

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة 20 اوت 1955 – سكيكدة-

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences
Département Ecologie et Environnement

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Intitulé :

*Cartographie du risque d'incendie de forêt dans la partie sud du
massif de Collo –Skikda-*

Présenté par :

M^{lle} Abdallah Hanéne

M^{lle} Ali guechi Sabrina

M^{lle} Boutaghane Ferial

M^{lle} Charef Maissa

Membre de Jury :

Mme. Bouderies Amel	(MCA)	Président	Université 1955. Skikda
Mr. Hadeff Azzedine	(MAA)	Promoteur	Université 1955. Skikda
Mme. Rouidi Sonia	(MCB)	Examineur	Université 1955. Skikda

Année universitaire 2023-2024

Remerciements

Louange et remerciements à *Allah* qui nous a accordé de sa grâce et nous a aidés, et qui nous a donné la force, la volonté et la patience pour accomplir ce travail modeste, Louange à Allah jusqu'à ce que la louange atteigne son apogée.

Et après, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mon immense respect à notre encadrant, *M. Hadeff Azzedine (M.A.A, université 20 Août 1955, Skikda)*, qui a eu la gentillesse et la bienveillance d'accepter de diriger ce travail et de m'apporter son aide précieuse et ses conseils avisés qui ont contribué de manière claire et significative à la réalisation de ce mémoire. Je le remercie du fond du cœur pour son temps et ses efforts déployés en ma faveur.

Ensuite, je remercie tous les membres du jury, chacun par son nom et sa fonction *Mme Bouderies Amel (M.C.A, Université du 20 Août 1955, Skikda)* qui a bien voulu présider ce mémoire.

Mme Rouidi Sonia (M.C.B, Université du 20 Août 1955, Skikda) qui a accepté de porter un jugement sur mon travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au chef département *Dr Dziri Hamdi*, pour ses efforts considérables pour répondre aux exigences de tous les étudiants tout au long de leur parcours académique.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à la Faculté des Sciences de l'Environnement et environnements, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué au bon fonctionnement de cette institution, pour leurs efforts remarquables et leur soutien continu.

En fin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé, de près ou de loin, pour leurs efforts dévoués.

Merci.

Dédicace



Je dédie mon mémoire de fin d'études à ceux que j'aime, en particulier :

À l'âme pure de mon père **Rabeh**, que Dieu lui fasse miséricorde et lui pardonne, qui a consacré sa vie à répondre à mes demandes, mon père qui a toujours souhaité me voir au plus haut rang du succès.

À ma chère mère **Roumana**, qui a inculqué à mon âme le sens de la patience et de la persévérance et qui a gravé dans mon esprit le terme

"ne pas abandonner".

À mon frère aîné **Samir**, ma fierté et ma gloire, merci d'être mon frère.

À mon fiancé **Ahmed**, source de mon courage et de ma force, surtout son soutien indéfectible.

À mes amis d'université qui étaient à mes côtés à chaque étape.

À tous ceux qui m'ont soutenu moralement pour achever ce travail.

Aux générations futures.

Je vous dédie tout ce travail.

Hanéne

Dédicace



الحمد لله جليل النعم، باعث الهمم ذي الجود والكرم، ثم الصلاة والسلام التامان الأكملان على خير

البرية وأزكى البشرية، محمد صلى الله عليه وعلى صحبه ومن والاه الى يوم الدين.

إلى من علمتني الحب والحنان، إلى من تحمل المشقة والصعاب لأجل راحتي... إلى أمي الغالية،

دعاؤك هو زادي في الحياة. كل كلمات الشكر لا تفيكِ حقك، أدامك الله تاجاً على رأسي.

إلى أبي الحبيب، الرجل الذي تعلمت منه معنى القوة والصبر، والدعم الذي لا ينضب. مصدر الهامي

وقوتي لك مني كل العرفان والتقدير.

إلى أختاي العزيزتان، حنان وهديل، كنتم لي السند الحقيقي، وكنتم دائماً إلى جانبي في رحلتي العلمية،

شكراً لكم على كل دعمكم ومحبتكم.

إلى عائلة علي فشي وبن ثيمامة، أنتم العائلة الممتدة التي منحتني الدعم والمساندة في كل خطوة، لكم

مني كل الشكر والامتنان.

إلى صديقتي الغاليات، رفيقات الدرب، كل لحظة قضيناها معاً كانت ذكرى جميلة تزين مسيرتي،

ودعمكم كان الوقود الذي دفعني نحو النجاح. شكراً لأنكم كنتم جزءاً من رحلتي.

إلى كل من ساندني، من قريب أو بعيد، أهديكم هذا الإنجاز، فلو لا دعمكم وتشجيعكم لما حققت ما

وصلت إليه اليوم.

لكم جميعاً، أهدي ثمرة تعبتي وسهري، وأتمنى أن أكون قد جعلتكم فخورين بي. شكراً لكم جميعاً...

صبرينة

Dédicace



Louange à Dieu, par Sa grâce les bonnes actions sont accomplies.

Je dédie cette réussite à

celui que Dieu a couronné de dignité et de respect, à celui qui m'a appris à donner sans attendre, à celui dont je porte le nom avec fierté... à celui qui est le plus cher à mon cœur et le plus proche de moi... Je prie Dieu de t'accueillir parmi les martyrs pieux... Tes paroles resteront des étoiles qui me guideront aujourd'hui, demain et pour toujours.

Mon cher père "**Riad**", que Dieu ait son âme

À mon ange dans la vie, à la signification de l'amour, de la tendresse et du dévouement, au sourire de la vie et au secret de l'existence... à celle dont les prières ont été la clé de mon succès et dont la tendresse a guéri mes blessures, qui a été mon soutien et ma compensation, qui a été pour moi un père, une sœur et une amie... mon premier soutien et ma source de force... Merci pour tout, ô la plus grande des mères

Ma chère mère "**Warda**", que Dieu la protège

À ceux avec qui j'ai vécu les plus beaux moments de ma vie, aux bougies de mon chemin, à ceux qui ont partagé avec moi les difficultés des études et les veillées nocturnes.

Mon frère et mes sœurs "**Abd el Raouf, Alaa errahmane, Rihab et Maria**", que Dieu les protège

À mes grands-parents "**Ali, Bakir**" et mes grands-mères "**Nawara, Khadija**", que Dieu leur accorde une longue vie

Et je n'oublie pas mes amis d'âme qui ont partagé avec moi les étapes de ce chemin, à ceux qui ont rendu la route plus facile, à ceux qui m'ont encouragée à persévérer et à continuer, à mes amis de toujours, je vous suis reconnaissante "**Amal, Dounia et Asma**"

Ferial

Dédicace



بسم الله الرحمن الرحيم
(وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)
أشكر الله عز وجل على توفيقى لهذا النجاح المتواضع الحمد لله حتى يبلغ الحمد
منتهاه

أهدي نجاحي الى والداي، الى داعمي الأول، سندي وملاذي بعد الله، الى من كان
دعائها سر نجاحي فخري واعتزازي المرأة المعجزة أمي ثم امي ثم أمي
إلى أخوي محمد إسلام وايوب عبد القدوس، واختاي سارة وضحي سند الحياة
وعضدها

إلى جدي إبراهيم رحمه الله، الذي رحل عنا ولم يرحل منا
الى من علمني الصبر على شدائد الدهر خالي العزيز مولود الى أخوالي وخالاتي
فردا فردا

إلى محفظ الوحي شيخي حفظه الله ورعاه الشيخ أحمد بن سعد خوضر
إلى رفيقات الخطوة الأولى والخطوة الأخيرة كل باسمها ومقامها في قلب
إلى من أراده الله أن يكون شريك حياتي إن شاء الله
إلى شهداء غزة فخر الأمة، الى من انتزعت الحرب أحلامهم ولم تنتزع وطنهم
منهم.

من قال انا لها نالها إن شاء الله

ميساء

Sommaire

Liste des abréviations.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Résumés.

Introduction..... 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I- Généralités sur les incendies des forêts	4
I-1-Définition des incendies de forêt	4
I-2- Les risques des incendies de forêts en région méditerranéenne	4
I-3- Les types de feux forts	4
I-3-1- Les feux de sol.....	4
I-3-2-Les feux de surface	5
I-3-3-Les feux de cimes	5
I-3-4-Les feux de braises	6
I-4-Les causes des incendies des forêts	6
I-4-1-L'origine des incendies des forts.....	6
I-4-2-Les différentes catégories des causes des incendies des forêts	6
I-5-Les conséquences des incendies des forêts	8
I-5-1-Sur les écosystèmes.....	8
I-5-2-Sur la faune forestière.....	8
I-5-3-Sur les écosystèmes forestiers.....	8
I-5-4-Sur le sol.....	9
I-5-5-L'émission d'une forte quantité de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.....	9
I-5-6-Pertes économiques	9
I-6-Les facteurs des incendies.....	9
I-6-1-Les facteurs climatiques	9
I-6-2-Les facteurs topographiques	10
I-6-3-La végétation forestière en tant que combustible	10
I-6-4-Les conditions édaphiques.....	10
I-7- Les mouvements d'un feu de forêt.....	11
I-8-Mécanisme de la lutte	13
I-8-1- La prévention.....	13
I-8-2- Les aménagements de DFCI.....	13
II-Généralités sur le SIG.....	14

II-1- Le système d'information géographique SIG	14
II-2-L'objectif de système d'information géographique SIG.....	14
III-Généralités sur la télédétection	14
III-1- La télédétection	14
III-2-Les objectifs des télédétections	14
IV-Les intérêts de la carte de risque.....	15

Chapitre II :Matériels et Méthodes.

I- La situation géographique de la zone sud du massif Collo	17
II-Les caractères physique de la région sud	18
II-1- Les reliefs.....	18
II-2-Le sol.....	18
II-3- La couverture forestière.....	19
II-4-Le climat	19
II-4-1-La précipitation	19
II-4-2-La température	19
II-4-3-Le brouillard	19
II-4-4-Les vents	19
III-Objectif de l'étude	20
IV-Outils utilisé pour la carte des risques.....	20
IV-1-Logiciel ArcGIS	20
IV -2-Google Earth Pro.....	20
IV -3-Les données	20
V- La méthodologie adoptée dans cette étude	21
V-1-Les traitements des données	21
V-1-1-Traitement de MNT.....	21
VI-2-Traitement des indices	23
VI-2-1-Indice topo-morphologique IM.....	23
VI-1-2-Elaboration de carte des pentes	24
VI-1-3- Elaboration de carte topo-morphologie	26
VI-1-4- Elaboration de la carte d'expositions	27
VI-2-2-Indice de combustibilité IC	28
VI-2-3-Indice d'occupation humaine IH	30

Chapitre III :Résultats et Discussion.

I- La cartographie du risque des incendies de forêt	33
I-1-Indice de Topo-morphologie (IM)	33
I-1-1- Carte des pentes	33
I-1-2-Carte des Topo-Morphologies.....	37

I-2-Indice de combustibilité (IC)	42
I-2-1-Le biovolume BV	42
I-2-2-NDVI	44
I-3-Indice d'occupation humaine (IH)	48
I-4-Indice de risque d'incendie (IR).	50
I-5-Analyse de la relation entre peuplements et IR	52
Conclusion	55
Références Bibliographiques.	

Liste des abréviations

BV : le **B**iovolume de la formation **V**égétale.

DEM : **D**igital **E**lévation **M**odel.

DFCI : **D**éfense des **F**orêts **C**ontre les **I**ncendies.

ESRI: **E**nvironmental **S**ystem **R**esearch **I**nstitute.

F.A.O: **F**ood and **A**griculture **O**rganization of the United Nations

GES : **G**az à **E**ffet de **S**erre.

GPS : **G**lobal **P**ositioning **S**ystem.

MNT : **M**odèle **N**umérique de **T**errain.

NDVI : **N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex (Indice de **V**égétation par **D**ifférence normalisé).

SIG : **S**ystème d'**I**nformation **G**éographique.

UTM : **U**niversal **T**ransverse **M**ercator.

WGS: **W**orld **G**eodetic **S**ystem (System geodesies Mondial)

Liste des figures

N° de la figure	Titre de la figure	Page
Figure01	feu de sol (alpes-maritimes.gouv.fr).	05
Figure02	Feu de surface et les feux de cimes (Plana et al, 2016).	05
Figure03	schéma du Triangle du comportement de l'incendie (Plana et al, 2016).	11
Figure04	Les mouvements d'un feu de forêt.	12
Figure05	Les mouvements d'un feu (Carmen, 2021).	13
Figure06	La situation géographique du massif sud de Collo.	18
Figure07	ArcGIS 10.4.1.	20
Figure08	Le modèle numérique de terrain de cette étude.	21
Figure09	Les étapes de la procédure de clip dans ArcGIS 10.4.1	22
Figure10	Découpage du modèle numérique de terrain	22
Figure11	La procédure de la projection MNT dans ArcGIS 10.4.1.	22
Figure12	Les étapes du prétraitement de la création de carte des pentes dans ArcGIS 10.4.1.	24
Figure13	La carte générée après avoir effectué les étapes.	24
Figure14	Les étapes de classification de pente dans ArcGIS 10.4.1	25
Figure15	Les classifications utilisées pour générer la carte des pentes.	25
Figure16	La procédure de la vectorisation d'un raster dans ArcGIS 10.4.1	25
Figure17	Les étapes de dissolve en ArcGIS 10.4.1.	26
Figure18	Les étapes de conversion des données vectorielles en données raster	26
Figure19	Les classifications utilisées pour générer la carte de topo-morphologie.	26
Figure20	Les étapes Aspect pour générer une carte des expositions.	27
Figure21	Les classifications utilisées pour générer la carte des expositions	27
Figure22	les étapes d'insertion et de calcul de l'équation précédente	28
Figure23	L'organigramme de la procédure de calcul de l'indice de risque de feu de massif sud Collo.	31
Figure24	Répartitions des classes des pentes	34
Figure25	Carte des pentes de la zone sud de massif Collo Skikda	34
Figure26	Les directions géographiques de la terre	35
Figure27	Répartitions des classes d'expositions	36

Figure28	Carte d'expositions de la zone sud de massif Collo Skikda	37
Figure29	Répartitions des classes de topo-morphologie (IM)	38
Figure30	Carte de topo-morphologie de la zone sud de massif Collo Skikda.	39
Figure31	Répartitions des classes de l'indice de topo-morphologie (IM)	40
Figure32	Carte d'indice IM de la zone sud de massif Collo Skikda	41
Figure33	La répartition des peuplements.	43
Figure34	Carte des peuplements BV de la zone sud de massif Collo Skikda	43
Figure35	Carte d'indice de végétation NDVI.	45
Figure36	Répartitions des classes de L'indice de combustibilité (IC)	46
Figure37	Carte de l'indice de combustibilité (IC) de la zone sud de massif Collo Skikda.	47
Figure38	Carte d'indice d'occupation humain (IH) de la zone sud de massif Collo Skikda.	49
Figure39	Répartitions des classes de l'indice de risque d'incendie (IR)	50
Figure40	Carte d'indice des risques (IR) de la zone sud de massif Collo Skikda	51
Figure41	évaluation du risque d'incendie pour différents types des peuplements dans la zone sud de massif Collo.	53

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 01	succinct illustrant quelques origines des incendies avec des exemples explicatifs (F.A.O , 2001).	06
Tableau 02	Les causes des incendies des forêts en Algérie pendant la période 1985-2010(Meddour et al, 2012).	08
Tableau 03	Influence des facteurs climatiques sur les conditions du feu (Messafri, 2018).	10
Tableau04	Les notes de combustibilité des principales espèces dominantes de la végétation méditerranéenne (Cemagref, 1990).	29
Tableau05	Les classes de la carte des pentes	33
Tableau06	Les classes de la carte d'expositions.	35
Tableau07	Les classes de la carte de topo-morphologie	38
Tableau08	Les classes de l'indice topo-morphologique de la zone sud de massif Collo	40
Tableau09	Les Principales essences peuplements de la zone sud de massif Collo	42
Tableau10	Les classes de la carte de l'indice de combustibilité (IC)	46
Tableau 11	Les classes de la carte d'indice d'occupation humain (IH)	48
Tableau12	les classes de l'indice de risque d'incendie (IR)	50

Résumés

Résumé

Les feux de forêt constituent le facteur le plus dangereux de la dégradation des forêts de Collo, en particulier dans la région sud. La structure et la composition des formations végétales, dominées par les peuplements "*Maquis à bruyère et myrte*" sur une superficie de 10066,69 hectares, et "*Chêne liège clair*" sur une superficie de 11002,82 hectares de la superficie totale de la région, contribuent largement à la propagation des incendies.

L'objectif de ce mémoire est d'utiliser les systèmes d'information géographique (SIG) à travers l'analyse thématique des images satellites, en appliquant une méthode développée par Dagorne Andrée en 01-10-1994 et comprenant trois (03) indices pour évaluer le risque d'incendie : indice de combustibilité, indice topo-morphologique et l'indice d'occupation humaine, afin d'établir une carte du risque des incendies de forêt dans le massif forestier de Collo, en particulier dans la région sud.

Les résultats de l'étude indiquent que la zone d'étude est exposée à un risque élevé de feux de forêt à 55%, tandis qu'elle est exposée à un risque faible à moyen à 28%. Les résultats indiquent également un risque de 17% entre moyen et élevé, en raison des pentes fortes ($30\% < P < 60\%$) qui couvrent 37,84% de la superficie de la zone. De plus, une dominance de la direction ouest par rapport aux autres directions dans la zone qui étudie, avec un taux de prévalence de 25,74%. De plus, le facteur morphologique domine 53,90% de la superficie des montagnes.

Mots clés

Incendie, risque, forêts, images satellitaires, cartes thématiques, Massif Collo, zone sud.

Abstract

Forest fires are the most dangerous factor in the degradation of Collo forests, particularly in the southern region. The structure and composition of plant formations, dominated by the “Heather and myrtle maquis” populations over an area of 10,066.69 hectares, and “Light cork oak” over an area of 11,002.82 hectares of the total area of the region, contribute significantly to the spread of fires.

The objective of this dissertation is to use geographic information systems (GIS) through the thematic analysis of satellite images, applying a method developed by Dagorne Andrée in 01-10-1994 and including three (03) indices to evaluate the fire risk: combustibility index, topo-morphological index and the human occupation index, in order to establish a map of the risk of forest fires in the Collo forest massif, particularly in the southern region.

The study results indicate that the study area is at high risk of wildfires at 55%, while it is at low to medium risk at 28%. The results also indicate a risk of 17% between medium and high, due to the steep slopes ($30\% < P < 60\%$) which cover 37.84% of the surface area of the area. In addition, a dominance of the western direction compared to other directions in the study area, with a prevalence rate of 25.74%. In addition, the morphological factor dominates 53.90% of the mountain area.

Keywords

fire, risk, forests, satellite images, thematic maps, Collo massif, south zone.

ملخص

تعتبر حرائق الغابات من أخطر عوامل تدهور غابات الكولو خاصة في المنطقة الجنوبية. هيكل وتكوين التكوينات النباتية، التي تهيمن عليها مجموعات "الخلنج والأس" على مساحة 10.066.69 هكتار، و"بلوط الفلين الخفيف" على مساحة 11.002.82 هكتار من إجمالي مساحة المنطقة، تساهم بشكل كبير في انتشار الحرائق.

الهدف من هذه الأطروحة هو استخدام نظم المعلومات الجغرافية من خلال التحليل الموضوعي لصور الأقمار الصناعية، وتطبيق طريقة طورها Dagorne André في 01-10-1994 وتتضمن ثلاثة (03) مؤشرات لتقييم مخاطر الحريق: مؤشر قابلية الاحتراق، مؤشر توبو - المؤشر المورفولوجي ومؤشر الإشغال البشري، من أجل وضع خريطة لمخاطر حرائق الغابات في كتلة غابات الكولو، خاصة بالمنطقة الجنوبية.

وتشير نتائج الدراسة إلى أن منطقة الدراسة معرضة لخطر كبير لحرائق الغابات بنسبة 55%، في حين أنها معرضة لخطر منخفض إلى متوسط بنسبة 28%. كما تشير النتائج إلى خطورة بنسبة 17% بين المتوسطة والعالية، بسبب المنحدرات الشديدة 30% > P < 60% والتي تغطي 37.84% من مساحة المنطقة. بالإضافة إلى ذلك، سيادة الاتجاه الغربي مقارنة بالاتجاهات الأخرى في منطقة الدراسة، حيث بلغت نسبة انتشاره 25.74%. بالإضافة إلى ذلك، يسيطر العامل المورفولوجي على 53.90% من مساحة الجبل.

الكلمات المفتاحية

الحرائق، المخاطر، الغابات، صور الأقمار الصناعية، الخرائط الموضوعي، كتلة جبال القل، المنطقة الجنوبية.

Introduction

Introduction

En Algérie, les incendies constituent le facteur le plus redoutable de la dégradation des forêts (**Missouni et al, 2002**).

