



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire



MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master 2

Géographie et Aménagement de Territoire

Option : Géomatique

Thème :

**L'APPORT DE LA GEOMATIQUE DANS LA PROTECTION
DES FORÊTS CONTRE LES INCENDIES
(CAS DU MASSIF HAFIR-ZARRIFET TLEMCEN)**

Présentée par :

Negadi Afaf

Devant le Jury composé de

<i>M.Boutrid Lamine</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>
<i>M.Bendib Abdelhalim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examinant</i>
<i>Mme.Khalfaoui Houria</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadrante</i>
<i>M.Ghabi Mohamed</i>	<i>Ingénieur CTS</i>	<i>Co-encadrant</i>

Année universitaire

2022-2023

Dédicace

Je dédie ce projet de fin d'études à ma mère bien-aimée, que son âme repose en paix. Sa présence aimante, son soutien indéfectible et ses encouragements constants ont été une source d'inspiration tout au long de ma vie et de mes études. Son esprit de persévérance et sa bienveillance continueront de m'accompagner dans tous mes projets futurs.

Je dédie également ce projet à mes sœurs et mon frère, qui ont toujours été là pour moi, me prodiguant leur amour inconditionnel et leur soutien inébranlable. Leurs encouragements et leurs conseils précieux ont été d'une grande valeur, et je leur suis reconnaissante pour leur présence constante dans ma vie.

Enfin, je dédie ce projet à mes amis fidèles, qui ont partagé avec moi des moments de joie, de rires et de soutien mutuel.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers ma directrice de mémoire,

Madame. Khalfaoui Houria. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je souhaite également exprimer mes sincères remerciements à mon Co-encadrant, **Monsieur. Ghabi Mohamed,** pour sa contribution précieuse à ce travail de recherche.

Je tiens à adresser mes remerciements à tous mes professeurs qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire. Leurs enseignements, leurs encouragements et leur expertise ont joué un rôle déterminant dans ma formation et ont contribué à ma croissance académique et professionnelle.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers les membres du jury **Monsieur Boutrid Lamine** et **Monsieur Bendib Halim.** Qui ont aimablement accepté d'évaluer et de juger ce travail, qu'ils trouvent ici, l'expression de mon respect et de ma gratitude.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de cette aventure. Leurs encouragements.

Sommaire

Contenu

1	Introduction :	1
1.1	Problématique	1
1.2	Choix du thème	2
1.3	L'objectif	2
1.4	Méthodologie	2
1.5	Plan de travail	3
1.6	Les contraintes rencontrées :	4
2	Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	4
2.1	Introduction	4
	Présentation de la forêt algérienne	4
2.2	Description de la forêt algérienne :	5
2.3	Généralités sur la gestion et l'évaluation des risques	6
2.3.1	Notion de risque :	6
2.3.2	Gestion du risque :	7
2.3.3	Analyse du risque :	7
2.3.4	La vulnérabilité :	7
2.4	Généralités sur les incendies :	8
2.4.1	Définition de l'incendie :	8
2.4.2	Types des incendies	9
2.4.3	Les origines et facteurs influents des feux de forêt :	11
2.4.4	Le phénomène des incendies de forêt en Algérie :	12
2.5	Géomatique :	13
2.5.1	Définition :	13
2.5.2	Objectifs de la géomatique :	13

2.6	Téledétection :	14
2.6.1	Définition :	14
2.6.2	Eléments essentiels en télédétection :	14
2.6.3	La série LANDSAT :	14
➤	Première génération (Orbite héliosynchrone phrasée).....	15
➤	Seconde génération (Orbite héliosynchrone phrasée)	15
➤	Landsat 7	16
➤	Landsat 8	17
2.6.4	Traitement des données de télédétection :	17
2.6.5	Classification des données :	19
2.7	Présentation des systèmes d'informations géographiques (SIG) :.....	22
2.7.1	Définition :	22
2.7.2	Composition d'un SIG :	23
2.7.3	Principales fonctions d'un SIG :	25
2.7.4	Modes de représentation des données géographiques :	26
2.7.5	Mode raster :	27
2.8	Etas de l'art : Modèle de la cartographie de risque d'incendie « DUCHE » et « DAGRONE »	29
2.9	L'analyse multicritères AHP :	31
2.9.1	Description de la méthode AHP :	31
2.9.2	Démarche à suivre : Recherche de la solution la plus adéquate possible :	31
2.10	Conclusion :	32
	Chapitre 2 :	30
3	Chapitre 2 : Zone d'étude et Méthodologie de travail	33
3.1	Introduction.....	33
3.2	: Présentation de la zone d'étude.....	34
3.3	Présentation du foret du massif hafir-Zariiefet :	34
3.3.1	Situation Géographique et administrative	34
3.3.2	Facteurs biotiques du massif Hafir- Zarifet	36

3.3.3	Facteurs abiotiques	37
4	Méthodologie de travail	39
4.1	L'analyse Multicritère	41
4.1.1	LA matrice de comparaison des critères l'analyse AHP :	41
4.2	Le modèle conceptuel des données de la carte de vulnérabilité :	44
4.3	Conclusion	45
5	Chapitre 3 : Création de la carte de vulnérabilité	45
5.1	Introduction :	45
5.2	La création des cartes	45
5.2.1	La carte d'occupation de sol	45
5.2.2	L'explication du code de la création de la carte depuis GEE :	45
5.3	Machine learning classification :	49
5.3.1	Carte de risque d'incendie associé à la densité de végétation :	54
5.3.2	Carte de risque d'incendie associé à l'élévation :	56
5.3.3	Carte de risque d'incendie associé à la pente :	58
5.3.4	Carte de risque d'incendie associé à l'exposition :	60
5.3.5	Carte de proximité à la route :	62
5.3.6	La création de la carte de vulnérabilité :	64
6	Conclusion :	65
7	Chapitre 4: Validation et discussion des résultats	62
7.1	Introduction :	62
7.2	Le Ratio de Brûlure Normalisé (Normalized Burn Ratio - NBR)	62
7.3	Bandes NBR	63
7.4	Différence NBR	63
7.5	Les étapes pour calculer le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) sur GEE	64
7.6	APPLICATION WEB :	67
7.7	L'explication du code pour calculer le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) :	68
7.8	La validation de la carte de vulnérabilité :	73

8	Discussion des résultats	74
8.1	Conclusion :	75
9	Conclusion Générale :.....	80

Abstract

This thesis focuses on assessing the vulnerability of the Haffir-Zarrifet forest massif in the Tlemcen province of Algeria to wildfires. The study proposes a method using geomatics and multicriteria analysis to map the fire risk vulnerability of the forested area. The research is divided into a theoretical part, involving literature review and understanding the problem, and a practical part, involving data collection from various sources such as USGS, Google Earth Engine, and local research centers. The collected data is processed using software like ARCGIS, Microsoft Excel, and Google Earth Engine. The thesis consists of four chapters: a literature review, a description of the study area, the methodology for assessing fire vulnerability using multicriteria analysis, and the validation of results through the differential normalized burn ratio (dNBR) index based on spectral remote sensing. The ultimate goal is to provide up-to-date and accurate vulnerability maps to assist forest managers in planning preventive and remedial measures for identified problems.

Keywords:

Geomatics, remote sensing, GIS, vulnerability, multicriteria analysis, burn index, risk management, fire

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'évaluation de la vulnérabilité de la forêt du massif de Haffir-Zarrifet dans la wilaya de Tlemcen, en Algérie, aux incendies de forêt. L'étude propose une méthode utilisant la géomatique et l'analyse multicritère pour cartographier le risque d'incendie et la vulnérabilité de la zone forestière. La recherche est divisée en deux parties : une partie théorique, comprenant une revue de littérature et une compréhension de la problématique, et une partie pratique, comprenant la collecte de données auprès de différentes sources telles que l'USGS, Google Earth Engine et des centres de recherche locaux. Les données collectées sont traitées à l'aide de logiciels tels que ARCGIS, Microsoft Excel et Google Earth Engine. Le mémoire se compose de quatre chapitres : une revue de littérature, une description de la zone d'étude, la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité au feu utilisant l'analyse multicritère, et la validation des résultats à l'aide de l'indice de ratio de brûlure normalisé différentiel (dNBR) basé sur la télédétection spectrale. L'objectif ultime est de fournir des cartes de vulnérabilité à jour et précises pour aider les gestionnaires forestiers à planifier des mesures préventives et curatives en fonction des problèmes identifiés.

Mots clés :

Géomatique, télédétection, SIG, Vulnérabilité, L'analyse multicritère, (Indice de brûlure), Gestion de risque, Incendie

Liste des abréviations :

AHP : Analytic Hierarchy Process - Méthode d'analyse multicritère qui permet de prendre en compte plusieurs critères simultanément et de les combiner pour obtenir une évaluation globale.

BDG : Base de Données Géographique

BIT : Bureau International du Travail

C.N.I.G. : Conseil National de l'Information Géographique

DNBI : Difference Normalized Burn Index (Indice de brûlure normalisé par différence)

ERTS : Earth Resources Technological Satellite (Satellite technologique des ressources terrestres)

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus (Cartographe thématique amélioré plus)

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

FOSA : L'Etude prospective du secteur forestier en Afrique

GPS : Global Positioning System - Système de positionnement mondial utilisant des satellites pour déterminer la localisation précise d'un objet ou d'une personne.

IH : Indice d'occupation humaine

IC : Indice de combustibilité

IM : Indice topomorphologique

ISO : International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)

ISO/CEI : International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission (Organisation internationale de normalisation/Commission électrotechnique internationale)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSS : Multi Spectral Scanner (Scanner multispectral)

NASA : National Aeronautics and Space Administration (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace)

OLI : Operational Land Imager (instrument de prise de vue)

OHSAS : Occupational Health and Safety Assessment Series (Série d'évaluation de la santé et de la sécurité au travail)

RBV : Return Beam Vidicon (Vidicon à faisceau de retour)

SIG : Système d'Information Géographique (GIS en anglais)

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

TDRS : Tracking and Data Relay Satellite (Satellite de suivi et de relais de données)

TIRS : Thermal Infrared Sensor (instrument de prise de vue)

TM : Thematic Mapper (Cartographe thématique)

USGS : United States Geological Survey (Service géologique des États-Unis)

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des forêts algériennes(DGF)	6
Figure 2 : Le triangle du feu (Ramade, 1997).....	8
Figure 3 : Les types de feux de forêts.....	10
Figure 4 : Les facteurs de propagation d'un feu de forêt.....	12
Figure 5 : Historique de la série Landsat	15
Figure 6 : Capteurs Landsat premier génération	15
Figure 7 : Capteurs Landsat deuxième génération	16
Figure 8 : Caractéristiques de satellite Landsat 7.....	16
Figure 9 : Caractéristiques de satellite Landsat 8.....	17
Figure 10 : Principes de classification des images (KLUSER 2000).....	19
Figure 11 : Les étapes de la classification non supervisée (DOS SANTOS 2001).....	20
figure 12 :Le cube de l'information géographique (Dangermond 1983).....	25
Figure 13 : Localisation de la zone d'étude	35
Figure 14 : Organigramme de la méthodologie de travail	40
Figure 15 : Interface Google Earth Engine	45
Figure 16 : Le code Java script pour le chargement et l'affichage des images :.....	45
Figure 17 : Le code Java script pour le calcul des indices de végétations.....	47
Figure 18 : Le code Java script pour la création de la composition d'images	47
Figure 19 : Le code Java script pour la création des données d'entraînement.....	48
Figure 20 : Le code Java script pour la classification supervisée	48
Figure 21 : Carte de l'occupation du sol de massif Hafir-Zariffet (Sud- ouest Tlemcen).....	53
Figure 22 : Vérification de la cohérence de la matrice.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 23 : Carte de l'occupation du sol (Base de données centre des techniques spatiales (Arzew).....	55
Figure 24 : Carte de risque associé à la densité de végétation	55
Figure 25 : Carte d'élévation.....	57
Figure 26 : Carte de risque d'incendie lié à l'élévation.....	57
Figure 27 : Carte des pentes.....	59
Figure 28 : Carte de risque d'incendie lié à la pente	59
Figure 29 : Carte d'exposition.....	61
Figure 30 : Carte de risque lié à l'exposition	61
Figure 31 : classification du risque de proximité a la route	62
Figure 32 : Carte de proximité à la route	63

Figure 33 : Carte de risque lié à la proximité à la route	63
Figure 34 : Carte de vulnérabilité de feux de forêt.....	64
Figure 35 : La réponse spectrale.....	63
Figure 36 : Le code pour le chargement et affichage des images Landsat 5 pour la 1 ^{ère} date 2006:	68
Figure 37 : Le code pour le chargement et affichage des images Landsat 5 pour la 2 ^{ème} date 2008:	69
Figure 38 :Le code pour le Calcul de la différence de NBR (delta NBR) et Détection des zones d'incendie :	70
Figure 39 : Le code pour le Calcul de la différence de NBR (delta NBR) et Détection des zones d'incendie 2007-2009:.....	72
Figure 40 : Carte de validation.....	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principales essences forestières en Algérie.	5
Tableau 2 : inventaire des espèces de Vertébrés par le parc national de Tlemcen 2000.	37
Tableau 3 : Transformations de fractions réelles	41
Tableau 4 : Calcule de valeurs relatives	42
Tableau 5 : Calcule des poids relatifs	42
Tableau 6 : Vérification de la cohérence de la matrice	43
Tableau 7 : classification de risque d'incendie selon la densité de végétation	54
Tableau 8 : classification de risque d'incendie selon l'élévation du terrain	56
Tableau 9 : classification de risque d'incendie selon l'inclinaison de la pente.	58
Tableau 10 : Table statistique de la carte de vulnérabilité :	65
Tableau 11 : Table statistique de la carte de validation	74

Introduction Générale

1 Introduction :

La superficie des forêts algériennes est estimée à 4,7 millions d'hectares de forêts et de maquis, ce qui représente environ 1% du territoire national (DGF, 2000)

Chaque année les incendies touchent d'importantes superficies dans les massifs forestiers algériens où plus de 36.000 hectares de forêts sont détruit. Les pertes économiques dans le secteur forestier généré par ces feux entre 1985 et 2006 se chiffrent à plus de 113 milliards de dinars algériens (Arfa et al., 2009).

