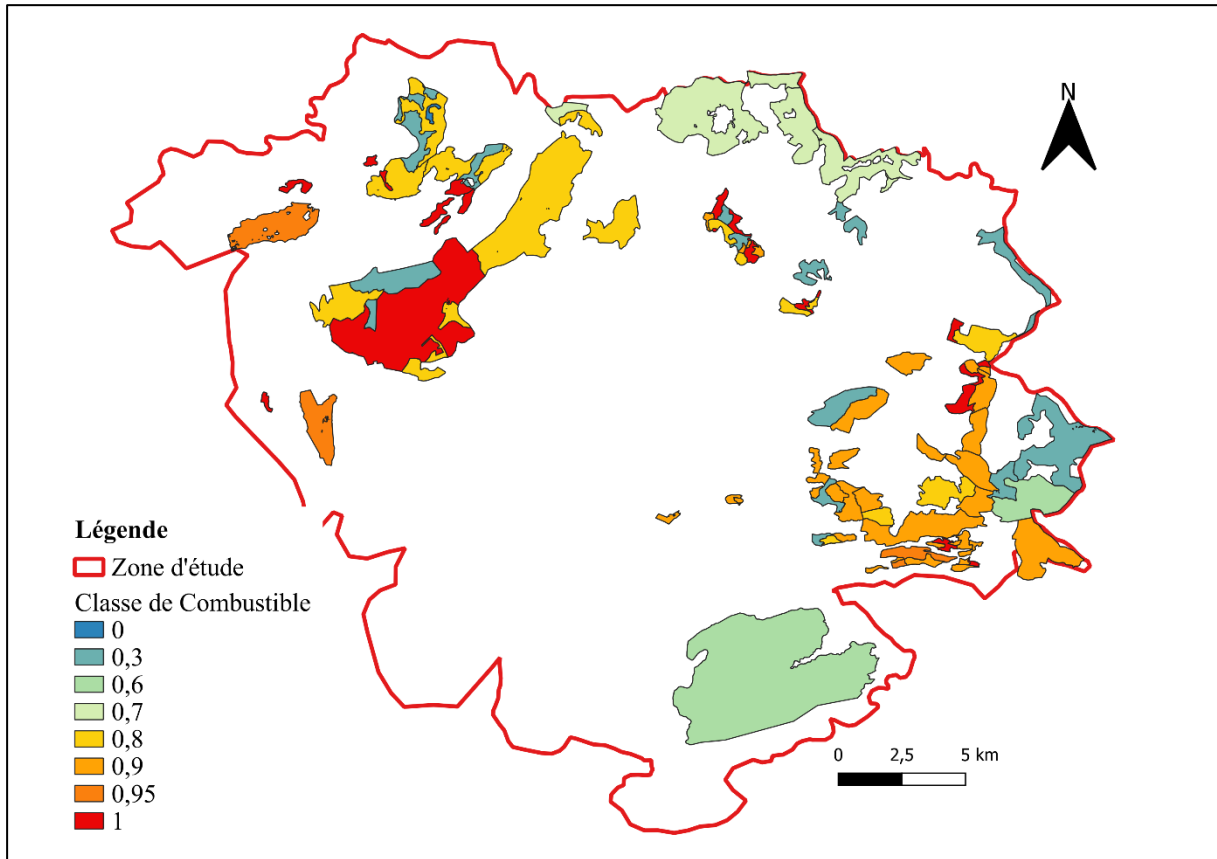
- Faible combustibilité (0.1 - 0.3) : Inclut les formations végétales comme les clairières et les prairies, où la biomasse est faible, réduisant ainsi le risque d'incendie.
- Combustibilité modérée (0.6 - 0.8) : Représente des types comme le maquis ou le pin pignon, où la densité végétative intermédiaire augmente le risque, mais sans atteindre le potentiel des formations les plus denses.

---

<sup>3</sup> Le poids des combustibles est calculé en prenant la moyenne des estimations fournies par les experts de la direction des forêts et de l'INRA.

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

- Haute combustibilité (0.9 - 1.0) : Les forêts d'eucalyptus et les mélanges de types d'arbres tels que cyprès et pin d'Alep sont des zones à risque élevé d'incendie, en raison de leur grande quantité de matière combustible.
- Libellé : Les libellés fournissent des descriptions précises des types de végétation, ce qui permet une compréhension claire des types spécifiques qui posent un risque élevé.



**Figure 7.2** Carte des combustibles végétaux

Source : Auteure 2024

La carte présentée illustre la répartition des classes de combustibles dans une région spécifique, avec une échelle variant de 0 (non combustible) à 1 (combustibilité maximale). Cette classification est essentielle pour identifier les zones à risque de feux de forêt et pour guider les efforts de gestion et de prévention des incendies.

Le modèle de combustible a été développé en se basant sur une carte précise des espèces végétales présentes dans la région. Ce modèle intègre les caractéristiques spécifiques de chaque type de végétation pour estimer leur potentiel de combustibilité.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

- Valeurs Maximales : Les zones présentant des valeurs de combustibilité maximale (1,0) sont principalement peuplées d'eucalyptus, de pin d'Alep et de pin pignon. Ces espèces sont connues pour leur haute inflammabilité, surtout sous des conditions climatiques propices aux incendies.
- Valeurs Minimales : Les valeurs minimales (0) correspondent aux clairières et aux prairies. Ces zones présentent un risque réduit d'incendie en raison de leur faible densité ou absence de matériel végétal hautement combustible.

La carte identifie clairement les zones les plus susceptibles aux feux de forêts, permettant aux gestionnaires de se concentrer sur ces régions pour la mise en œuvre de stratégies préventives et de gestion des risques.

Elle est destinée aux gestionnaires de territoires forestiers et autres espaces naturels. Elle sert d'outil indispensable pour planifier les actions de gestion, comme les coupes de sécurité, les brûlages dirigés ou les reboisements avec des espèces moins inflammables.

### **7.3.4 L'indice d'agrégation**

L'indice d'agrégation (AI) mesure la disposition spatiale et le regroupement des objets dans une image au format raster. Il indique combien souvent les pixels appartenant à une même catégorie de paysage sont connectés entre eux. Le calcul est effectué à l'aide d'une fenêtre glissante de 20 mètres. Les valeurs de l'indice d'agrégation (AI) s'accroissent en fonction de la continuité et de la compacité des pixels. (Lampin-Maillet, Bouillon, Long-Fournel, Morge, & Jappiot, 2010) (Caractérisation et Cartographie Des Interfaces Habitat-Forêt Prévention Des Risques d'incendies de Forêt Guide Méthodologique, n.d.)

Sa formule est définie de la manière suivante :

$$I = \left[ \frac{g_{ii}}{\max g_{ii}} \right] (100)$$

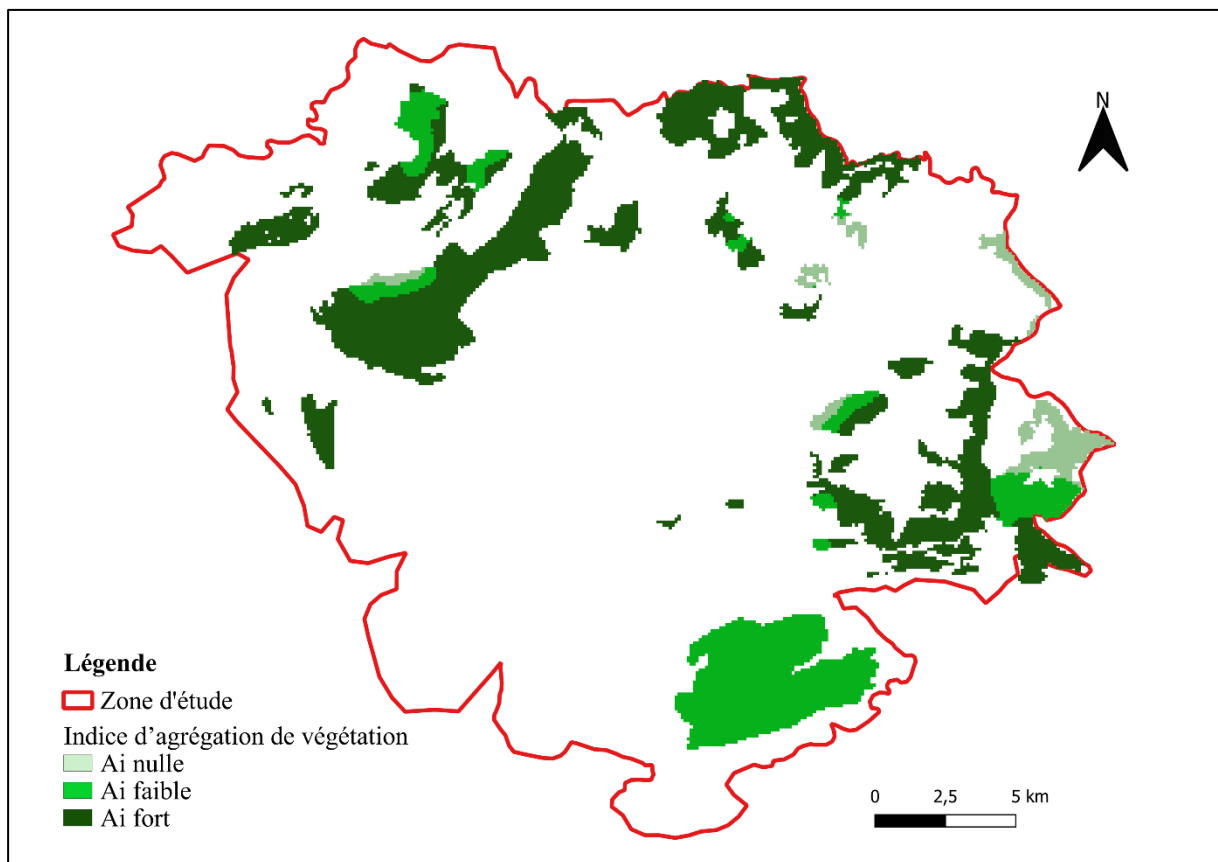
Avec

- $g_{ii}$  = nombre de contacts entre les pixels d'une classe  $i$
- $\max - g_{ii}$  = nombre maximal de contacts entre les pixels d'une classe  $i$

Les valeurs d'agrégation obtenues sont classées en trois classes :

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

- Les valeurs nulles de l'indice d'agrégation ( $AI = 0$ ) correspondent à une absence de végétation = Absence de végétation arborée et arbustive (il peut y avoir de la végétation herbacée).
- Les valeurs faibles de l'indice d'agrégation ( $0 < AI \leq 95 \%$ ) correspondent à une discontinuité de la structure horizontale de la végétation arborée et arbustive éparse, discontinue.
- Les valeurs fortes de l'indice d'agrégation ( $AI > 95 \%$ ) correspondent à une végétation arborée et arbustive continue



**Figure 7.3:** Carte d'indice d'agrégation de végétation

Source : Auteure 2024

La carte ci-dessus montre l'indice d'agrégation de végétation dans la zone d'étude de Djebel el Ouahch. Cet indice mesure la distribution spatiale de la végétation, indiquant où elle est plus ou moins dense et regroupée. L'indice d'agrégation de végétation (AI) est crucial pour évaluer la continuité de la couverture végétale, ce qui a des implications importantes pour la gestion des risques d'incendie de forêt.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

La végétation dans la zone d'étude est répartie de manière inégale, avec des zones de végétation dense principalement situées au nord et à l'est, et des zones de végétation dispersée ou nulle dans le reste de la région.

- **AI nul** : Ces zones ont une très faible ou aucune agrégation de végétation. Cela signifie que la végétation est très dispersée ou inexistante. Représentant ainsi des prairies, des clairières ou des zones non boisées.
- **AI faible** : Ces zones ont une faible consolidation de végétation, ce qui révèle une couverture végétale présente, mais très éparse. Elles peuvent représenter des zones avec une végétation clairsemée ou en mosaïque. Bien que la végétation soit présente, sa dispersion peut ralentir la propagation des incendies, mais elle peut toujours poser un risque en cas de conditions météorologiques favorables aux incendies.
- **AI fort** : Ces zones montrent une forte agrégation de végétation, ce qui signifie une couverture végétale dense et continue, représentant typiquement des forêts denses ou des zones avec une végétation très regroupée.

Ces zones sont les plus à risque en termes de propagation rapide des incendies de forêt en raison de la continuité de la végétation, nécessitant des mesures de prévention plus rigoureuses, comme des pare-feux et des tranchées pare-feu pour segmenter la végétation et ralentir la propagation des incendies.

- **Comparaison de la carte de combustibilité et la carte de IA:**

Les zones avec une **agrégation de végétation élevée** sur la **carte 7.3** (en vert foncé) correspondent généralement aux zones avec une **classe de combustible élevée** sur la **carte 7.2** (rouge ou orange). Cela indique que ces zones sont des **zones critiques** où il y a à la fois une forte présence de végétation dense et un risque important lié au combustible.

Les zones avec une **agrégation faible ou nulle** (vert clair sur la carte 1) correspondent aux zones avec des classes de combustible plus faibles (bleu et vert sur la carte 2). Ces zones sont potentiellement moins à risque d'incendie car elles manquent de végétation dense et de combustible.

Les zones à **forte agrégation de végétation** et **forte classe de combustible** devraient être les priorités pour la gestion du risque d'incendie. Il est important de mettre en place des stratégies de prévention dans ces zones (comme le débroussaillage, l'installation de coupe-feux, etc.). Les zones à **faible agrégation** et **faible classe de combustible**, en revanche,

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

sont beaucoup moins susceptibles de subir des incendies dévastateurs, bien que la vigilance reste importante.

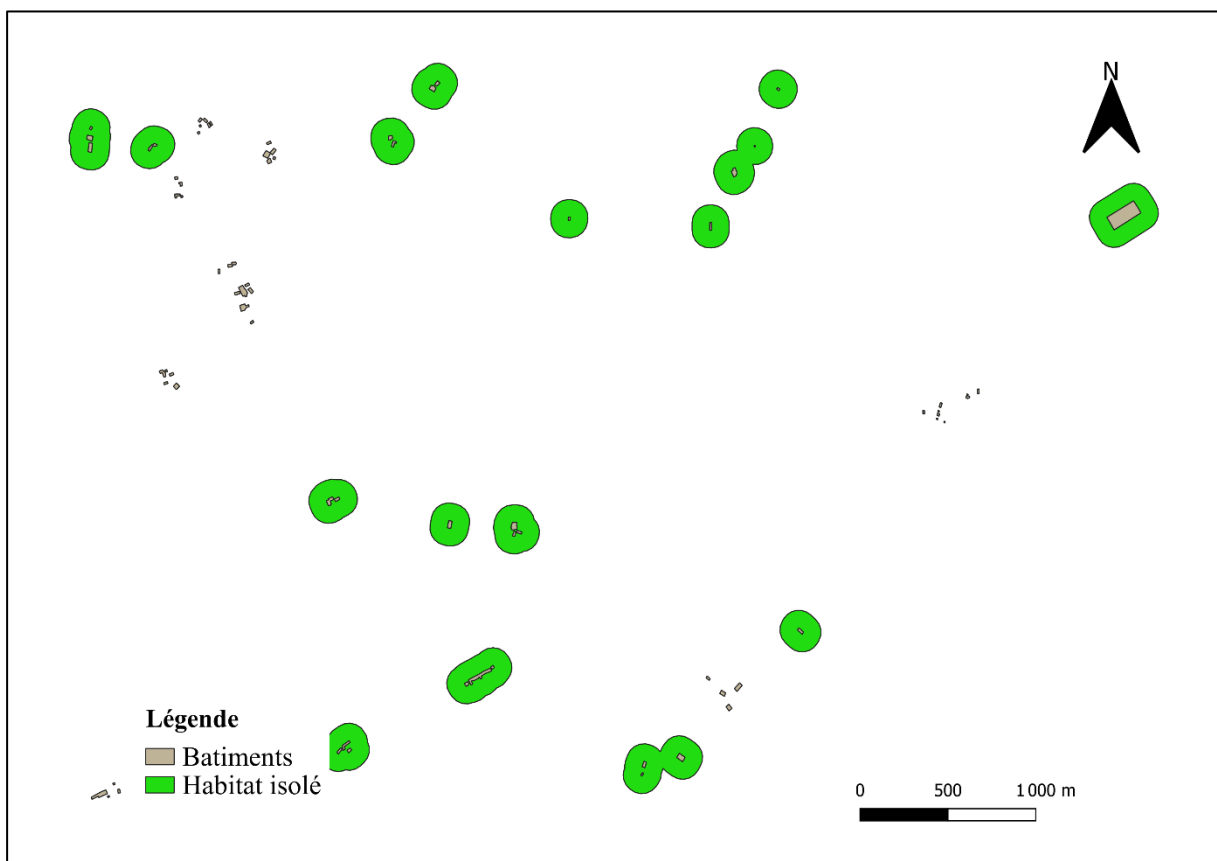
### 7.4 Identification et classification des zones de bâti

Selon le rapport technique classification des zones bâties vulnérables aux incendies dans l'interface bâtiments-végétation (INRAE, ONF), (Le Fur et al., 2024)

#### 7.4.1 Identification des bâtiments isolés

Les bâtiments isolés sont caractérisés par leur éloignement significatif des autres structures. Cela inclut :

- Un bâtiment se trouvant à plus de 100 mètres de toute autre construction.
- Deux bâtiments situés à moins de 100 mètres l'un de l'autre, mais séparés de plus de 100 mètres de toute autre structure ou groupe de bâtiments.
- Trois bâtiments situés à moins de 100 mètres les uns des autres, mais distants de plus de 100 mètres de tout autre bâtiment ou ensemble de bâtiments.



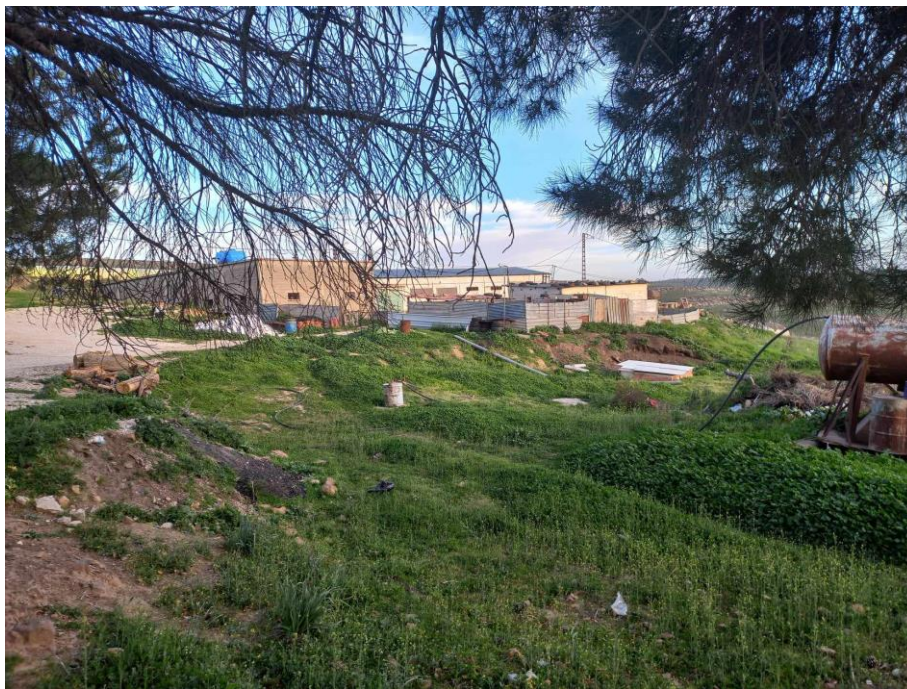
**Figure 7.4:** Cartographie d'habitat isolé dans la zone d'étude  
Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

La carte de la répartition des habitats isolés montre que ces structures sont largement dispersées à travers le massif, suggérant une faible densité de peuplement dans cette zone.