Face aux menaces croissantes qui pèsent sur la richesse forestière de l'Algérie, il est urgent de prendre des mesures efficaces pour réduire les risques des incendies de forêt qui détruisent massivement les écosystèmes et menacent la riche biodiversité.

D'autant plus que les forêts couvrent en Algérie une superficie totale estimée à environ 888189,8 hectares, soit 2 % de la superficie totale du pays et 11 % de la superficie du nord de l'Algérie.

Les incendies enregistrés en 2023 ont détruit plus de 41 000 hectares de forêts en Algérie (**Algérie Presse Service, 2023**).

Les forêts méditerranéennes, y compris les forêts du massif sud de Collo, sont des points chauds de la biodiversité, abritant une richesse immense de plantes et d'animaux rares. Cependant, cette richesse est menacée par l'augmentation des incendies de forêt, qui causent des dommages considérables à tous les niveaux, de la biodiversité aux biens et aux vies humaines et certaines espèces semblent peu affectées par la récurrence des incendies (par exemple le chêne-liège) (**Vallejo & Alloza, 1998**).

Par conséquent, les forêts du massif sud de Collo à Skikda sont un exemple flagrant de ces risques, souffrant d'une fréquence alarmante des incendies de forêt qui menacent de détruire cet habitat naturel unique. Elles constituent donc un terrain d'étude crucial pour évaluer ces risques et développer des stratégies de gestion efficaces.

L'évaluation des risques des incendies de forêt est une étape essentielle pour les combattre efficacement. Cette évaluation implique l'analyse d'un ensemble de facteurs, tels que le relief, le type de couverture végétale, les facteurs climatiques et l'activité humaine. L'analyse de ces facteurs permet d'identifier les zones les plus exposées aux risques d'incendie, ce qui permet de prendre des mesures préventives ciblées.

Cette recherche vise à créer une carte d'évaluation et d'estimation des risques des incendies de forêt, en se concentrant particulièrement sur les forêts du massif sud de Collo dans la wilaya de Skikda. Cela se fera grâce à l'analyse de données géographiques et à l'utilisation de techniques modernes de systèmes d'information géographique (SIG).

La présentation de notre travail s'articule autour de 03 chapitres qui traiteront respectivement :

- **Chapitre I** : Synthés bibliographique.
- **Chapitre II** : Matériels et méthodes.
- **Chapitre III** : Résultats et discussion.
- **Conclusion** : Conclusion et recommandations.

Synthèse Bibliographique

I- Généralités sur les incendies des forêts

I-1-Définition des incendies de forêt

Les incendies des forêts sont définis comme étant :

Une combustion qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace (**Justine, 2023**). On parle l'incendie de forêt lorsque le feu concerne une surface minimale d'un hectare d'un seul tenant et qu'une partie au moins des étages arbustifs/et ou arboré (partie haute) est détruite.

Un incendie est un phénomène qui échappe au contrôle de l'homme, tant en durée qu'en étendue (**Alp' Géorisques & Graphies, 2002**).

I-2- Les risques des incendies de forêts en région méditerranéenne

Selon (**Meddour, 2014**), il existe cinq (05) catégories de risque d'incendie en région méditerranéenne, à savoir :

- La première classe est de 0,1 %, c'est à dire un risque d'incendie presque nul et qui inclue le Maroc, la Lybie, l'Egypte, la Turquie et la Bulgarie.
- La France et la Tunisie appartient à la catégorie de la deuxième classe (0,1 à 0,5 %) qui se présente un risque du feu faible.
- Les risques moyens entrent (0,5 à 1 %) sont enregistrés pour l'Algérie et l'Espagne.
- Les risques les plus élevés concernent l'Italie.
- Le Portugal a classé la première au niveau de risque d'incendie avec une classe supérieure à 2 % (**Oussama & Jaime, 2021**).

I-3- Les types de feux forts

Les types des incendies de forêt varient selon leur gravité et leur impact sur l'environnement.

I-3-1- Les feux de sol

Le feu se propage grâce à des racines et des matières organiques dans des conditions particulières (écosystèmes de tourbière). Même si les flammes ne sont pas visibles, le feu peut rester actif pendant de longues périodes. (**Plana et al, 2016**).

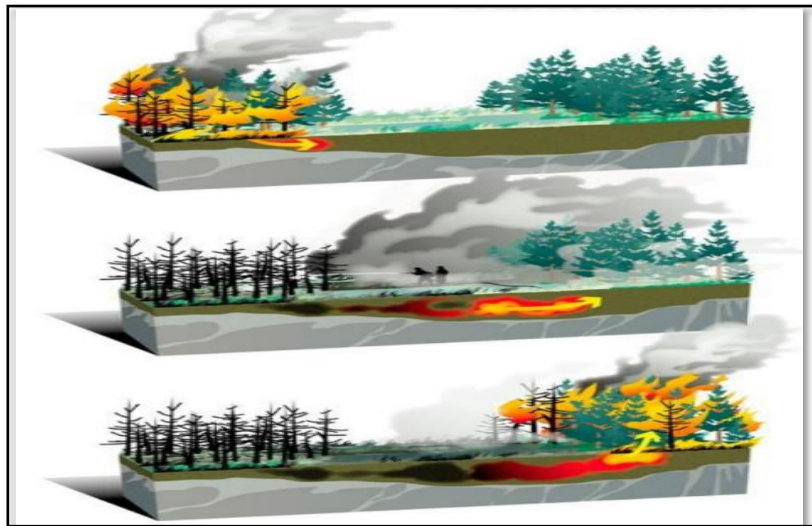


Figure 01 : feu de sol (alpes-maritimes.gouv.fr).

I-3-2-Les feux de surface

Ils brûlent les strates basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux bas. La propagation de ce type de feu peut être rapide lorsqu'il se développe librement, et si les conditions sont favorables à la propagation (**Heouaine & Mihoubi, 2018**).

I-3-3-Les feux de cimes

Qui brûlent la partie supérieure des arbres et forment une couronne de feu. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée. Ils sont d'autant plus intenses et difficiles à contrôler que le vent est fort et le Combustible sec (**Carmen, 2021**).

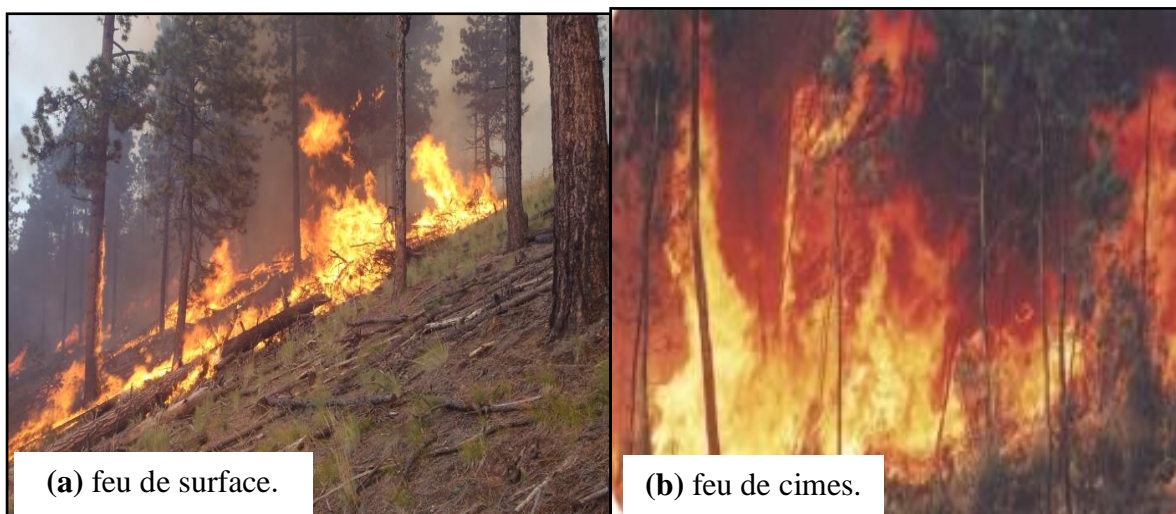


Figure 02 : Feu de surface et les feux de cimes (**Plana et al 2016**).

I-3-4-Les feux de braises

Ces forêts peuvent être exposées à des incendies en raison de braises qui n'ont pas été correctement éteintes en raison de la négligence de certaines personnes ou des autorités de protection civile.

I-4-Les causes des incendies des forêts

I-4-1-L'origine des incendies des forêts

La compréhension des origines des incendies est essentielle pour les prévenir et minimiser leurs dommages. Ces origines, qu'elles soient humaines ou naturelles, nécessitent une analyse approfondie pour une meilleure prévention et gestion des risques, tableau 01.

Tableau 01 : succinct illustrant quelques origines des incendies avec des exemples explicatifs (F.A.O, 2001).

Origines des incendies	Exemples
Travaux agricoles	En forêt : récolte du miel par fumage, défrichements pour labours En périphérie : feu pastoral, incinération de végétaux...
Travaux forestiers	Carbonisation (charbonnières), brûlage des rémanents après éclaircie.
Travaux industriels et artisanaux	Brûlage de déchets, étincelles...
Touristes	Pique-nique, mégots...
Chasseurs	Battue, campement...
Habitations	Feu de jardin, barbecue...

I-4-2-Les différentes catégories des causes des incendies des forêts

Un incendie ne peut éclater qu'à deux conditions : que la forêt ne soit pas propre et qu'il y ait du vent (Pierre, 1992).

I-4-2-1- Causes naturelles

L'inflammation spontanée de la végétation étant improbable, l'unique cause naturelle des incendies de forêt est la foudre (Attou & Khelil, 2020).

Toutefois, les éruptions volcaniques peuvent également être à l'origine des incendies de forêt. Ce phénomène est cependant exceptionnel dans le Bassin Méditerranéen (Colin et al, 2001).

I-4-2-2- Causes humaines

Elles constituent la principale source des départs d'incendie en milieu forestier, on observe à la fois des déclencheurs involontaires et volontaires.

➤ Causes volontaires

La malveillance joue incontestablement un rôle dans les incendies de forêts. Elle se manifeste habituellement pour exprimer le mécontentement des riverains vis-à-vis des procès-verbaux dressés à leur encontre par l'administration forestière (**Megrerouche, 2006**).

De plus, certains individus mettent le feu par plaisir ou par jeu, pour être reconnus, pour voir les engins de lutte en action.

➤ Causes involontaires

Elles constituent les causes principales :

• Les incendies criminels

Les incendies criminels peuvent apporter un gain matériel direct ou indirect par appropriation foncières (**Essid et al, 2021**).

• Les imprudences

Résultent de négligence par rapport aux risques d'incendie et sont corrélées à l'importance de la fréquentation des forêts ou de leurs abords immédiats. La nature des imprudences dépend des activités en forêt et aux abords immédiats. (**Colin et al, 2001**).

Également, les lignes de chemin de fer qui traversent les régions boisées créent des dangers, le feu est allumé en général par des flammèches sortant des cheminées.

Malheureusement, la recherche sur les causes des incendies en Algérie est encore à ses débuts, limitant ainsi la compréhension des principales causes des incendies dans le pays. Par exemple, pour la série temporelle comprise entre 1985 et 2010, pour laquelle des informations presque complètes sont disponibles, la cause de l'incendie ne peut pas être identifiée dans 80% des cas.

Tableau 02 : Les causes des incendies des forêts en Algérie pendant la période 1985-2010

(Meddour et al, 2012).

Causes	Nombre des incendies	Pourcentage%
Négligence	1,260	3
Accidentel	256	0,6
Délibération	7,009	16,4
Inconnu	34,030	80
Total	42,555	100

I-5-Les conséquences des incendies des forêts

Les incendies des forêts ont de nombreuses conséquences, notamment :

I-5-1-Sur les écosystèmes

Les incendies de forêt influencent de nombreuses façons la diversité biologique. A l'échelle mondiale, ils sont une importante source d'émissions de carbone et contribuent au réchauffement de la planète, ce qui pourrait entraîner des changements dans la biodiversité. Aux niveaux régional et local, ils modifient le volume de la biomasse, altèrent le cycle hydrologique avec des retombées sur les systèmes marins comme les récifs coralliens, et influencent le cycle de vie des végétaux et des animaux. La fumée dégagée par les forêts en flammes peut réduire de façon notable l'activité photosynthétique (Davies & Unam, 1999). Cela compromet souvent la santé des êtres humains et des animaux.

I-5-2-Sur la faune forestière

Dans les forêts où le feu ne constitue pas une perturbation naturelle, il peut avoir des effets dévastateurs sur les vertébrés et invertébrés vivant dans la forêt – non seulement en provoquant directement leur mort, mais aussi par des effets indirects à plus long terme comme le stress et la perte d'habitat, de territoire, d'abri et d'aliments. La perte d'organismes clés dans les écosystèmes forestiers, comme les invertébrés, les pollinisateurs et les décomposeurs, peut ralentir considérablement la régénération de la forêt (Boer, 1989).

I-5-3-Sur les écosystèmes forestiers

Les conséquences sont très variables selon l'intensité du feu et la richesse biologique présente, Les différents éléments qui constituent le coût d'un incendie sont :

- **Les coûts directs**

Lutte contre le feu, équipements détruits (habitations, infrastructures, véhicules), Forêts détruites.

- **Les coûts indirects**

Perte des usages, restauration de la végétation et des paysages, incidence sur L'économie du tourisme et des loisirs. Il est très difficile d'évaluer les pertes économiques dues à un incendie, en raison de la difficulté D'appréhender les coûts indirects (**Colin et al, 2001**)

I-5-4-Sur le sol

Le feu altère les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol par la chaleur qu'il dégage, le déplacement et la transformation des éléments nutritifs qu'il entraîne et par la réduction de la couverture morte qu'il produit.

Un incendie ne cause généralement pas d'altération majeure des propriétés physiques du sol. S'il est intense et entraîne une exposition du sol minéral et en réduit la matière organique, il peut affecter la Température, la texture, la structure, la densité et l'humidité du sol (**Rahmani, 2022**).

I-5-5-L'émission d'une forte quantité de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère

Les arbres sont des puits de carbone naturels, Autrement dit, tout au long de sa vie, un arbre stocke une partie de nos émissions de gaz à effet de serre. Or, à sa mort qu'elle soit naturelle ou provoquée par un feu de forêt -l'arbre rejette l'ensemble du carbone qu'il a séquestré dans l'atmosphère, contribuant ainsi au réchauffement climatique (**Justrine, 2023**).

I-5-6-Pertes économiques

Les incendies de forêt peuvent causer d'importantes pertes économiques en détruisant les ressources naturelles, les cultures agricoles, les infrastructures et en affectant les industries locales comme le tourisme.

I-6-Les facteurs des incendies

I-6-1-Les facteurs climatiques

Les facteurs climatiques sont parmi les principaux éléments qui influent sur les incendies de forêt, jouant un rôle crucial dans la détermination des conditions favorables à l'ignition et à la propagation de ces incendies. Ces facteurs comprennent la température, l'humidité, les vents et les précipitations. Ils interagissent de manière complexe pour créer un environnement où les forêts sont facilement inflammables et où le feu se propage rapidement.

Tableau 03 : Influence des facteurs climatiques sur les conditions du feu (Messafri, 2018).

Facteurs climatiques	Influence sur les conditions du feu
Précipitation	Rôle décisif dans le bilan hydrique des sols et du végétal.
Température de l'aire	Augmentation de la température du combustible ' diminution de la teneur en eau et réduction de l'humidité atmosphérique lorsque la température de l'aire augmente.
Humidité atmosphérique	Réduction de la teneur en eau du combustible si l'aire est sèche.
Vitesse du vent	Accélération du dessèchement des combustibles ' fléchissement de la colonne de convection ' transport de matières enflammées en avant de l'incendie (saute de feu), accélération de la propagation de l'incendie.
Direction du vent	Vent dirigeant l'incendie vers des zones de propagation illimitées (boisement d'un seul tenant).
Saison	Au printemps dessèchement des combustibles de surface : en été augmentation des combustibles secs et abaissement de la nappe phréatique.

I-6-2-Les facteurs topographiques

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

I-6-3-La végétation forestière en tant que combustible

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

I-6-4-Les conditions édaphiques

Les conditions édaphiques sont essentielles, car la texture des sols, leur structure, la qualité de leur complexe argilo humique, conditionnent leur aptitude à conserver une réserve hydrique

plus ou moins importante, et donc à rendre une espèce végétale moins inflammable alors que la sécheresse climatique sévit (Megrerouche, 2006).

Les facteurs des incendies de forêt jouent effectivement un rôle crucial dans le comportement de ces incendies.

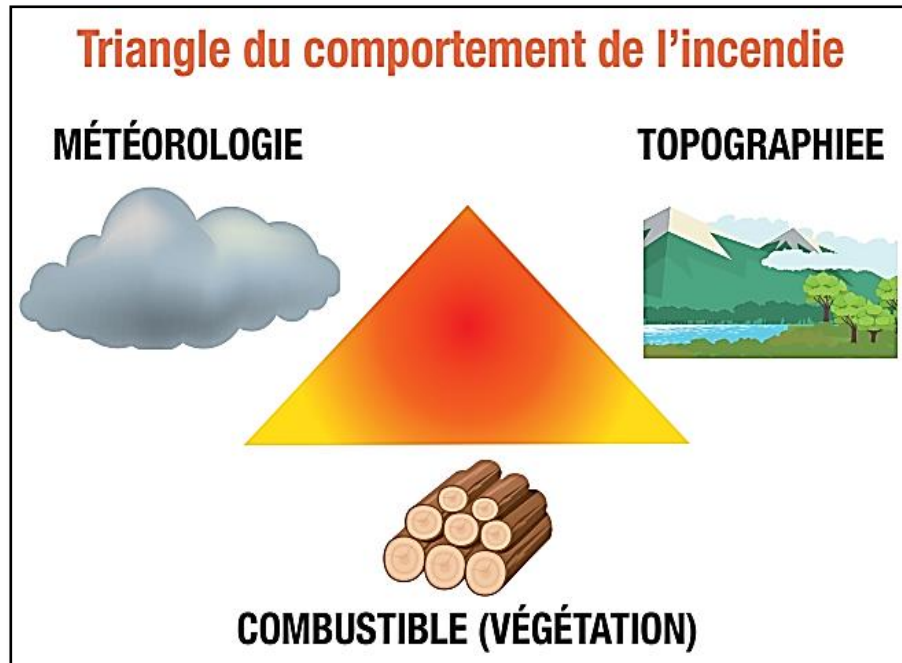


Figure 03 : schéma du Triangle du comportement de l'incendie (Plana et al, 2016).

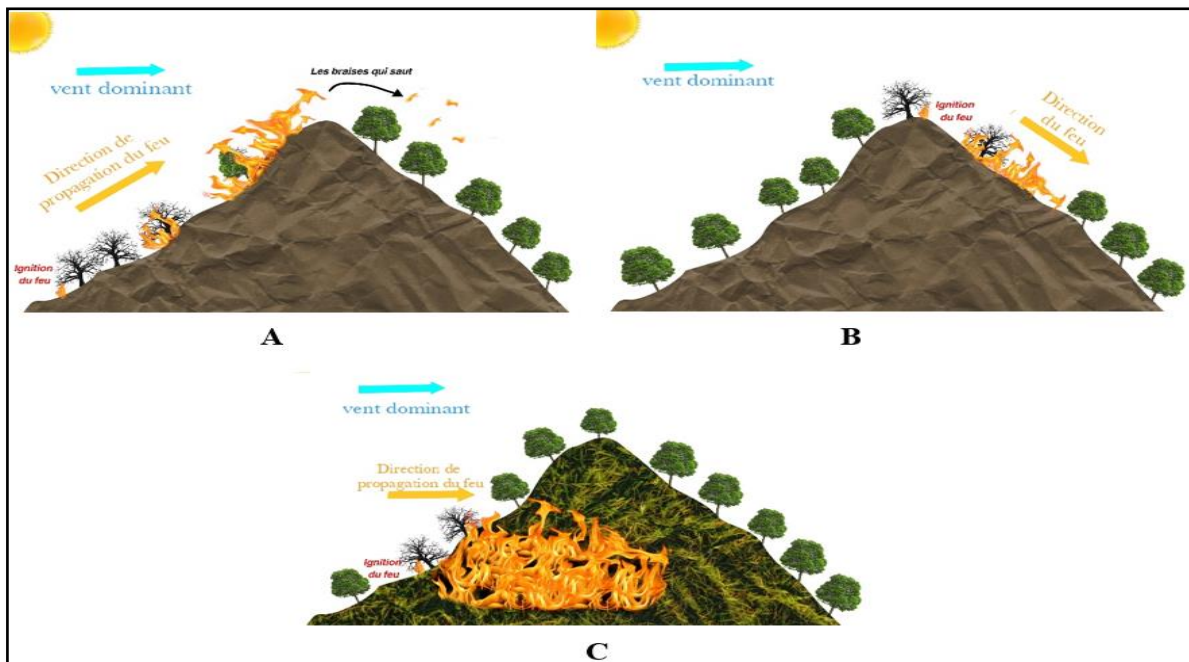
I-7- Les mouvements d'un feu de forêt

Les mouvements des feux sont une combinaison complexe de différents phénomènes physiques et chimiques qui se déroulent dans un volume délimité par le combustible et l'air ambiant qui l'enveloppe (Sullivan, 2017). En a quatre (04) mouvements d'un feu

- Mouvement horizontal.
- Mouvement vertical.
- Mouvement latéral.
- Mouvement de saute.