La destruction de la couverture végétale est une préoccupation majeure qui peut perturber l'équilibre naturel et socio-économique du pays. Les méthodes traditionnelles utilisées en Algérie pour prévenir et lutter contre les incendies sont souvent peu fiables et prennent du temps, compte tenu de la complexité et de la diversité des écosystèmes forestiers. Des travaux de recherche ont démontré l'efficacité et la rapidité des techniques modernes d'observation et d'analyse de l'espace (télédétection et système d'information géographique) dans l'élaboration de cartes d'évaluation des risques d'incendie en zone forestière, en analysant les différentes causes d'incendies.

Nous allons montrer concrètement l'apport du SIG et de la télédétection à la protection des forêts contre les incendies, en cartographiant le risque des incendies ; ceci au niveau de la partie sud-ouest du massif de la wilaya de Tlemcen.

1.1 Problématique

La géomatique est une discipline qui utilise les technologies de l'information géographique (SIG, télédétection, GPS, etc.) pour collecter, stocker, traiter, analyser et présenter des données géographiques. Elle peut être utilisée pour évaluer les risques d'incendies de forêt en cartographiant la vulnérabilité du territoire.

L'analyse multicritère (AHP) est une méthode qui permet de prendre en compte plusieurs critères en même temps et de les combiner pour obtenir une évaluation globale. Dans le cas de la protection des forêts contre les incendies, l'AHP peut être utilisé pour évaluer la vulnérabilité du territoire en prenant en compte des critères tels que la densité de la végétation, la topographie du terrain, la distance aux routes, la densité de population, etc.

La problématique consiste donc à étudier :

Comment l'utilisation de la géomatique, associée à une analyse multicritère, peut aider à mieux comprendre la vulnérabilité des forêts de la partie sud-ouest du massif de la wilaya de Tlemcen « Hafir Zarrifet » aux incendies et à planifier une gestion forestière durable ?

1.2 Choix du thème

Nous avons choisis ce thème pour plusieurs raisons : premièrement car : La protection des forêts contre les incendies est un enjeu majeur pour sauvegarder la biodiversité et l'environnement, ainsi que la sécurité des populations et des infrastructures. Dans ce contexte, l'utilisation de la géomatique et de l'analyse multicritères apparaît comme une approche innovante et efficace pour évaluer la vulnérabilité aux incendies de forêt. Cette approche peut considérer un grand nombre de critères et les combiner pour obtenir une évaluation efficace, qui aide à la planification de la gestion forestière et à la mise en œuvre d'actions préventives et curatives. De plus, cette approche peut aider les gestionnaires forestiers à optimiser les ressources disponibles en ciblant les zones les plus vulnérables et en priorisant les actions à mettre en œuvre en fonction de la problématique.

Encore plus, parce que je suis de cette région, et je voulais faire une étude sur les feux de forêt vécus dans les années 2007 et 2008.

1.3 L'objectif

L'objectif de ce travail est d'utiliser une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des forêts au feu à l'aide de la géomatique et de l'analyse multicritère. La méthode sera appliquée à la zone forestière du sud-ouest de massif Tlemcen pour cartographier la vulnérabilité au risque d'incendie de forêt en tenant compte de critères tels que la topographie, la densité de végétation, la distance aux routes. Le but ultime est de fournir aux gestionnaires forestiers une carte à jour et précise de la vulnérabilité des zones étudiées pour les aider à planifier et à mettre en œuvre des mesures préventives et curatives en fonction des problèmes identifiés.

1.4 Méthodologie

Ce mémoire est divisé en deux parties ; dont la première est une partie théorique et la seconde est une partie pratique :

- **Partie théorique :** Elle consiste en la collecte de documents, de revues, de travaux de recherche, d'articles de journaux, d'actes de séminaires, thèses, mémoires de master...etc. L'objectif de cette étape est de nous familiariser avec les différents concepts, de mieux comprendre, de cerner la problématique et dégager la matière nécessaire à la recherche.
- **Partie pratique :** Après avoir délimité le périmètre d'étude, nous avons procédé à la collecte des informations nécessaires à l'analyse, en l'occurrence, les données géo spatiales.

La collecte des données s'est faite auprès des différents sites tel que le site internet USGS ; la plateforme Google Earth Engine et d'autres données sont acquises auprès du centre des Techniques Spatiales d'Arzew à Oran.

Les données collectées ont été traitées afin d'être analysées de manière représentative à l'aide de différents outils tels que des tableaux numériques, graphiques, organigrammes, figures, cartes et plans.

Pour le traitement de ces données, nous avons utilisé des logiciels tels qu'ARCGIS 10.8, Microsoft Excel 2007, la plateforme Google Earth Engine.

1.5 Plan de travail

Ce mémoire présente les travaux menés dans le cadre de l'utilisation de la géomatique, associée à une analyse multicritère, peut aider à mieux comprendre la vulnérabilité des forêts de la partie sud-ouest du massif de la wilaya de Tlemcen

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres :

-le premier chapitre est une recherche bibliographique ;

-Le deuxième chapitre présente la zone d'étude et la méthodologie de travail ;

-Le troisième chapitre illustre la méthodologie et l'application sur la zone d'étude.

-Le quatrième chapitre est consacré à la validation des résultats par the difference Normalized Burn Index - Utilisation de la télédétection spectrale pour comprendre les impacts des incendies sur le paysage.

On termine ce travail par une conclusion.

1.6 Les contraintes rencontrées :

L'application s'est confrontée à plusieurs limites qui ont eu un impact sur sa mise en œuvre. Premièrement, la grande superficie de la zone d'étude s'est avérée être un obstacle majeur pour la classification supervisée. En raison de cette étendue, la végétation présente dans la zone n'était pas homogène, ce qui rend difficile l'identification précise des différents types de couverture végétale à partir des données disponibles. Cette hétérogénéité a entraîné une grande variabilité dans les caractéristiques des classes de plantes, rendant la classification supervisée plus complexe et moins précise.

Également, le manque de données historiques sur les feux de forêt s'est révélé être un obstacle majeur lors de la validation de la carte de vulnérabilité. Cette lacune a nécessité un investissement de temps considérable pour identifier les zones d'incendie à partir de l'indice de brûlure (burn index) disponible. Sans les données historiques, il était difficile de disposer d'une base de référence pour évaluer l'exactitude de la carte de vulnérabilité et de confirmer la validité des zones identifiées comme ayant été touchées par des incendies de forêt dans le passé.

Chapitre 1 :

Synthèse bibliographique

2 Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons une synthèse bibliographique sur des travaux et recherches antérieurs liés au sujet de notre étude plus des généralités sur les concepts de bases. Cette revue de la littérature nous permettra d'identifier les principales théories, méthodologies, résultats existantes dans ce domaine pour mieux comprendre notre recherche

Présentation de la forêt algérienne :

L'Algérie, avec une superficie totale d'environ 2,4 millions de km², peut être subdivisée en deux parties distinctes. Tout d'abord, les régions du nord occupent 250 000 km², ce qui représente un peu plus de 10% de la superficie totale. Dans ces régions, les conditions climatiques et environnementales permettent le développement de formations forestières.

En revanche, les régions sahariennes arides couvrent près de 90% du territoire algérien. Ces régions reçoivent moins de 200 mm de précipitations par an, ce qui rend le climat extrêmement sec.

En ce qui concerne la couverture forestière, Selon le **DGF** ; les forêts et maquis couvrent 4,1 millions d'hectares dans le nord de l'Algérie, ce qui correspond à un taux de boisement de 16,4%. Cependant, si l'on inclut également les régions sahariennes arides, le taux de boisement global chute à seulement 1,7%. Ces taux de boisement sont clairement insuffisants pour assurer l'équilibre physique et biologique.

L'essence prédominante est le pin d'Alep qui occupe 880000 ha et se rencontre principalement dans les zones semi arides.

Le chêne liège avec 230 000 ha se localise principalement dans le nord-est du pays. Les chênes Zeen et Afarès avec 48 000 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie. Les cèdres sont éparpillés sur 16 000 ha en îlots discontinus dans le tell central et les Aurès. Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 32 000 ha. Les eucalypt introduits dans le nord et surtout dans l'Est du pays occupent 43 000 ha.

Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1 249 000 ha dont 424 000 ha de peuplements artificiels.

Le second groupe, constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride jouent un rôle essentiellement de protection, ne couvre que 219 000 ha. Le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2 603 940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727 000 ha et les maquis et broussailles qui occupent une superficie de 1 876 000

ha. Les forêts font partie du domaine public de l'Etat. S'ajoutent à ces superficies forestières les nappes d'alfa qui totalisent 2,7 millions d'hectares.

Les principales essences forestières sont estimées comme suit :

Tableau 1 : Les principales essences forestières en Algérie.

Essences forestières	Superficie estimées (hectares)
Pin d'Alep	881 000 ha
Chêne liège	230 000 ha
Chênes Zeen et Afarès	48 000 ha
Cèdre de l'Atlas	16 000 ha
Pin maritime	31 000 ha
Eucalyptus	43 000 ha
Chêne vert	108 000 ha
Genévriers	219 000 ha
Thuya de Berbérie	124 000 ha
Matorrals et broussailles	1662 000 ha

2.2 Description de la forêt algérienne :

Milieu naturel, fragile et perturbé, la forêt ne pourra se développer que si les gestionnaires forestiers prennent conscience de sa conservation en tenant compte de son importance écologique et économique. En considérant les critères bioclimatiques, l'Algérie présente tous les bioclimats méditerranéens en allant de l'humide au saharien. Les zones semi-arides présentent des aspects bien particuliers tant par les espèces qui les constituent, conifères essentiellement, présents également en dehors de ces zones, mais aussi par la structure des formations végétales qu'elles déterminent et qui sont en fait presque toujours des formations arborées, souvent claires, à sous-bois de type matorral répondant plutôt à des structures pré-forestières, voire pré steppiques (**Abi-Saleh, B Arbéro, Nahal et Quézel, 1976**).

En 2019, l'Algérie demeurait le pays le plus vaste d'Afrique, couvrant une superficie de 2,382 millions de km², dont 84% est occupé par le Sahara. Cependant, les 16% restants sont répartis entre divers types de sol, ne laissant qu'environ 250 000 km² propices à la végétation, avec seulement 41 000 km² de couverture forestière. Cette zone ne représente que 16% du nord de l'Algérie, soit seulement 1,7% de l'ensemble du territoire, ce qui est considéré comme insuffisant selon le rapport algérien de la FOSA, l'Étude Prospective du Secteur Forestier en Afrique initiée par la (**FAO 2002**).

En effet, pour assurer l'équilibre physique et biologique du territoire, le taux de couverture forestière devrait s'élever à 28% du nord de l'Algérie soit environ 70 000 km² ; le couvert existant ne représente donc que 57% de cet optimum.

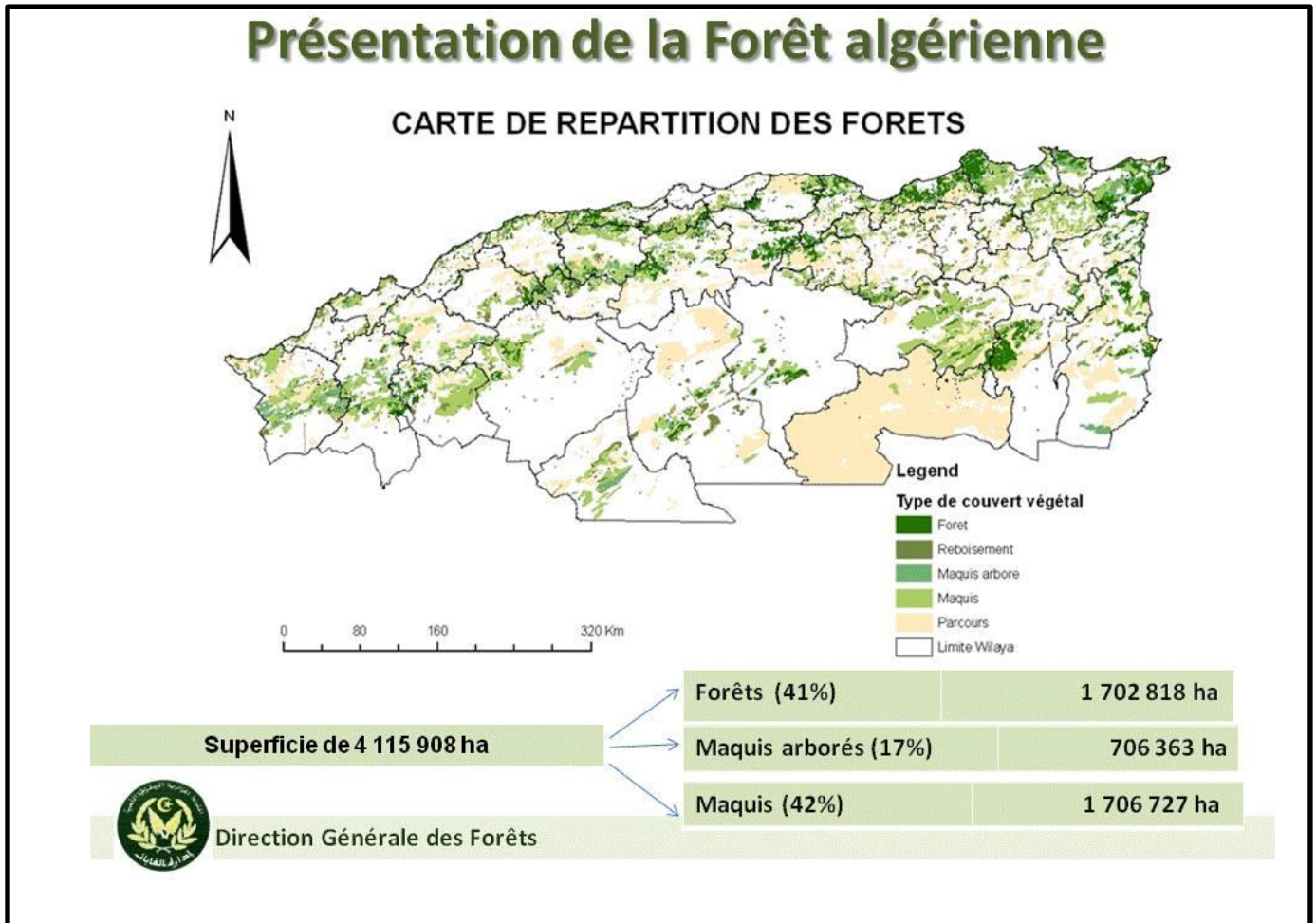


Figure 1 : Répartition des forêts algériennes(DGF)

2.3 Généralités sur la gestion et l'évaluation des risques

2.3.1 Notion de risque :

La perception des dommages potentiels liés à une situation dangereuse se rapporte à la notion de risque. Le terme risque à plusieurs significations. De même, les risques peuvent être de nature très variée et beaucoup de classifications ont été proposées. Le risque est la mesure du niveau de danger, fonction de la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable et des conséquences (gravité) de cet évènement. Un risque est la combinaison de la probabilité et de la (des) conséquence (s) de la survenue Selon **OHSAS 18001 / ISO 45001**

Selon la définition du BIT : « Le risque est l'éventualité qu'un événement non désiré ayant des conséquences données survienne dans une période donnée ou dans des circonstances données, cette éventualité étant exprimée selon le cas en termes de fréquence (nombre d'évènements donnés par unité de temps) ou en termes de probabilité (probabilité que se produise un événement donné à la suite d'un événement préalable) ».