La carte fournit une visualisation claire de la dispersion des habitats isolés dans le massif de Djebel El Ouahch, permettant d'identifier facilement les zones à faible densité de peuplement et potentiellement vulnérables en termes de gestion des risques, notamment les incendies de forêt.

Les tampons verts autour des groupes de bâtiments indiquent les zones de tampon de 50 mètres autour de chaque bâtiment ou groupe, respectant la méthodologie d'identification des habitats isolés.



**Figure 7.5** Photo de l'habitat isolé dans la zone d'étude

Source : Auteure 2024

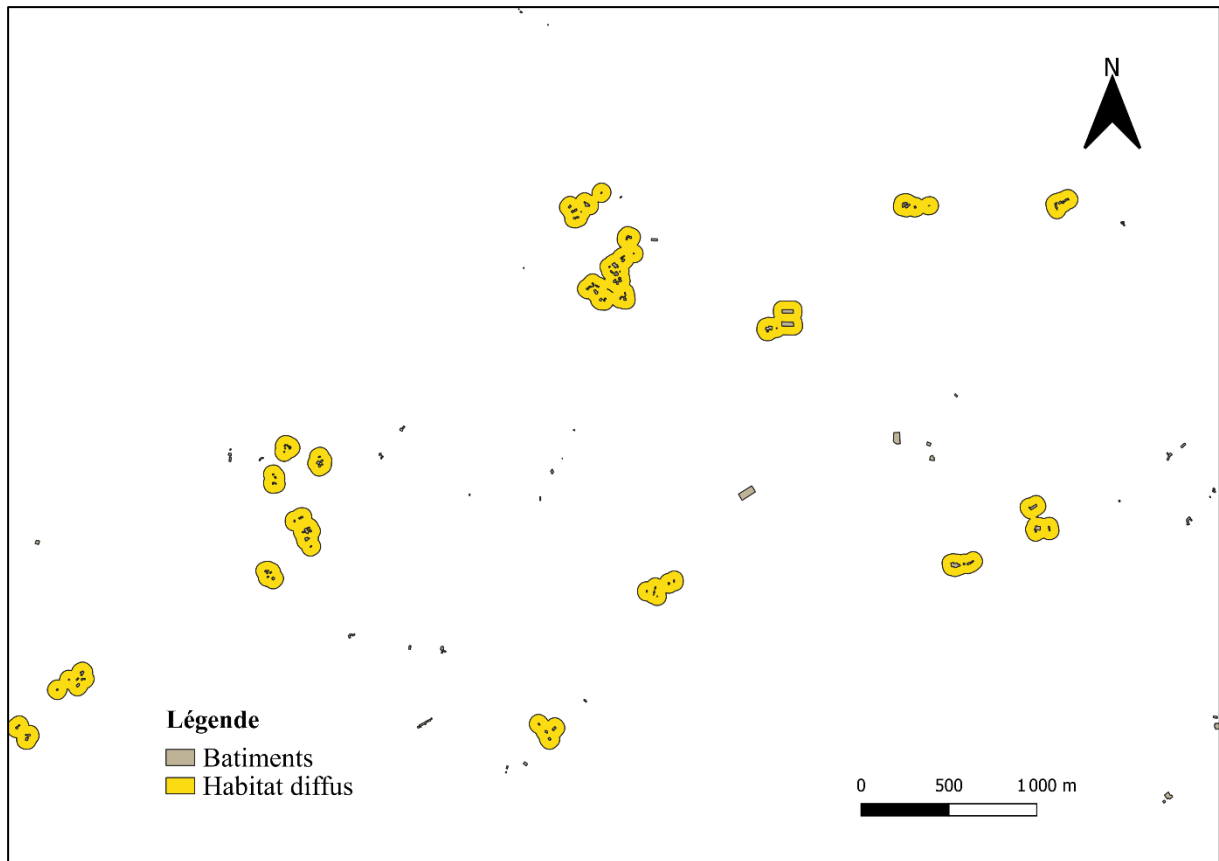
### **7.4.2 Identification des bâtiments diffus**

Les bâtiments diffus sont définis par leur disposition dispersée en petits groupes. Cela inclut :

- Un groupe de 4 à 50 bâtiments, chacun étant situé à moins de 100 mètres des autres dans le même groupe, mais à plus de 100 mètres d'un autre groupe.
- Des ensembles de plus de 50 bâtiments, où chaque bâtiment est à moins de 100 mètres des autres dans le même ensemble, mais avec des sous-groupes de moins de 50 bâtiments chacun, relativement éloignés les uns des autres.



**Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie :  
Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**



**Figure 7.6** Cartographie d'habitat diffus

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

Les tampons jaunes montrent les groupes de bâtiments, indiquant une faible à modérée densité de peuplement.

Cette carte illustre la distribution des habitats diffus dans le massif de Djebel El Ouahch, elles montrent où se trouvent les groupes de bâtiments qui pourraient nécessiter des interventions spécifiques.

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch



**Figure 7.7** Photo de restaurant dans la zone de l'habitat diffus

Source : auteure2024

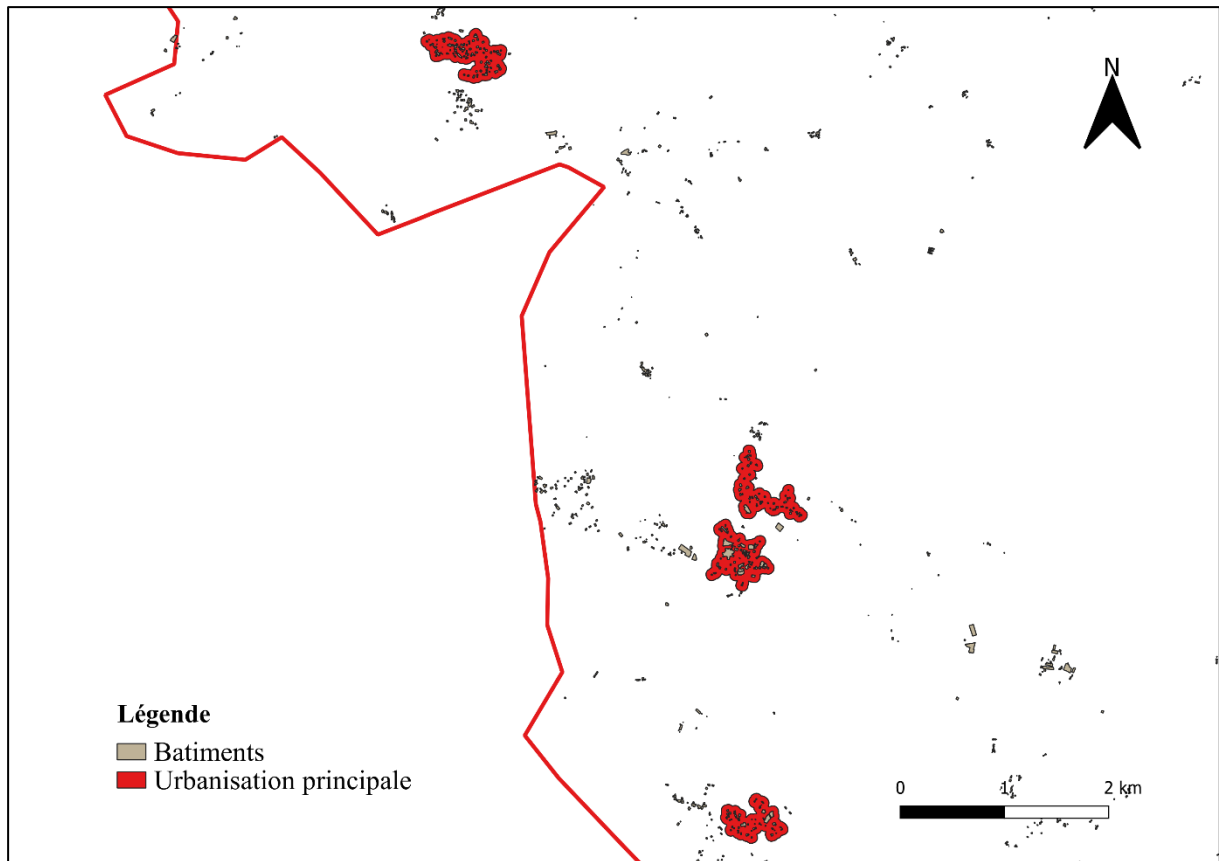
### 7.4.3 Identification des espaces urbanisés principaux

Les espaces urbanisés principaux se distinguent par la densité et la régularité de leur structure.

Ils sont définis comme suit :

- **Grand espace urbanisé dense** : Un groupe de plus de 50 bâtiments, chacun situé à moins de 30 mètres des autres, avec un coefficient de forme (rapport entre la surface et le périmètre de la zone) égal ou supérieur à 135. Cela représente un espace urbanisé dense, de grande taille, aux limites régulières.
- **Petit espace urbanisé dense** : Un groupe de moins de 50 bâtiments, chacun situé à moins de 30 mètres des autres, avec un coefficient de forme inférieur à 135. Plus de la moitié du périmètre de cette zone (défini par un tampon de 50 mètres autour des bâtiments) est adjacent à un grand espace urbanisé dense décrit précédemment. Cela correspond à un espace urbanisé de petite taille et dense, aux limites irrégulières, entouré majoritairement par un espace urbanisé plus grand et régulier.
- **Bâtiment isolé adjacent** : Un bâtiment situé entre 30 et 100 mètres de son voisin le plus proche. Plus de la moitié du périmètre de ce bâtiment (défini par un tampon de 50 mètres autour) est adjacent à un grand espace urbanisé dense décrit précédemment.

**Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie :  
Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**



**Figure 7.8:** Cartographie de l'urbanisation principale

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

Cette carte représente les zones densément urbanisées, où les bâtiments sont situés à moins de 30 mètres les uns des autres, avec un coefficient de forme égal ou supérieur à 135 dans le massif de Djebel El Ouahch. Ces zones sont caractérisées par une densité élevée de bâtiments et des limites régulières.

**Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie :  
Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**



**Figure 7.9** Photo des espaces urbanisés principaux

Source : Auteure 2024



**Figure 7.10** Photo de l'urbanisation principal

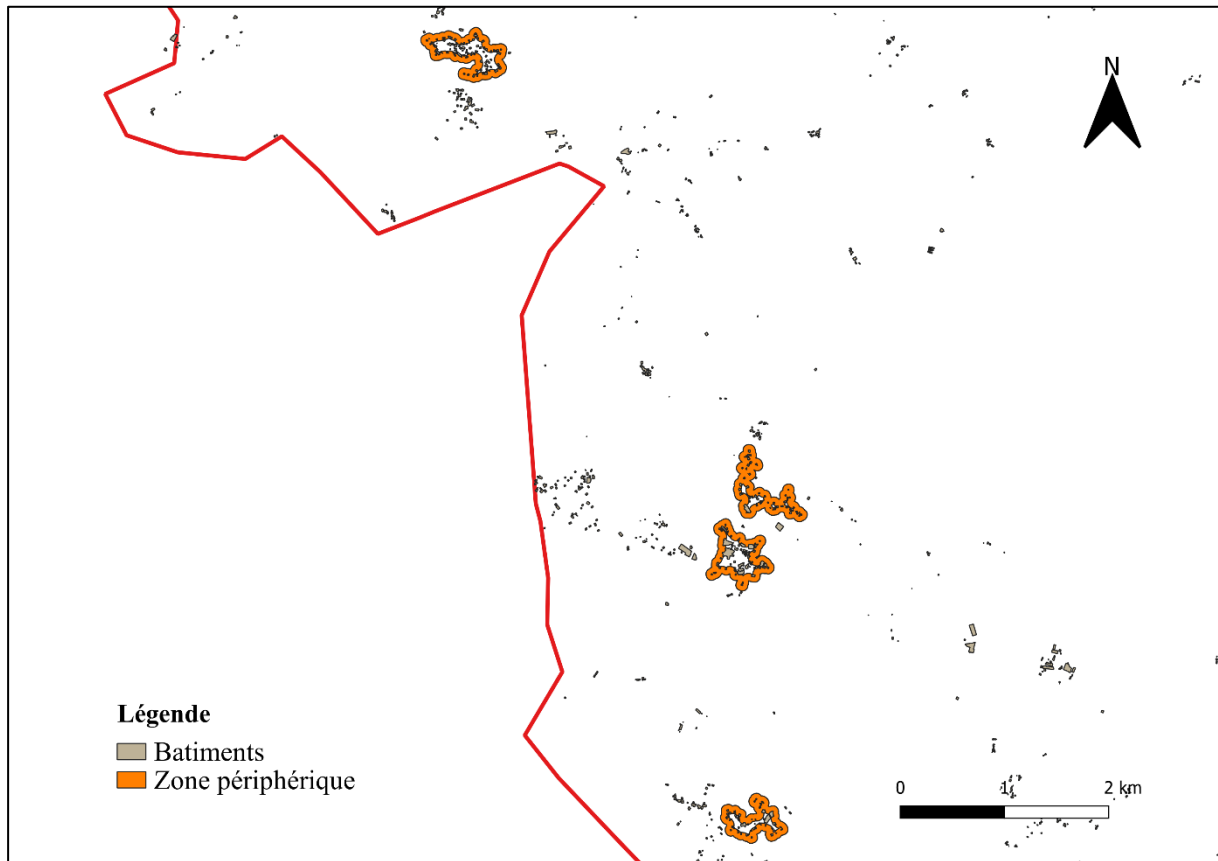
Source : Auteure 2024

Elles représentent des zones de concentration humaine qui nécessitent des mesures de protection renforcées.

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

### 7.4.4 Identification des zones périphériques

Les zones périphériques sont caractérisées par la première ligne de bâtiments face au massif forestier, définie par un tampon de 70 mètres (tampon d'érosion) autour des constructions situées en périphérie immédiate de l'espace naturel. Ces zones sont cruciales car elles matérialisent une vulnérabilité particulière due à leur exposition directe à un potentiel front de feu de forêt.

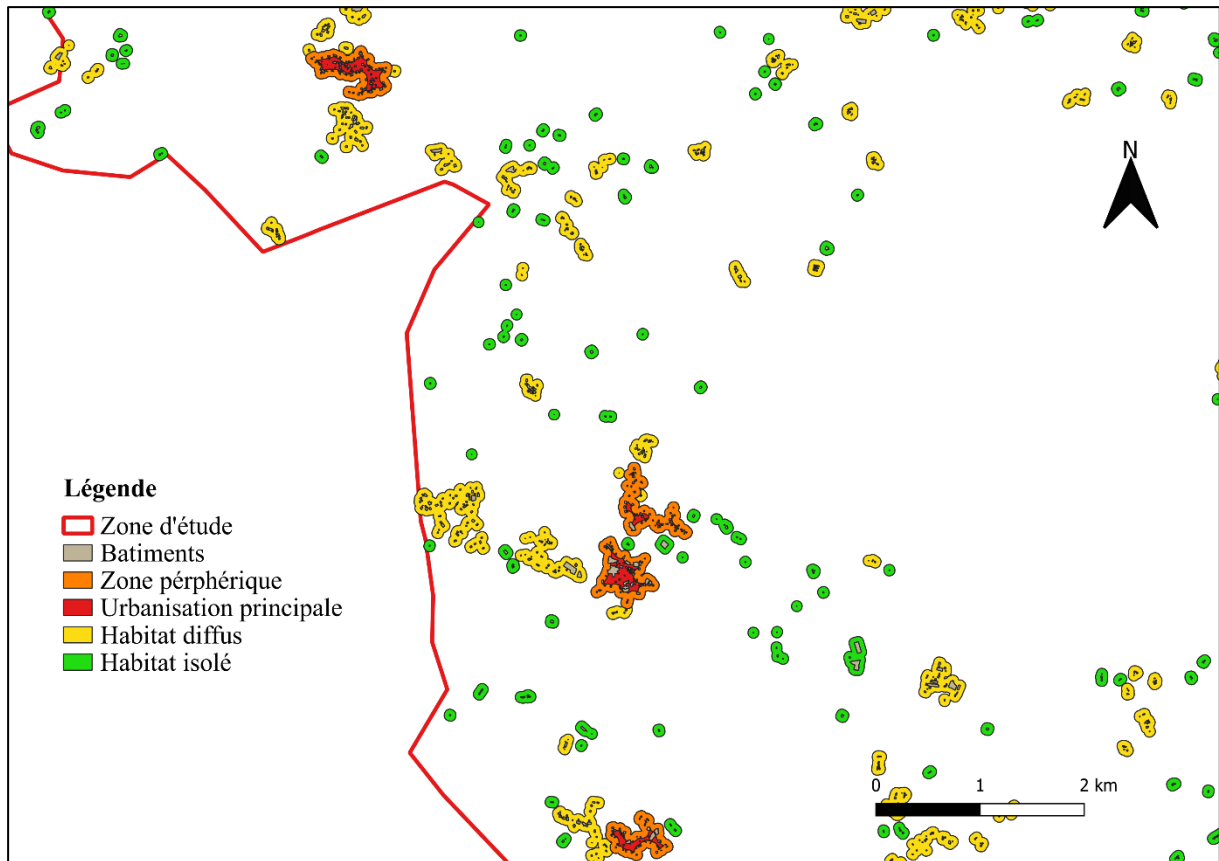


**Figure 7.11:** Cartographie des zones périphériques

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

La dernière étape a résumé cette analyse en fournissant des statistiques détaillées sur les différentes catégories de bâti identifiées, y compris l'urbanisation principale, le bâti périphérique, le bâti isolé, et le bâti diffus. La majorité des objectifs ont été atteints, aboutissant à la sauvegarde de plusieurs résultats clés et à l'identification des zones manquantes.