Le mouvement des feux dépend de plusieurs facteurs (vent, type de végétation et sa densité, le relief) qui ont des influences importantes sur le comportement de ce phénomène dans chaque phase de la propagation. Comprendre comment les différents facteurs environnementaux et les facteurs liés directement aux combustibles influent sur la dynamique des feux aboutit à prédire finalement le comportement d'un feu, sa direction et sa vitesse de propagation. (Carmen, 2021).

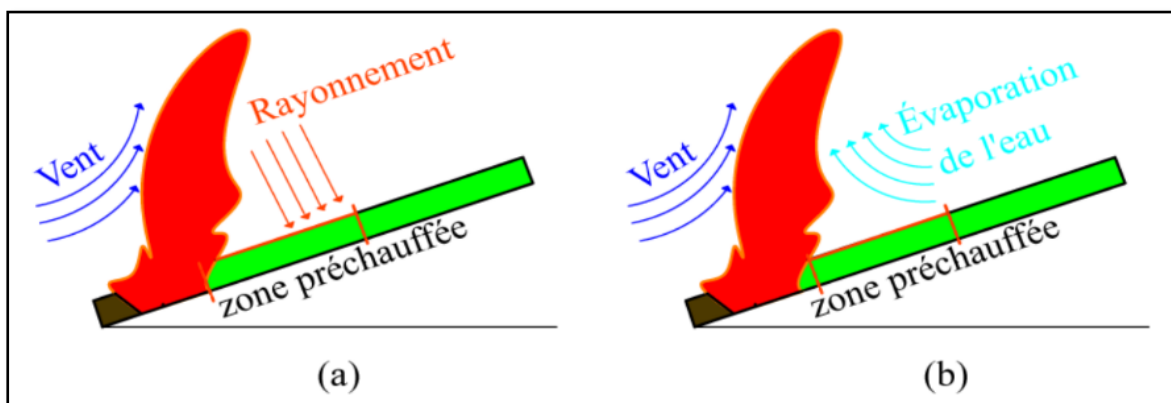
Les flammes peuvent en effet parcourir indifféremment la végétation vivante (branches, feuilles) ou morte (aiguilles, arbres morts sur pied), tout comme les infrastructures humaines implantées en zone forestière (Alp 'Géorisques & Graphies, 2002). En plus du vent et de la pente, ce processus peut contribuer au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes et au déclenchement de foyers secondaires (Mouvement de saute).



A) mouvement vertical et de saute, B) mouvement de latérale, C) mouvement d'horizontale.

Figure 04 : Les mouvements d'un feu de forêt.

L'ascendance de l'air chaud entraîne ainsi un mouvement de l'air ambiant et s'accompagne d'un panache au-dessus du foyer. Ce panache est visible, car les fumées contiennent des particules solides et liquides en suspension riches en carbone ou en eau (les aérosols) qui diffusent la lumière. Le feu crée donc un puissant mouvement d'air chaud ascendant ainsi que des mouvements d'air horizontaux alimentant la flamme et le panache. Au fur et à mesure que le panache entraîne l'air ambiant, il se refroidit. À une certaine altitude, un équilibre de densité est finalement atteint entre le panache et l'air ambiant ; le mouvement ascendant des fumées cesse, et elles sont ensuite transportées horizontalement par le vent (CURT et al, 2022) .



- (a)-Réchauffement du combustible par les flux de chaleur absorbée par la végétation.
- (b)- l'évaporation de l'eau du combustible.

Figure 05 : Les mouvements d'un feu (Carmen, 2021).

I-8-Mécanisme de la lutte

Il existe deux (02) volets principaux dans la lutte contre les incendies des forêts :

I-8-1- La prévention

- Une évaluation précise et quotidienne du risque pour mobiliser des moyens dimensionnés aux événements (Vaucluse, 2018).
- Les opérations préventives à mener se résument sur les aménagements de (DFCI), la surveillance et l'alerte, la cartographie de la nature et du niveau du risque et l'éducation et la sensibilisation du publique (Dubourdiou, 1997).
- Des campagnes de sensibilisation(Vaucluse, 2018).

I-8-2- Les aménagements de DFCI

• Les infrastructures routières

Les pistes permettent d'accéder aux écloisions et sur le front du feu, ainsi qu'aux points d'eau pour le ravitaillement (Chervou ,1998).

• Les points d'eau

L'eau étant le principal moyen d'extinction des feux deforêt, il faut se préoccuper attentivement de l'approvisionnement en eau desvéhicules terrestres et dans quelques pays par voie aérienne (Kern, 1975).

• Les pistes forestières

Les pistes permettent d'accéder aux écloisions et sur le front du feu, ainsi qu'aux points d'eau pour le ravitaillement (Chervou ,1998).

- **Les drones**

Cette technologie permet des capacités énormes pour détecter et identifier les incendies à leurs premiers stades, dessiner des cartes précises pour déterminer leurs emplacements et les éteindre avec efficacité et efficience (**Brown, 2018**).

II-Généralités sur le SIG

II-1- Le système d'information géographique SIG

Un système d'information géographique est un système informatique conçu pour permettre aux utilisateurs de collecter, gérer et analyser de grandes quantités de données géo référencées et associées à des caractéristiques spatiales (**Cotter et al, 1988**).

Et Robert MEAILLE voit que, Les développements ont contribué à orienter la cartographie systématique vers des systèmes de bases de données appelées Systèmes d'Information Géographique (SIG) (**Méaille, 1988**).

II-2-L'objectif de système d'information géographique SIG

La mise en place d'un système d'information géographique (SIG) vise des objectifs de court et long terme. À court terme, le SIG répond aux besoins opérationnels et quotidiens (cartographie thématique, gestion technique ou analyse) ; à long terme, il vise la création de bases de données fiables et pointues (**Franck, 2009**).

Les SIG sont utilisés pour résoudre des problèmes de recherche, de planification et de gestion complexes (**Cotter et al, 1988**).

III-Généralités sur la télédétection

III-1- La télédétection

C'est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans aucun contact matériel avec ceux-ci (**journal officiel du 11 décembre 1980 in bouleriaie, 2008 in Tir, 2016**).

III-2-Les objectifs des télédétections

- Savoir ce qu'est l'imagerie hyper spectral et la différence avec l'imagerie multi spectrale.
- Comprendre la signification d'une signature spectrale et comment on peut l'utiliser pour identifier des types de surfaces (souvent charte grise dans les instruments, capteur dessus qui mesure la lumière qui arrive).

- Savoir comment prendre une mesure de réflectance dans des conditions de terrain.
- Savoir ce qu'est un schéma d'échantillonnage (**Tellez, 2017**).

IV-Les intérêts de la carte de risque

- Permettent une compréhension pratique de l'état du risque (**Cyril, 2000**).
- Décrivent les risques à grande échelle (**Cyril, 2000**).
- Autorisent un lien direct entre l'état du risque et d'autres informations (**Cyril, 2000**).
- La carte a une force métaphorique, elle rend les situations ou les phénomènes explicites sous une forme directement compréhensible par un regard individuel (**Pierre le Bourhis, 2003**).
- Participent à la définition et à la mise en œuvre de l'action publique par l'intermédiaire de différents médiateurs (**Pierre le Bourhis, 2003**).

Pour être efficace, la cartographie des risques doit respecter trois conditions : être exhaustive et précise, être formalisée et accessible et être évolutive (**Cybersécurité, 2020**)

Matériels et Méthode

I- La situation géographique de la zone sud du massif Collo

La région de massif de Collo dans le nord est algérienne à environ 500 km à est d'Alger (**Bouziza & Guelmaoui, 2021**), Entre 6° et 7° de l'Est méridien et entre 36° et 37° Nord, une chaîne de l'Atlas Tellien oriental (**Agaguenia, 2018**).

Située massif Collo à son extrême ouest Skikda, bordée au nord par la mer, à l'est et au sud-est par les communes de Aïn Zouit, Bouhdjata, Sidi Mezghich et Béni Ouelbane relevant toutes de la wilaya de Skikda, et à l'ouest et au sud-ouest par la wilaya de Jijel (**Tameen, 2007**).

La région sud se trouve à 10 kilomètres au sud de la ville de Collo et comprend 05 communes : Tamalous, Bin El Ouiden, Ain Kechra, Ouldja Boulballout, Oum Toub.

Les coordonnées de la région sud

- Latitude : 36°37' et 37°5' Nord.
- Longitude : 6°45' et 6°12' Est.
- Altitude : 52 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les limites de la région sud

- Au Nord par les communes d'oued zhour, Beni Zid et karkera.
- Au Sud par la commune Beni Ouilbane.
- A l'Est par les communes Sidi Mezghiche, Bouchtata, Ain Zouit.
- A l'Ouest par la wilaya de Jijel.

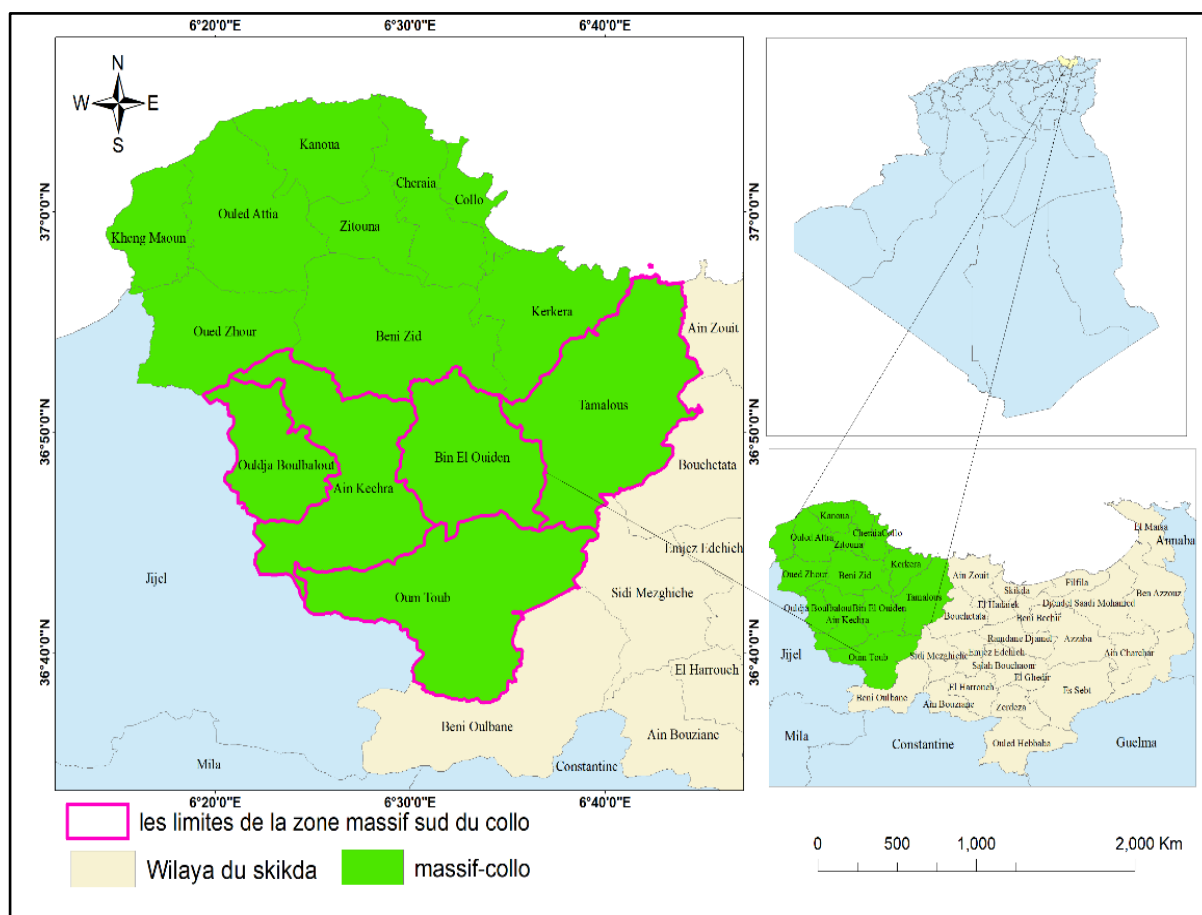


Figure 06 : La situation géographique du massif sud de Collo.

II-Les caractères physique de la région sud

II-1- Les reliefs

Il se caractérise par un terrain accidenté " les montagnes et les plaines". La rugosité de la région est due à ses pentes raides plutôt qu'à ses altitudes maximales, ce qui a créé des sentiers accidentés (Tameen, 2007). Elle se distingue également par ses pentes abruptes, avec une pente moyenne de plus de 20 % et une dénivellation atteignant 600 mètres.

Les plaines de la vallée de l'oued Guebli débutent dans la région d'Oum Toub et s'élargissent au niveau de Tamalous.

II-2-Le sol

La partie sud est surmontée par une couche semi-perméable constituée de limons argileux et sableux (Chabour, 2004).

Il s'agit surtout des sols bruns forestiers et de sols minéraux bruts ou peu évolués (Benamira, 2017).

II-3- La couverture forestière

Présente une richesse taxonomique considérable arborescente, arbustive et herbacée, à valeur patrimoniale certaine (**Boucenna, 2023**).

La pluviométrie ce qui permet le développement d'une végétation très dense et souvent impénétrable. Le couvert végétal de la région est constitué essentiellement de chênes lièges, chênes zéïnes, pins maritimes ...etc., avec de vaste plantation de lentisques, d'oliviers et d'autres arbres fruitiers (**Bouttine & Serir, 2002**).

II-4-Le climat

La zone est caractérisée par un climat méditerranéen. Cela signifie des étés chauds et sec, et des hivers doux et humides. En général c'est un climat méditerranéen de type humide (**Boucenna, 2023**).

II-4-1-La précipitation

La moyenne des précipitations en 2013 est d'environ 669,2 mm (**meteoblue.com**).

II-4-2-La température

Les températures estivales peuvent atteindre des niveaux élevés, tandis que les hivers sont plus doux en comparaison. La température moyenne varie de 25° (**Boucenna, 2023**).

II-4-3-Le brouillard

Est observé essentiellement en février et avril ; il est très faible et inexistant pendant L'automne et l'hiver (**Amieur, 2005**).

II-4-4-Les vents

Dominants sont d'Ouest et de l'Est, Les vents d'Ouest sont les plus fréquents en hiver surtout, ce sont souvent des vents violents. Du sud-ouest souffle au printemps et en été un vent chaud et sec : le sirocco. On notera la présence de brise de mer en été (**Boucenna, 2023**).

III-Objectif de l'étude

Notre objectif est de créer une carte des risques des incendies de forêt (IR) illustrant les zones exposées aux risques d'incendie élevés, moyens et faibles, dans la région sud du massif de Collo, Skikda.

IV-Outils utilisé pour la carte des risques

IV-1-Logiciel ArcGIS

Dans cette étude, on a utilisé le logiciel **ArcGIS** version 10.4.1, l'un des plus populaires des Systèmes d'Information Géographique (SIG) produits par la société Esri, pour la cartographie et la création des données géographiques, en traitant des données non compressées. Ce logiciel est composé de plusieurs blocs, il suffit d'utiliser :

- ✓ Le bloc "ArcMap"
- ✓ Le bloc "ArcToolbox"
- ✓ Le bloc "ArcCatalog"

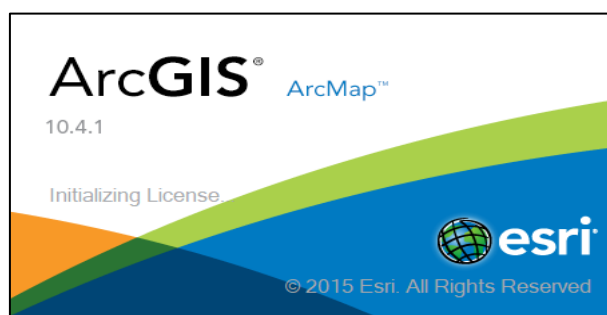


Figure07: ArcGIS 10.4.1.

IV-2-Google Earth Pro

Google Earth Pro est un logiciel avancé d'exploration et d'analyse de données géographiques. Il utilise des technologies de pointe en matière d'imagerie aérienne et de cartographie spatiale pour afficher des données géographiques en 2D et 3D de manière précise et réaliste.

IV-3-Les données

- Modèle numérique de terrain (MNT).
- Image satellitaire.
- Les données vectorielles.

IV- La méthodologie adoptée dans cette étude

IV-1-Les traitements des données

De nombreuses informations peuvent être dérivées du terrain selon la méthodologie adoptée dans cette étude, Les cartes qui seront dérivées sont les suivantes : carte des pentes, carte d'exposition et carte de la topo-morphologie. Avant de on a penché sur les détails de ces cartes, on est allé d'abord aborder :

IV-1-1-Traitement de MNT

La préparation d'un modèle numérique de terrain (MNT) nécessite l'utilisation de techniques avancées pour collecter les données géographiques et les convertir en un ensemble des données numériques.

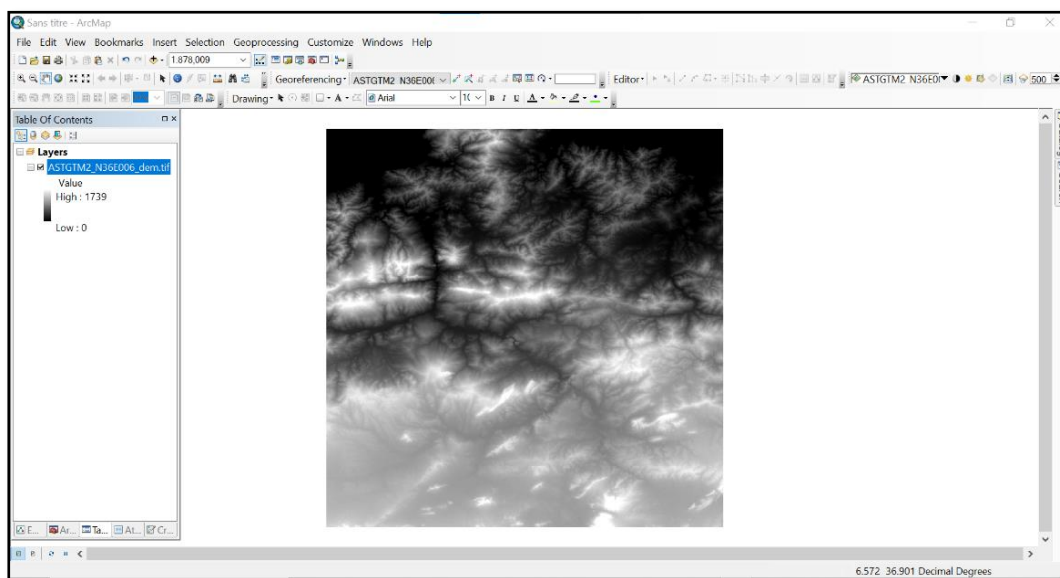


Figure 08 : Le modèle numérique de terrain de cette étude.