2.3.2 Gestion du risque :

La gestion du risque peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées en vue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable. Cette définition, cohérente avec les concepts présentés dans les guides **ISO/CEI 51 et 73**, s'appuie, ainsi, sur un critère d'acceptabilité du risque.

De manière classique, la gestion du risque est un processus itératif qui inclut notamment les phases suivantes :

- Appréciation du risque (analyse et évaluation du risque) ;
- Acceptation du risque ;
- Maîtrise ou réduction du risque.

2.3.3 Analyse du risque :

L'analyse du risque est définie dans le guide **ISO/CEI 51 : 1999** comme « l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque ». L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens. Dans un second temps, l'analyse des risques permet de mettre en lumière les barrières de sécurité existante en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (barrières de prévention) ou d'en limiter les conséquences. (Barrières de protection). Consécutivement à cette identification, il s'agit d'estimer les risques en vue de hiérarchiser les risques identifiés au cours de l'analyse et de pouvoir comparer ultérieurement ce niveau de risque à un niveau jugé acceptable.

2.3.4 La vulnérabilité :

La vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel (un aléa) sur des enjeux (les sociétés humaines et leurs activités). Elle est traduite en anglais par les termes *vulnerability* ou *sensitivity*. La notion de vulnérabilité évalue dans quelle mesure un système socio-spatial risque d'être affecté par les effets d'un aléa et cherche à quantifier ce qui est perdu.

Les approches en termes de vulnérabilité sont assez récentes, elles datent des années 1960 - 1970 dans le monde anglo-saxon et des années 1980 en France. La vulnérabilité, en englobant les enjeux, exprime un degré d'exposition à l'aléa qui peut être évalué par le niveau d'endommagement constaté ou prévu.

L'analyse de la vulnérabilité s'appuie sur une description de l'impact du dommage selon différents critères : sensibilité au dommage, degré de dépendance, la transférabilité, qui mesure la capacité d'adaptation et la résilience, qui mesure la capacité de cicatrisation après l'événement.

2.4 Généralités sur les incendies :

2.4.1 Définition de l'incendie :

Le feu résulte de la combustion de la végétation. Cette réaction chimique est provoquée par une source de chaleur d'origine naturelle ou humaine et nécessite un combustible et l'oxygène (Chauvie et Al. 2016).

Pour qu'un feu de forêt se déclenche, il faut que trois paramètres fondamentaux soient en présence : le combustible, le comburant et la chaleur (Carbonnel et Al. 2004). La réaction chimique de combustion ne peut se faire qu'à la présence de ces trois éléments. On représente de façon symbolique cette association par le triangle du feu.

Par ailleurs, Plusieurs définitions ont été proposées pour définir le feu de forêt et parmi elles, celle de (Trabaud 1992), qui définit l'incendie comme « une combustion qui se développe sans contrôle dans l'espace et dans le temps. L'incendie de forêt s'alimente de tous les combustibles possibles et ainsi se propage jusqu'à l'épuisement de ceux-ci ».



Figure 2 : Le triangle du feu (Ramade, 1997)

Dans le triangle du feu, la végétation forestière constitue le combustible. Par sa composition et sa structure, par sa teneur en eau, elle exigera une température plus ou moins élevée pour s'enflammer, par sa densité et sa répartition sur le terrain (**Chautrand, 1972 in Meddour- Sahar, 2014**).

Un comburant est le corps qui provoque et entretient la combustion du combustible. Le plus souvent, le comburant est constitué par l'oxygène présent dans l'air ambiant. La réaction de combustion est alors une oxydation (**Carbonnel et Al. 2004**).

Les situations idéales de développement des incendies se rencontrent lorsque sont réunies certaines conditions de climat, de végétation, de topographie et de gestion sociale et économique de l'espace (**Meddour- Sahar, 2014**).

2.4.2 Types des incendies

Tout feu se signale d'abord par une fumée. Celle-ci peut être grise et diffuse, s'il s'agit d'un foyer moyen. Elle peut être aussi noire et moutonnante et signale, dans ce cas, un feu à fort potentiel de développement, pouvant se propager par saute. Enfin, noire et rousse, avec des flammes, elle caractérise une combustion intense, absorbant tout l'oxygène de l'air.

Une fois éclos, un feu peut prendre différentes formes, chacune étant conditionnée par les caractéristiques de la végétation et les conditions climatiques (principalement la force et la direction du vent) (**Colin et Al, 2001**).

Il y a trois types de feu qui peuvent être distingués selon les strates du combustible (**Johann, SD**):

➤ **Les feux de sol :**

La ligne aura une largeur de 0,3 m au moins jusqu'au sol minéral, encerclant totalement l'incendie (**Chauvin et al. 2016**).

Ils brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières. Peu virulents, la combustion des végétaux est lente en profondeur. Même si les flammes ne sont pas visibles, le feu peut rester actif pendant de longues périodes.

Ce type de feu nécessite beaucoup d'eau pour obtenir l'extinction complète, le feu couve en profondeur, (**Colin et al., 2001**).

➤ **Les feux de surface (maquis, herbacées) :**

La ligne aura une largeur de 0,5 à 4 m, selon la violence du feu. Elle sera nettoyée jusqu'au sol minéral (**Chauvin et al, 2016**).

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 (vent, relief) (Colin et al, 2001 ; Johann G., SD).

➤ Les feux de cimes

La ligne aura une largeur de 7 à 10 m. Elle sera nettoyée également jusqu'au sol minéral et utilisée comme base pour allumer un contre-feu. (Chauvin, 2016).

Ils brûlent la partie supérieure des arbres (ligneux hauts) 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 (colin et al, 2001 ; Johann, SD).

Les feux les plus graves sont les « feux totaux » qui brûlent tant la surface que les cimes. Lorsqu'ils atteignent des niveaux d'intensité élevés, les incendies de forêt sont capables de transporter des matières en ignition ou brandons sur plusieurs centaines de mètres depuis le front du feu et d'allumer des foyers secondaires (Johann, SD).



Figure 3 : Les types de feux de forêts

2.4.3 Les origines et facteurs influents des feux de forêt :

Un feu de forêt est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace.

Différents facteurs de prédisposition, d'éclosion et de propagation concourent à la manifestation de ce phénomène.

A- L'influence des facteurs naturels

- Le type de végétation : certaines formations végétales sont plus sensibles que d'autres.
- La disposition de la végétation.
- Les conditions météorologiques : elles dépendent de la température, du degré hygrométrique de l'air, de l'absence ou non de précipitations, des vents violents et desséchants, de la foudre.
- Les conditions orographiques : le relief joue sur l'accélération de la progression du feu.

B- L'influence des facteurs anthropiques :

- Les activités humaines : les loisirs, les travaux agricoles ou forestiers, les dépôts D'ordures, les transports.
- L'imprudence.
- La malveillance.
- L'évolution de l'occupation du sol : l'augmentation de l'interface forêt/habitat, l'abandon des espaces ruraux, l'extension des zones urbanisées jusqu'aux abords des zones boisées, le mitage.

C- Les facteurs de propagation :

- La structure et la composition de la végétation : discontinuité ou non du massif.
- Le vent : il apporte de l'oxygène, active la combustion, rabat les flammes sur la végétation et transporte des particules incandescentes (figure, 3).
- Les sautes de feux.
- Le relief : produit des effets imprévisibles (succession de feux ascendants et de feux descendants rapides).

La déprise agricole : l'abandon des zones agricoles. Les zones agricoles cultivées à la périphérie des forêts pouvaient servir de barrières au feu (**Depraetere, 2007**).

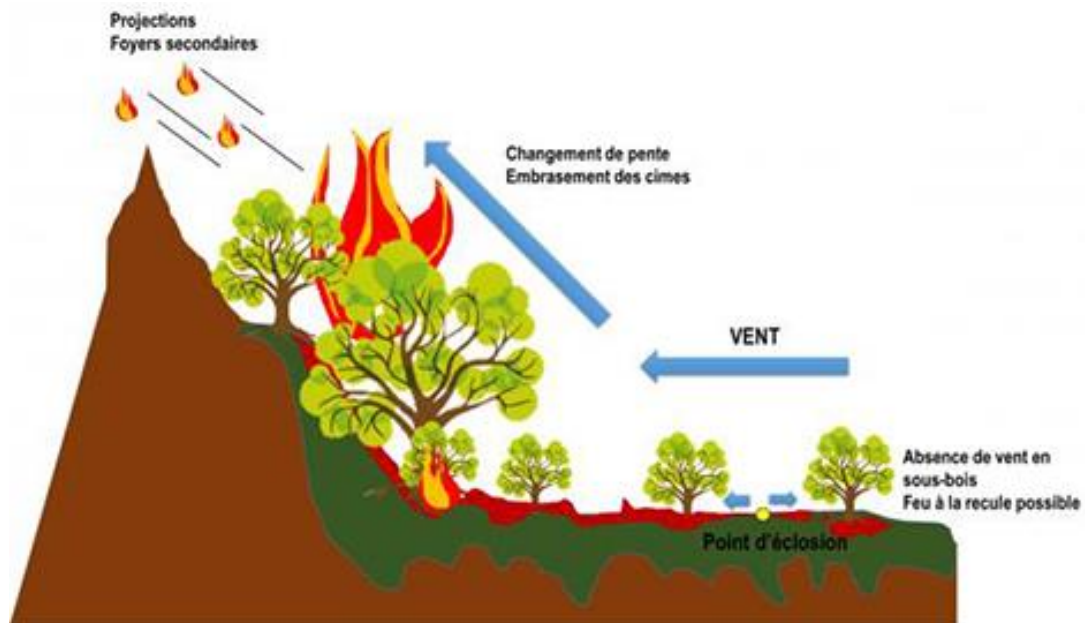


Figure 4 : Les facteurs de propagation d'un feu de forêt.

2.4.4 Le phénomène des incendies de forêt en Algérie :

L'Algérie est caractérisée par des écosystèmes forestiers très diversifiés et fragiles influençant par sa position géographique et aux variations importantes de son climat.

Ces formations forestières se composent principalement d'essence méditerranéenne, Ces écosystèmes sont aujourd'hui exposés aux effets de l'érosion, de la désertification et à la pression de l'homme et en particulier aux incendies de forêt.

Au cours des dernières années, dans des conditions météorologiques extrêmes, plusieurs incendies catastrophiques ont été enregistrés si on se réfère aux incendies de la dernière décennie, entre (2010 - 2021) l'Algérie a recensé 4185 incendies, estimait que plus de 37 000 hectares de forêts dispersé chaque année.

Quand le pays est plus en plus en état de sécurité stable et avec la création des nouvelles pistes et routes forestières et leur aménagement dans le but d'éliminer l'isolement des habitations rurales, la forêt est devenue plus accessible et soumise à tous risques que cette accessibilité puisse entraîner.

2.5 Géomatique :

2.5.1 Définition :

C'est au début des années 70 qu'un ingénieur géographe employa pour la première fois le mot « géomatique » pour faire allusion au mariage des sciences de l'étude et des mesures de la terre avec l'informatique. De nos jours, la géomatique est définie comme étant un champ d'activités qui a pour but d'intégrer les moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale en vue d'aboutir à une information d'aide à la décision. Dans un cadre systémique la notion de système explique la prise en compte de tout ce qui concourt à la réalisation d'un projet de géomatique : les données, les équipements, les spécialistes, le cadre physique de travail ainsi que les procédures qui les coordonnent **(C.C.T, 1999)**.

2.5.2 Objectifs de la géomatique :

De façon générale, la géomatique vise à :

- Définir les bases de la référence spatiale ;
 - Développer et utiliser les méthodes, techniques et outils pour localiser et mesurer les différents éléments du territoire, existants ou les mettre en place ;
 - Intégrer ou rendre intégrables les données obtenues en fonction des systèmes de référence choisis (modélisation mathématique pour transformer un besoin du monde réel) ;
 - Offrir des données et informations de qualité ;
 - Améliorer leur traitement, stockage et diffusion grâce à l'informatique ;
 - Analyser différents scénarios décisionnels à partir des informations obtenues en tirant profit des méthodes mathématiques d'optimisation (analyse multi variée, recherche opérationnelle...)
- (C.C.T, 1999)**.

La géomatique est la science et la technologie de la cueillette, de l'analyse, de l'interprétation, de la distribution et de l'utilisation de l'information géographique. Elle englobe une foule de disciplines qui, dans un système à référence spatiale commune, concourent à créer une représentation à la fois détaillée et compréhensible du monde physique et de l'espace que nous y occupons **(C.C.T, 1999)**.

Parmi ces disciplines, on compte :

- La télédétection ;
- Les systèmes d'information géographiques ;
- La cartographie.