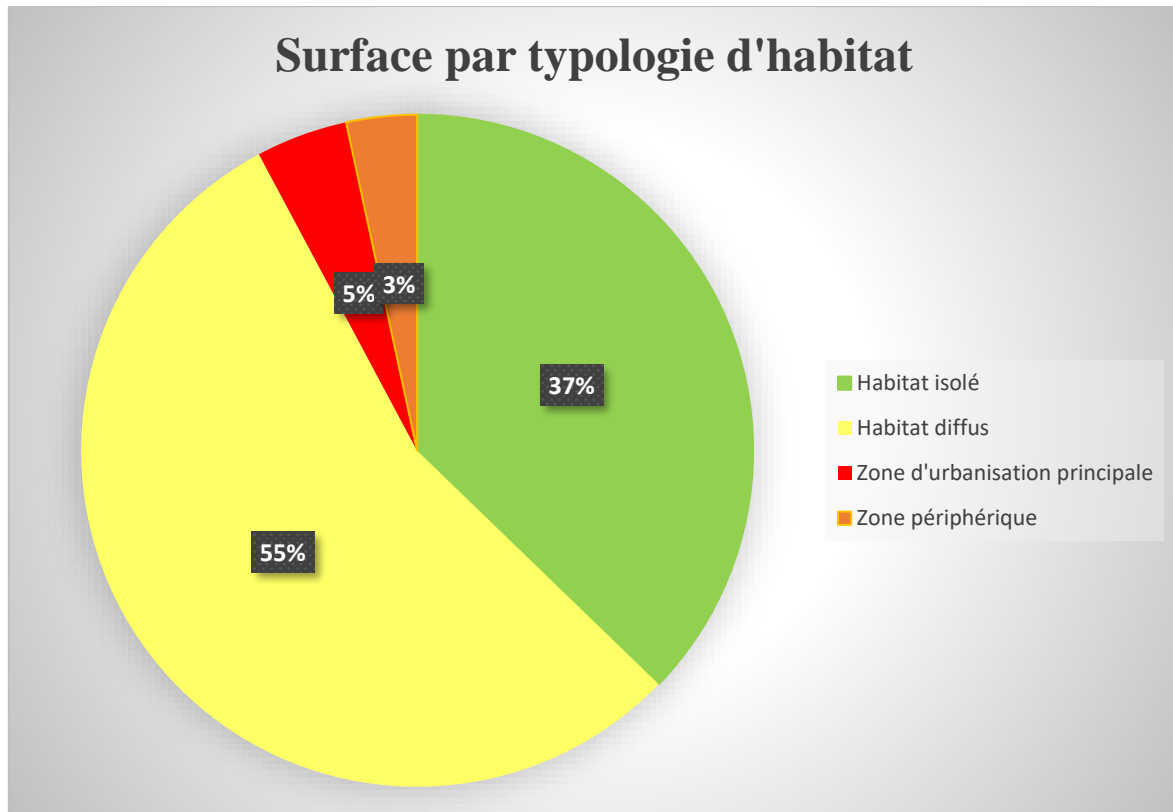
## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch



**Figure 7.2:** Cartographie de la structure du bâti

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

Les résultats montrent une prédominance des habitats diffus (55%) par rapport aux habitats isolés (37%), ce qui indique que la majeure partie du massif de Djebel El Ouahch est caractérisée par une végétation dense avec des habitations dispersées. Cela nécessite des mesures spécifiques pour la gestion des risques d'incendie, telles que le débroussaillage et la création de zones tampons.



**Figure 7.13:** Répartition des types d'habitat dans le massif de Djebel El Ouahch

Source : auteure 2024

Les zones d'urbanisation principale, bien que représentant seulement 5% de la surface totale, sont cruciales en termes de risques d'incendie en raison de la densité élevée de population et de structures. Des plans d'évacuation et des constructions résistantes au feu sont essentiels pour ces zones.

Les zones périphériques, occupant 3% de la surface, nécessitent également une attention particulière, même si elles sont moins étendues, afin de prévenir la propagation des incendies vers les zones plus densément peuplées.

Cette méthodologie d'analyse spatiale, basée sur le rapport de classification des zones bâties vulnérables aux incendies de (WUIMAPII), permet une meilleure gestion des interfaces habitats-forets et aide à prévenir les incendies de forêt dans ces zones vulnérables.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

### **7.5 Enjeux humains et prédiction du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt du massif de Djebel El Ouahch**

La présence humaine dans les interfaces habitats-forêts augmente non seulement la probabilité de déclenchement des incendies, mais complique également les opérations de lutte contre le feu en raison des infrastructures à protéger et des vies humaines en jeu.

Dans ce contexte, l'analyse des enjeux humains devient incontournable pour comprendre et gérer efficacement ces interfaces sensibles. Les populations vivant dans ces zones sont à la fois vulnérables aux incendies et parfois responsables de leur déclenchement, volontairement ou non.

Le tableau ci-dessous présente une répartition homogène de la densité de population à travers les différentes typologies d'habitat dans une zone caractérisée par des interfaces habitat-forêt. En moyenne, chaque type d'habitat abrite environ 5 personnes par unité.

**Tableau 7.2** Distribution et estimation de la population par typologie d'habitat dans les interfaces habitat forêt

<b>Typologie d'habitat</b>	<b>Nombre d'habitat</b>	<b>Population estimée</b>
<b>Habitat isolé</b>	750	3750
<b>Habitat diffus</b>	2657	13 285
<b>Zone d'urbanisation principale</b>	91	455
<b>Zone périphérique</b>	122	610
<b>Total</b>	3620	18 100

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

L'habitat isolé comprend 750 unités avec une population estimée à 3 750 personnes, reflétant une faible densité de population dans ces zones. L'habitat diffus, qui constitue la typologie la plus peuplée, abrite environ 13 285 personnes réparties sur 2 657 unités, ce qui en fait le type d'habitat le plus dense en termes de population dans cette zone d'étude.

La zone d'urbanisation principale, avec 91 unités abritant 455 personnes, présente une densité de population relativement faible par rapport aux autres catégories. À proximité, la zone périphérique comprend 122 unités d'habitat, avec une population estimée à 610 personnes, montrant une densité similaire à celle de la zone principale.

Globalement, la zone d'étude, située aux interfaces entre les habitats et les forêts, accueille une population totale estimée à 18 100 personnes réparties sur 3 620 unités d'habitat.

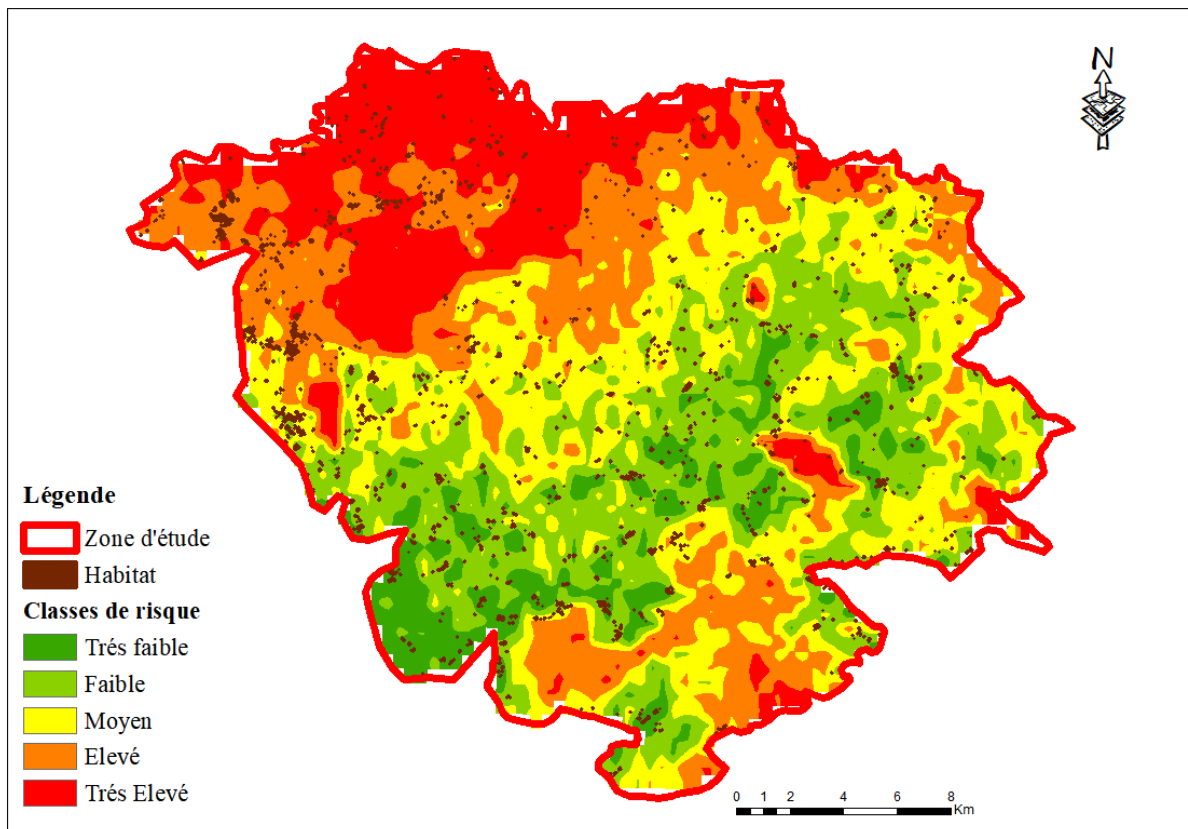


## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

L'habitat diffus représente 73 % de la population totale, indiquant une densité modérément élevée dans cette typologie.

Ces zones, malgré leur faible densité, sont stratégiques pour la gestion des incendies, car elles peuvent servir de points de regroupement ou d'évacuation en cas d'incident majeur. Cependant, la faible densité peut aussi indiquer une moindre priorité dans les plans d'intervention, ce qui pourrait être réévalué en fonction de leur rôle potentiel en cas de crise.

Sur la base de la susceptibilité de la région de Djebel El Ouahch aux incendies évaluée à l'aide du processus flou des facteurs causatifs, le risque potentiel d'incendies dans l'interface forêt-ville, illustré dans la figure 7.2 en superposant la carte de prédiction des incendies et l'interface habitable, est très préoccupant dans la partie nord de la zone d'étude. Cette zone correspond à la classe de vulnérabilité au risque très élevé et à la zone densément habitée à l'intérieur du massif forestier. Il est nécessaire d'intervenir de toute urgence pour atténuer les effets de ce problème et relancer les plans de gestion forestière.



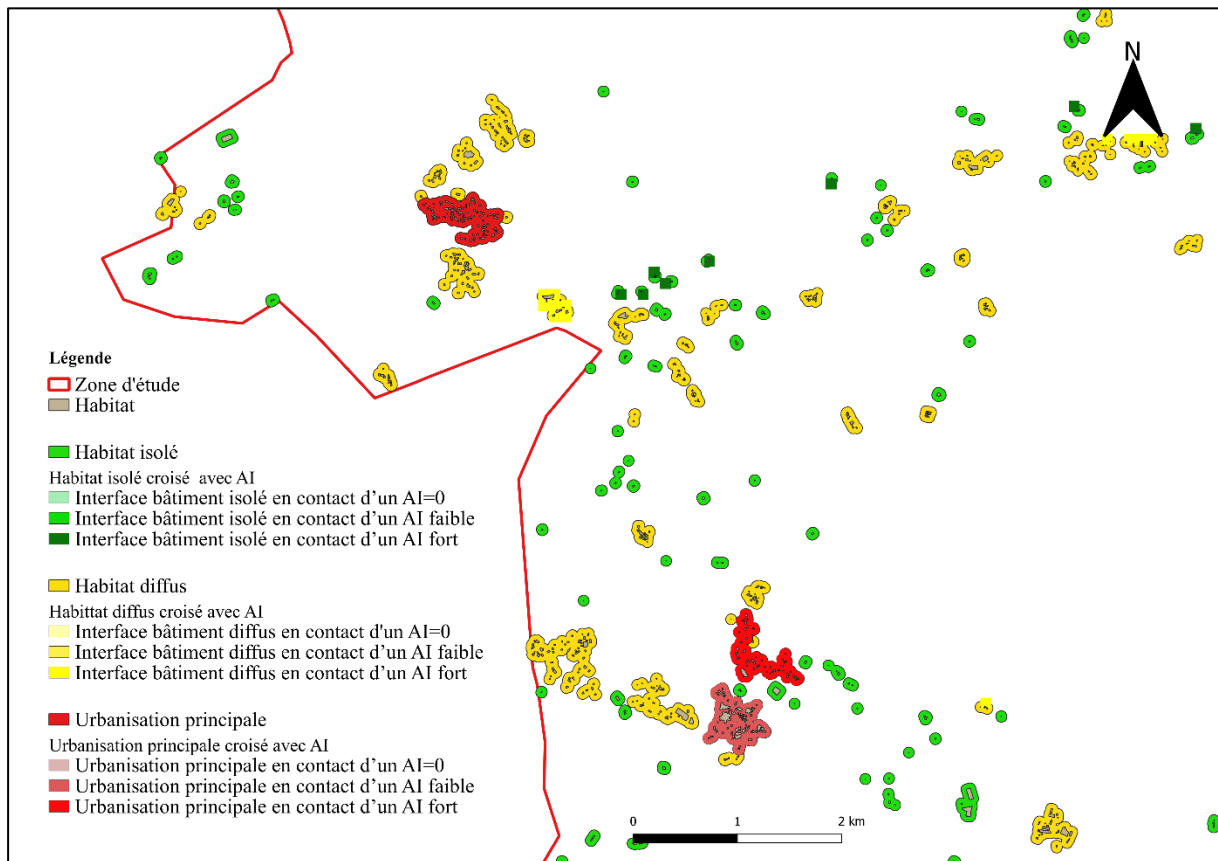
**Figure 7.14** Risque d'incendies dans les zones d'interface.

Source : auteure 2024

**Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-forêt et prédiction des risques d'incendie :  
Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

**7.6 Vulnérabilité et stratégies de gestion des risques d'incendie dans le massif de Djebel El Ouahch : Interfaces habitat-forêt et agrégation de la végétation**

La carte ci-dessous fournit une analyse détaillée des interfaces habitat forêt croisé avec l'indice d'agrégation de végétation dans le massif de Djebel el Ouahch,



**Figure 7.15:** Analyse des interfaces habitat-forêt croisées à l'indice AI dans le massif de Djebel El Ouahch

Source : WUIMAPII + traitement auteure 2024

- Pour l'habitats isolés : Les zones avec une agrégation forte sont particulièrement vulnérables aux incendies en raison de la continuité de la végétation.
- Pour l'habitats diffus : Les zones avec une agrégation forte représentent également des risques élevés, nécessitant des mesures de prévention.
- Pour les zones d'urbanisation principale : Les zones urbaines avec une agrégation forte sont critiques, car elles combinent une densité élevée de population et un risque élevé de propagation des incendies.

## Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch

Les zones avec une agrégation forte de la végétation nécessitent des interventions ciblées pour réduire les risques d'incendie, telles que la création de coupe-feu et le débroussaillage. Le tableau 7.3 présente trois niveaux d'agrégation de masse combustible :

**Tableau 7.3** Croisement de l'habitat avec l'indice d'agrégation

Classe d'interface	Masse combustible agrégée								
	Aléa			Vulnérabilité			Risque		
	Pas de combustible agrégé	Masse combustible semi-agrégée	Masse combustible agrégée	Pas de combustible agrégé	Masse combustible semi-agrégée	Masse combustible agrégée	Pas de combustible agrégé	Masse combustible semi-agrégée	Masse combustible agrégée
Urbanisation principale	+	++	++++	++	++	++	+	++	+++
Habitat diffus	+	++	++++	+++	+++	+++	++	+++	++++
Habitat isolé	+	++	++++	++++	++++	++++	+	+++	+++++

Source : auteure 2024

L'analyse des zones résidentielles en fonction de l'agrégation des combustibles révèle plusieurs niveaux de risque liés à la propagation des incendies. Dans les environnements où les combustibles sont peu ou pas agrégés, comme dans le cas des habitats groupés, le risque d'incendie reste faible. L'absence de masses inflammables autour des bâtiments réduit considérablement les chances de propagation rapide du feu, assurant ainsi une plus grande sécurité pour les habitations. Il est recommandé de maintenir ces zones en bon état en effectuant régulièrement du débroussaillage et en créant des espaces coupe-feu autour des habitations. Cela permettra de minimiser davantage le risque de propagation des incendies.

Cependant, dès que des masses combustibles commencent à s'accumuler, même de manière modérée, le danger potentiel augmente. Dans ces situations, le risque de propagation des flammes devient plus tangible, en particulier dans les zones résidentielles semi-agrégées. Des mesures de gestion, telles que l'identification des zones à haut risque et l'installation de barrières coupe-feu naturelles ou artificielles, devraient être mises en place pour prévenir la propagation rapide des incendies.

Lorsque l'on s'intéresse aux habitats diffus, qui se caractérisent par des habitations plus dispersées, la vulnérabilité est accrue. L'éloignement des habitations rend l'accès aux secours plus difficile, ce qui aggrave les conséquences potentielles d'un incendie. Dans ces

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

environnements, la présence de masses combustibles agrégées peut rapidement transformer un feu localisé en un incendie majeur. Il est donc crucial d'améliorer l'accès aux zones isolées en créant des chemins pour les véhicules de secours et d'augmenter la sensibilisation des habitants aux pratiques de prévention des incendies, comme l'entretien régulier des terrains environnants.

Si le combustible est fortement agrégé, les incendies peuvent se propager sans obstacles, profitant de la végétation pour se répandre d'une habitation à l'autre. Cela conduit à un risque particulièrement élevé. Dans ce cas, il est essentiel de prévoir des zones tampons entre les habitations et les zones forestières à haut risque, ainsi que des mesures plus strictes de prévention, comme l'interdiction des barbecues et des feux en plein air pendant les périodes de sécheresse.

L'habitat isolé est encore plus vulnérable, en raison de son éloignement non seulement des autres habitations, mais aussi des infrastructures de secours. Ici, la situation est d'autant plus critique lorsque les combustibles sont agrégés autour des bâtiments. Pour ces zones, des plans d'évacuation préétablis et une amélioration des infrastructures, telles que des réservoirs d'eau pour les services d'incendie, sont indispensables. De plus, encourager les propriétaires à maintenir des zones dégagées autour de leurs propriétés peut réduire le risque d'inflammabilité.

En ce qui concerne l'aléa, les zones à faible agrégation de combustible présentent un aléa minimal, ce qui signifie que la probabilité de survenue d'un incendie est relativement faible. Toutefois, à mesure que l'agrégation des combustibles augmente, l'aléa devient moyen, voire élevé, en particulier dans les zones où les habitations sont entourées de végétation dense. Dans ces cas, il est recommandé de mettre en place des programmes de gestion forestière visant à réduire l'accumulation de combustibles, notamment en effectuant des brûlages contrôlés et en nettoyant les sous-bois pour éviter l'agrégation de matière inflammable.

La vulnérabilité des habitations et des infrastructures dépend également de la préparation face aux incendies. Dans les zones présentant une vulnérabilité moyenne, des mesures de précaution sont souvent en place, mais elles restent insuffisantes pour prévenir totalement le risque. Il est conseillé d'améliorer les systèmes d'alerte rapide et d'organiser des campagnes de sensibilisation auprès des résidents pour renforcer leur préparation. À l'inverse, dans les zones où la vulnérabilité est très élevée, souvent en raison d'un isolement marqué et d'une agrégation importante de combustibles, le potentiel d'un incendie dévastateur est grand. Dans ces zones, des plans d'urgence communautaires, une formation aux premiers secours et une collaboration avec les autorités locales pour renforcer les moyens d'intervention sont essentiels.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

Le risque global unitaire, qui combine l'aléa et la vulnérabilité, reflète la gravité potentielle des incendies dans une zone donnée. Dans les zones à faible agrégation de combustible, le risque global est faible, car les probabilités de propagation rapide du feu sont minimales. Il est recommandé de maintenir ces zones avec des mesures préventives régulières. En revanche, dans les zones où le combustible est semi-agrégé, le risque augmente, bien qu'il reste modéré. Des programmes de gestion des forêts et des terres, ainsi que des dispositifs d'intervention rapide, doivent être prévus. Cependant, dans les zones où le combustible est fortement agrégé, en particulier dans les habitats isolés, le risque global devient très élevé. Une stratégie de gestion globale, incluant des mesures de prévention, des plans d'évacuation et des ressources renforcées pour les interventions d'urgence, doit être mise en place pour éviter que ces zones ne deviennent des foyers d'incendies incontrôlables.

## **Chapitre VII : Gestion des interfaces habitat-foret et prédiction des risques d'incendie : Approche intégrée pour la prévention et la protection dans le massif de Djebel El Ouahch**

### **Conclusion**

Ce chapitre a permis de mettre en lumière l'importance de la cartographie et de la gestion des interfaces habitat-forêt dans la prévention des incendies de forêt, particulièrement dans le massif de Djebel El Ouahch. En utilisant une approche méthodologique basée sur la classification des zones bâties vulnérables, combinée à des données satellitaires et des relevés de terrain, il a été possible d'identifier des zones à haut risque, notamment celles caractérisées par une forte agrégation de végétation.