On suit les étapes de figure 09 après avoir collecté les données topographiques :

✓ **Découpage de MNT**

Conformément aux étapes suivantes:

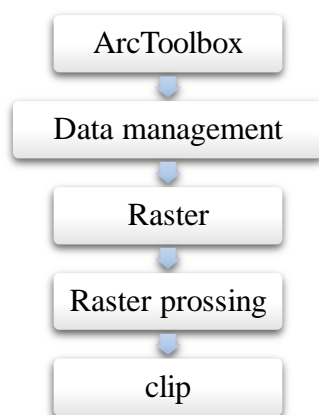


Figure 09 : Les étapes de la procédure de clip dans ArcGIS 10.4.1

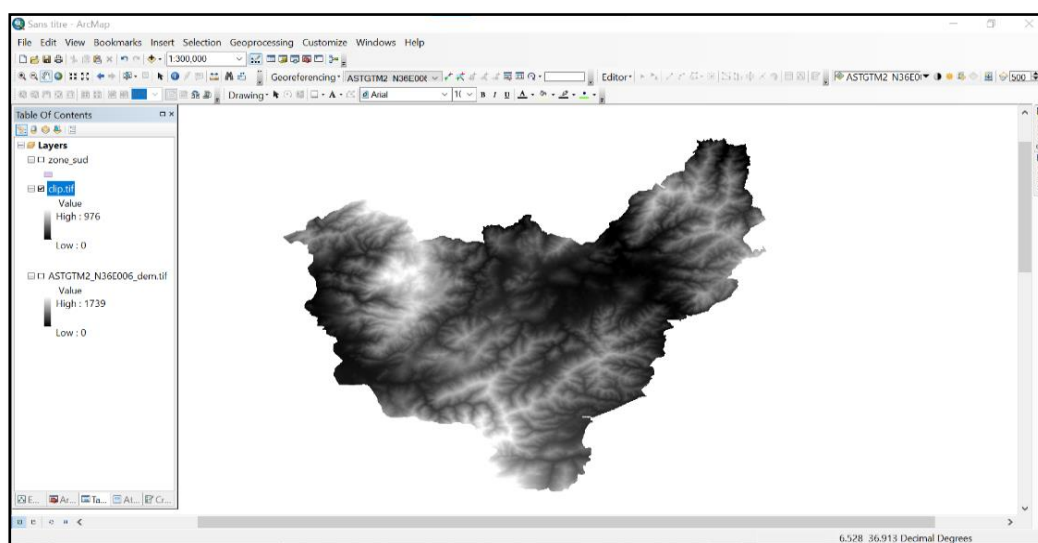


Figure 10 : Découpage du modèle numérique de terrain

✓ Projection de MNT

On a commencé d'abord par insérer une image de la région en DEM, doit être projeté dans le système de coordonnées WGS-1984-UTM Zone 32 Nord, en suivant les étapes de figure 11 :

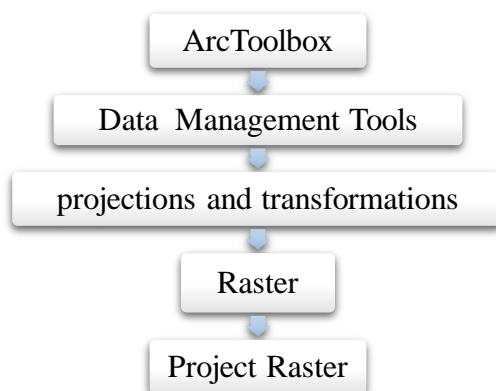


Figure 11 : La procédure de la projection MNT dans ArcGIS 10.4.1.

IV-2-Traitement des indices

L'établissement de la carte de risque d'incendie de forêts fait appel à l'application d'un modèle mis en place par Dagorne et le testé sur les massifs forestiers de la région méditerranéenne (Dagorne et al, 1994). Ce modèle sera appliqué sur notre zone d'étude la zone sud du massif de Collo.

Le modèle applique les trois (03) principaux facteurs pour l'évaluation du risque d'incendie de forêt, à savoir : la topo-morphologie, le combustible et les activités humaines. Ce modèle repose sur la formule 01 :

$$\mathbf{IR = 5. IC + 2. IH + IM01}$$

Où

IR : Indice de risque de feu de forêt

IC : Indice de combustibilité (facteur lié au combustible)

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

IM : Indice topo-morphologique (facteur lié à la topo-morphologie du terrain)

La caractérisation de cet indice est basée sur la variabilité spatiale du risque d'incendie dont la détermination est issue des paramètres physiques intervenant dans le modèle choisi (Aouda & mahdi, 2023).

IV-2-1-Indice topo-morphologique IM

Il s'agit d'une mesure utilisée pour évaluer la contribution des facteurs topographiques au risque de feux de forêt. Il y a trois (03) paramètres topographiques interviennent dans le modèle : la pente, l'exposition et la topo-morphologie. Tous ces paramètres sont déduits à partir du modèle numérique de terrain MNT de la région, Cet indice est exprimé par la relation 02 :

$$\mathbf{IM = 3p + (m. e)02}$$

Où

IM : Indice topo-morphologique

p : la pente

m : la topo-morphologie

e : l'exposition

IV-1-2-Elaboration de carte des pentes

La carte des pentes favorise la propagation ascendante du feu en transférant la chaleur entre la zone brûlée et la couverture végétale saine.

Par conséquent, on a constaté que la pente joue un rôle très important dans la propagation de l'incendie. Plus la pente est raide, plus la vitesse de propagation du feu est élevée et plus le risque de propagation est important.

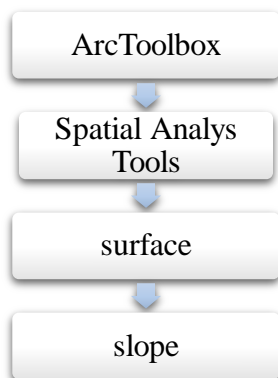


Figure 12 : Les étapes du prétraitement de la création de carte des pentes dans ArcGIS 10.4.1.

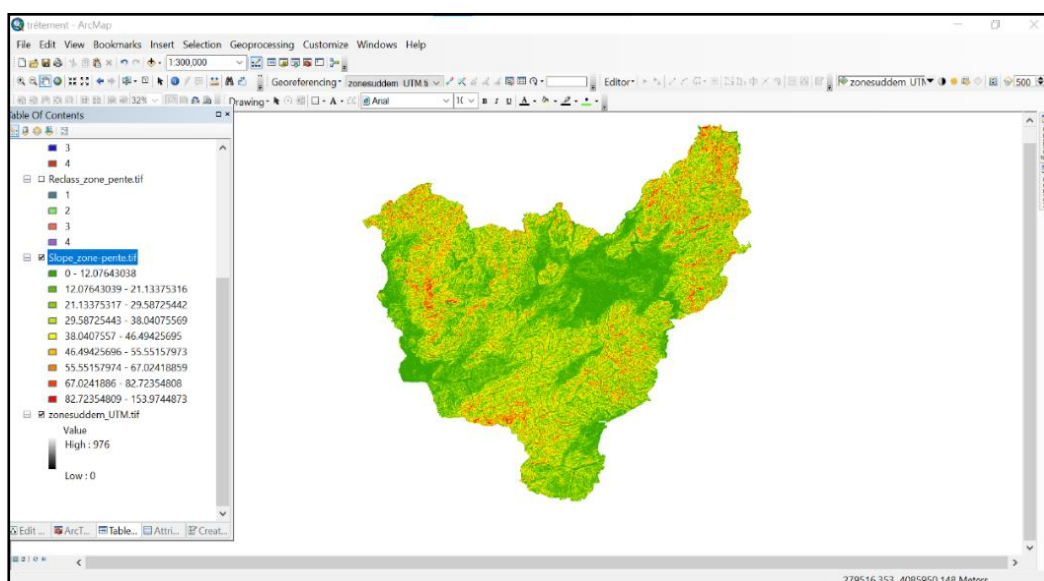


Figure 13 : La carte générée après avoir effectué les étapes.

On a procédé aux étapes secondaires suivantes :

➤ **Classification**

En fonction du résultat obtenu, on a 4 classes, en suivant les étapes figure 14 :

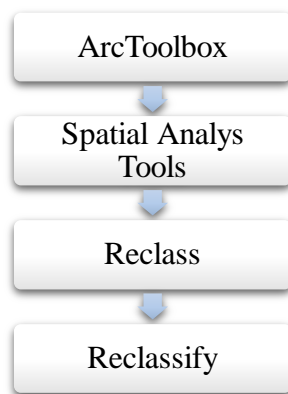


Figure 14 : Les étapes de classification de pente dans ArcGIS 10.4.1

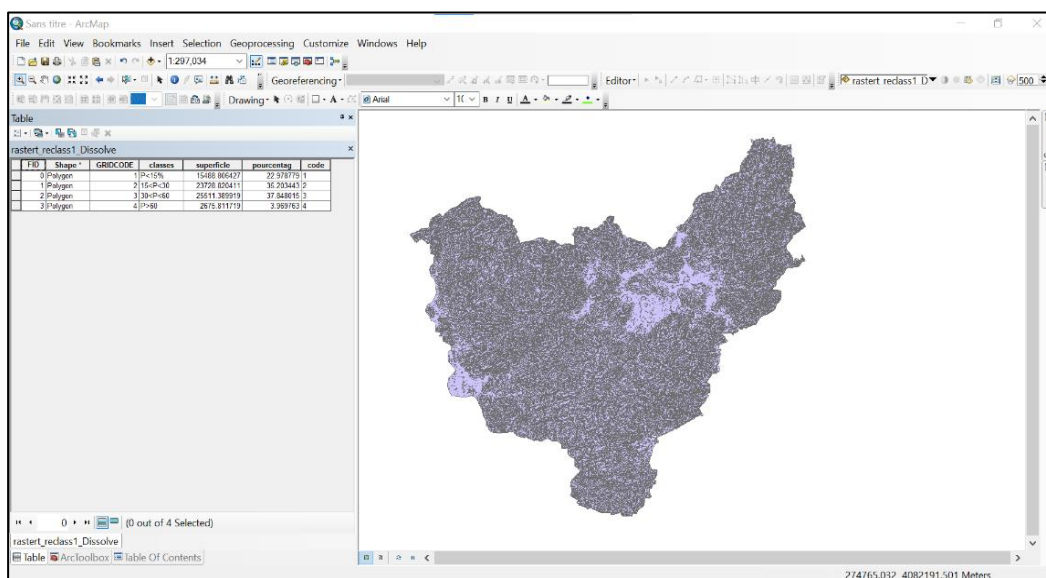


Figure 15 : Les classifications utilisées pour générer la carte des pentes.

➤ **Conversion des données raster en données vectorielles (vectorisation)**

Ensuite, la carte est convertie du format raster au format vectoriel la figure 16 :

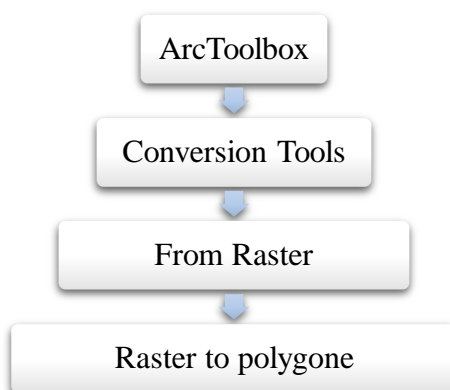


Figure 16 : La procédure de la vectorisation d'un raster dans ArcGIS 10.4.1

➤ **Dissolve la zone**

Une fois la conversion terminée, on a effectué la dissolution en suivant les étapes suivantes :

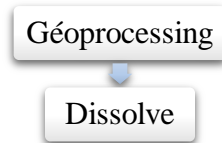
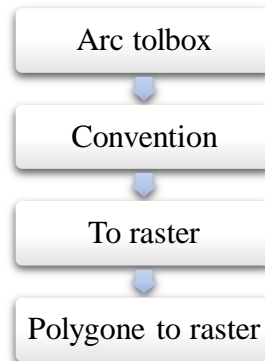


Figure 17 : Les étapes de dissolve en ArcGIS 10.4.1.

➤ To raster

Finalement, transférer les résultats du vecteur au raster en suivant les étapes Figures 18 :



Figures 18 : Les étapes de conversion des données vectorielles en données raster

IV-1-3- Elaboration de carte topo-morphologie

S'appuyant sur les étapes de préparation de la carte des pentes et en utilisant les quatre classifications de la figure 19, une carte topo-morphologique a été élaborée.

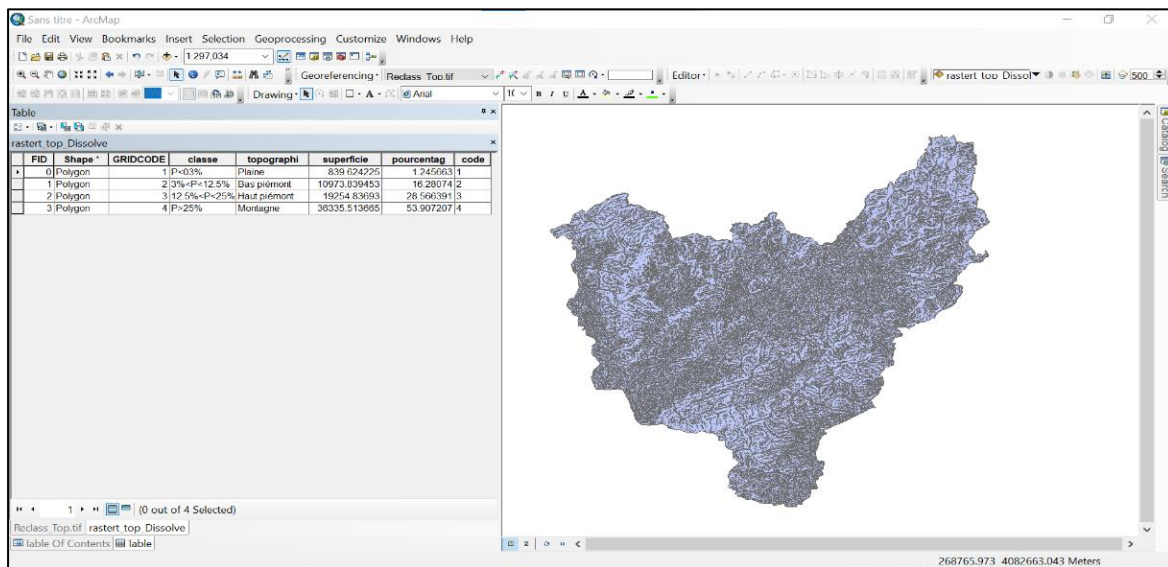


Figure 19 : Les classifications utilisées pour générer la carte de topo-morphologie.

IV-1-4- Elaboration de la carte d'expositions

La carte d'exposition est élaborée à l'aide de données du MNT, en calculant les surfaces et les pourcentages des quatre (04) catégories d'exposition : nord, est, ouest et sud. la réalisation de la carte de l'expositions a été faite par les étapes figures 20 :

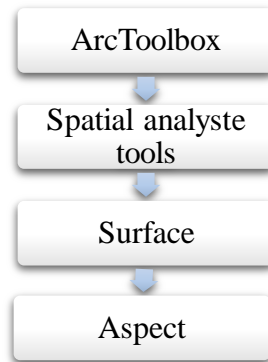


Figure 20 : Les étapes Aspect pour générer une carte des expositions.

On effectue donc les mêmes étapes que celles mentionnées sur la carte de pente et la carte de la topo-morphologie et le classement des données s'effectue en fonction de l'exposition décrite dans la figure 21.

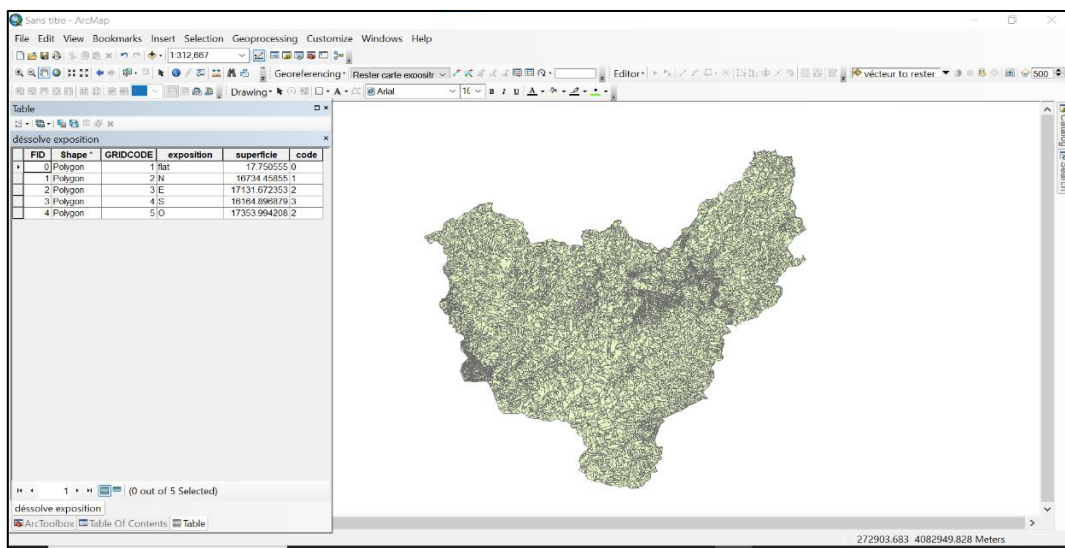


Figure 21 : Les classifications utilisées pour générer la carte des expositions

Pour appliquer la relation $IM = 3p + (m. e)$, on a procédé comme figure 22 :

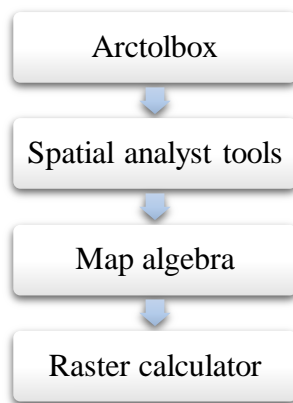


Figure 22 : les étapes d'insertion et de calcul de l'équation précédente.

IV-2-2-Indice de combustibilité IC

La combustibilité dépend de la structure et des espèces dominantes dans la forêt. Cette formule détermine le niveau de sévérité potentielle d'un incendie qui a été proposée par (Mariel, 1995). En fonction d'une carte des peuplements :

$$IC=39+0,23 BV (E1+E2 - 7,18)03$$

Où :

IC : Indice de Combustibilité.

BV : Représente le biovolume de la formation végétale (calculé à partir du biovolume combustible par addition des pourcentages de recouvrement de chacune des strates biologiques à partir des relevés terrains, Le biovolume intervient de façon différente suivant la valeur de E1+E2.

Avec :

E1 : représente les notes de combustibilité pour les ligneux hauts les plus dominantes.

E2 : représente les notes de combustibilité pour les ligneux bas ou les herbacées les plus dominantes.

Tableau 04 : Les notes de combustibilité des principales espèces dominantes de la végétation méditerranéenne (Cemagref, 1990).

LIGNEUX HAUT			
Arbousierà (<i>Arbutus unedo</i>)	5	Châtaignier (<i>Castanea Sativa</i>)	5
		Cèdre (<i>Cedrus atlantica</i>)	6
		Cyprès (<i>Cupressus macrocarpa</i>)	6
Chêne vert (<i>Quercus ilex</i>)	7	Erable (<i>Acer palmatum</i>)	5
		Epicéa (<i>Picea abies</i>)	6
		Noisetier (<i>Corylus avellana</i>)	2
Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>)	2	Peuplier (<i>Populus nigra, poplar</i>)	2
		Chêne pubescent (<i>Quercus pubescens</i>)	5
		Pin d'Alep (<i>Pinus halepensis</i>)	7
Ome	2	Pin noir (<i>Pinus nigra Arn.</i>)	7
		Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	6
		Pin pignon (<i>Pinus pinea</i>)	7
Pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>)	7	Pin de salzman (<i>Pinus salzmanni</i>)	7
		Frêne (<i>Fraxinus spp.</i>)	2
		Robinier (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	2
Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	7	Saule (<i>Salix alba, Willow</i>)	2
		Olivier (<i>Olea europea</i>)	5
		Sapin (<i>épicéa</i>)	6

LIGNEUX BAS			
Ajonc épineux (<i>Ulex europaeus</i>)	8	Amélanchier (<i>Amelanchier laevis</i>)	3
		Bruyère arborescente (<i>Erica arborea</i>)	8
		Bruyère multiflore (<i>Erica multiflora L.</i>)	6
Bruyère cendrée (<i>Erica cinerea L.</i>)	6	Bruyère à balais (<i>Erica scoparia</i>)	7
		Buis (<i>Buxus sempervirens</i>)	5
		Canne de Provence (<i>arundo donax</i>)	5
Callune (<i>Calluna vulgaris</i>)	6	Ciste blanc (<i>CISTUS albidus</i>)	6
		Ciste à f. de sauge (<i>cistus salvifolius</i>)	3
		Epine du christ (<i>Paliurus spina-christi</i>)	3
Eglantine (<i>Rosa canina L.</i>)	5	Genet à balais (<i>Cytisus scoparius L.</i>)	5
		Genet d'Espagne (<i>Spartium junceum</i>)	5
		Genet purgatif (<i>Cytisus purgans</i>)	7
Genet scorpion (<i>Genista scorpius</i>)	8	Genévrier commun (<i>Juniperus communis</i>)	7
		Genévrier oxycèdre (<i>Juniperus oxycedrus</i>)	7
		Lavande stéchade (<i>Lavandula stoechas</i>)	5
Lavande à large f. (<i>Lavandula litifolia.</i>)	5	Chêne kermès (<i>Quercus coccifera</i>)	8
		Pistachier lentisque (<i>Pistacia lentiscus</i>)	4
		Prunellier (<i>Eriogaster catax</i>)	4
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	5	Ciste de Montpellier (<i>Cistus monspeliensis</i>)	3
		Ronces (<i>Rubus fruticosus</i>)	6
		Staeheline (<i>Staehelina dubia</i>)	3
Térébinthe (<i>Pistacia terebinthus</i>)	4	Filaria (<i>Phillyrea latifolia</i>)	5
		Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	4

HERBACEES			
Agrostis	1	Anthyllide (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	1
		Aphyllanthe (<i>Aphyllanthes</i>)	1
		Avoine (<i>Avena sativa,)</i>	1
Brachypode des bois (<i>Brachypodium sylvaticum</i>)	1	<i>Brachypode penné</i> (<i>Brachypodium pinnatum</i>)	1
		Brachypode rameux (<i>Brachypodium ramosum</i>)	1
		Brome érigé (<i>Bromus erectus</i>)	1
Canche flexueuse (<i>Deschampsia flexuosa</i>)	1	Dactyle (<i>Dactylis glomerata</i>)	1
		Fétuques (<i>Festuca</i>)	1
		Fougère aigle (<i>Pteridium aquilinum</i>)	2
Fromental (<i>Arrhenatherum elatius</i>)	1	Inule visqueuse (<i>Inula viscosa</i>)	1

➤ **Calcul de NDVI**

Le NDVI est défini comme la différence entre la réflectance du rouge et de l'infrarouge proche (NIR) divisée par leur somme (Tucker, 1979).