2.6 Télédétection :

2.6.1 Définition :

La définition par la commission ministérielle canadienne de terminologie de la télédétection aérospatiale publiée au journal officiel canadien le 11 décembre 1980 est : « la télédétection regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Ceci suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté »

(C.C.T, 1999).

2.6.2 Eléments essentiels en télédétection :

On distingue les satellites géostationnaires placés sur une orbite équatoriale à 35800 km d'altitude. Ceux sont généralement des satellites météorologiques.

Les satellites de télédétection à défilement ont une orbite quasi-circulaire polaire à une altitude située entre 700 et 900 km.

Ces satellites ont une orbite héliosynchrone, c'est -à-dire que le satellite survole une latitude donnée à une heure locale sensiblement constante d'une révolution à l'autre. Ceci permet de bénéficier d'un éclairage solaire assez peu variable. Le satellite américain LANDSAT, le satellite ASTER. Le satellite français SPOT et le satellite algérien ALSAT1 appartiennent à cette catégorie **(Girard, 2000).**

2.6.3 La série LANDSAT :

Le programme Earth Resources Technological Satellite (ERTS) utilisant les satellites ERTS-1 dont le nom a été transformé en LANDSAT (land satellite) est dû à la NASA **(Girard, 2000)**. Le premier satellite, LANDSAT-1 fut lancé en 1972 et suivit de 5 autres (LANDSAT 2 à 6). Les trois premiers constituent la première génération, équipée de deux systèmes d'acquisition : le RBV (Return Beam Vidicom) et le MSS (Multi Spectral Scanner).

En 1982, le satellite LANDSAT-4 est le premier de la seconde génération, en apportant quelques modifications majeures sur le scanner et en remplaçant les caméras RBV par un nouveau capteur de résolution spatiale plus élevée 30 m contre 80 m, le Thématique Mapper « TM », possédant sept bandes spectrales plus fines, du bleu à l'infrarouge thermique **(Girard, 2000)**.

En 1999, le satellite LANDSAT-7 a été lancé avec un nouvel capteur (ETM+) Enhanced Thématique Mapper Plus, l'instrument d'ETM+ comporte huit bandes spectrales capables de fournir des informations à Haute résolution. Il détecte le rayonnement spectral filtré dans le

visible, proche-infrarouge, et l'infrarouge thermique. Les tailles des "Pixel" sont de 15 mètres dans la bande panchromatique ; 30 mètres dans les bandes de visible et l'infrarouge moyen et proche, et 60 mètres dans la bande infrarouge thermique (**Girard, 2000**).

Les satellites 1 à 5 n'ayant pas d'enregistreur embarqué, les données sont envoyées en temps réel aux stations de réception, quand il ne peut y avoir de liaison directe, les informations sont envoyées par des relais en utilisant des satellites de communication TDRS (Tracking and Data Relay Systems).



Figure 5 : Historique de la série Landsat

➤ **Première génération** (Orbite héliosynchrone phrasée)

- LANDSAT 1 : 23 juillet 1972
- LANDSAT 2 : 22 janvier 1975
- LANDSAT 3 : 5 mars 1978

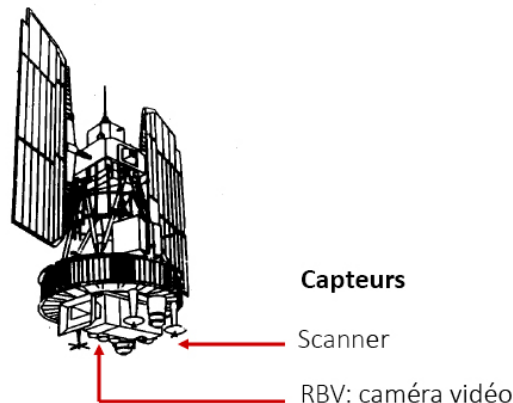


Figure 6 : Capteurs Landsat premier génération

➤ **Seconde génération** (Orbite héliosynchrone phrasée)

- LANDSAT 4 : 16 juillet 1982
- LANDSAT 5 : 1 mars 1984
- LANDSAT 6 : 5 octobre 1993 (échec)

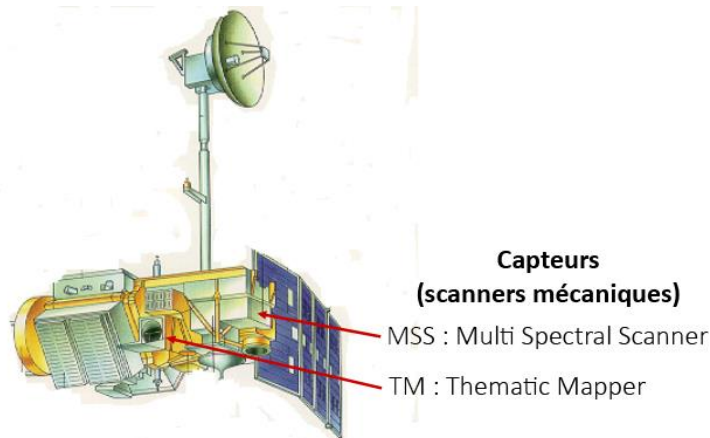


Figure 7 : Capteurs Landsat deuxième génération

➤ **Landsat 7**

-Date de lancement : 15 avril 1999

-Durée de vie initialement prévue : 5 ans, Landsat 7 devrait poursuivre sa mission jusqu'en 2017.

- Caractéristiques orbitales de Landsat 7 :
- Altitude : 705 km
- Inclinaison : 98 degrés
- Orbite : quasi polaire héliosynchrone (horaire de passage à 45° latitude nord : 09h30)
- Période de révolution : 99 minutes
- Durée d'un cycle : 16 jours

Bandes multispectrales	Bande thermique multispectrale	Bande panchromatique
Résolution : 30 m	Résolution : 60 m	Résolution : 15 m
Bandes (microns) : 0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90 1.55-1.75 2.08-2.35	Bandes (microns) : 10.4-12.5	Fauchée : 185 km Bandes (microns) : 0.5-0.9

Figure 8 : Caractéristiques de satellite Landsat 7

➤ Landsat 8

-Date de lancement : 11 février 2013

-Durée prévue de service : 10 ans (2023)

- caractéristiques orbitales de Landsat 8 : sont les mêmes que celles de Landsat 7 :
- Altitude : 705 km
- Inclinaison : 98 degrés
- Orbite : quasi polaire héliosynchrone (horaire de passage à 45° latitude nord : 09h30)
- Période de révolution : 99 minutes
- Durée d'un cycle : 16 jours

Landsat 8 emporte deux instruments de prise de vue :

- **OLI** (Operational Land Imager)
- **TIRS** (Thermal Infrared Sensor)

Sa fauchée de prise de vue est de 185 km.

Operational Land Imager (OLI)			Bande Thermique		Bande panchromatique	
Bande multispectrales			Résolution : 60 m.		Résolution : 15 m.	
Résolution : 30 m.			Numéro de bande	Longueur d'onde	Numéro de bande	Longueur d'onde
1	Visible	0.45 - 0.52 μm	6	10.40 - 12.50 μm	8	0.52 - 0.90 μm
2	Visible	0.52 - 0.60 μm				
3	Visible	0.63 - 0.69 μm				
4	Infra-rouge	0.77 - 0.90 μm				
5	Infra-rouge	1.55 - 1.75 μm				
7	Moyen infra-rouge	2.08 - 2.35 μm				
Thermal Infrared Sensor (TIRS)						
Résolution : 100 m.						
Numéro de bande	Spéctre	Longueur d'onde				
10	Infra-rouge thermique	10.6 - 11.19 μm				
11	Infra-rouge thermique	11.5 - 12.51 μm				

Figure 9 : Caractéristiques de satellite Landsat 8

2.6.4 Traitement des données de télédétection :

Les réflectances enregistrées par les capteurs sont transmises à des stations de réception terrestres, soit en temps réel (directement ou via un autre satellite) soit en temps différé (lorsque le satellite arrive « en vue » d'une station de réception). Dans tous les cas, les données transmises se présentent sous la forme brute d'un flux de données qui doit être traité avant d'être délivré à des utilisateurs (Esadafal et al, 1999).

A. Prétraitement des images satellitaires

Les prétraitements sont des opérations réalisées sur les images de télédétection avant l'analyse et l'interprétation des images. Les corrections visent à compenser les perturbations de la radiométrie et la géométrie de l'image intervenant lors de la prise de vue.

La mise au point d'une méthode concertée de surveillance par télédétection suppose un certain nombre d'étapes techniques incontournables. Parmi celles-ci, les corrections géométriques et radiométriques sont fondamentales pour la détermination de changements

(Escadafal et al, 1999).

B. Les corrections radiométriques

Les données radiométriques acquises par un capteur satellitaire sont affectées par un certain nombre de facteurs tels que les caractéristiques du capteur et l'état de l'atmosphère. Le passage des données brutes enregistrées par le capteur aux images corrigées de ces facteurs se fait en quatre étapes (**Bouzi, 1999**) :

1. Tout d'abord, il faut éliminer les perturbations dues à l'instrumentation pour rétablir les contrastes existant entre les objets ;
 2. Ensuite, les données brutes sont transformées en grandeurs physiques par l'introduction de coefficients d'étalonnage (étalonnage absolu) et par la prise en compte des conditions d'acquisition (orientation et inclinaison de la visée, position de soleil, résolution spectrale et spatiale). Les données obtenues sont alors exprimées en réflectance apparente au niveau du satellite ;
 3. La troisième étape consiste à éliminer les perturbations induites par l'atmosphère (correction atmosphérique) afin d'obtenir la réflectance des objets au niveau du sol. Les données ainsi obtenues sont relatives à une surface fictive, plane et horizontale en supposant un éclairage uniforme et constant ;
 4. Enfin, des corrections au niveau de la topographie (correction topographiques) sur l'éclairage sont effectuées pour acquérir des caractéristiques optiques réelles de la surface.
- Les effets dus aux instruments étant corrigés avant la distribution des images par les fournisseurs, seules les trois dernières étapes ont dû être réalisées (**Bouzi, 1999**).

C. Les corrections géométriques

Il reste de corriger les déformations géométriques de l'image dues à plusieurs sources d'erreurs. Ces corrections sont nécessaires pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les données enregistrées par le capteur du satellite ne sont pas présentées dans une projection cartographique courante, rendant difficile la comparaison avec des données géo référencées comme les cartes thématiques, de plus, ces corrections sont essentielles pour comparer et superposer une série d'images. Les méthodes de correction géométrique appliquées aux images numériques de télédétection peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes de corrections à partir des paramètres du satellite et les méthodes de corrections par référence à des points de coordonnées connues dans un autre système (**Bouzi, 1999**).

2.6.5 Classification des données :

L'objectif général des classifications est de traduire des informations spectrales en classes thématiques (d'occupation du sol, par exemple). La segmentation de l'image en classes thématiques est aussi appelée zonage (figure 9).

Les stratégies de zonage sont multiples (**Kluser, 2000**) :

- Approches par pixel (analyse multi-spectrale, segmentation d'indice) ;
- Approche par zone (détection de contour, texture) ;
- Approche par objet (analyse morphologique, détection de formes).

Deux types de méthodes de classification sont employés pour analyser les changements de milieu, la classification non supervisée et la classification supervisée.

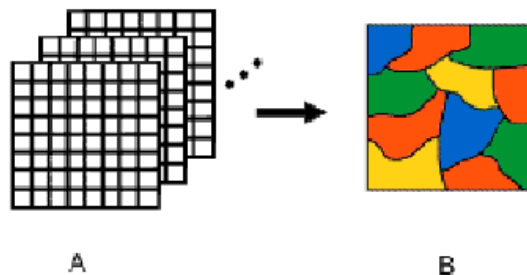


Figure 10 : Principes de classification des images (KLUSER 2000)

➤ La classification non supervisée :

Elles sont effectuées sans prise en compte de données de terrain (figure11). Il s'agit d'un découpage entièrement mathématique des données radiométriques en un nombre de classes définies. Il existe des algorithmes de classification, composés de plusieurs itérations, permettant de créer des regroupements de pixels ayant des signatures spectrales similaires. L'utilisateur procède ensuite à la reconnaissance des classes créées par l'algorithme en affectant un nom et une couleur à chaque classe. Un des algorithmes de classification non supervisée est appelé « Agrégation autour des centre mobiles ou méthode ISODATA » (**Dos Santos, 2001**)

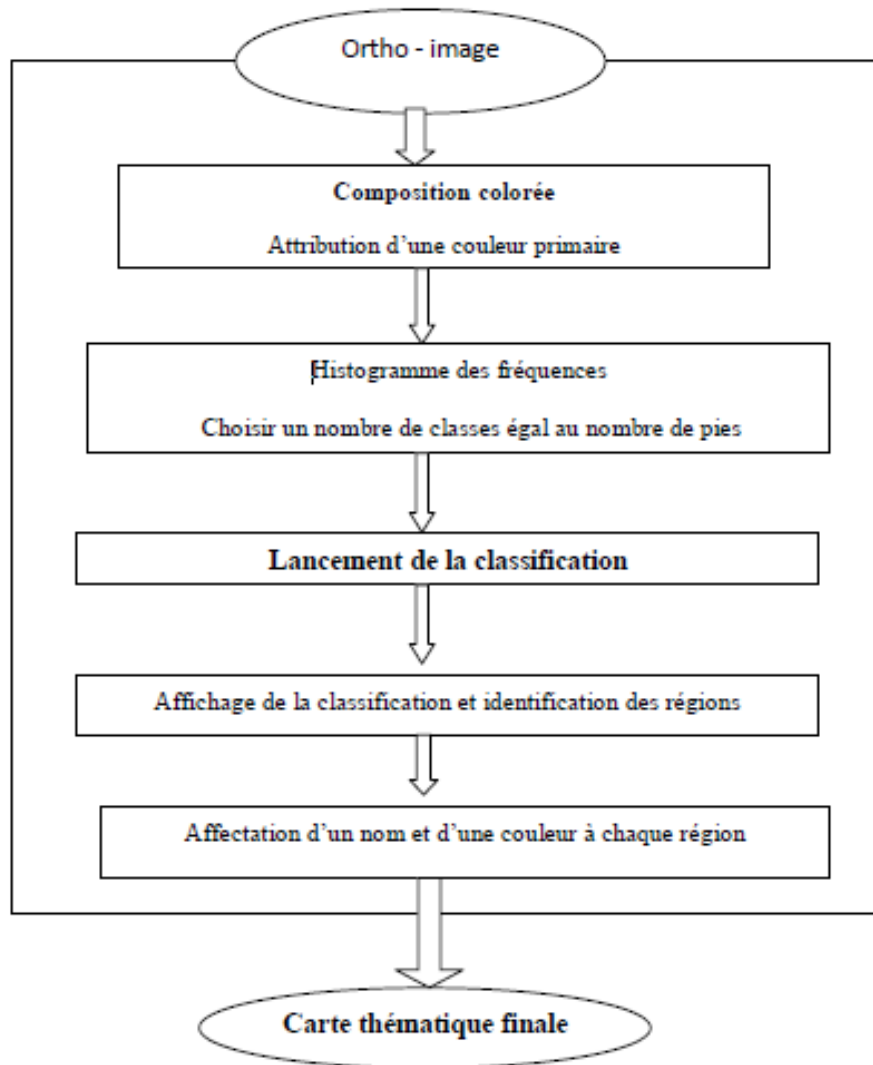


Figure 11 : Les étapes de la classification non supervisée (DOS SANTOS 2001)