Les résultats obtenus montrent que les habitats isolés et diffus sont particulièrement vulnérables en raison de leur proximité avec une végétation dense et continue, augmentant ainsi le potentiel de propagation des incendies. Les zones d'urbanisation principale, bien que moins étendues, sont également à risque en raison de la densité de population et des infrastructures présentes.

Ces conclusions soulignent la nécessité d'adopter des mesures préventives spécifiques, telles que le débroussaillage, la création de coupe-feu et l'amélioration des infrastructures résistantes au feu. De plus, la sensibilisation des populations locales et la mise en place de plans d'évacuation adaptés sont des priorités pour réduire les impacts des incendies dans ces zones.

Cette étude fournit des informations précieuses pour la gestion des risques d'incendie dans le massif de Djebel El Ouahch et propose des stratégies concrètes pour renforcer la résilience des interfaces habitat-forêt face aux incendies de forêt.

## Conclusion générale

### CONCLUSION GENERALE

L'incendie de forêt est l'un des risques environnementaux les plus dévastateurs en raison de son impact à grande échelle, touchant de vastes surfaces, ainsi que de ses conséquences sur les enjeux anthropiques. Ces incendies résultent d'une interaction complexe entre des facteurs météorologiques (vent, chaleur), physiques (topographie, géomorphologie), et biophysiques (végétation, humidité du sol).

De plus, le facteur humain (urbanisation, activités agricoles, comportements négligents) joue un rôle déterminant dans leur déclenchement et leur intensité, particulièrement dans les zones d'interface habitat-forêt. Ces caractéristiques justifient l'adoption d'une approche systémique, qui met l'accent sur l'importance d'une gestion globale et préventive des risques.

Au terme de ce travail de recherche, il est possible d'apporter quelques éléments de réponse aux principales interrogations :

- **Quels sont les principaux facteurs d'éclosion et de propagation des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch, et comment ces facteurs interagissent-ils avec les écosystèmes forestiers et les enjeux anthropiques ?**
- **Comment peut-on élaborer un cadre méthodologique novateur pour la cartographie du risque d'incendie ?**
- **Et quels outils numériques spécifiques peuvent être développés pour aider les gestionnaires locaux à prévenir et gérer efficacement les risques d'incendie de forêt dans ces contextes ?**

La validation des hypothèses avancées a nécessité l'élaboration d'un cadre théorique et expérimental robuste, impliquant la combinaison de diverses méthodes afin d'identifier le modèle le plus approprié pour répondre aux objectifs de cette recherche.

Ultimo, l'aboutissement de cette recherche est un modèle intégré d'évaluation des risques d'incendie de forêt. Un outil pragmatique pour la gestion et la prévention des incendies dans les interfaces habitat-forêt. Fournissant des cartes détaillées des zones sensibles aux incendies de forêt.

Les résultats principaux de l'analyse bibliométrique et systématique montrent une vue d'ensemble précise et pertinente de la recherche actuelle sur la cartographie et la gestion des

## Conclusion générale

incendies de forêt. Elle a permis de mieux comprendre les tendances émergentes, les contributeurs majeurs, et les outils méthodologiques utilisés dans ce domaine.

En effet, l'augmentation significative des publications au cours de la dernière décennie, en particulier à partir de 2017, témoigne de la reconnaissance croissante des incendies de forêt en tant que problème environnemental majeur. L'intérêt mondial pour cette thématique est évident à travers la participation active de plusieurs pays, notamment les États-Unis, l'Italie, et l'Indonésie, qui se distinguent comme des contributeurs majeurs. Cette collaboration internationale souligne l'importance de l'effort collectif pour relever les défis liés aux incendies de forêt.

Les résultats montrent également que les technologies avancées telles que la télédétection, les algorithmes d'apprentissage automatique, et la technologie LiDAR jouent un rôle clé dans l'amélioration de la précision de la cartographie des zones à risque. Les auteurs les plus prolifiques et les institutions académiques de premier plan ont fortement contribué à ces avancées méthodologiques, permettant de mieux comprendre les dynamiques des incendies de forêt, de leur déclenchement à leur gestion post-événement.

Enfin, l'analyse bibliométrique et systématique met en avant les défis persistants, notamment l'intégration des facteurs humains et environnementaux dans les modèles prédictifs, la variabilité régionale des incendies et la nécessité de mises à jour fréquentes des cartes et modèles. Ces résultats montrent qu'il est crucial de poursuivre l'affinement des modèles actuels, d'élargir les études à d'autres régions géographiques, et d'intégrer des facteurs socio-économiques pour une gestion plus holistique et efficace des risques d'incendie de forêt.

L'analyse multidimensionnelle vient compléter et enrichir l'analyse bibliométrique et systématique en ajoutant une perspective multidisciplinaire et en intégrant des dimensions sociales, politiques et institutionnelles essentielles pour une gestion holistique des incendies de forêt. Elle confirme également l'importance des avancées technologiques tout en soulignant la nécessité de politiques et d'approches plus robustes et intégrées.

En effet, l'importance de l'interface habitat-forêt est particulièrement soulignée, en raison de la vulnérabilité croissante des zones habitées face aux incendies. L'analyse des stratégies internationales pour la gestion des interfaces habitat-forêt, ainsi que la discussion des cadres institutionnels en Algérie, montrent qu'il existe des efforts pour prévenir les risques. Cependant, l'absence de systèmes prédictifs pleinement développés en Algérie révèle un besoin d'améliorations pour anticiper les incendies et limiter leurs impacts destructeurs.



## Conclusion générale

L'impact des incendies sur les écosystèmes, les communautés humaines et l'économie est également discuté de manière approfondie. Les résultats démontrent que les incendies de forêt entraînent non seulement la dévastation des ressources naturelles, mais aussi des pertes humaines et matérielles significatives. Les politiques de gestion actuelles, bien qu'efficaces dans certains cas, nécessitent un renforcement pour mieux intégrer la prévention et la résilience dans les zones d'interface.

Enfin, nous avons souligné sur la nécessité de renforcer les politiques publiques et les technologies pour une gestion plus efficace des incendies. Des technologies avancées telles que la télédétection et des méthodes comme la logique floue sont des approches porteuses très adaptées pour anticiper les incendies et améliorer les réponses opérationnelles. Cependant, une meilleure coordination entre les institutions et une sensibilisation accrue des populations locales sont des éléments essentiels pour maximiser l'efficacité de ces stratégies.

L'analyse cartographique thématique du milieu biophysique du massif de Djebel El Ouahch a permis de dégager plusieurs résultats importants qui renforcent la compréhension des dynamiques environnementales et des risques dans cette région.

En effet, l'analyse des données climatiques, obtenues par interpolation spatiale, montre que la région est soumise à un climat méditerranéen marqué par des étés secs et des hivers doux. Les précipitations varient significativement en fonction des zones, avec des disparités entre le nord et le sud du massif. Ces conditions climatiques influencent directement les risques d'incendies de forêt, qui tendent à augmenter pendant les périodes estivales de sécheresse.

La région étudiée présente une topographie accidentée, dominée par des pentes raides et des vallées profondes, rendant l'accès difficile et augmentant la vulnérabilité à l'érosion des sols. Cette structure géomorphologique influence également les écoulements hydrologiques et la distribution de la végétation, deux facteurs cruciaux dans l'évaluation du risque d'incendie de forêt. L'analyse géologique a mis en lumière des formations rocheuses variées, dont des calcaires et des dolomies, qui ont des implications directes sur la stabilité des sols et la gestion des ressources naturelles.

L'étude révèle une diversité écologique marquée, avec des forêts méditerranéennes denses dans certaines zones et des maquis clairsemés dans d'autres. Le pin d'Alep domine les forêts de la région, une essence particulièrement vulnérable aux incendies récurrents. Cette diversité souligne l'importance de la conservation de la biodiversité, tout en exposant les défis liés à la

## Conclusion générale

régénération des espèces après les incendies, notamment dans les zones où la couverture forestière est significativement affectée.

Le réseau hydrographique de la région, bien que relativement dense, est fortement influencé par les variations climatiques. Les cours d'eau et les zones humides identifiés jouent un rôle clé dans le maintien de la biodiversité locale et la régulation des microclimats, mais ils sont également vulnérables aux sécheresses prolongées. La gestion durable de ces ressources en eau est cruciale, notamment dans le contexte des changements climatiques, qui accentuent les risques d'assèchement et d'incendie.

Enfin la cartographie des utilisations des terres a montré que l'agriculture et l'agropastoralisme occupent une place prépondérante dans certaines zones du massif. Ces activités, combinées à la forte urbanisation, exercent des pressions importantes sur les écosystèmes locaux, augmentant le risque de dégradation des sols et la vulnérabilité aux incendies. Cette dynamique appelle à une gestion territoriale plus équilibrée et durable pour limiter les impacts négatifs de l'activité humaine sur l'environnement.

En effet, l'analyse diachronique a permis de mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle des incendies dans le massif de Djebel El Ouahch. Les résultats démontrent que les incendies ont causé une perte importante de végétation, mais que certaines zones présentent une résilience naturelle. Les outils de télédétection utilisés dans cette étude offrent des moyens efficaces de surveiller ces dynamiques et d'appuyer des stratégies de gestion des incendies plus informées et adaptées aux réalités locales.

De plus, l'analyse des indices NDVI, NBR et NDWI avant et après les incendies de 2017, 2019 et 2021 révèle une diminution notable de la couverture végétale dans les zones touchées. Ces résultats montrent que les incendies ont significativement réduit la densité et la santé de la végétation, avec des valeurs de NDVI plus faibles après chaque incendie, indiquant des zones brûlées où la végétation a été détruite. L'analyse du NBR confirme cette tendance, en identifiant les zones les plus gravement affectées par les feux. De même, les valeurs de NDWI montrent une baisse de l'humidité dans les zones touchées, ce qui pourrait avoir des conséquences à long terme sur la régénération naturelle.

Les cartes réalisées pour les trois dates étudiées montrent une extension progressive des zones brûlées dans le massif, particulièrement dans les zones forestières denses. Cependant, il a également été observé que certaines parties de la forêt, bien qu'affectées, ont montré des signes de régénération naturelle après les incendies. Les zones ayant subi une diminution plus modérée

## Conclusion générale

des indices de végétation présentent un potentiel de récupération, ce qui met en lumière la résilience écologique de certaines sections du massif. Toutefois, les zones les plus touchées par les incendies requièrent des efforts de restauration pour accélérer la régénération.

Cette étude montre l'importance des techniques de télédétection, en particulier les images satellites Sentinel-2 et Landsat 8 OLI, pour la surveillance et l'évaluation des changements d'occupation du sol après des incendies. Les indices NDVI, NBR et NDWI ont été particulièrement efficaces pour quantifier l'étendue des dommages et fournir des données précises sur la santé de la végétation et l'humidité du sol avant et après les incendies. Ces outils permettent de visualiser les dynamiques post-incendie et d'informer les décideurs sur les priorités de gestion et de restauration des zones affectées.

Enfin, les résultats obtenus offrent des informations critiques pour la gestion des ressources forestières dans le massif de Djebel El Ouahch. Les cartes produites mettent en évidence les zones à risque élevé qui nécessitent des interventions rapides, pour la prévention des incendies, la gestion des combustibles forestiers, et la restauration des terres. De plus, les informations sur les zones à fort potentiel de régénération peuvent guider les initiatives de reforestation. Cette étude souligne donc la nécessité de développer des stratégies de gestion durable des forêts, en tenant compte des cycles naturels de feu et des opportunités de régénération.

L'analyse de la logique floue dans le contexte de la prédiction des feux de forêt, a permis de développer un modèle prédictif pertinent pour le massif de Djebel El Ouahch, intégrant plusieurs facteurs environnementaux et humains. Voici les principaux résultats discutés :

L'utilisation de la logique floue a permis de modéliser des situations complexes et incertaines en attribuant des degrés de probabilité aux différents facteurs influençant les incendies de forêt. Contrairement aux approches classiques, la logique floue a intégré des paramètres imprécis, tels que la végétation, la pente, l'humidité du sol, et la distance aux infrastructures humaines, pour créer un modèle prédictif plus adaptable. Ce modèle a montré une bonne capacité à prédire les zones à haut risque, avec des corrélations positives entre les prévisions du modèle et les incendies observés, comme démontré par les cartes des indices de zone brûlée.

Le modèle de logique floue a permis de diviser la zone étudiée en cinq classes de risque : très faible, faible, modéré, élevé, et très élevé. Les zones à risque élevé et très élevé se trouvent principalement dans les parties montagneuses et densément forestières du massif, où des espèces végétales inflammables, comme le pin d'Alep, combinées à des pentes raides et des conditions climatiques défavorables (températures élevées, vents forts), augmentent la

## Conclusion générale

probabilité de propagation des incendies. Ces résultats confirment l'importance des paramètres topographiques et climatiques dans la prédiction des incendies de forêt.

Le modèle a également révélé que les zones situées à proximité des routes et des habitations sont particulièrement vulnérables aux incendies, en raison de la présence humaine qui peut déclencher des feux accidentels ou intentionnels. Cette relation entre la proximité des infrastructures et le risque d'incendie met en lumière la nécessité de renforcer les politiques de gestion dans les zones d'interface habitat-forêt, ainsi que d'éduquer les populations locales sur les pratiques de prévention des feux.

Les résultats montrent que les facteurs bioclimatiques (température, humidité, vent) et de combustibilité (teneur en eau de la végétation, type de couvert végétal) jouent un rôle prépondérant dans la modélisation des risques. La cartographie des facteurs montre une prédominance des zones de maquis et de forêts mixtes, qui augmentent la susceptibilité aux incendies. De plus, la pente et l'exposition des terrains accentuent la vulnérabilité, surtout dans les zones orientées au sud et au sud-est, qui sont plus ensoleillées et plus sèches.

L'ajout de la dimension interface (surtout vulnérabilité) à un modèle issu de la logique floue a enrichi l'analyse des interfaces habitat-forêt en augmentant la précision, en intégrant mieux les incertitudes et en offrant une approche plus flexible et réaliste de l'évaluation des risques d'incendie.

L'analyse des interfaces habitat-forêt a fourni des résultats significatifs sur la manière dont ces zones augmentent le risque d'incendies de forêt, en particulier dans le massif de Djebel El Ouahch. Ces résultats mettent en lumière plusieurs aspects clés liés à la cartographie et à la gestion des risques dans ces zones sensibles.

L'étude a démontré que la répartition des habitations à proximité des zones forestières joue un rôle crucial dans le risque d'incendie. En classifiant les types d'habitats (isolé, diffus, urbanisation principale et zone périphérique), il est possible de mieux comprendre les dynamiques spécifiques à chaque zone. Les habitats isolés et diffus, représentant la majorité des constructions dans la région, sont particulièrement vulnérables en raison de leur proximité avec une végétation dense et inflammable, ce qui nécessite des mesures spécifiques comme le débroussaillage et l'installation de coupures de combustible.

L'utilisation de l'indice d'agrégation (AI) permet de quantifier la continuité de la végétation et son potentiel à propager les incendies. Les résultats montrent que les zones avec une végétation

## Conclusion générale

fortement agrégée sont plus à risque, notamment dans les secteurs d'habitat isolé et diffus nécessitant des interventions immédiates pour réduire la densité de végétation et prévenir la propagation des feux de forêt.

Les infrastructures forestières, telles que les tranchées pare-feu, les postes de surveillance, et les pistes, sont cartographiées de manière à optimiser la gestion des incendies. Cependant, certains tronçons de ces infrastructures nécessitent encore des travaux d'aménagement pour accroître leur efficacité. La cartographie des zones d'urbanisation principale, bien que couvrant une surface réduite, souligne l'importance de protéger ces zones densément peuplées par des plans d'évacuation et des infrastructures résistantes au feu.

Le croisement entre la typologie des habitats et l'indice d'agrégation de la végétation permet d'identifier les zones les plus à risque. Les résultats montrent que les habitats diffus, avec une population estimée à plus de 13 000 personnes, représentent un enjeu majeur pour la gestion des incendies. Des campagnes de sensibilisation et des formations pour les résidents de ces zones pourraient être essentielles pour réduire les risques.

Cette analyse a permis de dresser une cartographie précise des interfaces habitat-forêt dans le massif de Djebel El Ouahch, mettant en évidence les zones à haut risque d'incendie. Les résultats montrent que la continuité de la végétation, en particulier dans les zones d'habitat isolé et diffus, constitue une menace importante pour la sécurité des résidents et la préservation des écosystèmes. Il est nécessaire de mettre en place des politiques de gestion plus ciblées, incluant des mesures de prévention comme le débroussaillage, la création de coupe-feu et la formation des résidents pour faire face aux risques d'incendie dans ces interfaces.

Enfin, les résultats obtenus à travers ce modèle basé sur la logique floue permettent une prédiction plus précise et nuancée des zones à risque d'incendie dans le massif de Djebel El Ouahch. La capacité du modèle à intégrer des données environnementales variées, ainsi que des facteurs humains, renforce son utilité en tant qu'outil de gestion et de prévention des incendies de forêt. La validation statistique des résultats montre que le modèle offre une représentation fiable des zones vulnérables et fournit une base solide pour orienter les futures stratégies de prévention et d'intervention.

Ce modèle offre également des pistes pour améliorer la gestion des risques à travers une surveillance continue des facteurs climatiques et humains, et un renforcement des infrastructures de prévention dans les zones à haut risque.

## Conclusion générale

Les contributions scientifiques de cette thèse sur la gestion des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch s'articulent autour de trois points principaux :

Face à l'absence d'un cadre unifié et multidimensionnel pour l'analyse des incendies de forêt, cette thèse propose une approche interdisciplinaire, intégrant des méthodes issues de la télédétection, des systèmes d'information géographique (SIG), et de la modélisation des risques (logique floue). Ce travail contribue à l'élargissement des connaissances en matière de gestion des feux de forêt, en associant les facteurs naturels et anthropiques dans une évaluation exhaustive. Cette approche multidisciplinaire met en avant la nécessité d'un cadre théorique et technique plus holistique, qui permet d'optimiser la gestion des risques d'incendie dans des environnements complexes comme les interfaces habitat-forêt, une thématique peu abordée jusqu'ici dans la littérature scientifique algérienne.

La deuxième contribution réside dans l'opérationnalisation d'un modèle prédictif basé sur la logique floue, capable de quantifier les risques d'incendies de forêt en intégrant une variété de facteurs environnementaux (climat, topographie, végétation) et anthropiques (urbanisation, infrastructures). Ce modèle permet d'identifier et de cartographier précisément les zones à risque élevé, et d'orienter les interventions de prévention et de restauration en fonction des résultats obtenus. En combinant des techniques avancées de télédétection et de classification supervisée, ce modèle offre un outil de diagnostic efficace pour la surveillance en temps réel et la gestion post-incendie. L'approche est particulièrement adaptée aux interfaces habitat-forêt, où les activités humaines sont les plus susceptibles d'interagir avec les dynamiques écologiques. Ce modèle peut également servir de base pour des études comparatives et d'aide à la décision dans des régions similaires.