Il est calculé à partir de ces valeurs individuelles comme suit l'équation :

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

Où :

PIR : La bande Proche-Infra-Rouge.

R : La bande rouge.

Pour calculer l'indice de végétation verte naturelle dans ArcGIS (NDVI) à l'aide de la logistique, vous pouvez suivre les étapes suivantes :

- Windows
- Image analysis
- On clique sur NDVI

Une fois ces étapes terminées, on obtient le NDVI souhaité pour compléter le calcul de la relation $IC=39+0,23 BV (E1+E2- 7,18)$.

IV-2-3-Indice d'occupation humaine IH

Cet indice est basé sur la densité de présence humaine et son activité dans la région. Pour mieux comprendre l'élément d'activité humaine, on a proposé une approche bidimensionnelle qui se concentre sur la source des incendies et les risques associés.

En résumé, les deux indices sont combinés pour calculer Indice d'occupation humaine selon l'équation suivante :

$$IH = IV + 2 ID \quad \dots\dots 04$$

Où

IV : indice de voisinage.

ID : indice de présence humaine.

➤ **L'indice de voisinage (IV)**

Est basé sur l'impact anthropique sur le proche voisinage forestier, Cela a été créé par buffers. Pour la zonation pour les bâtisseurs qui on a intéressent en les ajoutant 250-500-750-1000-1250. On est allé remplacer les valeurs de la distance par des code 1 à 5.

➤ **L'indice de présence humaine (ID)**

La prise en compte de l'infrastructure routière (routes, pistes, sentiers) est essentielle, bien que les incendies de forêt soient plus fréquents à proximité de ces voies d'accès.

Créer des buffers et on a réalésons la zonation pour les routes selon les valeurs :150-300-450-600-750. On est allé remplacer les valeurs de la distance par des code 1 à 5.

Le schéma ci-dessous résume les points clés abordés précédemment.

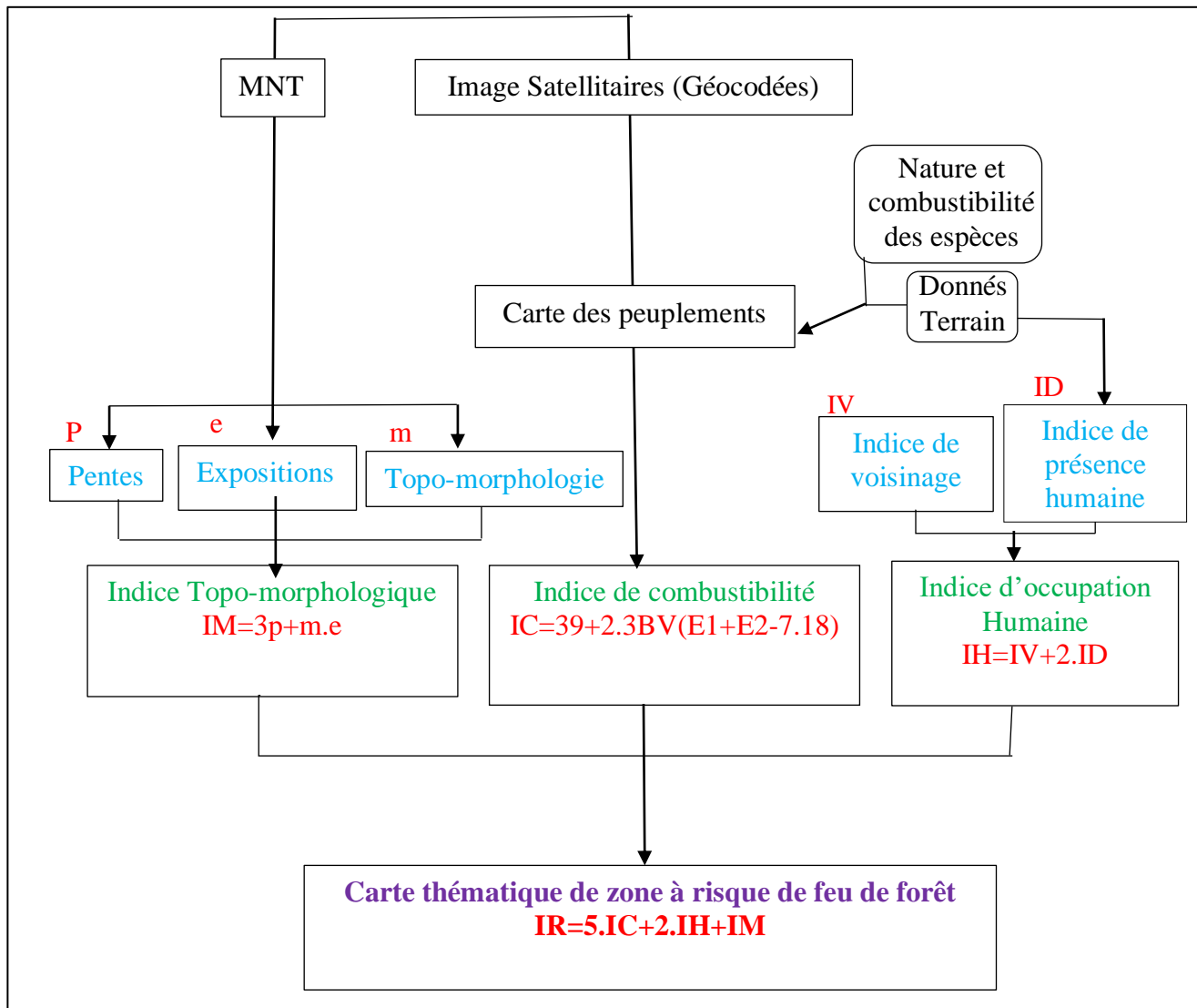


Figure 23 : L'organigramme de la procédure de calcul de l'indice de risque de feu de massif sud Collo.

Résultats et Discussion

I- La cartographie du risque des incendies de forêt

Grâce à l'outil SIG et au modèle de calcul de risque des incendies, Différentes cartes ont été développées pour l'indice de risque lié à la végétation, au relief et à la présence humaine. Ces cartes ont ensuite permis de proposer des aménagements appropriés en fonction des résultats obtenus.

I-1-Indice de Topo-morphologie (IM)

A partir du modèle numérique de terrain (MNT), une carte des pentes, de l'exposition des pentes et de topo-morphologies a été dérivée. Ces trois (03) paramètres topographiques ont été utilisés pour calculer l'indice topo-morphologique, qui est l'un des paramètres retenus et utilisés dans l'approche méthodologique.

I-1-1- Carte des pentes

Comme mentionné précédemment, la carte des pentes est un outil essentiel pour comprendre la topographie de la zone d'étude et identifier les risques potentiels. Ces cartes illustrent les angles d'inclinaison de la surface terrestre dans différentes zones. Quatre (04) catégories de pente ont été sélectionnées en fonction de leur occurrence, de leur fréquence d'occurrence, de leur distribution spatiale et après calcul de la surface de chaque catégorie, on a obtenu les résultats présentés dans le tableau (05).

Tableau 05 : Les classes de la carte des pentes

Classes des pentes	Superficie en ha	Pourcentage %	code
P<15%	15488.81	22.97	1
15%<P<30%	23728.82	35.20	2
30%<P<60%	25511.39	37.84	3
P>60%	2675.812	3.96	4

Où :

- P < 15% : pente faible sans incidence sur la propagation.
- 15% < P < 30% : pente moyenne provoquant une accélération modérée du front de feu.
- 30% < P < 60% : pente forte avec accélération importante du front de feu.
- P > 60% : pente très forte avec risque de turbulence, saute de feu, embrasement.

Afin de rendre le tableau plus clair, Et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau.

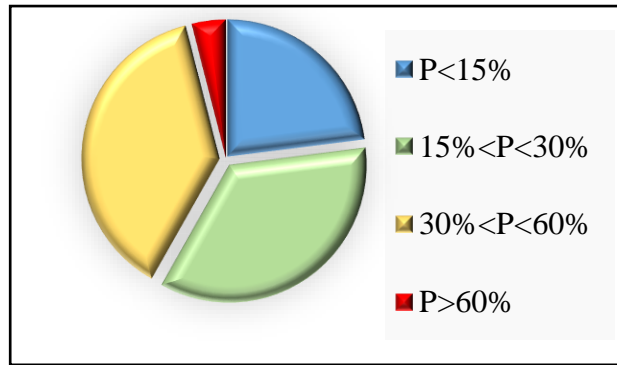


Figure 24 : Répartitions des classes des pentes

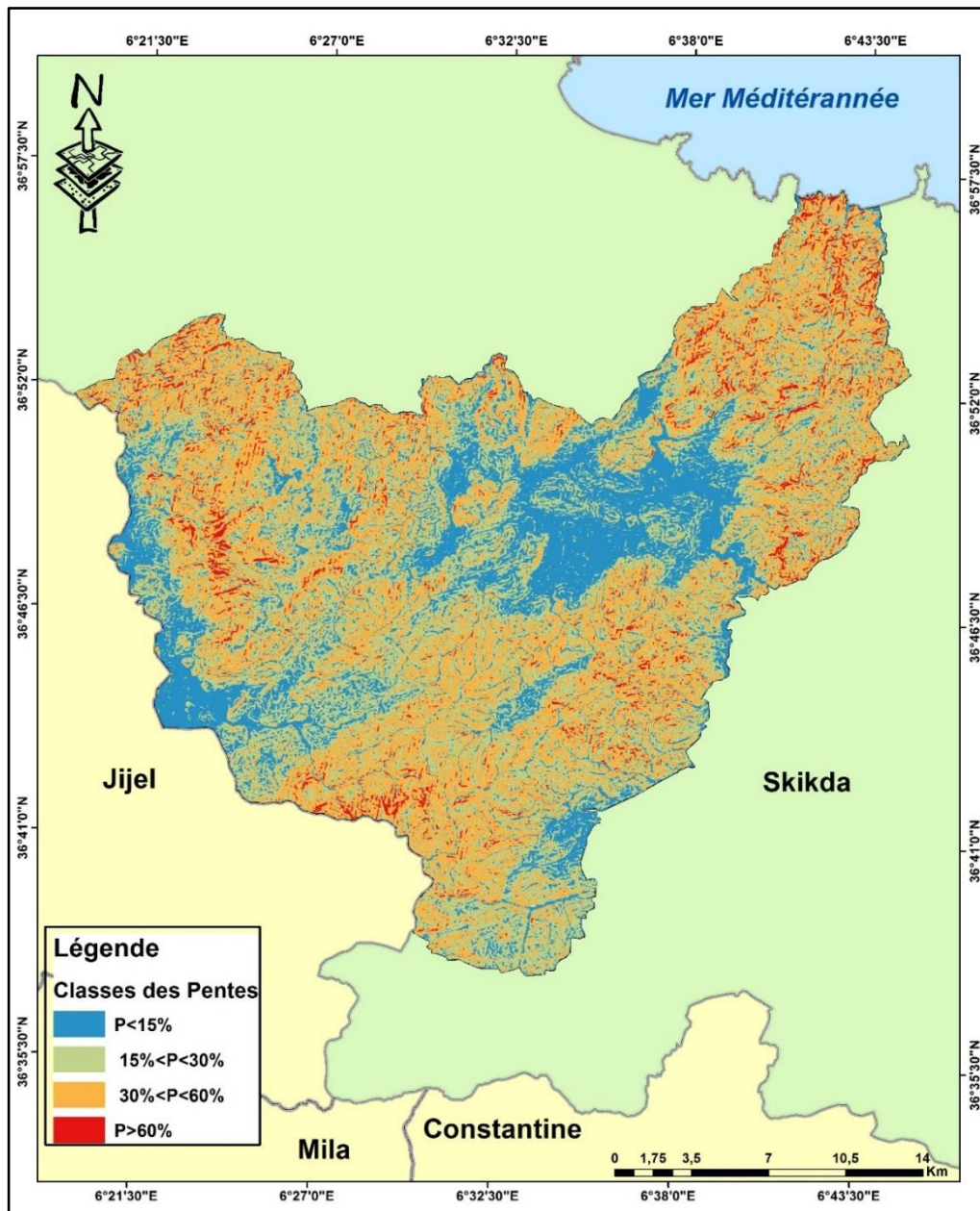


Figure 25 : Carte des pentes de la zone sud de massif Collo Skikda

Les figures 25 et 26 montrent que les pentes faibles ($P < 15\%$) représentent 22,97% de la superficie totale de la zone d'étude, tandis que les pentes moyennes ($15\% < P < 30\%$) constituent 35% de la superficie. La catégorie la plus représentée est celle des pentes élevées dans la classe forte ($30\% < P < 60\%$) qui couvrent 37,84% de la superficie totale, tandis que les pentes très fortes ($P > 60\%$) représentent une petite proportion de 3,96%.

Cette analyse indique que La région sud de Massif du Collo se compose principalement de pentes moyennes à fortes, ce qui peut avoir des effets divers sur la stabilité topographique de la zone.

I-1-2-Carte des expositions

Les cartes des directions du vent sont un outil essentiel pour évaluer le risque d'incendie, en particulier dans les zones sèches et rocheuses telles que la zone sud du massif Collo. L'exposition aux pentes, joue également un rôle important dans la propagation de l'inflammation.

Après avoir calculé la superficie des principales directions sélectionnées en fonction de leur influence, les résultats présentés dans le tableau (06).

Tableau 06 : Les classes de la carte d'expositions.

Exposition	Superficie en ha	Pourcentage %	Code
Flat	17,75	0.02	0
NORD	1734,45	24.82	1
EST	17131,67	25.41	2
SUD	16164,89	23.98	3
OUEST	17353,99	25.74	2

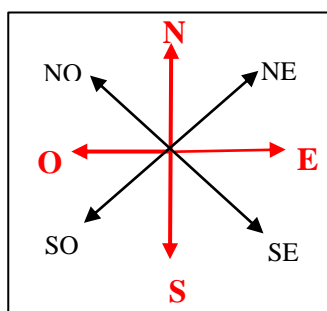


Figure 26 : Les directions géographiques de la terre

Ce tableau fournit des informations précieuses pour analyser la répartition des directions du vent et évaluer les niveaux de risque associés. Le tableau (06) comprend les directions du vent sélectionnées, ainsi que leur superficie et leur pourcentage de la superficie totale, en plus d'un symbole indiquant la gravité de chaque direction.

Afin de rendre le tableau plus clair, les pourcentages des surfaces de chaque catégorie sont indiqués dans la figure 27 :

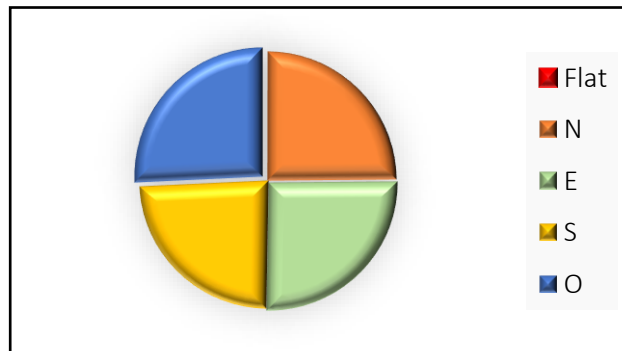


Figure 27 : Répartitions des classes d'expositions

La Figure 28 affiche la répartition des expositions de la zone d'étude identifiées.

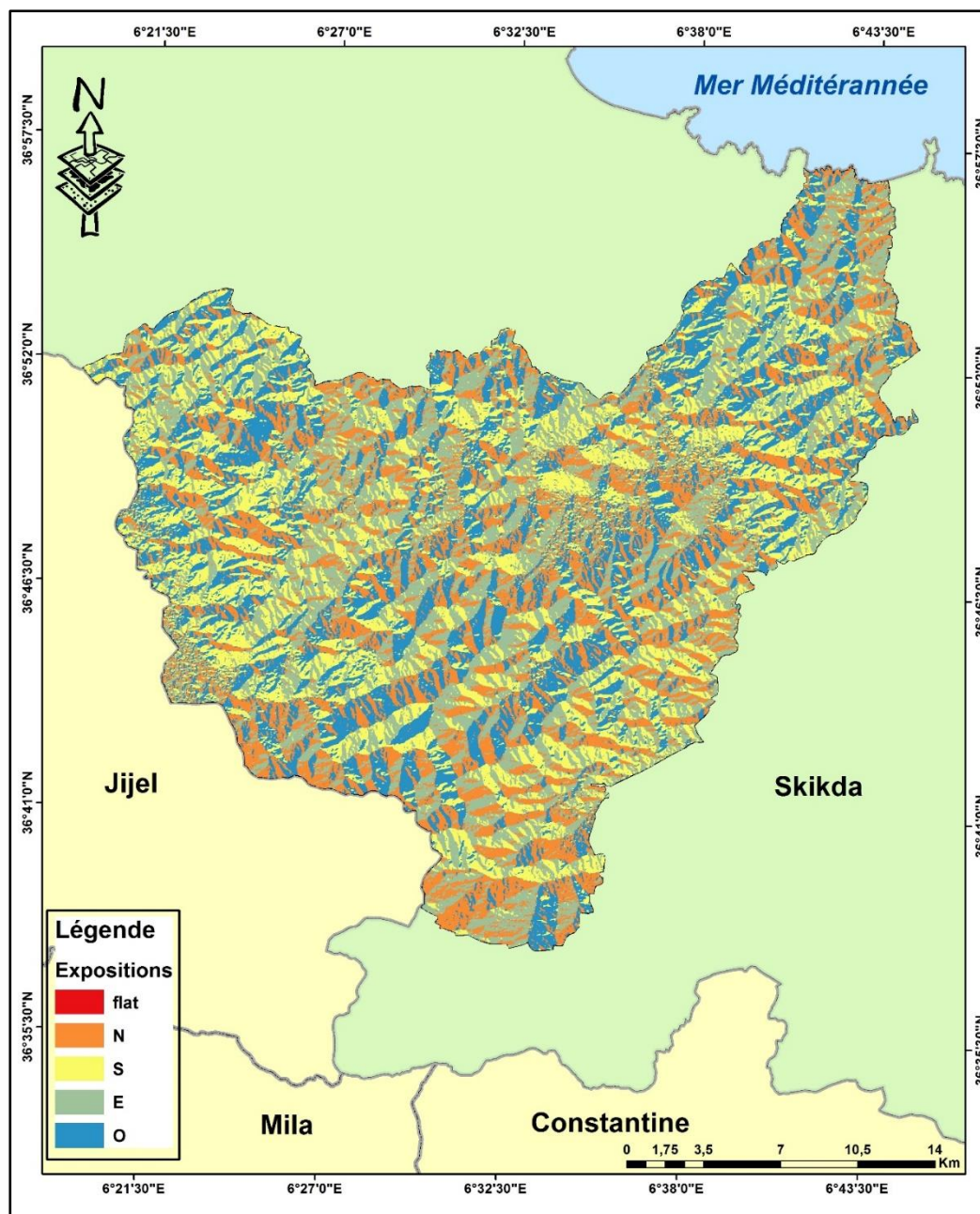


Figure 28 : Carte d'expositions de la zone sud de massif Collo Skikda

D'après les résultats présentés dans la figure 28, on observe une répartition homogène des quatre (04) catégories d'exposition (Nord, Est, Sud, Ouest) dans la zone d'étude.

Cependant, une prédominance de la direction Ouest par rapport aux autres directions dans la région est remarquée, avec une prévalence de 25,74% et on lui attribuant le code 2.

I-1-2-Carte des Topo-Morphologies

La topo-morphologie joue un rôle crucial dans la détermination de la gravité d'un incendie, influençant sa propagation et la difficulté de l'éteindre. La topographie a été préférée à

l'élévation pour évaluer l'effet de l'emplacement sur la gravité des incendies, car elle fournit des informations plus précises sur la complexité du terrain.

Une carte topographique a été générée en reclassant une carte de pente en sélectionnant quatre (04) catégories pour cette étude, Ces quatre (04) catégories définissent des situations topographiques de plus en plus défavorables à la lutte contre les incendies (**Belgherbi, 2002**). Les surfaces de chaque classe des pentes ont été calculées et un code unique a été attribué à chaque classe. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 07 et la figure 29.