➤ **La classification supervisée :**

Le principe de la classification supervisée est de regrouper les pixels à des classes thématiques, basées sur une connaissance préalable de la zone à étudier. Les classes sont définies sur la base de zones d'apprentissage, qui sont des échantillons représentatifs des classes (figure 11). Cette méthode de classification comporte les étapes suivantes (Dos Santos, 2001) :

a) Définition de la légende

Choix des classes souhaitées suivant la problématique de recherche.

b) Sélection d'échantillons représentatifs

Pour chaque type d'occupation du sol, on identifie sur l'image des zones représentatives appelées échantillons. si possible, deux jeux d'échantillons sont définis :

- Des zones d'apprentissage, qui permettront de décrire les classes en termes de valeurs ;
- Des zones de test, qui serviront à la vérification de la classification.

c) Description des classes

Les classes sont décrites en termes de paramètres statistiques (valeur moyenne, minimum, maximum, variance, etc.) calculés à partir des zones d'apprentissage sélectionnées sur l'image.

d) Choix d'un algorithme de classification

Il faut ensuite choisir l'algorithme de classification et les règles de décisions appropriés. Les classifications sont basées sur des critères de distance ou de probabilité (maximum de vraisemblance, distance minimum...etc.). A ce stade, il importe d'évaluer le contenu et la séparabilité des classes :

❖ De manière visuelle, sur une représentation graphique des signatures spectrales (courbes de signatures, histogrammes, diagrammes à deux dimensions...etc.).

e) Lancement de la classification

A ce stade, tous les pixels de l'image sont classés selon l'algorithme de classification choisi.

f) Evaluation de la classification

Le résultat de la classification est évalué en le comparant à des informations de référence qui peuvent être fournies par :

- Des zones test sélectionnées sur l'image ;
- D'autres cartes ou images ;
- Des relevés de terrain.

L'interprétation des données multi-spectrales s'effectue le plus souvent par une méthode statistique de classement par maximum de vraisemblance, méthode généralement considérée comme la plus heureuse. Il est cependant difficile en pratique de dépasser une proportion de 65 % de pixels bien classés (**Porchier, 1993**)

2.7 Présentation des systèmes d'informations géographiques (SIG) :

Grâce au développement des nouvelles technologies (satellites et mise au point d'ordinateurs puissants) le Système d'Information Géographique (SIG), qui était assimilé au départ à un moyen de représenter les données sur une simple carte géographique, devient de plus en plus un outil important d'aide à la prise de décision ; un outil de portée relativement grande et élargie à des domaines connexes à la gestion globale du développement **(Sitayeb, 2006)**.

L'objectif fondamental du SIG est de fournir une base de prise de décision, dans plusieurs domaines, à partir des données satellitaires **(Sitayeb, 2006)**.

2.7.1 Définition :

En 1988, une définition donnée par **(Dickinson et Calkins)** reprend le SIG comme un système à plusieurs composantes: "Les SIG comportent trois types de composantes: technologiques (matériel et logiciel), informatives (bases de données géographiques et associées) et infrastructurelles (personnel, installations, services de support)." Cette définition donne une approche systémique du concept de SIG. Il ne s'agit pas seulement d'outils (logiciels), mais d'un système complexe. La SFPT (Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection) donne également sa définition d'un SIG lors d'un congrès à Strasbourg en 1990: un "système informatique permettant à partir de diverses sources de rassembler, organiser, gérer, analyser, combiner, élaborer, présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Appelés GIS (Géographique Information System) dans le monde anglophone, ils sont, depuis 1988, définis aux Etats-Unis comme des « systèmes informatiques de matériels, de logiciels et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion ». En France, la définition, est adoptée par le conseil national de l'information géographique (C.N.I.G.1) en 1990. Les S.I.G sont des « ensembles de données repérées dans l'espace et structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».

2.7.2 Composition d'un SIG :

2.7.2.1 La base de données géographique (BDG) :

L'analyse spatiale des données est un domaine ancien et vaste qui regroupe de nombreuses méthodologies, certaines générales et d'autres plus spécifiques à un champ thématique précis. Les logiciels SIG classiques sont donc loin d'être les seuls outils employés en analyse spatiale. Certains viennent de la géostatistique par exemple ou de champs thématiques comme l'écologie du paysage. Dans le domaine des SIG, on appelle parfois Géotraitements ces fonctions analytiques. Certaines se réalisent en mode vecteur, d'autres en mode raster, d'autres encore fonctionnent dans les deux modes. Parmi les fonctions générales susceptibles de s'appliquer dans différents domaines, on peut lister les traitements géométriques d'union et d'intersection, les mesures et calculs de distance euclidienne, de distance coût ou selon un réseau, les analyses de contiguïté et de voisinage, les calculs statistiques, l'algèbre de cartes, l'interpolation spatiale et la géostatistique, les analyses de distribution spatiale, de densité et de potentiel. Quelques exemples classiques plus spécifiques sont l'analyse topographique (pentes, orientations, morphologie, visibilité), les calculs hydrologiques, l'interprétation de données de télédétection. **(Glossaire SIG 2013)**

2.7.2.2 SGBD :

A l'origine, un SGBD est un logiciel dédié à la gestion des données alphanumériques de type attributaire stockées dans des tables et organisées en bases de données structurées. Grâce à un logiciel standardisé de requêtes attributaires (SQL = Standard Query Language), un SGBD permet d'interroger les tables, de procéder à des jointures ou à des synthèses. Les logiciels SIG proposent tous un module de SGBD en charge de la gestion des données attributaires. Plus récemment, les SGBD ont élargi le type de données qu'ils étaient capables de gérer et maintenant ce sont l'ensemble des données géographiques, attributaires, raster et vecteur que les SGBD-S (S pour spatiales), peuvent gérer de manière intégrée et cohérente. Toutefois le modèle classique associant une table à une couche d'entités reste encore dominant dans les systèmes simples.

L'organisation des données dans un SGBD doit être très stricte et formalisée par un modèle conceptuel de données. La correspondance entre deux tables doit se faire via une seule colonne (ou champ) dans chacune des tables mises en relation. Généralement, les relations se basent sur des colonnes qui servent d'identifiant pour être certain que la relation soit stable dans le temps et se base bien sur des valeurs uniques.

2.7.2.3 *L'analyse spatiale :*

L'analyse spatiale des données est un domaine ancien et vaste qui regroupe de nombreuses méthodologies, certaines générales et d'autres plus spécifiques à un champ thématique précis. Les logiciels SIG classiques sont donc loin d'être les seuls outils employés en analyse spatiale. Certains viennent de la géostatistique par exemple ou de champs thématiques comme l'écologie du paysage. Dans le domaine des SIG, on appelle parfois Géotraitements ces fonctions analytiques. Certaines se réalisent en mode vecteur, d'autres en mode raster, d'autres encore fonctionnent dans les deux modes. Parmi les fonctions générales susceptibles de s'appliquer dans différents domaines, on peut lister les traitements géométriques d'union et d'intersection, les mesures et calculs de distance euclidienne, de distance coût ou selon un réseau, les analyses de contiguïté et de voisinage, les calculs statistiques, l'algèbre de cartes, l'interpolation spatiale et la géostatistique, les analyses de distribution spatiale, de densité et de potentiel. Quelques exemples classiques plus spécifiques sont l'analyse topographique (pentes, orientations, morphologie, visibilité), les calculs hydrologiques, l'interprétation de données de télédétection. **(Glossaire SIG 2013)**

2.7.2.4 *L'analyse statistique :*

Les attributs associés aux entités vectorielles et stockés dans les colonnes d'une table d'un SGBD ou aux cellules d'une grille raster peuvent être considérés comme des variables statistiques sur lesquelles il est possible d'appliquer toutes les analyses statistiques classiques uni-, bi- ou multivariées. Rares sont cependant les logiciels SIG en mode vecteur disposant de fonctions autres que le calcul des paramètres statistiques de base. Des analyses plus élaborées demandent de mobiliser des outils spécialisés. Les formats de données attributaires sont habituellement facilement exportables vers les outils d'analyse statistique. **(Glossaire SIG 2013)**

2.7.2.5 *: Information Géographique*

Il s'agit au sens large de symboles qui représentent des mesures ou des observations collectées sur la surface terrestre pour caractériser des phénomènes divers, sociaux, techniques, naturels... Les symboles en question peuvent être sous forme de textes ou de nombres ou de graphiques. Ils sont de plus en plus souvent au format numérique dès la collecte, comme les données issues des satellites d'observation de la terre, ou numérisées dans un second temps comme les cartes anciennes par exemple. Les données correspondent à des valeurs brutes, dont la méthodologie de collecte est connue et validée mais qui ne sont pas interprétées.

La sélection, la combinaison ou la transformation des données en fonction d'objectifs précis les transforment en information géographique grâce aux Systèmes d'Information Géographique.

Avant d'être utilisées, les données brutes doivent être conceptualisées dans des modèles de données afin de les structurer, les organiser, les classer et de les définir.

Ces trois composantes permettent de répondre à différentes questions en interrogeant au moyen de requêtes attributaires et spatiales la base de données géographiques.

- ✓ Composante spatiale : que trouve-t-on ici ? Où se trouve ce type d'entité ? Cette entité est-elle semblable à ses voisines ?
- ✓ Composante temporelle : de quand date ceci ? Quelles sont les entités apparues après telle date ? Composante thématique : qu'est-ce que ceci ? Ceci est-il différent de cela ?

La puissance d'un système d'information géographique vient de ses capacités à répondre à des questions combinant ces trois composantes. Exemple : quelle est la nature des objets apparus des dix dernières années à proximité de cet autre objet ? .(Glossaire SIG 2013)

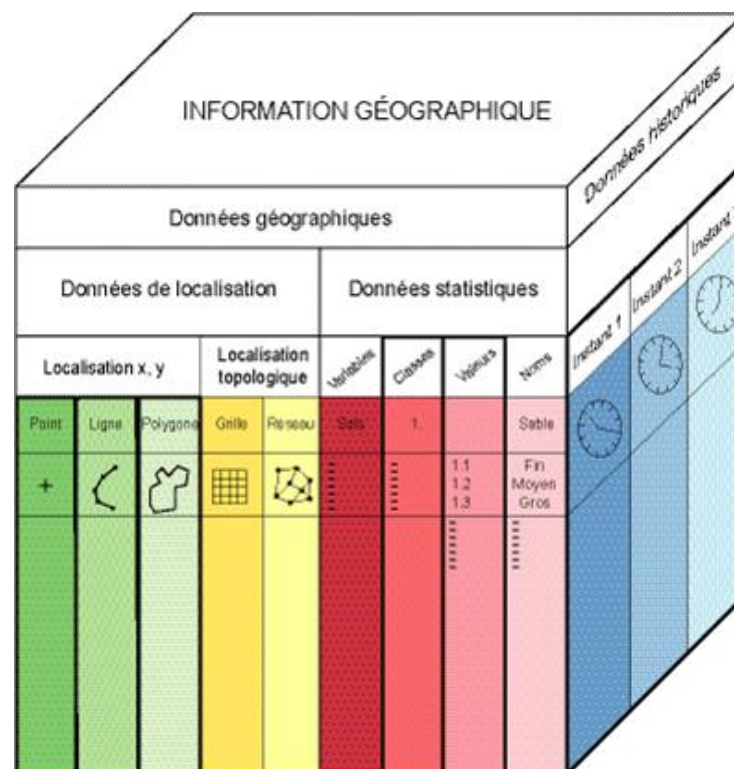


Figure 12 : Cube de l'information géographique (Dangermond 1983)

2.7.3 Principales fonctions d'un SIG :

Les systèmes d'information géographique peuvent être constitués pour répondre à différentes demandes. Comme le système universel n'existe pas, il faut les adapter selon les objectifs fixés. Toutefois ils ont en commun des fonctionnalités que l'on retrouve dans chaque système

regroupées en 5 familles sous le terme des « 5A » (figure 4) pour : Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse (**Marmonnier, 2002**) :

a) Abstraction : modélisation du réel selon une certaine vision du monde.

b) Acquisition : intégration et échange de données. (Import-export). L'acquisition des données est faite par trois types :

- *Digitalisations* : la numérisation des plans cartographiques scannés par l'ordinateur ou la table a digitalisé.

- *Scanner* : les cartes, les photos aériennes sont introduites sous forme des données raster.

- *Clavier* : la saisie des données attributaires.

c) Archivage : structuration et stockage de l'information géographique sous forme numérique.

d) Affichage : représentation et mise en forme, notamment sous forme cartographique

e) Analyse : analyse spatiale (calculs liés à la géométrie des objets, croisement de données thématique...)