La troisième contribution concerne l'analyse diachronique des incendies dans le massif de Djebel El Ouahch, qui permet de suivre les dynamiques spatio-temporelles des incendies sur plusieurs années. En évaluant l'évolution de l'occupation du sol et la régénération de la végétation, cette thèse offre une vision précise des effets des incendies sur les écosystèmes locaux. Ces résultats sont directement applicables à la gestion territoriale, notamment pour orienter les politiques publiques et les décisions des gestionnaires forestiers en matière de restauration écologique et de prévention des incendies futurs. L'application de cette approche à la région du Djebel El Ouahch montre également un changement de perspective dans la gestion des espaces naturels, en proposant une vision plus flexible et coopérative, adaptée aux

## Conclusion générale

particularités locales. Les autorités publiques peuvent utiliser ces résultats pour ajuster les plans de gestion forestière et renforcer les stratégies de prévention dans les zones les plus vulnérables.

Cette étude a également une dimension sociale et environnementale, en recommandant une meilleure intégration des communautés locales dans la gestion des risques d'incendies, en promouvant des pratiques de prévention adaptées aux réalités locales. Le développement de programmes de sensibilisation et l'implication des populations dans la surveillance et la restauration des zones touchées contribuent à renforcer la résilience des écosystèmes et des habitants face aux feux de forêt.

### Perspectives et pistes de recherche

Nous proposons quelques perspectives de recherche qui peuvent être envisagées à partir des résultats obtenus dans cette thèse sur la gestion des incendies de forêt dans le massif de Djebel El Ouahch :

- Amélioration du modèle prédictif par l'intégration de nouvelles données climatiques et environnementales

Bien que le modèle basé sur la logique floue ait montré son efficacité, il serait pertinent d'améliorer sa précision en intégrant des données climatiques plus fines et en temps réel (température, humidité, vitesse du vent) et des projections climatiques à long terme. Cela permettrait de mieux anticiper les risques d'incendie dans le contexte des changements climatiques et d'ajuster les stratégies de prévention en fonction des scénarios futurs.

- Études comparatives dans d'autres régions sensibles aux incendies

Il serait intéressant d'appliquer le modèle développé dans cette thèse à d'autres régions forestières sensibles aux incendies, notamment dans des zones méditerranéennes ou semi-arides, afin de comparer les dynamiques d'incendie dans différents contextes géographiques et écologiques. Cela pourrait également permettre de tester la transposabilité du modèle et d'identifier des variables spécifiques à chaque région qui influencent les risques d'incendie.

- Analyse des interactions entre les incendies de forêt et la biodiversité

Une autre perspective serait de croiser les données relatives aux incendies avec des études sur la biodiversité. Cela permettrait d'analyser plus en profondeur l'impact des incendies sur les espèces végétales et animales, et de développer des stratégies de restauration qui tiennent

## Conclusion générale

compte des dynamiques écologiques locales. Il serait notamment pertinent d'étudier les espèces résistantes aux incendies pour encourager leur régénération dans les zones touchées.

- Développement d'une approche participative pour la gestion des incendies

L'une des pistes de recherche pourrait consister à élaborer un modèle participatif de gestion des incendies en impliquant les populations locales, les gestionnaires forestiers, et les autorités publiques. L'objectif serait de développer des systèmes de surveillance collaborative basés sur les savoirs locaux et les technologies numériques (comme les applications mobiles ou les drones), afin de mieux anticiper les départs de feu et d'accélérer les interventions.

- Développement de solutions technologiques pour la restauration post-incendie

Une autre perspective consisterait à explorer l'utilisation de nouvelles technologies (drones, capteurs intelligents, bioingénierie) pour faciliter la restauration écologique des zones touchées par les incendies. Ces technologies pourraient aider à surveiller la régénération de la végétation, à évaluer l'efficacité des efforts de reforestation, et à suivre la qualité des sols et de la biodiversité dans les zones restaurées.

- Analyse économique des impacts des incendies de forêt et des coûts de la gestion des risques

Une dimension encore peu explorée est celle des impacts économiques des incendies de forêt sur les communautés locales, les infrastructures, et les écosystèmes. Il serait intéressant de mener une étude sur les coûts de la gestion des incendies (prévention, intervention, restauration) et sur les bénéfices potentiels des stratégies proposées dans cette thèse. Cela permettrait d'évaluer la rentabilité des investissements dans la gestion durable des forêts et la prévention des incendies.

- Élaboration de stratégies d'adaptation aux changements climatiques

Les changements climatiques constituent un facteur aggravant des incendies de forêt, notamment en raison de l'augmentation des périodes de sécheresse et de chaleur intense. Une perspective de recherche serait d'élaborer des stratégies d'adaptation spécifiques aux incendies de forêt dans des zones sensibles aux changements climatiques. Cela pourrait inclure des politiques de gestion des ressources en eau, des pratiques de reforestation avec des espèces plus résistantes, et des modèles de gestion adaptative des écosystèmes.



## **Conclusion générale**

Ces perspectives de recherche permettraient de poursuivre les travaux entrepris dans cette thèse en approfondissant l'étude des dynamiques liées aux incendies de forêt, en améliorant les outils de gestion et en intégrant de nouvelles dimensions écologiques, économiques et sociales. Ces pistes pourraient également servir à orienter les politiques publiques et à renforcer les capacités des communautés locales dans la prévention et la gestion durable des incendies.

## Bibliographie

- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Abdelhamid, D., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2023). Decoding the interplay between tree traits, seed production, and cone-boring insect damage using advanced modeling to unveil the intricacies of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) forests. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *8*(4), 875–891. <https://doi.org/10.1007/s41207-023-00419-6>
- Abdo, H. G., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., & Al-Mutiry, M. (2022). GIS-Based Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process for Forest Fire Susceptibility Mapping in the Western Region of Syria. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(8). <https://doi.org/10.3390/su14084668>
- Abedi Gheshlaghi, H. (2019). Using GIS to Develop a Model for Forest Fire Risk Mapping. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *47*(7), 1173–1185. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00981-z>
- Abedi Gheshlaghi, H., Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2020). GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management*, *63*(3), 481–499. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>
- Adab, H., Kanniah, K. D., & Solaimani, K. (2013). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, *65*(3), 1723–1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>
- Ahmed, L., Amina, B., & Djamel, A. (2020a). Mapping the wildland-urban interfaces for forest fire prevention in the province of Mila (Algeria). *Environmental Research, Engineering and Management*, *76*(2), 76–90. <https://doi.org/10.5755/J01.EREM.76.2.24782>
- Ahmed, L., Amina, B., & Djamel, A. (2020b). Mapping the wildland-urban interfaces for forest fire prevention in the province of Mila (Algeria). *Environmental Research, Engineering and Management*, *76*(2), 76–90. <https://doi.org/10.5755/J01.EREM.76.2.24782>
- Aljos Farjon. (2005). *A Monograph of Cupressaceae and Sciadopitys: Vol. 643 pages* (K. 2005 Royal Botanic Gardens, Ed.; illustrée).
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, *6*(8). <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- ARFA Azzedine Mohamed Touffik. (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*.

- Argañaraz, J. P., Gavier Pizarro, G., Zak, M., Landi, M. A., & Bellis, L. M. (2015). Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina. *Science of The Total Environment*, 520, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.02.081>
- Argañaraz, J. P., Radeloff, V. C., Bar-Massada, A., Gavier-Pizarro, G. I., Scavuzzo, C. M., & Bellis, L. M. (2017). Assessing wildfire exposure in the Wildland-Urban Interface area of the mountains of central Argentina. *Journal of Environmental Management*, 196, 499–510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.058>
- Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O., & Vacik, H. (2014). Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Applied Geography*, 53, 258–270. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2014.05.015>
- Baas, J., Schotten, M., Plume, A., Côté, G., & Karimi, R. (2020). Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 377–386. [https://doi.org/10.1162/qss\\_a\\_00019](https://doi.org/10.1162/qss_a_00019)
- Badia, A., & Gisbert, M. (2020). LiDAR technology to map forest continuity: A municipality tool to prevent forest fires in a Wildland–Urban interface. *Applied Geography*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102134>
- Bartolucci, A., Marconi, M., Magni, M., Pierdicca, R., Malandra, F., Ho, T. C., Vitali, A., & Urbinati, C. (2022). Combining Participatory Mapping and Geospatial Analysis Techniques to Assess Wildfire Risk in Rural North Vietnam. *Environmental Management*, 69(3), 466–479. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01582-8>
- Belkaid, H., & Carrega, P. (2012). Interface habitat / forêt : enjeu et facteur de risque incendie. *SHS Web of Conferences*, 3, 01003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20120301003>
- Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 17(4), B-141-B-164. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.b141>
- Bentchakal, M., Medjerab, A., Chibane, B., & Rahmani, S. E. A. (2022). Meteorological drought and remote sensing data: an approach to assess fire risks in the Algerian forest. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3847–3858. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01323-0>
- Bond-Lamberty, B., Rocha, A. V., Calvin, K., Holmes, B., Wang, C., & Goulden, M. L. (2014). Disturbance legacies and climate jointly drive tree growth and mortality in an intensively studied boreal forest. *Global Change Biology*, 20(1), 216–227. <https://doi.org/10.1111/gcb.12404>
- Bouisset, C., Vanneufville, S., & Pourquoi, S. V. (2018). *Pourquoi être résilient quand on est efficace ? La gestion du risque incendie de forêt dans les Landes de Gascogne au défi des changements territoriaux*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.19152i>
- BOUZEKRI Abdelhafid. (2014). *Evaluation multicritere des situations critiques au risque de la desertification dans les aures (algerie)*.
- Bowman, D., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W., Carlson, J., Cochrane, M., D'Antonio, C., Defries, R., Doyle, J., Harrison, S., Johnston, F., Keeley, J., Krawchuk, M., Kull, C.,

- Marston, J., Moritz, M., Prentice, I., Roos, C., Scott, A., & Pyne, S. (2009). Fire in the Earth System. *Science (New York, N.Y.)*, 324, 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Cañete-Salinas, P., de la Fuente-Sáiz, D., Yáñez-Segovia, S., Guajardo, J., Venegas, J., Zamudio, F., Espinosa, C., Urzua, J., & Fuentes-Contreras, E. (2024). Use of satellite images to monitor *Leucoptera sinuella* leaf damage in poplar plantations in central Chile. *New Forests*. <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10029-x>
- Carrega, P. (2008). *Le risque d'incendies de forêt en région méditerranéenne : compréhension et évolution*.
- Carrega, P. (1991). O Fire Research Institute. In *Int. J. WildlandFire 1* (Issue 2).
- Chabot, M., Blanchet, P., Drapeau, P., Fortin, J., Gauthier, S., Imbeau, L., Lacasse, G., Lemaire, G., Nappi, A., Quenneville, R., & Thiffault, E. (2009). *Le feu en milieu forestier* (pp. 1037–1090).
- Chenchouni, H. (2010). Drought-induced mass mortality of Atlas cedar forest (*Cedrus atlantica*) in Algeria. In *The International Forestry Review, 33th IUFRO World Congress*, 23–28.
- Chuvieco, E., & Congalton, R. G. (1989). *Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping* (Vol. 29).
- Chuvieco, E., & Salas, J. (1996). Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(3), 333–345. <https://doi.org/10.1080/02693799608902082>
- Clément, V. (2005). Mediterranean forest fires: Nature wrongly accused. *Espace Géographique*, 34(4), 289–304. <https://doi.org/10.3917/eg.344.0289>
- Colin, P.-Yves. (2001). *Protection des forêts contre l'incendie : fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen*. FAO.
- Colin, P.-Yves., Marielle Jappiot, Anne Mariel, Corinne Cabaret, Stephanie Veillon, & Fabien Brocchieron. (2001). *Protection des forêts contre l'incendie : fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen*. FAO et Cemagref.
- Conedera, M., Tonini, M., Oleggini, L., Vega Orozco, C., Leuenberger, M., & Pezzatti, G. B. (2015). Geospatial approach for defining the Wildland-Urban Interface in the Alpine environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 52, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.02.003>
- Copernicus Emergency Management Service (2023). *Annual fire reports*. Disponible sur : <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/reports-and-publications/annual-fire-reports> (Consulté le : 04/01/2024)
- Cyr, & Dominic. (2011). *Cycle des feux, vieilles forêts et aménagement en forêt boréale de l'est du Canada*.
- David T., Butry, D., Evan Mercer, Jeffrey P, Prestemon, J. M., & Pye, and T. P. H. (2001). What Is the Price of Catastrophic Wildfire? *Journal of Forestry*.

- Desbois, N., & Vidal, A. (1995). *La télédétection dans la prévision des incendies de forêts*. <https://hal.science/hal-00466078>
- Devisscher, T., Boyd, E., & Malhi, Y. (2016). Anticipating future risk in social-ecological systems using fuzzy cognitive mapping: the case of wildfire in the Chiquitania, Bolivia. *Ecology and Society*, 21(4). <https://doi.org/10.5751/ES-08599-210418>
- Driss, N. Ben. (2023). Analyse diachronique de la dynamique forestière et de la susceptibilité aux incendies de forêt: Cas de la province de Fahs-Anjra, Maroc [ Diachronic analysis of forest dynamics and susceptibility to forest fires: Case of the province of Fahs-Anjra, Morocco ]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 41(2), 680–695. <http://www.ijias.issr-journals.org/>
- Eldredge, N. (2000). *Life in the balance: humanity and the biodiversity crisis*. Princeton University Press.
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053–1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Eugenio, F. C., dos Santos, A. R., Fiedler, N. C., Ribeiro, G. A., da Silva, A. G., dos Santos, Á. B., Paneto, G. G., & Schettino, V. R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 173, 65–71. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.02.021>
- European Commission, J. R. C. (2013). *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2012*. <https://doi.org/10.2788/58397>
- FAO. (2006). *Fire management: voluntary guidelines. Principles and strategic actions*. (17; Vol. 17).
- Fares, S., Bajocco, S., Salvati, L., Camarretta, N., Dupuy, J.-L., Xanthopoulos, G., Guijarro, M., Madrigal, J., Hernando, C., & Corona, P. (2017). Characterizing potential wildland fire fuel in live vegetation in the Mediterranean region. *Annals of Forest Science*, 74(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0599-5>
- Farfán, M., Dominguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I., & Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: a case study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>
- Field, C. B., Barros, V. R., Jon, D., Directeur, D., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Yuka, K. L. E., Estrada, O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (2014). *Changements climatiques 2014 Incidences, adaptation et vulnérabilité Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Publiée sous la direction de Service d'appui technique du Groupe de travail II Révisiuse scientifique de la version française: Nirivololona Raholijao*. [www.ipcc-wg2.gov/AR5](http://www.ipcc-wg2.gov/AR5)

- Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., De Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. In *International Journal of Wildland Fire* (Vol. 18, Issue 5, pp. 483–507). <https://doi.org/10.1071/WF08187>
- Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., Spinoni, J., Feyen, L., Hartmann, H., Beck, P. S. A., Camps-Valls, G., Chirici, G., Mauri, A., & Cescatti, A. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications*, 12(1), 1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>
- Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240, 117537. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117537>
- Gallardo-Salazar, J. L., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., López-Toledo, L., Blanco-García, A., & Endara-Agramont, Á. R. (2023). THREE DECADES OF REMOTE SENSING ANALYSIS ON FOREST DECLINE RELATED TO CLIMATE CHANGE: A BIBLIOMETRIC STUDY. *Geographical Research Letters*, 49(1), 69–87. <https://doi.org/10.18172/cig.5639>
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. *Environmental Management*, 51(3), 651–662. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
- Gill, A. M., Scott L. Stephens, & Geoffrey J. Cary. (2013). The world-wide ‘wildfire’ problem. *Ecological Society of America*.
- Guettouche, M. S., Derias, A., Boutiba, M., Bounif, M. ou A., Guendouz, M., & Boudella, A. (2011). A Fire Risk Modelling and Spatialization by GIS. *Journal of Geographic Information System*, 03(03), 254–265. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.33022>
- Guo, R., Yan, J., Zheng, H., & Wu, B. (2024). Assessment of the Analytic Burned Area Index for Forest Fire Severity Detection Using Sentinel and Landsat Data. *Fire*, 7(1), 19. <https://doi.org/10.3390/fire7010019>
- Gupta, S. K., Kanga, S., Meraj, G., Kumar, P., & Singh, S. K. (2023). Uncovering the hydro-meteorological drivers responsible for forest fires utilizing geospatial techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(1), 675–695. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04497-y>
- Hal E. Anderson. (1990). *Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/x90-046>
- Hantson, S., Scheffer, M., Pueyo, S., Xu, C., Lasslop, G., van Nes, E. H., Holmgren, M., & Mendelsohn, J. (2017). Rare, Intense, Big fires dominate the global tropics under drier conditions. *Scientific Reports*, 7(1), 14374. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14654-9>
- Herndon, J. M., & Whiteside, M. (2018). California Wildfires: Role of Undisclosed Atmospheric Manipulation and Geoengineering. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 17(3), 1–18. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2018/44148>

- Hosseini, M., & Lim, S. (2023). Burned area detection using Sentinel-1 SAR data: A case study of Kangaroo Island, South Australia. *Applied Geography*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102854>
- Ian Brooker, D. K. M. I. H. B. (2006). *Field guide to eucalypts : Vol. Volume 1* (2006 Bloomings Books, Ed.; 3rd ed.).
- Iliadis, L. S., Papastavrou, A. K., & Lefakis, P. D. (2002a). A computer-system that classifies the prefectures of Greece in forest fire risk zones using fuzzy sets. *Forest Policy and Economics*, 4(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(01\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(01)00079-X)
- Iliadis, L. S., Papastavrou, A. K., & Lefakis, P. D. (2002b). A computer-system that classifies the prefectures of Greece in forest fire risk zones using fuzzy sets. *Forest Policy and Economics*, 4(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(01\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(01)00079-X)
- Iliadis Lazaros and Skopianos, S. and T. S. and S. S. (2010). A Fuzzy Inference System Using Gaussian Distribution Curves for Forest Fire Risk Estimation. In A. S. and B. M. Papadopoulos Harris and Andreou (Ed.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 376–386). Springer Berlin Heidelberg.
- Jesús San-Miguel-Ayanz, T. D. R. B. P. M. G. L. T. A.-V. D. O. A. B. D. de R. D. F. H. P. R. G. M. O. P. L. (2022). *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2021*. <https://doi.org/10.2760/34094>
- João, T., João, G., Bruno, M., & João, H. (2018). Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series. *Ecological Indicators*, 89, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.008>
- Jones, H. P., Nickel, B., Srebotnjak, T., Turner, W., Gonzalez-Roglich, M., Zavaleta, E., & Hole, D. G. (2020). Global hotspots for coastal ecosystem-based adaptation. *PLoS ONE*, 15(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233005>
- Jones Holly P. AND Nickel, B. A. N. D. S. T. A. N. D. T. W. A. N. D. G.-R. M. A. N. D. Z. E. A. N. D. H. D. G. (2020). Global hotspots for coastal ecosystem-based adaptation. *PLOS ONE*, 15(5), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233005>
- Juárez-Orozco, S. M., Siebe, C., & Fernández y Fernández, D. (2017). Causes and Effects of Forest Fires in Tropical Rainforests: A Bibliometric Approach. *Tropical Conservation Science*, 10. <https://doi.org/10.1177/1940082917737207>
- Juvanhol, R. S., Fiedler, N. C., Dos Santos, A. R., Da Silva, G. F., Omena, M. S., Eugenio, F. C., Pinheiro, C. J. G., & Filho, A. C. F. (2021). Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 93. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190726>
- Konca-Kędzierska, K., & Pianko-Kluczyńska, K. (2018). The influence of relative humidity on fires in forests of Central Poland. *Forest Research Papers*, 79(3), 269–279. <https://doi.org/10.2478/frp-2018-0027>
- Koutsias, N., Arianoutsou, M., Kallimanis, A. S., Mallinis, G., Halley, J. M., & Dimopoulos, P. (2012). Where did the fires burn in Peloponnisos, Greece the summer of 2007?