Tableau 07 : Les classes de la carte de topo-morphologie

Classe des pentes	topographie	Superficie en ha	Pourcentage %	code
P<03%	Plaine	839.62	1.24	1
3%<P<12.5%	Bas piémont	10973.83	16.28	2
12.5%<P<25%	Haut piémont	19254.83	28.56	3
P>25%	Montagne	36335.51	53.90	4

Le comportement du feu sur la surface terrestre varie en fonction de la nature du terrain, qu'il soit plat ou présente des pentes importantes, comme illustré dans le tableau ci-dessus.

Afin de rendre le tableau plus clair, Les proportions de chaque type de surface sont définies dans la figure 29 :

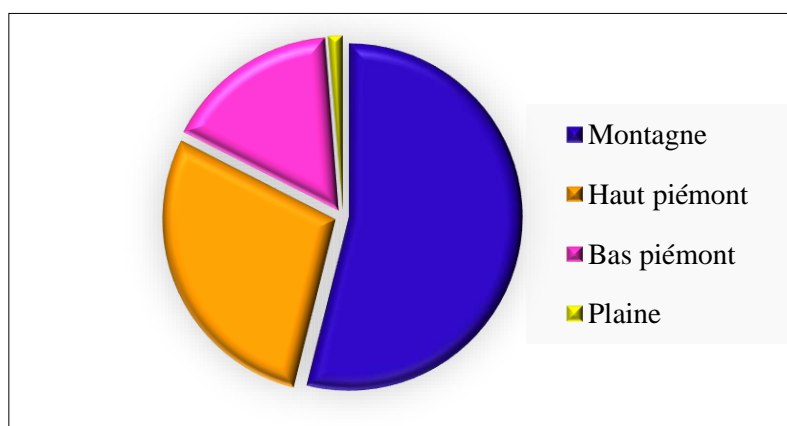


Figure 29 : Répartitions des classes de topo-morphologie (IM)

La Figure 30 affiche la répartition des expositions de la zone d'étude identifiées.

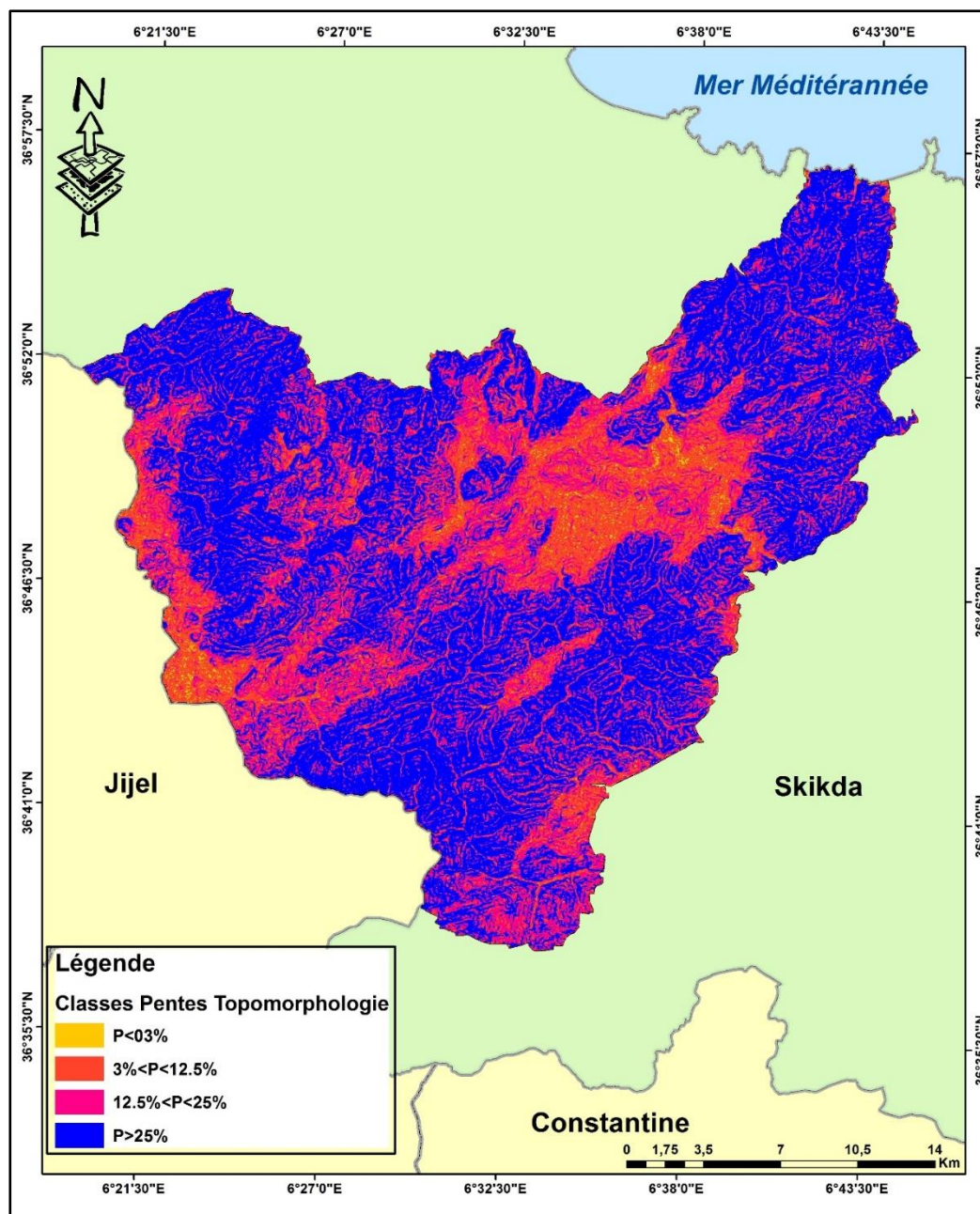


Figure 30 : Carte de topo-morphologie de la zone sud de massif Collo Skikda.

Les résultats extraits du cercle relatif et de la carte montrent que la zone sud de massif Collo est située dans un environnement caractérisé par des montagnes avec un pourcentage de 54% de montagnes.

En revanche, les zones de plaine présentent un risque d'incendie très faible de 1% En autre, le risque d'incendie dans les contreforts peu profonds est de 16 % et de 29 % dans les bas et hauts piémonts.

On peut donc conclure que la topographie des montagnes expose la région à un plus grand risque d'incendie que les plaines, les hauts et bas piémont

La modélisation d'indice topo-morphologie :

En combinant les trois (03) caractéristiques de la zone (pente, exposition et caractéristiques topo-morphologiques) à l'aide d'une formule $IM = 3p + (m. e)$ un indice topo-morphologique a été obtenu.

Cet indice a permis de définir quatre (04) catégories topo-morphologiques importantes résumées dans le tableau 08.

Tableau 08 : Les classes de l'indice topo-morphologique de la zone sud de massif Collo

IM	Signification	Superficie en ha	Pourcentage%	code
IM<09	Peu favorable	34151,92	25.51	1
09<IM<14	Moyennement favorable	41908,07	31.30	2
14<IM<19	Favorable	33037,99	24.68	3
IM>19	Très favorable	24757,71	18.49	4

Le tableau comprend quatre (04) colonnes principales qui expliquent en détail la répartition des risques d'incendie dans la région.

Afin de rendre le tableau 08 plus clair, montre les pourcentages des surfaces de chaque classe dans la figure31 :

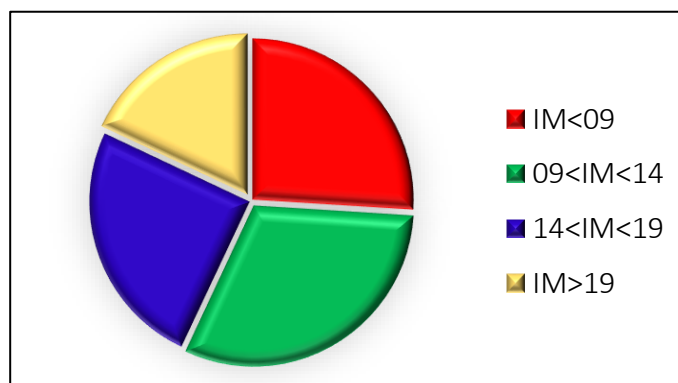


Figure 31 : Répartitions des classes de l'indice de topo-morphologie (IM)

La Figure 32 affiche la carte d'indice IM de la zone d'étude identifiées :

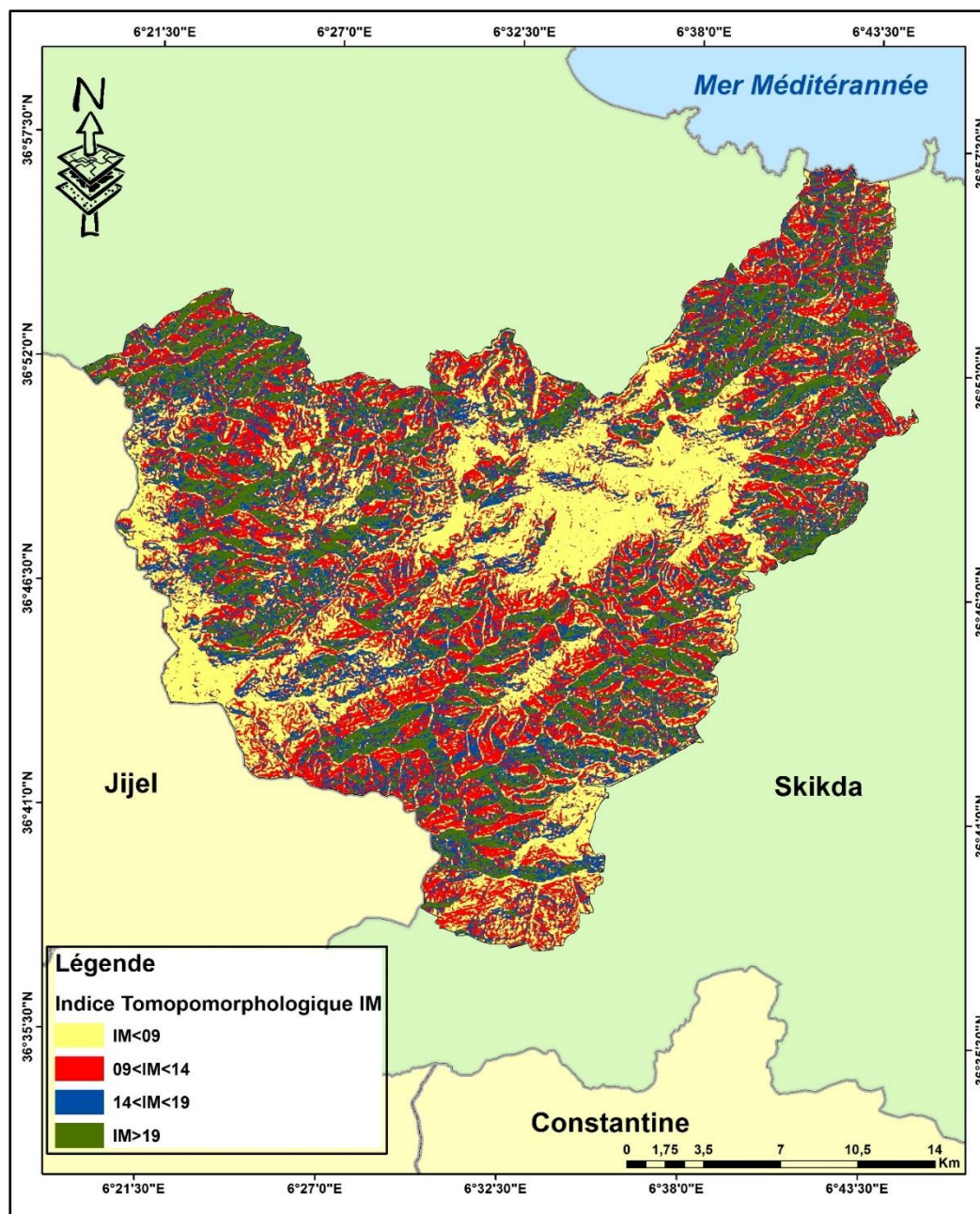


Figure 32 : Carte d'indice IM de la zone sud de massif Collo Skikda

La catégorie Moyennement favorable de l'indice topo-morphologique domine la majeure partie de la zone. Tandis que les catégories Peu favorable et favorable sont moins répandues, La catégorie très favorable au feu est rare.

La base de données cartographiques de l'indice topo-morphologique indique également que 31 % de la zone présente des conditions d'incendie Moyennement favorables. Viennent ensuite les conditions Peu favorable et favorables à respectivement 24 % et 25 %. Et les conditions très favorables ne représentent que 18 % de la superficie.

Sur la base de l'analyse des résultats, on a pu conclure que le terrain dans la zone Sud de massif Collo est considéré moyennement favorable à l'apparition des incendies.

I-2-Indice de combustibilité (IC)

La carte de l'indice de combustion a été générée en combinant la couche de l'indice de couverture végétale avec la couche des peuplements forestières. Il s'exprime sous la forme suivante : $IC = 39 + 0.23BV (E1 + E2 - 7.18)$

Le biovolume NDVI a été calculée à partir de la couche d'indice de végétation, tandis que les notes d'intensité calorique (E1 et E2) ont été extraites de la couche des peuplements.

I-2-1-Le biovolume BV

Offre une carte de la couverture végétale de la forêt, fournissant des détails sur la répartition des plantes, des arbres et des arbustes dans la zone, Le biovolume intervient de façon différente suivant la valeur de la somme E1+ E2. Si cette somme est inférieure à 7,18 l'indice reste inférieur à 40. Dans le cas contraire, il sera d'autant plus élevé que le biovolume sera important (Cemagref, 1990).

➤ Diversité de massif sud Collo

Tableau 09 : Les Principales essences peuplements de la zone sud de massif Collo

Peuplements	Superficie en ha	Pourcentage%
<i>Chêne liège clair</i>	11002,82	24.58
<i>Chêne liège dense</i>	4728,13	15.27
<i>Chêne zeen</i>	1175,45	5.77
<i>Maquis à bruyère et myrte</i>	10066,69	30.76
<i>Maquis à oléo-lentisque</i>	6863,35	15.00
<i>Mélange L+Z</i>	2301,08	5.71
<i>Mélange Z+ L</i>	353,49	1.45
<i>Plantations à Eucalyptus</i>	189,91	0.40
<i>Ripisylves</i>	0,029	1.00

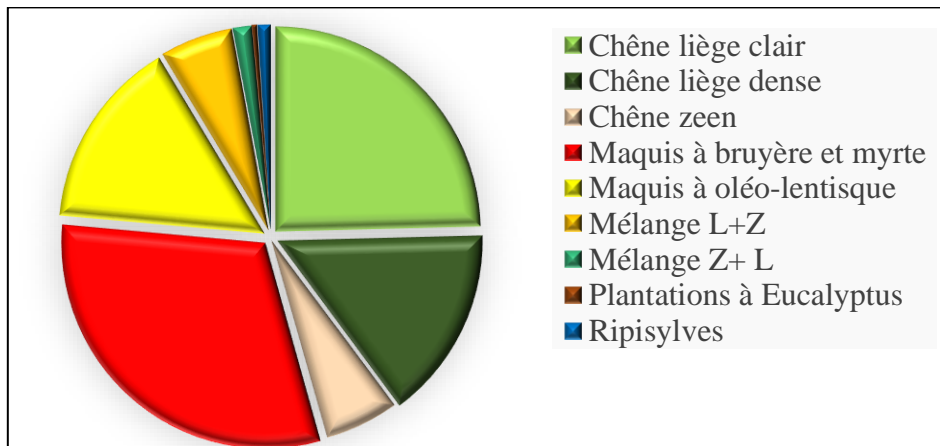


Figure 33 : La répartition des peuplements.

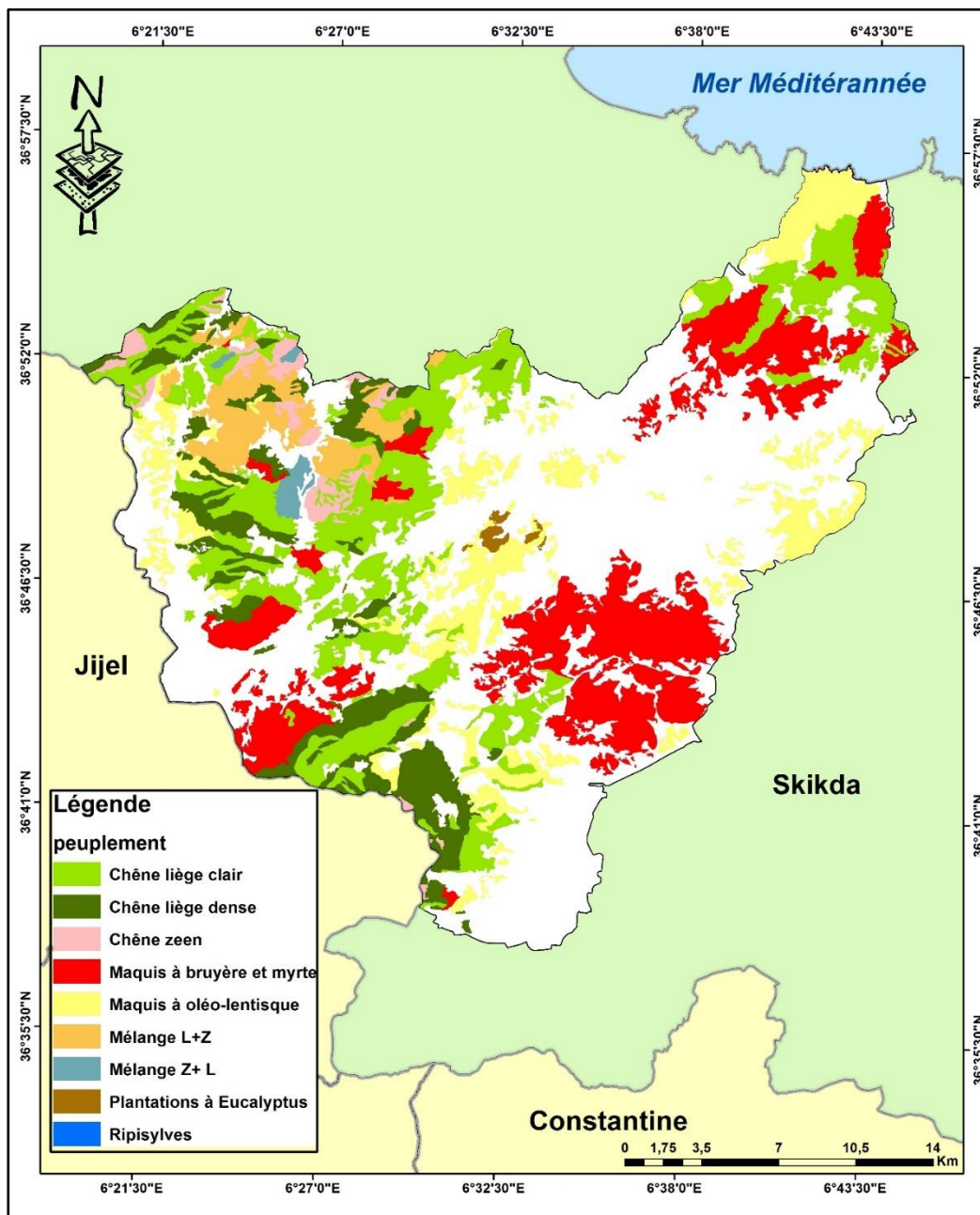


Figure 34 : Carte des peuplements BV de la zone sud de massif Collo Skikda

La carte des peuplements figure 34 montre une dominance très élevée du type "maquis à bruyère et myrte" de 30% dans la zone sud-est, tandis que le type *chêne liège clair* de 24% se concentre à une densité moyenne dans la zone sud-ouest. Les types *chêne liège dense* et *maquis à oléo-lentisque* sont quant à eux répartis uniformément dans la zone sud de 15%, tandis que les autres types sont présents en petites quantités et de manière aléatoire dans toute la région.

On peut donc conclure que les espèces dominantes telles que les chênes et les forêts de densité moyenne indiquent la présence de vastes zones couvertes de plantes qui peuvent contribuer à l'apparition rapide des incendies et à leur propagation rapide, en raison de leur prolifération et de leur densité dans la région.

I-2-2-NDVI

L'évaluation de l'intensité de combustibilités disponible pour la combustion dans la partie sud de massif Collo était basée sur le calcul de l'indice NDVI à partir des images satellite Sentinel 02. Les valeurs NDVI, indiquent la densité et l'état de la végétation.