2.7.4 Modes de représentation des données géographiques :

Les données spatiales sont représentées dans un SIG suivant deux modes : vecteur ou raster

2.7.4.1 Mode vecteur :

Le mode vectoriel correspond à une vue discrète du monde, constitué d'entités distinctes, contrairement au mode raster qui correspond à un modèle continu. Dans le mode vecteur les entités du monde réel sont traduites au moyen de formes géométriques exprimant leur contour. Il existe trois grandes formes de base : les points, les lignes et les polygones. Ces formes se traduisent numériquement par des paires de coordonnées (x,y) ou des triplets (x,y,z) dans les SIG 3D. Les structures vectorielles peuvent être plus ou moins complexes. Si les relations géométriques de contiguïté et de connexion ne sont pas prises en compte, on parle d'un modèle spaghetti. Dans le modèle le plus simple, les points sont stockés géographiquement sous formes de paires de coordonnées, les lignes sous forme de séries de paires de coordonnées et les polygones comme des séries de paires de coordonnées dont la dernière est identique à la première (fermeture du contour). Le modèle topologique permet de prendre en compte le fait que deux polygones contigus partagent une ligne et que deux lignes se croisent en un point qui leur est commun. Une manière de construire un modèle vecteur topologique et d'envisager les points comme des éléments de base, les lignes comme des connexions entre ces points et les polygones comme des agencements de lignes connectées entre elles. Dans une structure de données vectorielles, il faut distinguer les nœuds qui établissent les connexions entre les objets et les sommets qui construisent leur forme. **.(Glossaire SIG 2013)**

❖ **Les points :**

Ils définissent des localisations d'éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces qui n'ont pas de surface réelle comme les points cotés.

❖ **Les lignes**

Les lignes représentant les formes des objets géographiques trop étroits être décrits des surfaces (ex : rue ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau.

❖ **Les polygones**

Ils représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de formations végétales.

2.7.5 Mode raster :

Le mode raster ou maillé représente l'espace selon un maillage régulier appliqué sur la surface terrestre. Ce maillage se fait sous forme d'une grille formée de cellules de taille prédéterminée auxquelles sont attribuées des valeurs spécifiques. La taille de la cellule s'appelle la résolution spatiale. Le mode raster correspond à une vue du monde où les phénomènes varient de manière continue sous forme de champs, au sens physique du terme, comme un champ magnétique par exemple. La grille raster peut alors être vue comme une grille d'échantillonnage de ce champ continu où chaque pixel est un élément d'un échantillon de la réalité étudiée. Il s'oppose conceptuellement au mode vecteur, fondé sur un découpage a priori du monde en entités bien distinctes, effectué dans un espace discret (au sens mathématique du terme) où chaque polygone est un élément d'un échantillon de la réalité étudiée.

A chaque cellule est attribuée une valeur qui peut correspondre à une mesure (pollution, altitude), à une catégorie (type de végétation), à l'identifiant d'un objet (code d'une commune, numéro d'une route, d'une école), à un code couleur issu du scan d'une carte topographique ou à une valeur mesurée par un capteur placé sur un satellite. Dans le mode raster, un objet du monde réel n'est pas explicitement décrit, seule la cellule de la grille existe dans le système. Pour retrouver un objet, il faut demander au système d'afficher toutes les cellules portant le code correspondant à cet objet.

Le mode raster est très utilisé dans le domaine de la télédétection, pour stocker les images qui sont prises sur la surface terrestre. La grille prend alors le nom d'image et les cellules sont appelées des pixels. Les images satellites combinent, sur plusieurs canaux, des mesures

différentes de radiométrie qu'il faut combiner au moyen de compositions colorées. **.(Glossaire SIG 2013)**

Les modèles de la cartographie de risque d'incendie de forêt :

Les modèles de la cartographie de risque d'incendie de forêt sont des outils essentiels pour la prévention, la gestion et la lutte contre les incendies de forêt. Ils permettent d'identifier les zones à risque élevé d'incendie et d'affecter les ressources en conséquence. Voici quelques modèles couramment utilisés :

1. **Modèles empiriques** : Ces modèles sont basés sur l'analyse des données historiques d'incendies de forêt et des variables environnementales telles que la végétation, le climat, la topographie et les activités humaines. Les modèles empiriques établissent des relations statistiques entre les variables et le risque d'incendie pour estimer la probabilité d'occurrence des incendies de forêt.
2. **Modèles physiques** : Ces modèles sont basés sur la compréhension des processus physiques impliqués dans la propagation des incendies, tels que la combustion, la convection et la radiation. Ils tiennent compte des caractéristiques du combustible, de la météorologie et de la topographie pour simuler la propagation des incendies de forêt.
3. **Modèles déterministes** : Ces modèles utilisent des équations mathématiques pour décrire la relation entre les variables environnementales et le risque d'incendie. Les modèles déterministes peuvent être basés sur des lois physiques ou des relations empiriques.
4. **Modèles stochastiques** : Ces modèles tiennent compte de l'incertitude et de la variabilité des variables environnementales en utilisant des approches probabilistes. Les modèles stochastiques estiment la probabilité d'occurrence d'un incendie de forêt à partir de distributions de probabilité pour les variables environnementales.
5. **Modèles spatiaux** : Ces modèles intègrent des informations spatiales, telles que la distribution de la végétation, la densité de population et la topographie, pour estimer le risque d'incendie à différentes échelles spatiales. Les modèles spatiaux peuvent être utilisés pour identifier les zones à risque élevé d'incendie de forêt et pour planifier les mesures de prévention et de lutte contre les incendies.
6. **Modèles dynamiques** : Ces modèles simulent les interactions entre les processus écologiques, les perturbations naturelles et les activités humaines pour estimer le risque d'incendie de forêt. Les modèles dynamiques peuvent être utilisés pour évaluer l'impact

des changements climatiques, de la gestion des forêts et des politiques d'aménagement du territoire sur le risque d'incendie de forêt.

7. **Systèmes d'alerte précoce** : Ces systèmes combinent des données en temps réel sur la météorologie, la végétation et les activités humaines avec des modèles de risque d'incendie pour fournir des informations actualisées sur le risque d'incendie de forêt. Les systèmes d'alerte précoce peuvent être utilisés pour guider les opérations de prévention et de lutte contre les incendies de forêt en temps réel.

2.8 Etas de l'art : Modèle de la cartographie de risque d'incendie « DUCHE » et « DAGRONE »

L'établissement de la carte de risque incendie fait appel à l'application d'un modèle mis en place par **DUCHE et DAGORNE (1993)** et testés sur les massifs forestiers de la région méditerranéenne. Les différentes étapes de la méthodologie adoptée tout au long de ce travail sont représentées par l'organigramme synthétisé par la figure n° 01. Modèle utilisé Afin d'atteindre l'objectif fixé, le modèle appliqué fait intervenir les trois principaux facteurs pour l'évaluation du risque de feu de forêt à) savoir : la topomorphologie, le combustible et les activités humaines. Le modèle en question repose sur la formule suivante :

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

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 topomorphologique (facteur lié à la topomorphologie 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. (**Belhadj Aissa, 2003**). L'indice topomorphologique :(IM) Trois paramètres topographiques interviennent dans le modèle : la pente, l'exposition et l'altitude. Tous ces paramètres sont déduits à partir du modèle numérique de terrain (M.N.T) de la région. Cet indice est exprimé par la relation suivante :

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

Où p : la pente

m : la topo- morphologie

e : l'exposition

L'indice de combustibilité (IC) Pour évaluer l'indice de combustibilité (IC), la méthode proposée par MARIEL (1995) pour estimer la gravité potentielle d'un feu démarrant dans un peuplement forestier déterminé a été retenue. Cette méthode consiste en la mise au point d'un modèle, empirique, basé sur l'expérience des sapeurs-pompiers pour pondérer les termes d'une expression mathématique dont les paramètres proviennent d'une description normalisée de la végétation (Belhadj Aïss, et al. 2003).

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

$$IC = 39 + 2,3 BV (E1 + E2 - 7,18)$$

Où BV : représente le biovolume de la formation végétale.

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

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

Le biovolume de la formation végétale est obtenu par addition des taux de recouvrement de chacune des 4 strates de végétation (ligneux hauts, ligneux bas, herbacées, litière) auxquels on ajoute le taux de recouvrement des chicots et bois morts, s'il y a lieu. Chacun de ces taux de recouvrement est compris entre 0 (absence de strate) et 10 (strate formant un couvert fermé) ; le biovolume est donc compris entre 0 et 50. Les notes d'intensité calorique sont comprises entre 1 et 8 pour les deux espèces dominantes : E1 pour les ligneux hauts et E2 pour les ligneux bas ou herbacées.

2.9 L'analyse multicritères AHP :

2.9.1 Description de la méthode AHP :

Méthode multicritère d'aide à la décision intégrant plusieurs critères et arrivant à un choix justifié de technologie, la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise.

Elle se caractérise par :

- sa capacité de structurer un problème complexe, multicritère, multi personne et multi période de façon hiérarchique,
- a comparaison binaire des éléments (alternatives, critères et sous critères),
- et la facilité de son support informatique, le logiciel Expert Choice. Trois principes de la méthode AHP :
 - la structuration hiérarchique
 - la structuration des priorités, comparaison binaire
 - la cohérence logique

2.9.2 Démarche à suivre : Recherche de la solution la plus adéquate possible :

1. Définir le problème : Identifiez clairement le problème de prise de décision, l'objectif principal et les critères et sous-critères qui seront utilisés pour évaluer les alternatives.
2. Créer la hiérarchie : Construisez une hiérarchie en plaçant l'objectif principal au sommet, suivi des critères et sous-critères, et enfin des alternatives à la base. Cette hiérarchie permet de structurer le problème de manière visuelle et facilite l'analyse.
3. Comparaison par paires des critères : Évaluez l'importance relative de chaque paire de critères en utilisant une échelle de 1 à 9, où 1 signifie que les deux critères sont également importants et 9 signifie qu'un critère est extrêmement plus important que l'autre. Les jugements inverses sont également utilisés (par exemple, si le critère A est 3 fois plus important que le critère B, alors le critère B est 1/3 fois moins important que le critère A).
4. Construire la matrice de comparaison par paires : Créez une matrice carrée pour les critères en plaçant les poids relatifs de chacun des jugements par paires. La diagonale de la matrice sera toujours égale à 1, puisqu'un critère est toujours égal à lui-même.
5. Calculer les poids des critères : Calculez les valeurs propres de la matrice de comparaison par paires et normalisez-les pour obtenir les poids des critères. Les poids reflètent l'importance relative de chaque critère dans l'ensemble du problème.

6. Répéter les étapes 3 à 5 pour les sous-critères et alternatives : Effectuez des comparaisons par paires pour chaque sous-critère et alternative en fonction de chaque critère, puis calculez les poids correspondants.
7. Agréger les poids : Multipliez les poids des alternatives par les poids des critères et des sous-critères pour obtenir les poids globaux des alternatives. Sommez ensuite les poids globaux pour chaque alternative.
8. Classer les alternatives : Classez les alternatives en fonction de leurs poids globaux. L'alternative ayant le poids global le plus élevé est considérée comme la meilleure option pour atteindre l'objectif principal.
9. Vérifier la cohérence : Calculez le rapport de cohérence (CR) pour vérifier la cohérence des jugements par paires. Si le CR est inférieur à 0,1, cela signifie que les jugements sont cohérents. Si le CR est supérieur à 0,1, cela indique que les jugements peuvent être incohérents et doivent être révisés.
10. Sensibilité et analyse des scénarios : Réalisez une analyse de sensibilité pour évaluer l'impact des changements dans les critères et les pondérations sur le classement des alternatives. Ceci peut être utile pour identifier les critères les plus influents et pour explorer différents scénarios de prise de décision.

2.10 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les feux de forêts, mettant en évidence la vulnérabilité associée à ces catastrophes naturelles et l'importance d'une analyse multicritère pour évaluer les risques et prendre des décisions éclairées. La littérature examinée a permis de comprendre les différents facteurs contribuant à la propagation des feux de forêts, tels que les conditions météorologiques, les caractéristiques du paysage et les comportements humains.

Dans cette synthèse bibliographique, des généralités sur la géomatique, les SIG (Systèmes d'Information Géographique) et la télédétection ont été abordées en raison de leur rôle crucial dans l'étude de la vulnérabilité des feux de forêt.

Cette littérature nous a permis de découvrir un état de l'art approfondi sur l'évaluation de la vulnérabilité des feux de forêt.

Chapitre 2 :

Zone d'étude et Méthodologie de travail

3 Chapitre 2 : Zone d'étude et Méthodologie de travail

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons l'importance du calcul de la vulnérabilité des feux de forêt dans la gestion des écosystèmes forestiers et la prévention des incendies. Cette problématique nécessite l'utilisation de méthodologies appropriées afin de prendre en compte les différents facteurs influençant la vulnérabilité et de fournir des résultats fiables. Nous commencerons par présenter de manière synthétique la zone d'étude, en mettant en évidence des éléments clés tels que sa localisation, son hydrologie, sa végétation, son climat, sa surface et sa faune. Cela nous permettra d'obtenir une vision globale de cet écosystème forestier, en mettant en évidence les caractéristiques qui le définissent et qui influencent son fonctionnement. Ensuite, nous détaillerons la méthodologie utilisée, notamment l'analyse multi-critère et la méthode de l'Analytic Hierarchy Process (AHP), pour évaluer la vulnérabilité des feux de forêt dans cette zone d'étude spécifique.

3.2 : Présentation de la zone d'étude

3.3 Présentation du forêt du massif hafir-Zariiefet :

La forêt domaniale de Zariiefet forme avec celle de Hafir un massif continu d'environ 12 000 hectares, s'étendant au sud-ouest de la ville de Tlemcen. Il constitue le plus important massif de chêne liège de tout l'ouest algérien. Il représente à lui seul environ 80% de la surface totale de la subéraie de montagne dans cette région (Bouhraoua, 2003).

3.3.1 Situation Géographique et administrative

La région de Zarifet est située au sud-ouest de la ville de Tlemcen, avec une altitude qui varie entre 830 et 1480 km. Elle est parcourue au Nord par la route nationale n°22 et desservie par les pistes carrossables, l'un relie la maison forestière de Zarifet et l'autre la piste venant de la localité de Sabra (GUELLIL, 2013).