- Evidence for a synergy of fuel and weather. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 41–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.006>
- Lampin, C., Jappiot, M., & Ferrier, J. P. (n.d.). *Modélisation du risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts*. <https://doi.org/10.14758/SET>
- Lampin-Maillet, C. (n.d.). *Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France*. <https://hal.inrae.fr/tel-02592367>
- Lampin-Maillet, C., Bouillon, C., Long-Fournel, M., Morge, D., & Jappiot, M. (2010). *Guide de cartographie et caractérisation des interfaces habitat-forêt*. Convention n°2008 11 9 071 U du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Le Fur, O., Savazzi, R., Maillé, E., Reymond, B., & Kizirian, L. (2024). *Classification des zones bâties vulnérables aux incendies dans l'interface bâtiments-végétation : démarche, méthodologie et utilisation*.
- Leduc, A., Harvey, B. D., Bergeron, Y., & Gauthier -Scf, S. (2001). *Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique SEE PROFILE Les incendies de forêt sont une des perturbations qui engendrent le dynamisme de la forêt boréale*. <https://www.researchgate.net/publication/237356417>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Liu, Z., Chen, H., Li, W., Chen, K., Qi, Z., Liu, C., Zou, Z., & Shi, Z. (2024). *Learning to detect cloud and snow in remote sensing images from noisy labels*. <http://arxiv.org/abs/2401.08932>
- Liu, Z., & Wimberly, M. C. (2015). Climatic and Landscape Influences on Fire Regimes from 1984 to 2010 in the Western United States. *PLoS ONE*, 10. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16721994>
- Long-Fournel, M., Morge, D., Bouillon, C., Jappiot, M., & Jappiot La, M. (n.d.). *La cartographie des interfaces habitat-forêt : un outil de diagnostic territorial dans la prévention du risque d'incendie de forêt dans le Sud de la France*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2013.HS.05i>
- Loudermilk, E. L., O'Brien, J. J., Goodrick, S. L., Linn, R. R., Skowronski, N. S., & Hiers, J. K. (2022). Vegetation's influence on fire behavior goes beyond just being fuel. *Fire Ecology*, 18(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00132-9>
- Mariel, A. (1995). *Cartographie du niveau de risque d'incendie: exemple du massif des Maures*.
- Madou, A. (2022). Les incendies de forêt en Algérie. Historique, bilan et analyse. *Forêt Méditerranéenne*, 23–30.



- McGee, T. K., & Russell, S. (2003). "It's just a natural way of life..." an investigation of wildfire preparedness in rural Australia. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2003.04.001>
- Meddour-Sahar, O., Meddour, R., Leone, V., & Derridj, A. (2015). Motifs des incendies de forêt en Algérie : analyse comparée des dires d'experts de la Protection Civile et des Forestiers par la méthode Delphi. *Vertigo, Volume 14 Numéro 3*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.15462>
- Mell, W. E., Manzello, S. L., Maranghides, A., Butry, D., & Rehm, R. G. (2010). The wildland-urban interface fire problem - Current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, 19(2), 238–251. <https://doi.org/10.1071/WF07131>
- Meng Yongchang and Deng, Y. and S. P. (2015). Mapping Forest Wildfire Risk of the World. In R. Shi Peijun and Kasperson (Ed.), *World Atlas of Natural Disaster Risk* (pp. 261–275). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45430-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45430-5_14)
- Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., & Borrelli, P. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, 172, 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>
- Mohajane, M., Costache, R., Karimi, F., Bao Pham, Q., Essahlaoui, A., Nguyen, H., Laneve, G., & Oudija, F. (2021). Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area. *Ecological Indicators*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107869>
- Mohamed Gana, Azzedine Mohamed Toufik Arfa, Mohamed El Habib Benderradji, and Djamel Alatou, "Analysis of Vegetation Change and Mapping Tree Species in Mountainous Area Using Multi-Source Satellite Data: A Case Study of Djebel El Ouahch, Algeria." *American Journal of Environmental , Protection*, vol. 5, no. 2 (2017): 44-51. doi: 10.12691/env-5-2-3.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. In *PLoS Medicine* (Vol. 6, Issue 7). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- MOKHTARI Samah. (2018). *Contribution à la gestion des connaissances en gestion des risques : application aux feux de forêt dans le massif des Aurès*.
- Mota, P. H. S., Rocha, S. J. S. S. da, Castro, N. L. M. de, Marcatti, G. E., França, L. C. de J., Schettini, B. L. S., Villanova, P. H., Santos, H. T. dos, & dos Santos, A. R. (2019). Forest fire hazard zoning in Mato Grosso State, Brazil. *Land Use Policy*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104206>
- Mrad, D., Djebbar, Y., & Hammar, Y. (2018). Analysis of trend rainfall: Case of North-Eastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, No 36. <http://journals.pan.pl/Content/106839/PDF-MASTER/Mrad%20et%20al-1.pdf>

- Mutke, S., Gordo, J., & Gil, L. (2005). Variability of Mediterranean Stone pine cone production: Yield loss as response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3–4), 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.002>
- Nathan, R. and G. N. (2004). Spatiotemporal Dynamics of Recruitment in Aleppo Pine (*Pinus Halepensis* Miller). *Plant Ecology*, 171, 123–137.
- Naveh, Z., & Whittaker, R. H. (1980). Structural and floristic diversity of shrublands and woodlands in Northern Israel and other Mediterranean areas. *Vegetatio*, 41(3), 171–190. <https://doi.org/10.1007/BF00052445>
- Nuthammachot, N., & Stratoulas, D. (2021). Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: method and case study. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 17443–17458. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01394-0>
- Oad, V. K., Szymkiewicz, A., Khan, N. A., Ashraf, S., Nawaz, R., Elnashar, A., Saad, S., & Qureshi, A. H. (2023). Time series analysis and impact assessment of the temperature changes on the vegetation and the water availability: A case study of Bakun-Murum Catchment Region in Malaysia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100915. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100915>
- Oliveira, S., Gonçalves, A., & Zêzere, J. L. (2021). Reassessing wildfire susceptibility and hazard for mainland Portugal. *Science of the Total Environment*, 762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143121>
- Ondine LE FUR, Rémi SAVAZZI, Éric MAILLE, Loris KIZIRIAN, & Benoit REYMOND. (n.d.). *Rapport-Classification des zones bâties vulnérables aux incendies (INRAE, ONF) RAPPORT TECHNIQUE CLASSIFICATION DES ZONES BATIES VULNERABLES AUX INCENDIES DANS L'INTERFACE BATIMENTS-VEGETATION.*
- Onur Satir, S. B., & Donmez, C. (2016). Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5), 1645–1658. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541>
- OpenDEM .Link DEM. Disponible sur : [https://www.opendem.info/link\\_dem.html](https://www.opendem.info/link_dem.html)  
(Consulté le : [26/10/2022])
- Orieux, A. (1974). Conditions météorologiques et incendies en région méditerranéenne. *Revue Forestière Française*, 122–129.
- Ouahiba Meddour-Sahar, & Christine Bouisset. (2013). Les grands incendies de forêt en Algérie : problèmes humains et politiques publiques dans la gestion des risques. *Méditerranée : Revue Géographique Des Pays Méditerranéens*, 33–40.
- P. Quezel, M. B. (1992). Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne*, 158–170.
- Parajuli, A., Gautam, A. P., Sharma, S. P., Bhujel, K. B., Sharma, G., Thapa, P. B., Bist, B. S., & Poudel, S. (2020). Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major

- landscapes of Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2569–2586.  
<https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1853251>
- Parks, S. A., Holsinger, L. M., Panunto, M. H., Jolly, W. M., Dobrowski, S. Z., & Dillon, G. K. (2018). High-severity fire: Evaluating its key drivers and mapping its probability across western US forests. *Environmental Research Letters*, 13(4).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab791>
- Pourghasemi, H. R., Kariminejad, N., Amiri, M., Edalat, M., Zarafshar, M., Blaschke, T., & Cerda, A. (2020). Assessing and mapping multi-hazard risk susceptibility using a machine learning technique. *Scientific Reports*, 10(1), 3203.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60191-3>
- Prestemon, J. P., Pye, J. M., Butry, D. T., Holmes, T. P., & Mercer, D. E. (2002). Understanding Broad-scale Wildfire Risks in a Human-Dominated Landscape. In *Forest Science* (Vol. 48, Issue 4).  
<https://academic.oup.com/forestscience/article/48/4/685/4617198>
- Pyne, S. J. ., Andrews, P. L. ., & Laven, R. D. . (1996). *Introduction to wildland fire*. Wiley.
- Qi, Y., Chen, X., Chen, Z., Zhang, X., Shen, C., Chen, Y., Peng, Y., Chen, B., Wang, Q., Liu, T., & Zhang, H. (2024). *Research on Estimation Model for Cotton Canopy Structure Parameters Based on Hyperspectral Vegetation Index*.  
<https://doi.org/10.20944/preprints202401.1329.v1>
- Quinto-Canas, R., Cano-Ortiz, A., Raposo, M., Piñar Fuentes, J. C., Cano, E., Barbosa, N., & Pinto Gomes, C. J. (2021). Cork oak vegetation series of southwestern iberian peninsula: Diversity and ecosystem services. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 178 *SIST*, 1279–1290. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4\\_119](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_119)
- Radeloff, V. C., Hammer, R. B., Stewart, S. I., Fried, J. S., Holcomb, S. S., & Mckeefry, J. F. (2005). THE WILDLAND-URBAN INTERFACE IN THE UNITED STATES. In *Communications Ecological Applications* (Vol. 15, Issue 3).  
<http://www.silvis.forest.wisc.edu/projects/WUI>
- Reinhardt, E. D. (2001). *Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior*. <http://www.fs.fed.us/rm>
- Richard, M. E. (2008). *Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : Effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité Soutenue le 7 avril 2008 devant la commission d'examen*.
- Richer, H. B., Anderson, J., Brewer, J., Davis, S., Fahlman, G. G., Hansen, B. M. S., Hurley, J., Kalirai, J. S., King, I. R., Reitzel, D., Rich, R. M., Shara, M. M., & Stetson, P. B. (2006). Probing the faintest stars in a globular star cluster. *Science*, 313(5789), 936–940.  
<https://doi.org/10.1126/science.1130691>
- Rigolot, E. (2008). *Impact du changement climatique sur les feux de forêt*.  
<https://hal.science/hal-03573294>

- Rigolot, É., Dupuy, J.-L., Pimont, F., & Ruffault, J. (2020). Les incendies de forêt catastrophiques. *Annales Des Mines - Responsabilité et Environnement*, N° 98(2), 29–35. <https://doi.org/10.3917/re1.098.0029>
- Rothermel, R. C. (1983). *How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires*.
- S. Escuin, R. N., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053–1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Sandal Erzurumlu, G., & Yıldız, N. E. (2024). Determination of fire intensity after forest fire by remote sensing: marmaris case study. *BIO Web of Conferences*, 85, 01041. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501041>
- San-Miguel-Ayanz, J. , D. T. , B. R. , L. G. , B. A. , de R. D. , F. D. , M. P. , A. V. T. , O. D. , P. H. , N. D. , L. T. (2019). *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*. <https://doi.org/10.2760/561734>
- Segura Dorado, J., Anaconda Mopan, Y. E., Solis Pino, A. F., & Paz Orozco, H. (2023). Fuzzy analytical network techniques for selecting suitable temporary refuge sites in Paez, Colombia. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45, 5107–5121. <https://doi.org/10.3233/JIFS-231453>
- Shatnawi, N. (2022). AHP and fuzzy logic geospatial approach for forest fire vulnerable zones. *Canada. Decision Science Letters*, 11, 399–406. <https://doi.org/10.5267/dsl.2022.8.001>
- Simonson, W. D., & Allen, H. D. (2014). Cork oak (*Quercus suber* L.) forests of western Mediterranean mountains: a plant community comparison. *Ecologia Mediterranea*, 40(1), 35–48. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2014.1268>
- Sismanis, M., Chadoulis, R. T., Manakos, I., & Drosou, A. (2023). An Unsupervised Burned Area Mapping Approach Using Sentinel-2 Images. *Land*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/land12020379>
- Spracklen, D. V., Carslaw, K. S., Merikanto, J., Mann, G. W., Reddington, C. L., Pickering, S., Ogren, J. A., Andrews, E., Baltensperger, U., Weingartner, E., Boy, M., Kulmala, M., Laakso, L., Lihavainen, H., Kivekäs, N., Komppula, M., Mihalopoulos, N., Kouvarakis, G., Jennings, S. G., ... Sun, J. (2010). Explaining global surface aerosol number concentrations in terms of primary emissions and particle formation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(10), 4775–4793. <https://doi.org/10.5194/acp-10-4775-2010>
- Tan, C., & Feng, Z. (2023). Mapping Forest Fire Risk Zones Using Machine Learning Algorithms in Hunan Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15076292>
- Tariq, A., Shu, H., Gagnon, A. S., Li, Q., Mumtaz, F., Hysa, A., Siddique, M. A., & Munir, I. (2021). Assessing burned areas in wildfires and prescribed fires with spectral indices and sar images in the margalla hills of Pakistan. *Forests*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/f12101371>

- Thierry Agbanou, B. (n.d.). *Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest bénin) : de l'analyse diachronique à une modélisation prospective*. <https://theses.hal.science/tel-02476241>
- Thrippleton, T., Lüscher, F., & Bugmann, H. (2020). Climate change impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: dynamic forest modelling as a tool for decision support. *European Journal of Forest Research*, 139(3), 483–498. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01263-x>
- Tiwari, A., Shoab, M., & Dixit, A. (2021). GIS-based forest fire susceptibility modeling in Pauri Garhwal, India: a comparative assessment of frequency ratio, analytic hierarchy process and fuzzy modeling techniques. *Natural Hazards*, 105(2), 1189–1230. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04351-8>
- Touffik Arfa, A. M., Habib Benderradji, M. El, & Alatou, D. (2009). Statistics on forest fire and analysis of their economic impact in Algeria between 1985 and 2006. *New Medit*, 8(1).
- Trabaud, L., & Oustric, J. (n.d.). *Comparaison des stratégies de régénération après incendie chez deux espèces de ciste*. <https://hal.science/hal-03529258>
- Trucchia, A., Meschi, G., Fiorucci, P., Provenzale, A., Tonini, M., & Pernice, U. (2023). Wildfire hazard mapping in the eastern Mediterranean landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 32(3), 417–434. <https://doi.org/10.1071/WF22138>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2009). *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. [www.preventionweb.net](http://www.preventionweb.net)
- Vallejo-Villalta, I., Rodríguez-Navas, E., & Márquez-Pérez, J. (2019). Mapping forest fire risk at a local scale—A case study in Andalusia (Spain). *Environments - MDPI*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/environments6030030>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). *Visualizing Bibliometric Networks*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:46174142>
- van Lierop, P., Lindquist, E., Sathyapala, S., & Franceschini, G. (2015). Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 352, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.010>
- Walter Larcher. (2003). *Physiological Plant Ecology: Vols XX, 514* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Whitehead, D., & Beadle, C. L. (2004). Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: A review. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 113–140. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.026>
- Zahoor Abdul Rehman and Khan, S. N. and A. A. and A. R. A. (2023). Remote Sensing and GIS Based Techniques for Monitoring and Conserving Water on Newly Developed Farmlands. In G. and M. P. and M. S. Balaji Etikala and Veeraswamy (Ed.), *Emerging Technologies for Water Supply, Conservation and Management* (pp. 83–107). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35279-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35279-9_5)

Zeyad T. Aklah, Amean Al-Sa, & Maraw H. Abdali. (n.d.). *Predicting High-Risk Individuals in Disease Outbreaks Using Fuzzy Logic-Based Contact Tracing Model.*

## LISTE DES ANNEXES

### ANNEXE A : GLOSSAIRE

**Agropastoralisme** : Mode d'exploitation agricole combinant des activités de culture et d'élevage, souvent pratiqué dans des zones de transition comme les piémonts.

**Analyse bibliométrique** : Méthode de recherche quantitative qui analyse les publications scientifiques pour mesurer l'impact de la recherche, identifier les tendances et évaluer les contributions des chercheurs et institutions.

**Analyse carto-thématique** : Processus de cartographie qui se concentre sur des thèmes spécifiques comme la géologie, la végétation et l'hydrographie, afin de représenter visuellement les caractéristiques physiques et biophysiques d'une région.

**Bassin versant** : Zone géographique où toutes les précipitations s'écoulent vers un même point, généralement un fleuve ou une rivière.

**Biophysique** : Ensemble des processus physiques et biologiques qui régissent les interactions entre les composants naturels de l'environnement, tels que la végétation, l'eau, et le relief.

**Cartographie des incendies de forêt** : Processus de représentation spatiale des zones affectées ou à risque d'incendies de forêt, souvent à l'aide de données de télédétection.

**CiteScore** : Mesure de l'impact d'une revue académique basée sur le nombre de citations reçues par ses publications.

**Climogramme d'Emberger** : Graphique utilisé pour caractériser les zones climatiques méditerranéennes, en fonction des précipitations et des températures, permettant de classer les étages bioclimatiques.

**Défuzzification** : Étape inverse de la fuzzification, où les valeurs floues sont converties en valeurs nettes pour produire une sortie finale utilisable.

**Forêt domaniale** : Forêt appartenant à l'État, souvent gérée pour la conservation des ressources naturelles et la protection de la biodiversité.

**Fuzzification** : Processus de conversion de données précises en variables floues. Cela implique d'attribuer des valeurs de degré d'appartenance à différents ensembles flous.

**Hydrographie** : Discipline qui concerne l'étude et la cartographie des eaux superficielles d'une région, comme les rivières, les lacs, et les bassins versants.

**Interpolation spatiale** : Technique géostatistique utilisée pour estimer les valeurs dans des zones non mesurées en se basant sur des données de points environnants, souvent appliquée en climatologie et cartographie.

**Kriging** : Méthode géostatistique avancée utilisée pour l'interpolation des données spatiales, telle que les précipitations ou les températures, dans les études climatiques.

**LiDAR (Light Detection and Ranging)** : Technologie qui utilise des lasers pour mesurer les distances et produire des cartes topographiques détaillées, souvent utilisée dans la cartographie des forêts.

**Lithologie** : Étude des caractéristiques des roches dans une région donnée, influençant la fertilité des sols et la stabilité des constructions humaines.

**Massif** : Grande zone montagneuse ou forestière continue, souvent caractérisée par des écosystèmes denses et complexes, comme un massif forestier ou montagneux. Les massifs sont particulièrement étudiés en raison de leur vulnérabilité aux incendies de forêt et à la déforestation.

**Modèle numérique de terrain (MNT)** : Représentation en trois dimensions d'une surface terrestre qui permet de calculer des paramètres comme la pente et l'exposition, cruciaux dans l'analyse de la propagation des feux de forêt.

**Piémont** : Zone située au pied d'une montagne, souvent caractérisée par des pentes modérées et une végétation spécifique, utilisée pour l'agriculture ou l'agropastoralisme.

**Prévention** : Ensemble de mesures mises en place pour réduire le risque d'incendie de forêt avant qu'il ne survienne, par exemple via l'entretien des forêts, la sensibilisation du public ou la réglementation stricte des activités en zones à risque.

**Prévision** : Utilisation de modèles scientifiques et d'outils tels que la télédétection pour identifier les zones à risque d'incendie de forêt et anticiper les déclenchements avant qu'ils ne surviennent.

**Protection** : Stratégies et actions déployées pour protéger les écosystèmes et les populations des incendies de forêt, notamment les systèmes d'alerte, les équipes d'intervention et les infrastructures adaptées.