La Figure 35 affiche la carte d'indice de végétation NDVI de la zone d'étude identifiées :

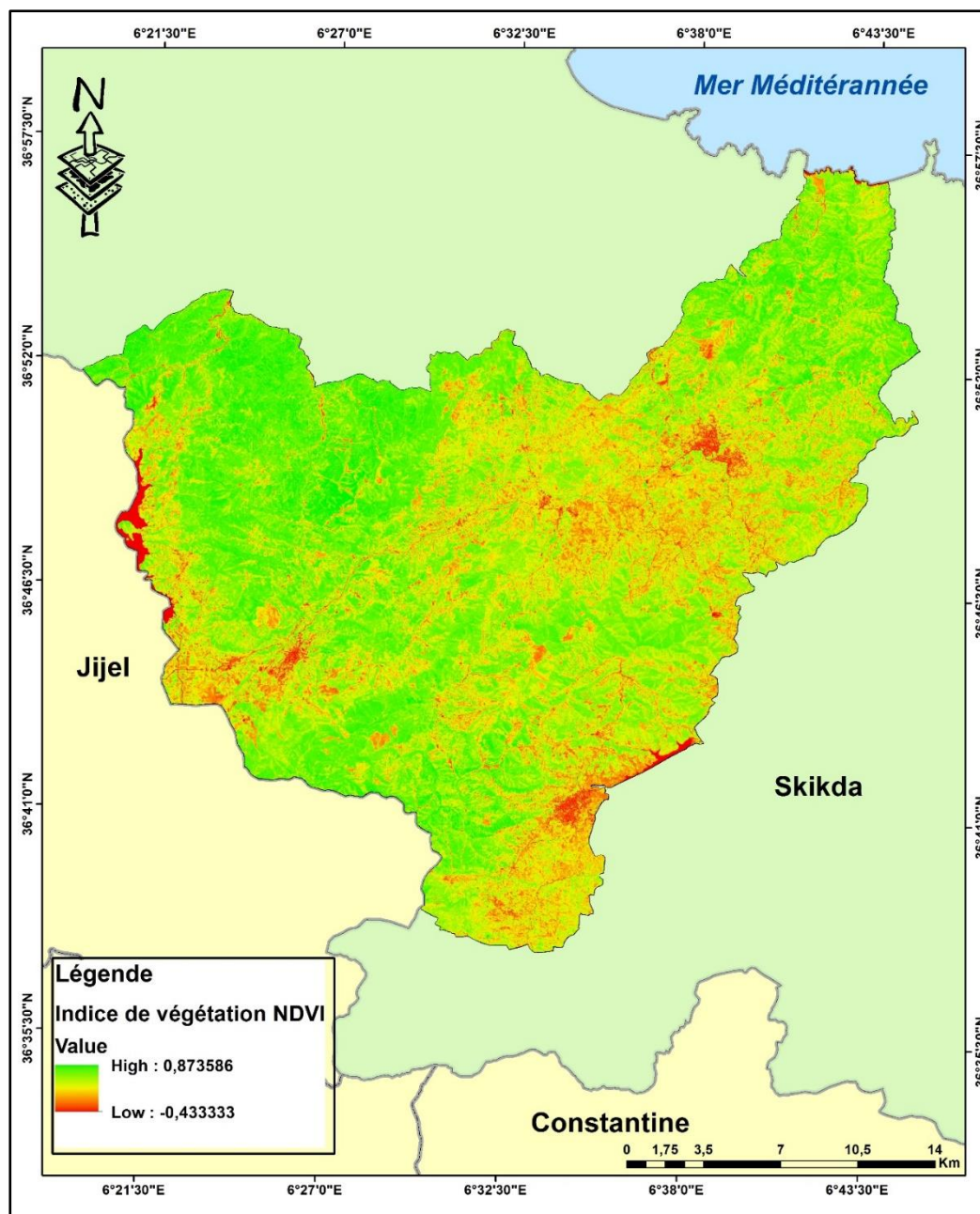


Figure 35 : Carte d'indice de végétation NDVI.

La carte NDVI montre une grande variation dans la densité des plantes dans la région étudiée. Les zones où les valeurs NDVI = 0,87 reflètent la présence de végétation dense et une activité chlorophyllienne élevée, ce qui indique des environnements sains, des forêts denses ou des terres agricoles prospères. Les zones où les valeurs NDVI = 0,42 reflètent la présence de végétation de densité moyenne, ce qui indique la présence des plantes moins denses, telles que des arbustes ou de l'herbe de densité moyenne. Les zones où les valeurs NDVI = 0,04 reflètent une couverture végétale faible ou quasi inexistante, ce qui reflète des terres arides ou dégradées.

Il a été conclu que la région étudiée présente une grande variation de couverture végétale, avec des zones nécessitant une intervention urgente pour améliorer les conditions environnementales et végétales afin de garantir la restauration de l'équilibre écologique.

➤ **La modélisation de combustibilité :**

L'indice de combustibilité (IC) est un outil essentiel pour évaluer la combustibilité des zones, aidant à identifier les zones les plus vulnérables aux incendies.

La carte de végétation et la carte d'indice de végétation ont été utilisées pour calculer l'indice de combustibilité (IC) pour la zone sud de massif Collo, Les résultats pour cet indicateur sont présentés dans la Figure 37 et le tableau 10.

Tableau 10 : Les classes de la carte de l'indice de combustibilité (IC)

Classe IC	Note risque	Superficie en ha	Pourcentage %	code
IC<40	Faible	823,58	1	1
40<IC<50	Modéré	29444,86	36	2
50<IC<60	Elevé	51766,64	63	3
IC>60	Très élevé	0	0	4

En se basant sur les caractéristiques de combustibilité de chaque type de couvert végétal, les valeurs de l'indice de combustible ont été codées en 4 catégories. La figure 37 et la figure 38 fournissent des informations spatiales sur la répartition de ces catégories, ce qui a permis d'identifier les zones les plus exposées au risque des incendies.

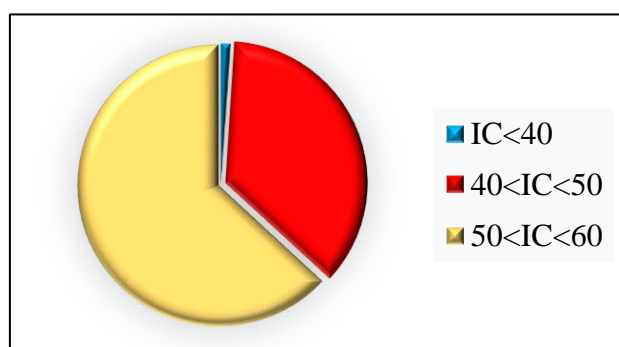


Figure 36 : Répartitions des classes de L'indice de combustibilité (IC)

La figure 37 affiche Carte d'indice IC de la zone d'étude identifiées.

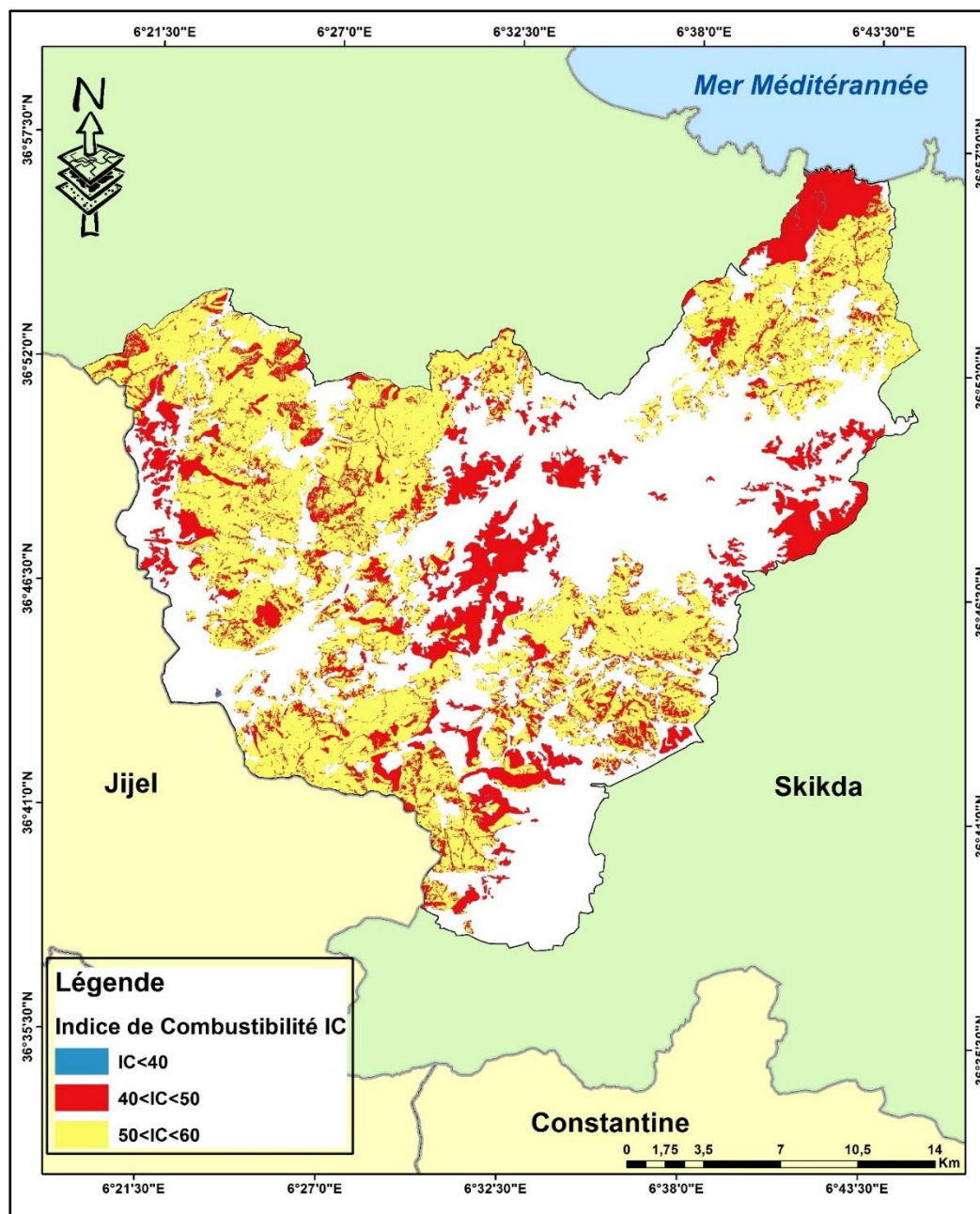


Figure 37 : Carte de l'indice de combustibilité (IC) de la zone sud de massif Collo Skikda.

D'après la figure 36 de répartition du risque d'incendie et la figure 37, les résultats indiquent que :

- 63 % de la superficie forestière (soit 51 766,64 hectares) est classée à risque élevé d'incendie. Ces zones se concentrent principalement dans le nord-ouest et le sud-ouest de la zone d'étude.
- 36 % de la superficie forestière (soit 29 444,86 hectares) est classée à risque d'incendie modéré. Ces zones sont réparties de manière aléatoire et dispersée dans la zone d'étude.

- 1 % seulement de la superficie forestière (soit 823,58hectares) est classée à faible risque d'incendie.

En analysant l'indice de combustibilité dans la zone sud de massif Collo, il apparaît que la région est confrontée à un risque élevé des incendies, et on peut dire qu'elle est considérée comme une zone de haute sensibilité aux incendies.

I-3-Indice d'occupation humaine (IH)

Afin d'évaluer l'impact de l'activité humaine sur les forêts de la zone d'étude, l'indice de densité de population a été utilisé, en le subdivisant en deux sous-indices : Indice de voisinage (Bâtie) IV et Indice de présence humaine ID (Route).

L'analyse des résultats a révélé une corrélation forte entre l'indice de densité de population, en particulier ID et la répartition des forêts dans la zone.

Après avoir identifié les emplacements des principales colonies rurales et des routes à l'intérieur de la forêt et dans ses environs, une carte a été créée pour illustrer la répartition de l'indice de densité de population.

La Figure 38 et tableau 11, offre un aperçu des variations de la densité de population dans la zone d'étude.

Tableau 11 : Les classes de la carte d'indice d'occupation humain (IH)

Paramètres	Distance	Classe du risque	Code
Indice de voisinage (Bâtie)	<250	Très élevé	4
	25-500	Elevé	3
	50-750	Moyen	2
	>750	Faible	1
Indice de présence humaine (Route)	<150	Très élevé	4
	150-300	Elevé	3
	300-450	Moyen	2
	>450	Faible	1

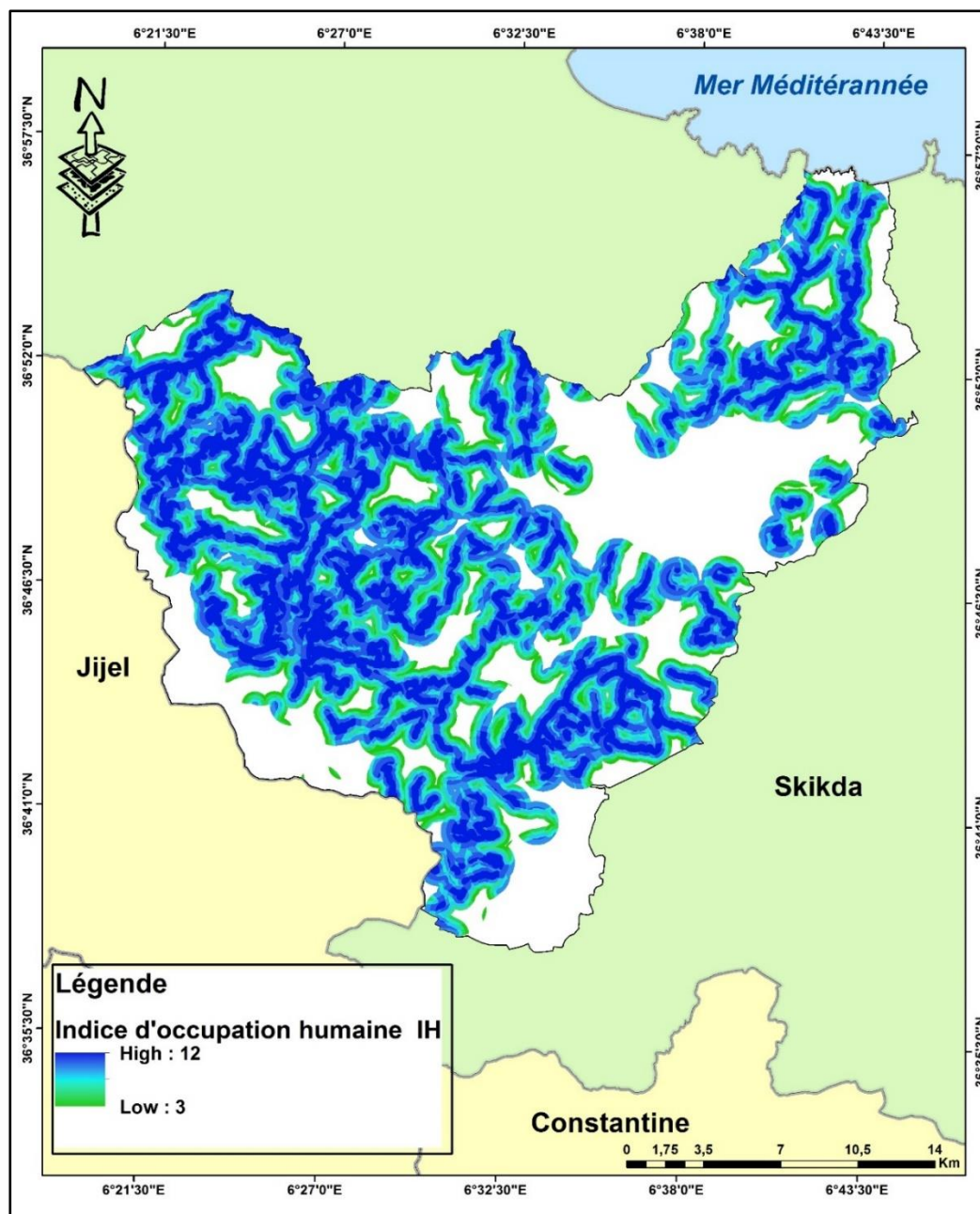


Figure 38 : Carte d'indice d'occupation humaine (IH) de la zone sud de massif Collo Skikda.

La figure 38 et montre la distribution du réseau routier et la densité de la population avec plusieurs observations principales.

En effet, les zones à haute densité de routes associées à une concentration élevée de population, avec des distances courtes entre les deux. En revanche, d'autres zones montrent un réseau routier et une densité de population modérés.

Enfin, L'indice d'occupation Humaine, reflète des petites superficies dont le risque de départ de feu de forêt intervient, cette situation est due aux faibles densités humaines et à la faible densité du réseau routier implanté en forêt (**Boughaba & Boussioud, 2022**).

I-4-Indice de risque d'incendie (IR).

Pour calculer l'indice de risque d'incendie, trois (03) couches d'informations : la couche d'indice topo-morphologique, la couche d'indice de combustibilité et la couche d'indice d'occupation humaine sont combinées à l'aide de la formule suivante :

$$IR = 5. IC + 2. IH + IM$$

Ce qui nous permet d'identifier les zones les plus exposées aux incendies et de prendre les mesures préventives appropriées.

Tableau 12 : les classes de l'indice de risque d'incendie (IR).

Classe	Significat	Superficie	pourcentages
IR<6	Risque Faible	34,59	0
6<IR<9	Risque Moyen	10136,36	28
9<IR<12	Risque Fort	6304,09	17
IR>12	Risque Très Fort	19978,40	55

Le tableau montre quatre (04) catégories différentes avec des détails sur la signification, la superficie et le pourcentage de chaque catégorie. Notez que les catégories varient du risque très faible au risque très élevé, et les pourcentages indiquent la répartition des terres au sein de chaque catégorie.

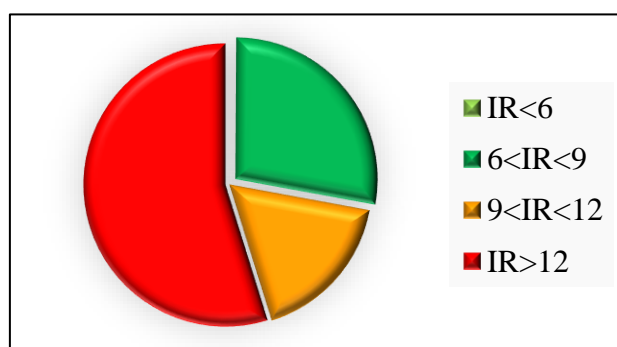


Figure 39 : Répartitions des classes de l'indice de risque d'incendie (IR)

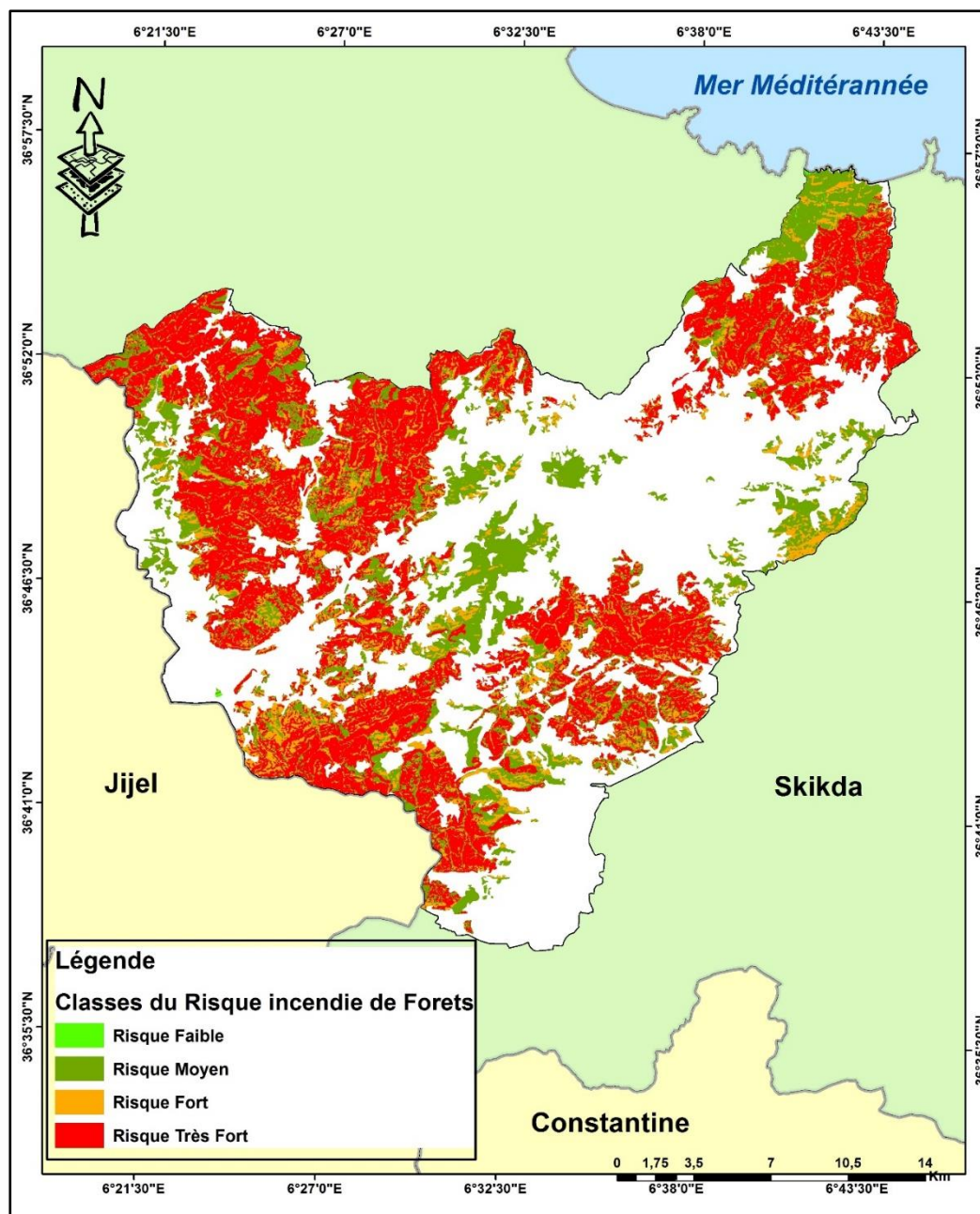


Figure 40 : Carte d’indice des risques (IR) de la zone sud de massif Collo Skikda

La cartographie du risque des incendies nous permet de délimiter les zones potentielles d’éclosion des feux, tout en pouvant remonter aux causes et degré du risque (végétation très inflammable, pente élevée, proximité d’une route, ...etc.) (**Algeria Geomatics Innovation Journal**).