Juridiquement, la forêt appartient au domaine public de l'état, sous la tutelle de la Conservation des Forêts et du Parc National de Tlemcen. Administrativement, elle est limitée :

- au Nord par les communes de Mansourah et Beni Mester,
- à l'Est par : Djebel Moudjet et la localité de Aïn Douz,
- à l'Ouest par : Aïn El Mardjene et la forêt domaniale de Hafir,
- au Sud par : Dar Dis et la commune de Terny.

La forêt de Zariiefet à Tlemcen est localisée aux coordonnées géographiques :

34°50'20"N 1°22'35"W.

La forêt de Hafir se situe dans la wilaya de Tlemcen, à 20 km au sud-ouest du chef-lieu de wilaya, elle est limitée :

- Au Nord par la route nationale n°7 qui relie Maghnia à Tlemcen.
- Au Sud et à l'Ouest par la partie centrale de la vallée de l'oued Tafna.
- l'Est par la RN22 qui relie Tlemcen à El Aricha.

La forêt domaniale Hafir totalise une superficie de sur10 157,5560 Ha.

Cette forêt relève de la Conservation des forêts de la Wilaya de Tlemcen ; et gérée par les circonscriptions forestières de Tlemcen, Maghnia et Sebdou. Cette foret ne rentre pas dans sa totalité dans le territoire du parc, elle ne représente que 1653 Ha ; 94 ha appartenant aux communes de Ain Ghoraba et la commues de Sabra pour 1559 ha.

La forêt domaniale de Hafir occupe la zone la plus élevée et la plus boisée des monts de Tlemcen.

Elle est localisée aux environs de l'intersection du parallèle 34°41' 49'' N et 10° 25' 35''W.

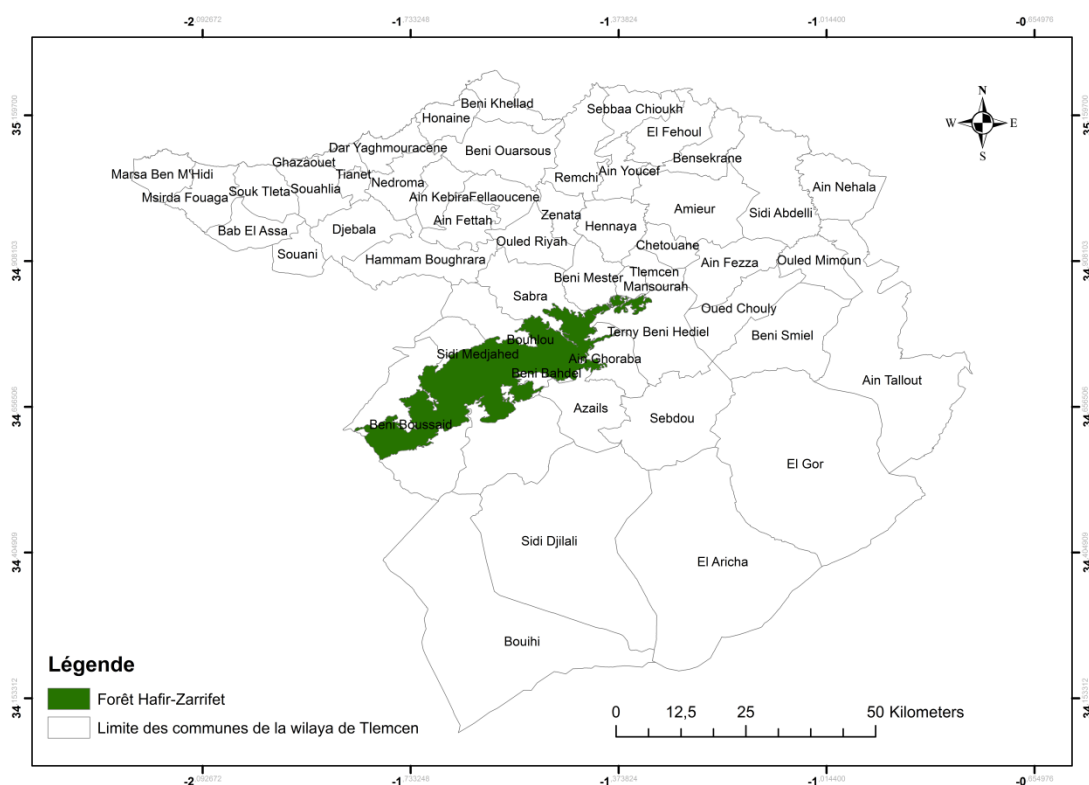


Figure 13 : Localisation de la zone d'étude

3.3.2 Facteurs biotiques du massif Hafir- Zarifet

3.3.2.1 Végétation (Flore) :

Les différentes formations végétales qui composent l'étendue du territoire du parc lui donnent une grande diversité floristique et un habitat apprécié par la faune. Les formations forestières couvrent une superficie de 400 ha soit de 48% de la superficie du parc dont 2076 ha 25% des forêts localisées dans l'Ouest au niveau de la région de Hafir alors que les maquis couvrent 1929, 13 ha 23%, sont situés pratiquement dans une partie de la forêt de Zarifet suite aux incendies successifs qui ont touché la région. Vers l'Est apparaît une colonisation progressive des sols par une végétation dégradée et qui occupe les 30 % (2467 ha) de la surface totale par contre la répartition des terrains nus qui est de 5% (412 ha) se manifeste dans la région du Meffrouche alors que les terrains agricoles sont de l'ordre de 985 has soit de 12% de la superficie totale du parc (plan de gestion, du PNT, 2003). Néanmoins il faut souligner l'aspect thermophile de cette composition floristique caractérisant un milieu ouvert et un stade régressif dus à la faible régénération naturelle de la subéraie. La subéraie de Hafir qui est l'un des peuplements reliques d'Oranie, fournissait selon (BOUDY, 1955) le meilleur liège d'Algérie. Actuellement cette vieille futaie avec ses sujets Plus que bicentennaires est nettement en déclin, état de dégradation lié aux rudes conditions climatiques aggravées par l'état physiologique des souches (vieilles), l'absence de régénération, les incendies et par l'action de l'homme. Cette végétation constitue le support de la vie animal, elle représente un habitat pour la nutrition et pour l'hibernation, pour certain espèce et un lieu de reproduction.

3.3.2.2 faune :

On note la présence de l'embranchement de vertébrés comme :

- Les amphibiens : Crapaud commun (*Bufo bufo*), Crapaud vert (*Bufo viridis*), Rainette verte (*Hyla arborea*) .
- les reptiles : Lézard ocellé (*Lacerta lepida*), Couleuvre viperine (*Natrix maura*).
- Les mammifères : le Sanglier (*Sus scrofa*), le porc épic (*Hystrix critata*), le Renard roux (*Vulpe vulpe*), le Lapin de garenne (*Oryctolagus cuniculus*).
- Des oiseaux qui vivent dans la réserve de chasse de Moutas, qui se trouve à proximité de la forêt de Zariffet, montre la présence de : La Perdrix gabra (*Alectoris barbara*), le Pouillot veloce (*Pylloscopus collybita*), rouge queue de Moussier (*Phoenicurus moussieri*), (BRAHIMI, 1990).

Selon une étude faite par le parc national de Tlemcen, ils ont pu faire un inventaire des différentes classes de vertébrés, cette estimation est récapitulée sur le tableau suivant.

Tableau 2 : Inventaire des espèces de Vertébrés par le parc national de Tlemcen 2000.

Classe	Espèces recensées	Espèces protégées	Pourcentage des Espèces protégées
-Oiseaux	126	45	36
Mammifères	19	10	60
Reptiles	21	04	20
TOTAL	306	61	29

3.3.3 Facteurs abiotiques

3.3.3.1 Géomorphologie

La géomorphologie est l'étude des formes et formations superficielles de l'interface terrestre. Selon (LUKKAS, 2006), les Monts de Tlemcen sont formés de reliefs accidentés, à une série de massifs montagneux dont le profil de ces monts présente des lignes de crêtes aiguës, parfois plus atténuées et arrondies entrecoupées par des Vallées et des plateaux (Lalla Setti, El Mefrouche, Ain Fezza). De point de vue de (TRICART, 1996), ils sont composés de pentes de plus de 20% ; avec un tapis végétal plus ou moins dense qui les protège d'une érosion intense.

3.3.3.2 Aspect topographique :

L'altitude varie de 800 à 1418 m imprimant un relief accidenté toutes les expositions (Bouchachia, 2010). Il existe plusieurs classes de pentes dont les dominantes oscillent entre 12 et 50% et couvrant plus de la moitié de la superficie. Les pentes faibles (<3%) et abruptes (>50%) sont par contre moins fréquentes (Bouhraoua, 2003).

3.3.3.3 Hydrographie

La forêt est caractérisée par un réseau hydrographique important constitué par des oueds de régime temporaire tels que Tiet, Oued Fernane et Oued Zariffet, etc. Il existe ainsi sur les lisières plus de 50 sources au débit assez régulier, variant de 30 à 50 litres par minutes (Ain Zariffet, etc). (Kazi-Tani, 1996).

3.3.3.4 Géologie

Le massif est formé de plusieurs types de roches mères d'âges différents mais dont la majeure partie est du jurassique supérieur à plissement tertiaire. Il s'agit de grès séquaniens principalement mais aussi les calcaires de Zariéffet et les dolomies (Bouhraoua, 2003).

3.3.3.5 Pédologie :

Les études de plusieurs auteurs (Dahmani-Megrerouche, 1984, Gaouar, 1980 Bensed, 1986) ont montré que notre zone d'étude repose sur un sol superficiel de moins de 30cm traversé par des surfaces rocheuses et rocailleuses affleurant. La pédologie révèle que les sols dans notre zone d'étude sont en général de type brun forestier.

3.3.3.6 Climat :

Parmi les défis actuels, sans aucun doute, le plus important est celui des changements climatiques que traversent les pays du bassin méditerranéen, qui se reflètent principalement par les tendances haussières des températures et la fréquence des phénomènes extrêmes tels que les vagues de de chaleur (IPCC, 2014). Cela peut avoir un impact très négatif sur les écosystèmes forestiers qui deviennent très vulnérables aux incendies de forêt, d'autant plus que les risques associés à ce phénomène sont particulièrement élevés dans tout le bassin méditerranéen (Jappiot, 2002).

Le climat de la zone d'étude est méditerranéen, caractérisé par de longs étés secs et des hivers froids et humides. L'emplacement sud de Tlemcen par rapport à la zone climatique méditerranéenne, la sécheresse estivale prolongée et les précipitations irrégulières sont tous des facteurs limitant des facteurs environnementaux et menacent en permanence les zones naturelles (Medjahed, 2014).

4 Méthodologie de travail

L'organigramme de création de la carte de vulnérabilité des feux de forêt comporte plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il est nécessaire de calculer les poids relatifs des différents paramètres en utilisant l'analyse AHP (Analytic Hierarchy Process). Cette étape permet d'établir l'importance de chaque critère dans l'évaluation de la vulnérabilité aux incendies.

Ensuite, les cartes de pentes, d'altitudes et d'exposition sont créées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 30 mètres. Ces cartes fournissent des informations précieuses sur le relief et l'exposition aux feux de forêt dans la zone d'étude.

Parallèlement, la carte de densité de végétation est élaborée à partir de la carte d'occupation du sol obtenue à partir d'une image satellitaire Landsat 8, avec une résolution de 30 mètres. Pour cela, une classification supervisée est effectuée, permettant de distinguer les différents types de végétation présents dans la région étudiée.

Enfin, la carte de proximité des routes est générée en utilisant la base de données des centres des techniques spatiales d'Arzew. Cette carte indique la distance entre chaque pixel et la route la plus proche, offrant ainsi une estimation de la proximité des zones boisées aux voies de circulation.

L'ensemble de ces étapes permet de constituer la carte de vulnérabilité des feux de forêt, qui met en évidence les zones présentant les plus grands risques d'incendie en fonction de divers paramètres tels que la topographie, la végétation et la proximité des routes.