**PRISMA** : (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) Cadre qui guide la conduite d'une revue systématique en fournissant des critères pour la recherche et la sélection des études.

**Reboisement** : Action de planter des arbres dans une zone précédemment déboisée, souvent utilisée pour restaurer des écosystèmes dégradés et prévenir l'érosion.

**Revue systématique** : Processus rigoureux de collecte et d'analyse des données à partir d'études multiples afin de répondre à des questions de recherche spécifiques. Elle est souvent utilisée pour synthétiser les résultats de recherches existantes.

**Sentinel-2** : Mission satellitaire de l'Agence spatiale européenne (ESA) utilisée pour l'observation de la Terre, notamment pour la cartographie de la végétation et des feux de forêt.

**SIG** (Systèmes d'Information Géographique) : Outils logiciels permettant de capturer, gérer, analyser et visualiser des données géospatiales.

**Système d'inférence floue** : Processus par lequel des informations imprécises ou incertaines sont traitées par un ensemble de règles floues pour obtenir une sortie, souvent utilisé pour la prédiction et la classification.

**Téledétection** : Technique qui permet d'observer et de recueillir des données sur la surface terrestre à distance, généralement à l'aide de satellites ou de drones.

**Zone homogène** : Zone géographique où les caractéristiques naturelles (comme la végétation, le climat, ou le relief) sont uniformes ou similaires, permettant une gestion ou une analyse cohérente des risques environnementaux, tels que les incendies de forêt.



## **ANNEXE B : DONNEES METHODOLOGIQUES**

## ANNEXE B : DONNEES METHODOLOGIQUES

### La moyenne pondérée : Définition et formules

Une moyenne pondérée est une moyenne dans laquelle chaque valeur est multipliée par un coefficient correspondant à son poids. Une moyenne pondérée fait varier ces poids, traduisant une importance variable des observations. Le poids équivaut à augmenter d'autant de fois le nombre d'observations identiques et de même importance dans le calcul de la moyenne.

$$\bar{x} = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}$$

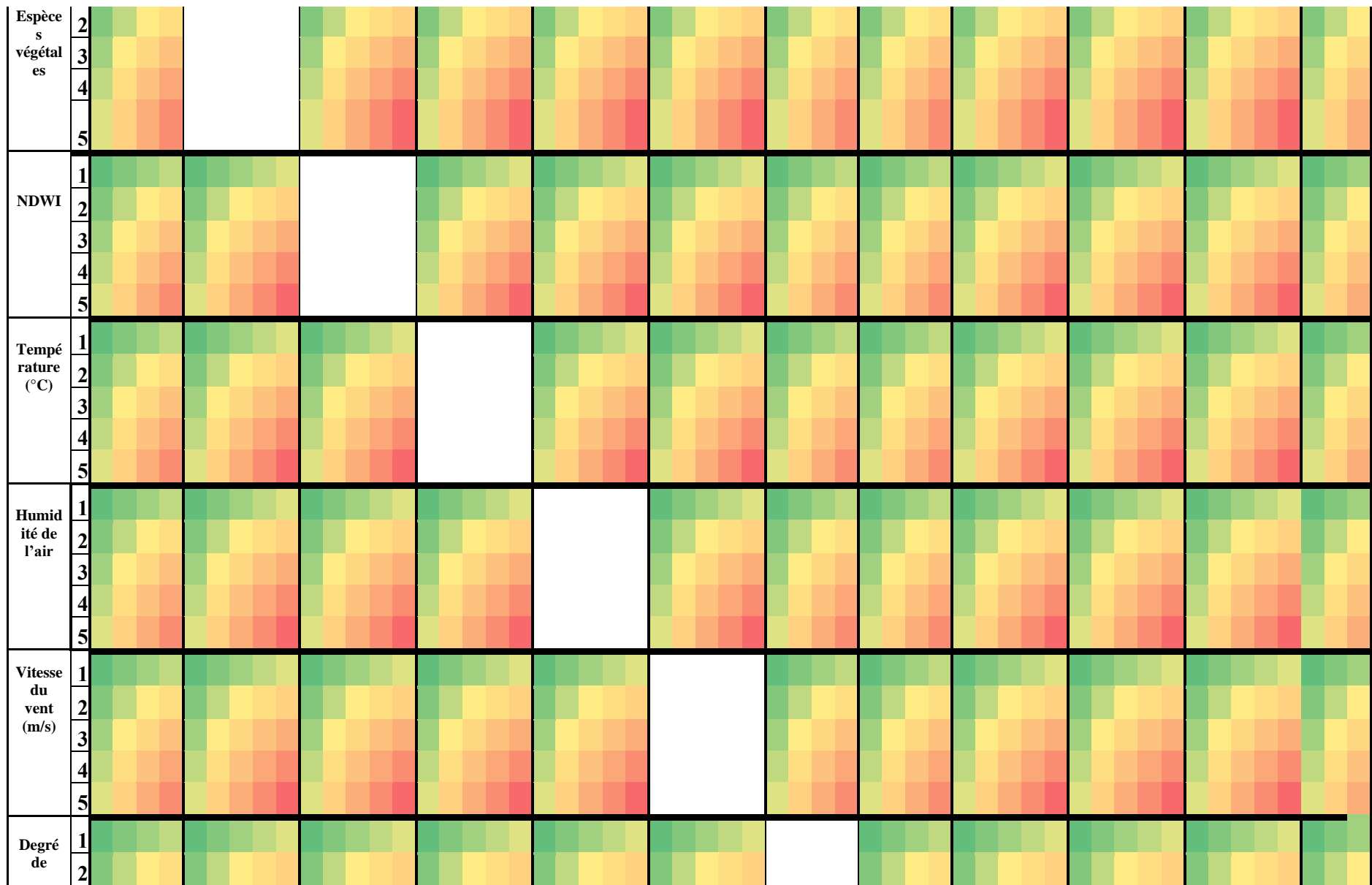
Nous avons utilisé cette moyenne afin d'obtenir une seule valeur représentative du classement des facteurs selon le niveau de risque qui lui convient

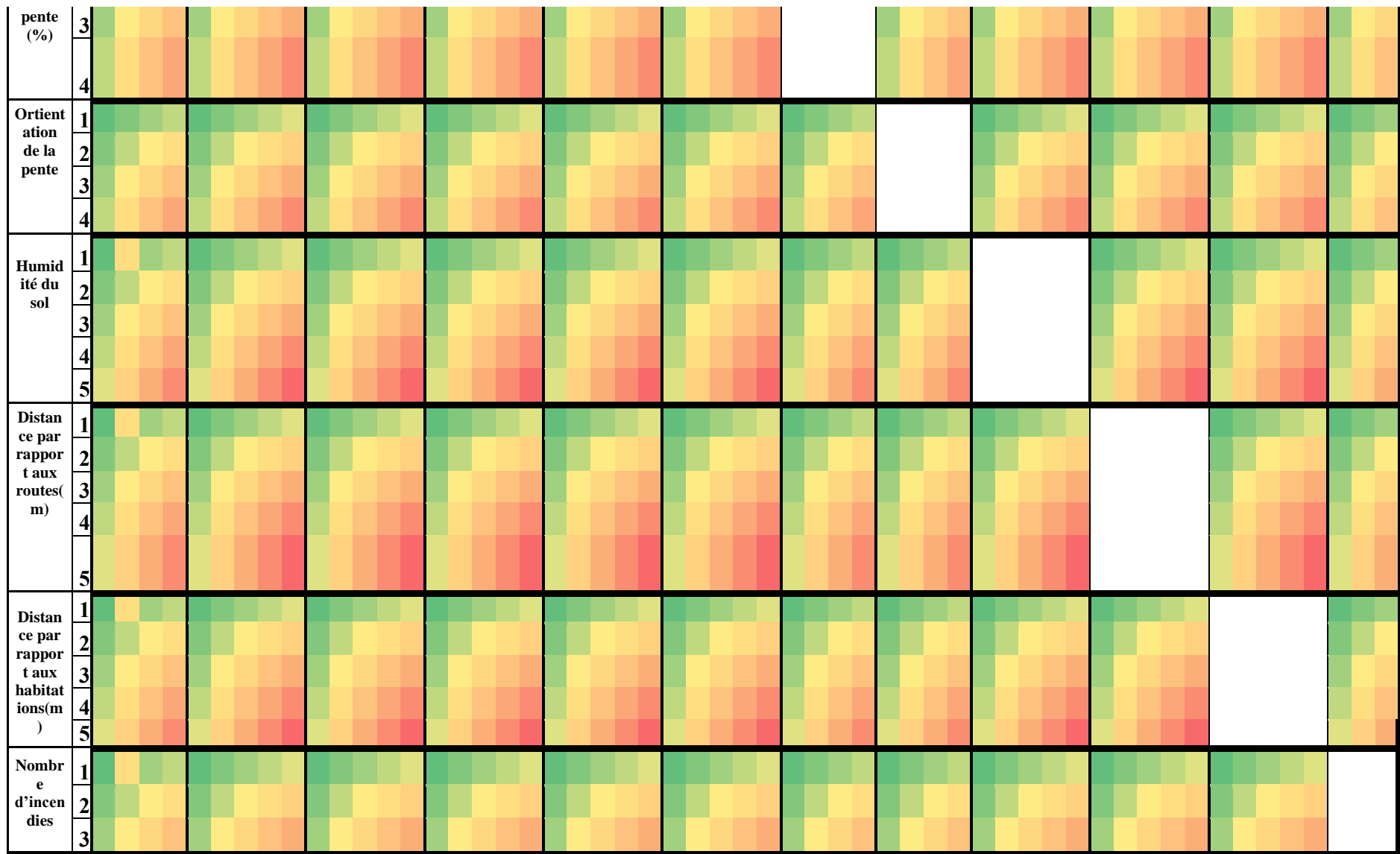
**Tableau 1** Détails de calcul de la moyenne pondéré pour les données : Classement des du risque par facteur

Facteurs	Classes	Classement des risques										
		5	4	3	2	1	p <sub>1</sub> x <sub>1</sub>	p <sub>2</sub> x <sub>2</sub>	p <sub>3</sub> x <sub>3</sub>	p <sub>4</sub> x <sub>4</sub>	p <sub>5</sub> x <sub>5</sub>	Σ/10
<b>Occupation du sol</b>	Cours d'eau / zones urbaines	0	0	0	1	9	9	2	0	0	0	1
	Agriculture et arboriculture	0	0	1	8	1	1	16	3	0	0	2
	Broussailles et pâturages	0	1	8	1	0	0	2	24	4	0	3
	Forêt et maquis	0	9	1	0	0	0	0	3	36	0	4
<b>Espèces végétales</b>	Absence de végétation	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	1
	Forêt de chêne-liège	0	0	1	9	0	0	18	3	0	0	2
	Cypress méditerranéen–prairie	0	0	9	1	0	0	2	27	0	0	3
	Pin d'Alep–Maquis de chêne vert	1	9	0	0	0	0	0	0	36	5	4
	Forêts pures et mixtes d'eucalyptus, de cyprès, de pin et de cèdre	9	1	0	0	0	0	0	0	4	45	5
<b>NDWI</b>	-1—0.20	0	0	1	0	9	9	0	3	0	0	1
	0.20–0.33	0	0	0	9	1	1	18	0	0	0	2

	0.33–0.46	0	1	8	1	0	0	2	24	4	0	3
	0.46–0.60	1	8	1	0	0	0	0	3	32	5	4
	0.60–0.97	9	1	0	0	0	0	0	0	4	45	5
<b>Température (°C)</b>	15–15.25	0	0	0	1	9	9	2	0	0	0	1
	15.25–15.39	0	0	0	9	1	1	18	0	0	0	2
	15.39–15.52	1	1	8	0	0	0	0	24	4	5	3
	15.52–15.70	1	8	1	0	0	0	0	3	32	5	4
	15.70–16	8	1	1	0	0	0	0	3	4	40	5
<b>Humidité de l'air</b>	7.62-7.65	0	0	1	1	8	8	2	3	0	0	1
	7.65-7.68	0	0	0	9	1	1	18	0	0	0	2
	7.68-7.71	1	1	8	0	0	0	0	24	4	5	3
	7.71-7.75	1	9	0	0	0	0	0	0	36	5	4
	7.75-7.78	8	1	1	0	0	0	0	3	4	40	5
<b>Vitesse du vent (m/s)</b>	2.65–3.70	0	0	0	1	9	9	2	0	0	0	1
	3.70–4.34	0	0	1	8	1	1	16	3	0	0	2
	4.34–4.93	0	1	8	1	0	0	2	24	4	0	3
	4.93–5.61	2	8	0	0	0	0	0	0	32	10	4
	5.61–7.45	8	1	1	0	0	0	0	3	4	40	5
<b>Degré de pente (%)</b>	0–5	0	0	0	1	9	9	2	0	0	0	1
	6–15	0	0	1	8	1	1	16	3	0	0	2
	16–35	0	1	8	1	0	0	2	24	4	0	3
	<36	0	9	1	0	0	0	0	3	36	0	4
<b>Orientation de la pente</b>	Nord, Nord Est	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	1
	Ouest, Ouest Sud	0	1	1	8	0	0	16	3	4	0	2
	Est, Est Sud, Est Nord	0	1	9	0	0	0	0	27	4	0	3
	Sud Est, Sud-Ouest	0	8	0	2	0	0	4	0	32	0	4
<b>Humidité du sol</b>	-1 – -0.25	0	0	0	1	9	9	2	0	0	0	1
	-0.25 – -0.14	0	0	0	9	1	1	18	0	0	0	2









**ANNEXE C : TABLEAU RECAPITULATIF DES ARTICLES ISSUS DE L'ANALYSE SYSTEMATIQUE**

## ANNEXE C : TABLEAU RECAPITULATIF DES ARTICLES ISSUS DE L'ANALYSE SYSTEMATIQUE

Label	Auteurs	Applications	Variables	Tendances et résultats	Défis	Directions futures
<b>A1 : Application de la télédétection et des algorithmes d'apprentissage automatique pour la cartographie des incendies de forêt dans une zone méditerranéenne</b>	(Mohajane et al., 2021)	Cartographie des incendies de forêt à l'aide de la télédétection et des algorithmes d'apprentissage automatique.	Données climatiques, topographiques et d'utilisation des terres.	Les modèles hybrides combinés avec des données de télédétection améliorent la gestion et la prévention des incendies de forêt.	Complexité des facteurs environnementaux et intensité computationnelle.	Affiner les modèles hybrides, intégrer des données multisources haute résolution, développer des systèmes de surveillance en temps réel.
<b>A2: Évaluation des dynamiques de récupération post-incendie basée sur des indicateurs utilisant les séries temporelles NDVI par satellite</b>	(João et al., 2018)	Évaluation de la dynamique de récupération post-incendie avec des indicateurs NDVI.	Traits des incendies, composition du paysage, conditions climatiques post-incendie.	Utilisation de la télédétection et des techniques d'apprentissage automatique pour surveiller et prédire la récupération écologique.	Précision et fiabilité des données de télédétection, intégration des facteurs environnementaux.	Affiner les indicateurs, étendre leur application à différentes régions et écosystèmes, améliorer les systèmes de surveillance en temps réel.
<b>A3: Réévaluation de la susceptibilité aux incendies de forêt et des risques pour le Portugal continental</b>	(Oliveira et al., 2021)	Cartographie de la susceptibilité et des risques d'incendie pour soutenir la gestion des incendies et la planification spatiale.	Topographie, couverture terrestre, historique des incendies.	Les forêts de broussailles et certaines forêts (eucalyptus, pin maritime) sont plus susceptibles aux incendies.	Challenges include data limitations on fire behavior and variability in annual fire conditions.	Limitations des données sur le comportement des incendies, variabilité des conditions annuelles.

<p><b>A4: Technologie LiDAR pour cartographier la continuité des forêts: un outil municipal pour prévenir les incendies de forêt dans une interface habitat forêt (WUI)</b></p>	<p>(Badia &amp; Gisbert, 2020)</p>	<p>Cartographie et gestion de la continuité des forêts dans les zones WUI à l'aide de la technologie LiDAR.</p>	<p>Couverture fractionnelle du couvert végétal, hauteur de la végétation, densité du couvert forestier..</p>	<p>Plus de la moitié des parcelles étudiées ont une couverture forestière supérieure à 35%, nécessitant des interventions prioritaires pour la prévention des incendies.</p>	<p>Besoin de mises à jour continues des données et intégration avec d'autres pratiques de gestion.</p>	<p>Étendre l'utilisation de la technologie LiDAR à d'autres régions, affiner les méthodologies pour améliorer la prévention des incendies et la gestion des risques dans les zones WUI.</p>
<p><b>A5: Détection des zones brûlées à l'aide des données SAR Sentinel-1: une étude de cas de Kangaroo Island, Australie du Sud</b></p>	<p>(Hossein i &amp; Lim, 2023)</p>	<p>Utilisation des données SAR Sentinel-1 et des techniques d'apprentissage automatique pour détecter et cartographier les zones brûlées.</p>	<p>Indice de différence de brûlure radar (RBD), ratio de brûlure radar (RBR), indice de végétation modifié radar delta (<math>\Delta RVI</math>).</p>	<p>Les données SAR Sentinel-1 combinées avec un classificateur random forest produisent des cartes de zones brûlées très précises, surpassant le produit MODIS MCD64.</p>	<p>Besoin de multiples de ensembles de données pré- et post-incendie, complexité de l'analyse des données SAR, ressources computationnelles importantes.</p>	<p>Affiner la méthodologie en intégrant davantage d'ensembles de données, améliorer les algorithmes pour gérer des couvertures terrestres complexes, étendre l'application des données SAR à d'autres régions.</p>
<p><b>A6: Approche géospatiale pour définir l'interface sauvage-urbaine dans l'environnement alpin</b></p>	<p>(Conedera et al., 2015)</p>	<p>Améliorer les stratégies de gestion des incendies, renforcer les mesures de prévention des incendies et aider à la planification spatiale</p>	<p>Infrastructures anthropogéniques (bâtiments et routes) et caractéristiques naturelles (couvert forestier).</p>	<p>Les bâtiments et les routes praticables sont les prédicteurs les plus significatifs des ignitions</p>	<p>Intégration de diverses sources de données et adaptation du modèle aux caractéristiques</p>	<p>Affiner la méthode pour tenir compte des changements environnementaux dynamiques, étendre à d'autres régions</p>

		en identifiant les zones à risque d'ignition due aux activités humaines.		d'incendies. Les résultats révèlent une concentration spatiale significative des ignitions d'incendies près de ces infrastructures.	régionales différentes.	
<b>A7 : Forest fire hazard zoning in Mato Grosso State, Brazil</b>	(Mota et al., 2019)	Soutenir les stratégies de prévention des incendies, aider à la planification spatiale, améliorer l'allocation des ressources pour les efforts de lutte contre les incendies	Utilisation des terres, végétation, pente, orientation du terrain, proximité des routes et sentiers, altitude, précipitations, déficit hydrique, évapotranspiration, température	Plus de 55 % de l'État du Mato Grosso est à risque élevé ou extrême d'incendie de forêt, en particulier dans les régions centrale et sud	Intégration de diverses sources de données, assurer l'adaptabilité à d'autres régions	Affiner la méthodologie pour une application plus large, améliorer la précision des prédictions
<b>A8 : Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe</b>	(Modugno et al., 2016)	Cartographier et analyser l'étendue et l'impact des zones d'interface sauvage-urbaine (WUI) à l'échelle continentale	Utilisation/couverture des terres, proximité des zones urbaines, types de végétation, distances des zones WUI	Différences régionales significatives dans l'impact des zones WUI sur les incendies de forêt, plus probables près des zones WUI dans les régions	Cadres juridiques hétérogènes, besoin de données géospatiales standardisées, intégration de diverses sources de données	Affiner la cartographie des zones WUI, intégrer les changements environnementaux dynamiques, étendre les analyses régionales

				méditerranéennes		
<b>A9 : Assessing wildfire exposure in the Wildland-Urban Interface area of the mountains of central Argentina</b>	(Argañaraz et al., 2017)	Cartographier les zones WUI en utilisant des images satellites, numériser les emplacements des bâtiments, calculer les probabilités de brûlure	Densité des habitations, couverture végétale, proximité des grandes parcelles végétales, données historiques sur les incendies, estimations de la probabilité de brûlure	15 % de la zone d'étude classée comme WUI, contenant 52 % des bâtiments, probabilités de brûlure plus élevées dans les zones WUI mixtes	Intégration de diverses sources de données, besoin de mises à jour fréquentes des cartes, adaptation de la méthodologie aux caractéristiques régionales	Affiner les méthodologies de cartographie des zones WUI, intégrer les changements environnementaux dynamiques, étendre les analyses régionales
<b>A10 : Mapping the Wildland- Urban Interfaces for Forest Fire Prevention in the Province of Mila (Algeria)</b>	(Ahmed et al., 2020a)	Utiliser les données Landsat 8 et SRTM pour classifier la couverture terrestre, calculer l'indice d'agrégation de la végétation, analyse de buffer pour les types de logements	Types de végétation, densité des habitations, proximité des limites forestières	Augmentation rapide des zones WUI en raison des nouveaux développements immobiliers, risques accrus d'incendies de forêt	Intégration de diverses sources de données, mises à jour fréquentes des cartes	Affiner les méthodologies de cartographie, étendre les études à d'autres régions, incorporer des facteurs socio-économiques
<b>A11 : Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major landscapes of Nepal</b>	(Parajuli et al., 2020)	Développer des modèles de risque d'incendie de forêt pour le paysage de l'Arc Terai (TAL) et le paysage Chitwan Annapurna (CHAL) au Népal	Orientation, pente, élévation, végétation, température, proximité des routes et des habitations	Les forêts à feuilles larges pendant la saison pré-mousson sont très vulnérables aux incendies, 65% de la zone forestière dans	Intégration de diverses sources de données, mises à jour fréquentes des cartes, adaptabilité du modèle à	Affiner le modèle de risque d'incendie, incorporer des variables environnementales plus dynamiques, étendre l'étude pour inclure des analyses régionales détaillées