La figure 40 illustre clairement la distribution des risques des incendies de forêt dans les différentes zones, facilitant ainsi la compréhension des endroits les plus exposés aux incendies et permettant de mieux orienter les efforts de prévention.

Les zones à très faible risque ($IR < 6$) représentent une très petite part, seulement 0,09% de la superficie totale. Ces zones sont les moins susceptibles de subir des incendies et ne nécessitent pas de mesures préventives intensives.

Les zones à risque faible à moyen ($6 < IR < 9$) couvrent environ 28% de la superficie. Ces zones nécessitent une surveillance régulière et des mesures préventives modérées pour prévenir le développement des incendies potentiels.

Les zones à risque moyen à élevé ($9 < IR < 12$) représentent 17% de la superficie. Ces zones nécessitent une attention particulière en raison de la probabilité accrue des incendies.

Les zones à très haut risque ($IR > 12$) constituent la plus grande partie de la carte, avec 55%. Ce pourcentage élevé indique que plus de la moitié de la superficie est exposée à un risque élevé des incendies.

En analysant la carte de l'indice de risque d'incendie (IR) et les résultats précédents, on peut conclure que la région sud de massif Collo est fortement exposée aux incendies.

La carte a permis d'identifier les zones les plus exposées aux risques d'incendie. Par conséquent, il est crucial de se concentrer sur les zones à très haut risque pour prendre des mesures préventives urgentes, tandis que les zones à risque moyen et élevé nécessitent une surveillance et des mesures préventives appropriées.

Elle aide également à orienter efficacement les efforts et les ressources pour lutter contre les incendies de forêt et réduire les dommages qu'ils causent.

I-5-Analyse de la relation entre peuplements et IR

Cette étude présente une évaluation de l'inflammabilité des espèces végétales de la zone sud du massif de Collo à Skikda, en identifiant les espèces les plus vulnérables au feu.

L'objectif est de développer des plans efficaces de prévention et de lutte contre les incendies de forêt.

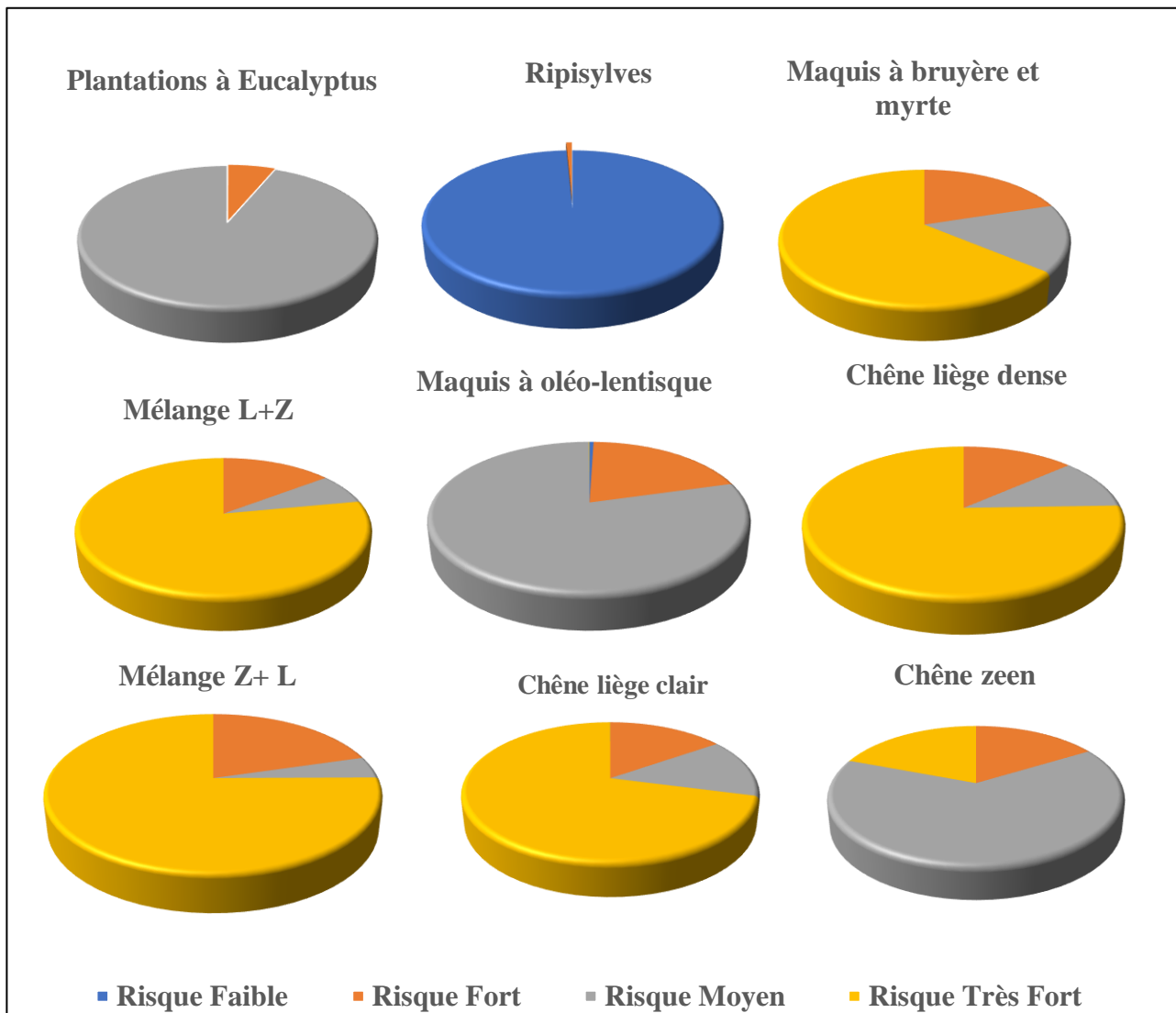


Figure 41 : évaluation du risque d'incendie pour différents types des peuplements dans la zone sud de massif Collo.

Pour évaluer le risque d'incendie de plusieurs peuplements situés dans le massif sud Collo, une étude de la relation entre le risque et les peuplements a été réalisée.

Figure 41 montre ce qui suit :

- **Zones à faible risque** : cette catégorie comprend un seul peuplement, *Ripisylve*.
- **Zones à risque moyen** : cette catégorie comprend trois types des peuplements, *le Plantation à Eucalyptus maquis à oléo-lentisque et chêne zeen*.
- **Zones à fort risque** : dans cette catégorie Il n'y a aucun type de peuplement en elle.
- **Zones à très fort risque** : cette catégorie comprend cinq (05) types des peuplements, *le Maquis à bruyère et myrte, chêne liège dense, chêne liège, mélange chêne liège et chêne zeen*.

Les résultats indiquent que les peuplements les plus résistants aux incendies de forêt dans la région sud de massif Collo sont les *Eucalyptus* et les *Chêne liège dense*. Ces peuplements sont très résistants à l'ignition grâce à la couche de liège qui protège le tronc et les branches, ce qui en fait des espèces résistantes dans les écosystèmes méditerranéens (Curt et al, 2022).

En revanche, les peuplements les plus susceptibles aux incendies de forêt sont les *Mélange chêne liège et chêne zeen* et le *Maquis à oléo-lentisque*.

Conclusion

Conclusion

Les incendies de forêt dans le massif du Collo, en particulier dans sa partie sud, représentent une menace environnementale majeure pour la biodiversité. Des efforts exceptionnels doivent donc être déployés pour la protéger pour les générations futures.

Les méthodes classiques de prévention et de lutte contre les incendies en Algérie, bien que répandues, s'avèrent chronophages et parfois inefficaces face à la complexité et à la diversité des écosystèmes forestiers du pays. Dans le cadre de ce travail, nous avons élaboré une carte de risque d'incendies pour cette forêt en utilisant les outils des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

Selon la carte des risques d'incendie de la région du Massif Sud du Collo, il a été constaté qu'elle révèle les zones les plus vulnérables aux incendies, à savoir :

19 978,40 hectares de la zone d'étude se caractérisent par un risque très fort d' $IR > 12$ à 55% de la superficie totale de la zone.

Suivi de 10 136,36 hectares, caractérisés par un risque moyen de 28%, et représentant 17% de risques fort $9 < IR < 12$, il comprend une superficie de 6 304,09 hectares. C'est le résultat des plantes inflammables, comme le *Maquis à bruyère et myrte*, qui sont présentes à raison de 30,76% sur une superficie estimée à 10 066,69 hectares. De plus, la présence humaine intense augmente les risques, tels que les activités diverses et le réseau routier dense, et les pentes compliquent encore la situation, car la pente est forte à $30\% < P < 60\%$ dans la zone accélère considérablement la propagation des incendies de 37,84%.

Cette région requiert une attention accrue pour minimiser les dégâts occasionnés par les incendies et préserver la continuité écologique. Cela passe par un renforcement des moyens matériels et humains.

A cet effet, et sur la base de la carte des risques incendies obtenue, il est important de mettre en œuvre des mesures de protection et de prévention des incendies de forêt cela concerne en particulier le peuplement exposé a un risque très fort, tels qui les *Maquis à bruyère et myrte*, *chêne liège dense*, *chêne liège clair* et mélange *chêne liège et chêne zeen*.

Comme solutions trouvées pour ce risque, nous conseillons de les appliquer comme suit :

- Soutenir la recherche scientifique dans le domaine de la prévention des incendies de forêt.

- Renforcement des équipes d'intervention par le recrutement.
- Amélioration des infrastructures de lutte contre les incendies en créant de nouvelles routes d'accès à travers les forêts.
- Fournir suffisamment de points d'eau pour les services d'incendie.
- Construire des centres de surveillance pour surveiller les forêts et détecter rapidement les incendies.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Agaguenia S (2018) La petite ville en milieu montagneux, quelles potentialités d'innovation territoriale ? Cas de Collo, une ville du Massif de Collo (nord-est algérien). *Revue des sciences humaine* 9 :96-106.

Agee JK (1993) *Fire Ecology of Pacific Northwest Forests*, Island Press, Washington DC.

Alessio GA, Delillis M, Fanelli M (2004) Direct and indirect impacts of fire on isoprenoid emissions from Mediterranean vegetation. *Functional Ecology* 3 (18) :357–364.

Algeria Geomatics Innovation Journal (www.algeriageomaticsinnovation.dz).

Algérie Presse Service (2023) Incendies de forêt : destruction de plus de 41 Mille hectares jusqu'au 31 octobre dernier. *Régions* 151629 :41-31

Alp'Géorisques D, Graphies M (2002) Les feux de forêt. Risques naturels majeurs Ministère de l'Environnement et du Développement durable v1 Septembre 2002,3p. (www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MaQID%20FF%20v1-0.pdf)

Amiour A (2005) Les zones préférentielles de la mondialisation en Algérie. Exemple de Skikda. Thèse master, Université Mentouri Constantine, Algérie, 156 p.

Attou A, Khelil K (2020) Contribution à l'étude de la régénération post - incendie des formations forestières à *Tetraclinis Articulata* dans la Commune de Tircine, Daira de Ouled Brahim, wilaya de Saida. Thèse master, Université Dr Moulay Taher, Saïda, Algérie,18p.

Bayet C, Pierre le bourhis J (2000) Le zonage comme instrument de gouvernement. Le cas des risques naturels. *Les Annales des ponts et chaussées* (93) : 52-61.

Belgherbi B (2002) Intégration des données de télédétection et des données multi sources dans un système d'information géographique (SIG) pour la protection des forêts contre les incendies (cas de la forêt Guetarnia – Ouest d'Algérie). Thèse master, université de Tlemcen, Algérie, 217p.

Boer C (1989) Effects of the forest fire 1982-83 in East Kalimantan on wildlife. Fraport No. 7. Deutsche FirstService GmbH, Samaria, Indonesia.

Boucenna H (2023) Les macros invertébrées benthiques de la région de Collo. Thèse doctoral, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, 39.41.42.p

Boughaba Kh, Boussioud A (2022) Cartographie de risque feu de forêt dans la région de Mila. Thèse master, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf-Mila, Algérie, P61.

Bouttine N, Serir M (2002) Contribution à l'étude métallique de la mine de Boudoukha (Kabylie de Collo), Université Mentouri- Constantine, 44p.

Bouziza M, Guelmaoui CH (2021) Suivie de la distribution de Néréis falsa sur le littoral Est Algérien. Thèse Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie,17P.

Brown J (2018) Drones: A revolution in fighting forest fires (1st ed.). CRC pressa.Ⓜ

Carmen A (2021) Études numériques et expérimentales des feux marginaux. Thèse doctoral, Université de CORSE-PASCALPAOLI, Français,6-8p.

Cemagref (1990) Protection des forêts contre les incendies, guide technique du forestier méditerranéen français. Fiche 5 : Inflammabilité et combustibilité.

Chabour N (2004) la surexploitation des eaux souterraines dans les plaines littorales : la nappe de Télézza dans la plaine de Collo (Nord-Est algérien). Sciences & Technologie B (22) : 127-132.

Chervou R (1998) Prévention et lutte contre les grands incendies de forêts. Forêt méditerranéenne t. XIX (01), 60p.

Colin P, Jappiot M (2001) Protection des forêts contre les incendies. Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen. Cahier Fao Conservation (36) :1020-1149.

Cotter D, Gibson R, Listen R, Tom H, Trainor T, VanWyhe H-P (1988) A process for evaluating geographic information systems. technology exchange working group-technical report 1 Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography.U.S. Geological Survey Open-File Report 88-105.03p.

Curt T, Hély C, Barbero R, Dupuy J-L, Mouillot F, Ruffault J (2022) Feux de végétation comprendre leur diversité et leur évolution, enjeux sciences, éditions quæisbn : 978-2-7592-3505-6 ; p17-54.

Cybersécurité (2020) La cartographie des risques : définition sécurité des lieux de travail.

Dagorne A, Duche Y, Castex J.M, Ottavi J.Y (1994) Protection des forêts contre l'incendie et système d'information géographique : application à la commune d'Auribeau-sur-Siagne (Alpes Maritimes) , Forêt Méditerranéenne, XV (4), pp.409-420.

Davies S.J, Unam L (1999) Smoke-haze from the 1997 Indonesian forest fires: effects on pollution levels, local climate, atmospheric CO2 concentrations, and tree photosynthesis. Forest Ecology and Management 124, 137-144p.

Dubourdieu (1997) Manuel d'aménagement forestier, gestion durable et intégrée des écosystèmes forestiers, Edi par Tec, paris.

Essid O, Justino J.J, Nhacalaza V.V(2021) Rôle des Aménagements des Défenses des Forêts Contre les Incendies dans la lutte contre les feux de forêts dans la wilaya de Blida, mémoire de fin d'étude, 11p.

F.A.O(2001) Réunion de la FAO sur les politiques nationales ayant une incidence sur les incendies de forêt : Rome, 28-30 octobre 1998, 33p.

Faver P (1992) Feux et forêts, forêt m, méditerrané t. XIII, n01, janvier, 31p.

Franck G (2009) Indispensable outil d'aide à la décision, Espaces naturels n°26 • avril, 12p.

Heouaine S, Mihoubi M (2018) Cartographie des Incendies de Forêts dans la Wilaya de Skikda par l'Utilisation des Techniques de la Géomatique, Mémoire master, Skikda, 6p.

Houria B, Bahia L, Manal N, Naima D (2022) Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord algérien : cas de la forêt d'Akfadou Est (W. de Bejaia). Algeria Geomatics Innovation Journal.

Journal officiel du 11 décembre 1980 in boulaie, 2008 in Tir 2016.

Justine D (2023) Feu de forêt : chiffres, causes, conséquences et prévention, Greenlly.

Kern (1975) Les incendies de forêts, les réserves d'eau, The revue forestière française REF-SPCIAL 541p.

Maktite A, Faleh A (2017) Cartographie des zones à risque d'incendies de forêts à l'aide Du SIG et la télédétection dans l'arrière-pays du port Tanger Med. European Scientific Journal, 13(32), 205-224p.

Mariel A (1995) Cartographie du niveau de risque d'incendie : exemple du massif des Maures, CEMAGREF, article.

Méaille R (1988) les systèmes d'information géographique : structure, mise en œuvre et utilisation dans différentes études, thèse docteur en sciences. Université de Nice Sophia-Antipolis. Français.9p.

Meddour S, Derridj A (2012) Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). Sécheresse. 23(2) : 133-141.

Meddour S.A, González-Cabán A, Meddour R, Arezki Derridj Y (2012) Políticas de Manejo de Incendios Forestales en Argelia : Necesidades Presentes y Futuras, Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales : Cambio Climáticoe Incendios Forestales general technical report PSW-GTR-245. 415p.

Megrerouche R (2006) Sensibilité de la végétation forestière aux incendies Cas de la forêt domaniale de Chettabah-Ain Samara-Constantine. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magistère en Ecologie et Environnement, 11p-20p.

Messafri L (2018) Contribution à l'étude des grands feux dans la wilaya de bejaia, Mémoire de master en agronomie, Université mouloud Mammeri de tizi ousou, p8.

Missouni A, Mederbal K, Benabdelli K (2002) Apport des systèmes d'information géographiques dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts : Exemple de la forêt de Kounteidat. Algérie. Forêt méditerranéenne. 23(1) : 11-22.

Myers N, Russell A, Cristina G, Gustavo A. B (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature. 403(6772).853-858p.

Oussama E, Jaime J, vitória N, vitorino (2021) Rôle des Aménagements des Défenses des Forêts contre les incendies dans la lutte contre les feux de forêts dans la wilaya de Blida. Mémoire fin d'étude, un Saad dahleb _blida 15,25,26p.

Pierre le Bourhis J, Olivier Ihl, Kaluszynski M, Pollet G (2003) Les sciences de gouvernement. Collection Etudes Politiques. Economica. 157-168p.

Plana E, Font M, Serra M, Chauvin S, Gladiné J, Edition CT (2016) Les incendies en forêt, guide pour les journalistes et les médias. Projet efrecom. Edition CTFC. 16-36p.

Sullivan A.L (2017) À l'intérieur de l'enfer : processus fondamentaux du comportement des incendies de forêt, partie 1 : chimie de la combustion et dégagement de chaleur. Scie au feu. 3.132-149, est ce que je :10.1007/s40725-017-0057-0.

Tameen R (2007) Étude de terrain sur les zones montagneuses marginalisées en Algérie : cas de la région de Collo. Sciences & Technologie D – N°25. Juin (2007). pp.97-107.

Tanushree k (2023) L'évaluation de l'impact environnemental, pollution, Les impacts sur la santé de la pollution par les incendies des forêts.

Tellez L (2017) Résumé Télédétection cours 7. University d Lausanne.Suisse.7-12.1p.

Tucker C.J (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, Journal of Remote Sensing of Environment. 8. 127–150.DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0. Wildland fire management terminology. FAO. Rome.1986. pp. 257.

Vallejo R, Alloza J.A(1998) The restoration of burned lands: the case of eastern Spain. In Large forests fires, Backhuys Publishers, Leiden, 91-108P.

Vaucluse (2018) Feux de forêt les prévenir et s'en protéger dossier de presse, ministre de la transition écologique et solidaire, 21p.

Les sites web :

<https://Alpes-maritimes.gouv.fr/>

https://www.meteoblue.com/ar/climate-change/%d8%b3%d9%83%d9%8a%d9%83%d8%af%d8%a9 %d8%a7%d9%84%d8%ac%d8%b2%d8%a7%d8%a6%d8%b1_2479536