				TAL à haut risque, avec les comptages d'incendies montrant une forte corrélation ( $R^2 = 0,82$ ) avec la surface brûlée	différentes régions	
<b>A12 : Mapping Forest Fire Risk at a Local Scale—A Case Study in Andalusia (Spain)</b>	(Vallejo-Villalta et al., 2019)	Créer des cartes locales détaillées des risques d'incendie de forêt à court et moyen terme en utilisant le SIG et la télédétection	Pente, type de végétation combustible, stress hydrique de la végétation, proximité des éléments causaux (infrastructures de transport et d'énergie, habitations, zones de loisirs)	Les risques d'incendie de forêt varient selon la saison, plus élevés pendant les périodes sèches en raison d'un stress hydrique accru de la végétation, niveaux de danger induit plus élevés près des activités humaines	Intégration de diverses sources de données, mises à jour fréquentes des cartes	Améliorer la classification des types de combustibles en utilisant des données multi-saisonniers, renforcer la vérification sur le terrain, incorporer des données socio-économiques plus détaillées
<b>A13: An Unsupervised Burned Area Mapping Approach Using Sentinel-2 Images</b>	(Sismanis et al., 2023)	Différencier les zones brûlées des zones non brûlées en utilisant les images satellites Sentinel-2 et l'indice Normalized Burn Ratio (NBR)	Indices spectraux (NBR, NDVI, NDWI)	Détecte des changements au niveau du pixel, capture de petites parcelles brûlées ambiguës	Bruit dans les données (nuages, ombres) affecte la précision	Affiner la méthode de seuil, intégrer plusieurs paires d'images temporelles, étendre à diverses régions

<p><b>A14: High-severity fire: evaluating its key drivers and mapping its probability across western US forests</b></p>	<p>(Parks et al., 2018)</p>	<p>Analyser les données d'intensité des incendies déduites des satellites pour comprendre l'influence relative de divers facteurs, fournir des cartes de risque d'incendie à jour pour soutenir les stratégies de gestion des combustibles et des incendies de forêt dans l'ouest des États-Unis</p>	<p>Indices de combustibles vivants (NDVI, NDMI, EVI), métriques topographiques (pente, position topographique), données climatiques (déficit hydrique climatique, évapotranspiration, température), indicateurs météorologiques d'incendie (indice de brûlage, composant de libération d'énergie, température maximale quotidienne)</p>	<p>Les combustibles vivants sont le facteur le plus influent dans les incendies de haute intensité, suivis par la météo des incendies, le climat et la topographie</p>	<p>Caractériser avec précision les variables de combustible et de météo des incendies, intégrer diverses sources de données, assurer la robustesse du modèle à travers différents paysages et événements d'incendie</p>	<p>Affiner le modèle en incorporant des données plus dynamiques et haute résolution, améliorer la précision de la caractérisation des combustibles et de la météo, étendre l'étude à des régions géographiques plus larges</p>
<p><b>A15: Combining Participatory Mapping and Geospatial Analysis Techniques to Assess Wildfire Risk in Rural North Vietnam</b></p>	<p>(Bartolucci et al., 2022)</p>	<p>Cartographie participative impliquant les parties prenantes locales pour cartographier les incendies, ces cartes étant ensuite numérisées et analysées à l'aide de</p>	<p>Données topographiques (élévation, pente, aspect), données climatiques (précipitations, température, humidité, radiation solaire), types de</p>	<p>La probabilité d'incendie est plus élevée dans les zones à faible pression humaine, surtout dans les zones reculées avec une</p>	<p>Biais potentiels dans les données participatives en raison des perceptions subjectives, complexité de l'intégration de diverses sources</p>	<p>Affiner l'intégration de la cartographie participative avec l'analyse géospatiale, améliorer la précision des modèles prédictifs, étendre l'approche à d'autres régions</p>

		techniques géospatiales. Utilise les données MODIS pour valider la carte de probabilité d'incendie créée grâce à la cartographie participative. Applications incluent la sensibilisation aux risques d'incendie, le soutien à la prise de décision et le développement de lignes directrices pour la gestion des incendies en intégrant les connaissances locales avec des techniques géospatiales avancées	couverture terrestre (terres agricoles, prairies, broussailles, forêts), facteurs anthropogéniques (proximité des routes, densité de population, disponibilité des terres agricoles et forestières par personne, variables socio-économiques telles que la pauvreté, l'analphabétisme, le chômage)	végétation dense. Les incendies sont moins fréquents près des zones peuplées en raison d'un meilleur contrôle et de charges de combustible plus faibles	de données, assurer une collecte de données précise et cohérente	
<b>A16: Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: method and case study</b>	(Nuthammachot & Stratoulis, 2021)	Utilisation d'une combinaison de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour cartographier le risque d'incendie dans le district de Hua Sai,	Précipitations, distance des rivières, distance des habitations, utilisation des terres, élévation, pente, aspect	Les zones à précipitations plus faibles, proximité des habitations et certains types d'utilisation des terres (prairies, marais) présentent un risque	Précision des données d'entrée, besoin de calibration locale des seuils de modèle	Améliorer la précision du modèle avec des données de plus haute résolution, étendre la méthodologie à d'autres régions avec des conditions écologiques similaires pour une meilleure gestion des incendies de forêt et



		province de Nakorn Sri Thammarat, Thaïlande		d'incendie plus élevé		planification des politiques
<b>A17: GIS-based forest fire susceptibility modeling in Pauri Garhwal, India: a comparative assessment of frequency ratio, analytic hierarchy process and fuzzy modeling techniques</b>	(Tiwari et al., 2021)	Utilisation du SIG combiné à trois techniques de modélisation différentes : Ratio de Fréquence (FR), Analyse Hiérarchique des Processus (AHP), et AHP Flou (FAHP) pour cartographier la susceptibilité aux incendies de forêt	Modèle Numérique de Terrain (DEM), pente, aspect, courbure, Indice de Végétation Normalisé (NDVI), Indice d'Humidité de la Végétation Normalisé (NDMI), Indice de Mouillage Topographique (TWI), type de sol, distance des habitations, distance des routes, distance des rivières, précipitations, température, vitesse du vent	Le modèle FAHP présente la plus haute précision de prédiction (83,47 %), suivi par AHP (81,75 %) et FR (77,21 %). Les résultats indiquent que l'altitude, la proximité des habitations et les indices de végétation influencent significativement la susceptibilité aux incendies de forêt	Intégration de diverses sources de données, assurer la précision et la cohérence des couches thématiques, traiter la subjectivité inhérente aux modèles AHP et FAHP	Affiner les modèles en intégrant des données plus dynamiques et en temps réel, étendre l'étude à d'autres régions avec des conditions écologiques similaires, intégrer des facteurs socio-économiques pour renforcer la robustesse des évaluations et des stratégies de gestion des risques d'incendie
<b>A18: GIS-Based Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process for Forest Fire Susceptibility Mapping in the Western Region</b>	(Abdo et al., 2022)	Utilisation des méthodes du Ratio de Fréquence (FR) et de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) pour délimiter les zones de	Facteurs topographiques (pente, élévation, courbure, aspect), indices de végétation (NDVI, NDMI), facteurs	Le modèle FR avec un AUC de 0,864 est plus précis comparé au modèle AHP avec un AUC de 0,838. Les	Intégration de diverses sources de données, assurer la précision et la cohérence des données d'entrée,	Affiner l'intégration de diverses sources de données, améliorer la précision des modèles prédictifs, étendre l'étude pour inclure des variables

<p><b>of Syria</b></p>		<p>susceptibilité aux incendies de forêt</p>	<p>climatiques (précipitations, température, vitesse du vent), proximité des activités humaines (distance des habitations, routes et réseaux de drainage)</p>	<p>cartes résultantes indiquent que les zones à pentes raides, hautes altitudes, végétation dense et proximité des activités humaines (routes et habitations) sont plus susceptibles aux incendies de forêt</p>	<p>traiter la nature subjective de la méthode AHP</p>	<p>environnementales plus dynamiques</p>
<p><b>A19 Wildfire hazard mapping in the eastern Mediterranean landscape</b></p>	<p>(Trucchi a et al., 2023)</p>	<p>Utilisation d'une technique de classification par apprentissage automatique (Forêt Aléatoire) pour lier une décennie d'incendies passés à des descripteurs géoclimatiques et anthropiques</p>	<p>Données climatiques (précipitations, température, humidité du sol), données topographiques (élévation, pente, aspect), types de végétation (données CORINE Land Cover), facteurs anthropiques (densité de population, distance</p>	<p>La susceptibilité et l'intensité des incendies de forêt varient significativement selon les différents climats et paysages végétaux de la zone d'étude. La haute susceptibilité est liée à des</p>	<p>Intégration de diverses sources de données, assurer la précision des données d'entrée, gérer la complexité de la modélisation sur une grande région hétérogène</p>	<p>Affiner la méthodologie en intégrant des données locales plus détaillées, tenir compte de la saisonnalité des événements d'incendie, étendre l'analyse à d'autres régions</p>

			des terres cultivées et des zones urbaines)	conditions géoclimatiques spécifiques et à des pressions anthropiques		
<b>A20: Mapping Forest Fire Risk Zones Using Machine Learning Algorithms in Hunan Province, China</b>	(Tan & Feng, 2023)	Utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique (Forêt Aléatoire, Machine à Vecteurs de Support, Arbre de Décision à Gradient) pour cartographier les zones à risque d'incendie de forêt dans la province du Hunan, Chine	19 variables telles que des données météorologiques, topographiques, de végétation et d'activité humaine pour prédire les probabilités d'incendie et créer des cartes de risque	Les facteurs météorologiques et la végétation sont les principaux moteurs des incendies de forêt, avec des risques élevés principalement en hiver et au printemps	Complexité des interactions non linéaires entre les variables, besoin de modèles de haute précision	Affiner les modèles d'apprentissage automatique pour une meilleure précision de prédiction, appliquer ces méthodes à d'autres régions pour améliorer la gestion des incendies de forêt

## **ANNEXE D : PHOTOS**

## ANNEXE D : PHOTOS



**Photo 1** : pin d'alep



**photo 2** : eucalyptus



**Photo 3**: arbres feuillus



**Photo 4**: Cédre



**Photo 5** : zone de paturage



**Photo 6** : Comportement de quelques citoyens



**Photo 6** : Journée de sensibilisation par la conservation des forêts de Constantine et les associations de l'environnement



Contents lists available at ScienceDirect

Trees, Forests and People

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/trees-for-people](http://www.elsevier.com/locate/trees-for-people)

## Hoping the best, expecting the worst: Forecasting forest fire risk in Algeria using fuzzy logic and GIS

Louiza Soualah<sup>a,b,\*</sup>, Abdelhafid Bouzekri<sup>b</sup>, Haroun Chenchouli<sup>b,c,d</sup>

<sup>a</sup> Institute of Urban Technology Management, University of Constantine 2, 25000 Constantine, Algeria

<sup>b</sup> Laboratory of Algerian Forests and Climate Change (LAFCC), Higher National School of Forests, 40000 Elcheikhia, Algeria

<sup>c</sup> Laboratory of Natural Resources and Management of Sensitive Environments (LANSSE), University of Oum El Bouaghi, 24000 Oum El Bouaghi, Algeria

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Forest fires  
Algeria  
Risk assessment  
Fuzzy logic  
Geographic information system (GIS)  
Bioclimatic factors  
Geomorphological factors  
Human activities  
Vulnerability mapping  
Fire risk map  
Mediterranean forests

### ABSTRACT

Forest fires pose a severe threat to ecosystems and communities globally, especially in vulnerable semi-arid regions like North Africa. Understanding the key factors influencing forest fire dynamics is essential for effective management and mitigation. This study aims to comprehensively analyze forest fire risk patterns in Djebel El Guadi's massif (Algeria), focusing on integrating bioclimatic, fuel, geomorphological, and human factors through advanced fuzzy logic and geographic information system (GIS) techniques. Climate station data, satellite imagery, and GIS were employed to map bioclimatic parameters, land cover, and geomorphological features. Fuzzy logic systems were applied to integrate these factors, assigning appropriate weights based on their significance. The resulting forest fire prediction model was defuzzified to generate predictive maps indicating varying vulnerability levels within the study area. Predictive maps delineated areas of low to high forest fire risk. Low-risk zones were characterized by sparse vegetation, while high-risk regions featured densely vegetated slopes near human settlements. The study identified critical factors influencing vulnerability, emphasizing the impact of climate, terrain, and human activities. Urgent attention was directed toward high-risk areas, necessitating tailored fire prevention measures and strategic urban planning to minimize human-induced risks. The results underscored the complex interaction of natural and anthropogenic factors in shaping forest fire susceptibility. Understanding these dynamics facilitates evidence-based policymaking, enhancing forest fire preparedness, biodiversity preservation, and community safety. Additionally, the study emphasized the need for continuous research incorporating real-time climate data and socio-economic factors to refine predictive models. This research provided valuable insights into forest fire risk patterns in Djebel El Guadi, serving as a foundation for targeted fire management strategies. By bridging the gap between theoretical knowledge and practical application, this study contributes significantly to sustainable forest management and disaster mitigation efforts globally, emphasizing the importance of proactive measures in safeguarding vulnerable ecosystems and communities.

### 1. Introduction

Forests, the lifeline of our planet, stand as vast, interconnected ecosystems that harbor an extraordinary diversity of flora and fauna, playing a pivotal role in maintaining ecological balance (Caldwell, 2000). These natural sanctuaries contribute significantly to the Earth's biodiversity, water cycles, and carbon sequestration, serving as crucial buffers against climate change (Kumar, 2008; Pat et al., 2011). However, these sanctuaries of biodiversity face a dire threat: forest fires, among the most devastating natural disasters globally (Weng et al., 2015). The impact of these fires reverberates across the globe, not only

decimating acres of greenery but also disrupting climate patterns and posing significant threats to both ecosystems and human settlements. Nowhere is this menace more acute than in regions characterized by dense forests, especially under semi-arid climatic conditions (Duffin et al., 2021), a description befitting the mountainous terrain of the Mediterranean region and North Africa (Chahel et al., 2022; Vicens-De-Las-Heras et al., 2023). In the northern regions of Algeria, the juxtaposition of high forest density and proximity to inhabited areas creates a precarious scenario, rendering these lands particularly vulnerable to recurrent outbreaks (Cuervocho et al., 2017). The complex relationship between forests, climate, and fire underscores the

\* Corresponding author.

E-mail address: [louiza.soualah@gmail.com](mailto:louiza.soualah@gmail.com) (L. Soualah).

<https://doi.org/10.1016/j.trep.2024.100614>

Available online 23 June 2024

2666-7143/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Nom et Prénom : SOUALAH Louiza  
Titre : CARTOGRAPHIE ET GESTION DES INCENDIES DANS  
LES INTERFACES HABITAT-FORÊT DANS UNE ZONE MONTAGNEUSE  
(CAS DE DJEBEL EL OUAHCH)  
Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en  
Gestion des techniques urbaines

### Résumé

Les forêts, vastes écosystèmes interconnectés, jouent un rôle central dans la préservation de la biodiversité et de l'équilibre écologique. Cependant, elles sont gravement menacées par les incendies de forêt, l'un des risques environnementaux les plus dévastateurs en raison de leur propagation rapide et de leur impact sur les écosystèmes et les communautés humaines.

L'objectif appliqué de cette recherche est de développer un cadre méthodologique novateur pour la cartographie du risque d'incendie de forêt dans le contexte de l'Afrique du Nord, avec un focus particulier sur le massif de Djebel El Ouahch. Ce cadre prend en compte à la fois les facteurs d'éclosion et de propagation des incendies, ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes forestiers et les enjeux anthropiques associés. L'objectif théorique vise à articuler plusieurs paradigmes issus de la géographie, de la foresterie et des sciences de l'information numérique. Cette approche assure une réalisation valide et cohérente de l'objectif appliqué.

La méthodologie adoptée dans cette thèse combine plusieurs techniques : des analyses diachroniques des images satellitaires, l'utilisation des indices NDVI et NBR pour évaluer l'évolution de la couverture végétale, ainsi qu'une évaluation des interfaces habitat-forêt qui sont des zones critiques pour la propagation des incendies. La logique floue a été utilisée pour modéliser la vulnérabilité des différentes zones et prédire les risques d'incendie, intégrant à la fois des données environnementales et humaines.

Le modèle développé permet non seulement de cartographier les zones à risque, mais également de spécifier et de développer des outils d'aide à la décision pour la gestion du risque d'incendie de forêt, offrant ainsi des solutions pratiques et adaptées aux gestionnaires locaux. Ces outils visent à renforcer la capacité de prévention, de surveillance et d'intervention en fonction des spécificités locales, permettant une gestion proactive et efficace des incendies.

Mots clés : Incendie de forêt, télédétection, logique floue, SIG, gestion des risques.

Directeur de thèse : Abdelhafid BOUZEKRI- Ecole Nationale Supérieure des Forêts.Khenchela  
Co-directeur : Éric MAILLÉ - Université d'Aix Marseille

Année Universitaire : 2023-2024