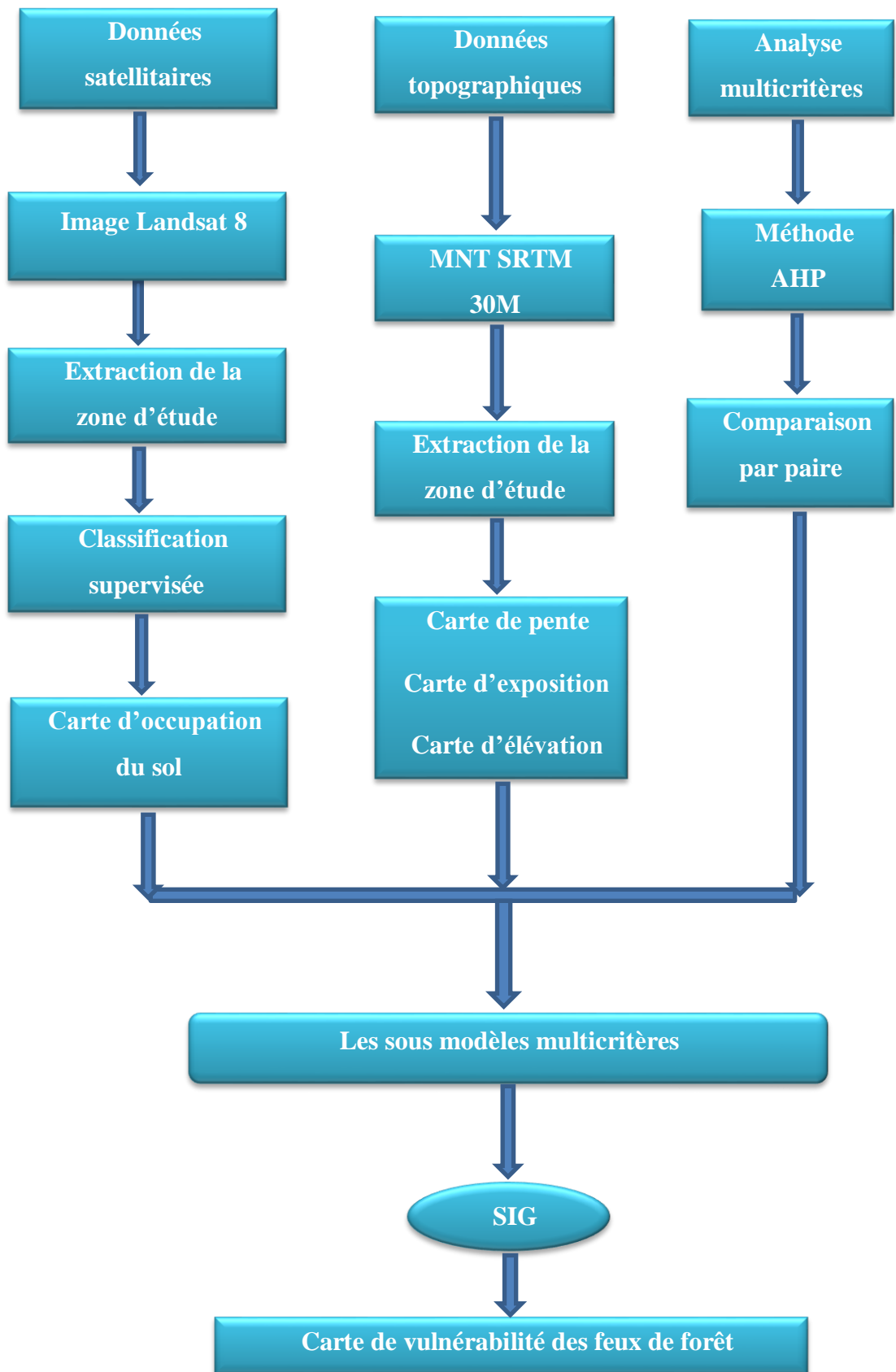


Figure 14 : Organigramme de la méthodologie de travail

4.1 L'analyse Multicritère

4.1.1 LA matrice de comparaison des critères l'analyse AHP :

Tableau 3 : Transformations de fractions réelles

	Densité	Pente	Routes	Exposition	Elevation
Densité	1	6	3	7	9
Pente	0,16666667	1	2	3	7
Routes	0,33333333	0,5	1	3	6
Exposition	0,14285714	0,33333333	0,33333333	1	5
Elevation	0,11111111	0,14285714	0,16666667	0,2	1
COL. TOTAL	1,64285714	7,83333333	6,33333333	14	28

Les valeurs, dans le tableau in situ sont fournies par l'expert Monsieur Ghabi Mohamed Ingénieur principale dans le centre des techniques spatiales Arzew représente une matrice de comparaison des critères pour l'analyse AHP. La matrice indique les relations de comparaison entre les facteurs en termes de leur importance relative. On interprète cette matrice :

- Les facteurs sont représentés dans l'ordre : Densité, Pente, Routes, Exposition, Élévation.
- Les valeurs dans la matrice indiquent l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre. Par exemple, la valeur 6 dans la cellule (Densité, Pente) indique que la Densité est considérée comme six fois plus importante que la Pente.
- La matrice est symétrique par rapport à la diagonale principale, car les comparaisons sont bidirectionnelles.
- Pour calculer les pondérations des facteurs à partir de cette matrice, vous devez effectuer les étapes suivantes :
- Normalisation de la matrice : Divisez chaque élément de la matrice par la somme des éléments de sa colonne respective. Cela permet d'obtenir une matrice normalisée où chaque colonne a une somme égale à 1.
- Calcul des moyennes des lignes : Calculez la moyenne de chaque ligne de la matrice normalisée. Cela représente les pondérations des facteurs.
- Vérification de la cohérence : Vérifiez la cohérence des pondérations en utilisant le ratio de cohérence (CR). Le CR est généralement utilisé pour évaluer si les comparaisons sont cohérentes ou non. Si le CR est inférieur à un seuil de 0,1, les comparaisons sont considérées comme cohérentes.

- Calcul de la valeur propre : Calculez d'abord les valeurs propres de la matrice de comparaison. Les valeurs propres représentent la variance expliquée par chaque vecteur propre associé à la matrice.
- Calculer la valeur propre maximale (λ_{max}) : Identifiez la plus grande valeur propre parmi les valeurs propres calculées à l'étape précédente. Cette valeur propre maximale est notée λ_{max} .
- Calcul de l'indice de cohérence (IC) : L'indice de cohérence (IC) est calculé à l'aide de la formule suivante : $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, où n représente la taille de la matrice (nombre de normes ou alternatives). Calcul du rapport de cohérence (CR) :
- Pour évaluer la cohérence d'une matrice, il faut comparer l'indice de cohérence (IC) calculé avec une valeur de référence. Le rapport de cohérence (CR) est déterminé en divisant l'indice de cohérence (CI) par le coefficient de cohérence tabulé (CC). Les coefficients de cohérence dépendent de la taille de la matrice et sont couramment disponibles dans les tables de recherche.
- Interpréter le rapport de cohérence (CR) : Si le rapport de cohérence (CR) est inférieur au seuil 0,1, cela indique que la cohérence de la matrice est acceptable. Si le taux de cohérence dépasse le seuil, cela indique que les comparaisons par paires sont incohérentes.

Tableau 4 : Calcul de valeurs relatives

	Densité	Pente	Routes	Exposition	Elevation	Total:valeurs relatives
Densité	0,60869565	0,76595745	0,47368421	0,5	0,32142857	2,66976588
Pente	0,10144928	0,12765957	0,31578947	0,21428571	0,25	0,8531945
Routes	0,20289855	0,06382979	0,15789474	0,21428571	0,21428571	0,8531945
Exposition	0,08695652	0,04255319	0,05263158	0,07142857	0,17857143	0,43214129
Elevation	0,06763285	0,01823708	0,02631579	0,01428571	0,03571429	0,16218572

Tableau 5 : Calcul des poids relatifs

	Densité	Pente	Routes	Exposition	Elevation	Poids relatifs
Densité	0,60869565	0,76595745	0,47368421	0,5	0,32142857	0,53395318
Pente	0,10144928	0,12765957	0,31578947	0,21428571	0,25	0,1706389
Routes	0,20289855	0,06382979	0,15789474	0,21428571	0,21428571	0,21329863
Exposition	0,08695652	0,04255319	0,05263158	0,07142857	0,17857143	0,08642826

Tableau 6 : Vérification de la cohérence de la matrice

1-Calcul $\lambda_{1\max}$ =	2,92397567	5,47609
2-Calcul $\lambda_{1\max}$ =	1,17257313	6,87166
3-Calcul $\lambda_{1\max}$ =	0,93051011	4,36248
4-Calcul $\lambda_{1\max}$ =	0,45287218	5,23986
5-Calcul $\lambda_{1\max}$ =	0,16897768	5,2093884

Calculez λ_{\max} = 5,431896

Calcul IC= $(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ = 0,107974

Calcul RC=IC/IA= 0,09641

Puisque RC est égale à 0,09 donc la matrice est *cohérente*

4.2 Le modèle conceptuel des données de la carte de vulnérabilité :

Pour concevoir le MCD, nous devons d'abord identifier les entités et les relations impliquées dans la base de données. Les entités sont les zones géographiques, la densité de végétation, les routes, les expositions, les pentes et les altitudes. Les relations inclure des liens entre la zone géographique et les facteurs de risque, ainsi que des liens entre les facteurs de risque eux-mêmes.

Ce modèle conceptuel de données (MCD) représente les cinq facteurs qui influent sur la vulnérabilité des feux de forêt dans notre zone d'étude en utilisant l'analyse AHP (Analytic Hierarchy Process) avec 5 facteurs : la pente, l'exposition, l'élévation, la densité de végétation et l'proximité à la route. Chaque facteur est classifié en 4 classes : très fort, fort, moyen et faible.

- **Entités principales :**

1. Zone géographique : représente la zone spécifique dans laquelle la vulnérabilité des feux de forêt sera calculée. Elle est définie par des coordonnées géographiques.
2. Facteur : représente chaque facteur qui contribue à la vulnérabilité des feux de forêt. Les facteurs sont les suivants : Pente ; Exposition ; Élévation ; Densité de végétation; Proximité à la route
3. Classe : représente les classes attribuées à chaque facteur. Chaque facteur sera classifié en 4 classes : très fort, fort, moyen et faible.

- **Relations :** Appartient à (Zone géographique - Facteur) : une zone géographique peut avoir plusieurs facteurs associés à elle. Cette relation est utilisée pour lier chaque facteur à la zone géographique correspondante.

Classifié en (Facteur - Classe) : chaque facteur est classifié en une classe spécifique. Cette relation est utilisée pour lier chaque facteur à sa classe correspondante.

En termes de structure des tables, les relations sont implémentées :

-Table "Zone géographique" :

Zone ID (clé primaire)

Les attributs spécifiques à la zone géographique.

-Table "Facteur" :

Facteur_ID (clé primaire)

Zone_ID (clé étrangère faisant référence à la clé primaire de la table "Zone géographique")

Les attributs spécifiques au facteur (pente, exposition, élévation, densité de végétation, proximité à la route)

-Table "Classe" :

Classe ID (clé primaire)

Les attributs spécifiques à la classe (très fort, fort, moyen, faible).

En termes des cardinalités

Relation "Zone géographique - Facteur" (Un-à-Plusieurs, 1:N) : Chaque zone géographique peut avoir plusieurs facteurs associés à elle. Chaque facteur est lié à une seule zone géographique.

Cette relation est représentée par une clé étrangère dans la table des facteurs, faisant référence à la clé primaire de la table des zones géographiques.

Relation "Facteur - Classe" (Un-à-Plusieurs, 1:N) : Chaque facteur est classifié en une seule classe. Chaque classe peut être attribuée à plusieurs facteurs.

Cette relation est représentée par une clé étrangère dans la table des facteurs, faisant référence à la clé primaire de la table des classes.

4.3 Conclusion

En conclusion, la combinaison de la zone d'étude et la méthodologie d'application a permis de jeter les bases pour la création d'une carte de vulnérabilité des feux de forêt, qui constituera un outil précieux pour la gestion des risques. Cette carte nous permettra de visualiser de manière claire et précise les zones les plus exposées aux incendies de forêt, et servira de guide pour les actions de prévention et de gestion.

Chapitre 3 : Création de la carte de vulnérabilité

5 Chapitre 3 : Création de la carte de vulnérabilité

5.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons la création de la carte de vulnérabilité, une étape cruciale dans l'évaluation et la gestion des risques. Après avoir défini les facteurs de risque et évalué leur importance dans le chapitre précédent, nous sommes maintenant prêts à représenter graphiquement la vulnérabilité de la zone d'étude. La carte de vulnérabilité permettra de visualiser de manière claire et concise les zones les plus exposées et susceptibles de subir les conséquences de risque d'incendie.

5.2 La création des cartes

5.2.1 La carte d'occupation de sol

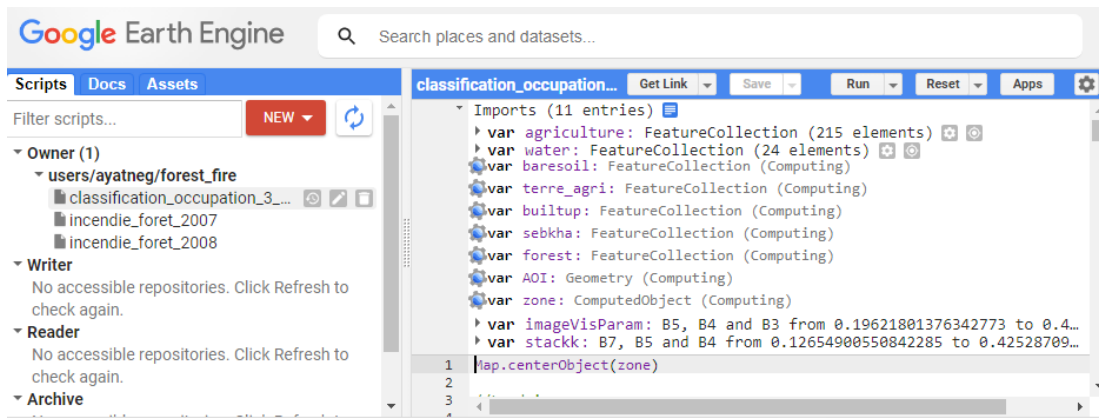


Figure 15 : Interface Google Earth Engine

5.2.2 L'explication du code de la création de la carte depuis GEE :

```
1 // Chargement de l'image
2 var startDate = ee.Date.fromYMD(2020, 1, 1);
3 var endDate = ee.Date.fromYMD(2020, 12, 31);
4
5 var l8image = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA")
6   .filterBounds(AOI)
7   .filterDate(startDate, endDate);
8
9 var img = l8image.mean();
10
11 // Affichage de l'image
12 Map.addLayer(img.clip(zone), { bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min: 0, max: 0.3 }, 'Image');
```

Figure 16 : Le code Java script pour le chargement et l'affichage des images :

- ✓ le code utilise des techniques de télédétection pour analyser une image satellite Landsat 8, calculer des indices de végétation et réaliser une classification d'occupation des terres à l'aide de différentes méthodes de classification. Cela permet de comprendre et d'extraire des informations précieuses sur les caractéristiques et les changements de la surface terrestre à partir des données satellitaires.
- ✓ les images Landsat 8 utilisées dans ce code appartiennent à la plage de dates du 1er janvier 2020 au 31 décembre 2020.
- ✓ Dans le code fourni, les images Landsat 8 sont chargées en tant qu'images Top of Atmosphere (TOA). Cela signifie que l'image est corrigée radiométriquement.
- ✓ Les données Landsat 8 TOA fournissent la réflectance de surface corrigée des variations de l'irradiance solaire et de la distance soleil-terre, ainsi que les caractéristiques instrumentales du capteur Landsat 8. Cette correction radiométrique nous permet de normaliser et de comparer les valeurs de réflectance entre différentes images.
- ✓ les images Landsat 8 utilisées dans ce code sont fournies avec une géométrie correcte de base. Les images Landsat 8 sont capturées par un capteur embarqué à bord du satellite qui enregistre les données avec des informations de géolocalisation précises. Les données sont ensuite traitées pour assurer une géométrie correcte, ce qui signifie que les pixels sont correctement alignés géographiquement.
- ✓ Prétraitement des images : une image composite est créée en faisant la moyenne des bandes sélectionnées dans l'image Landsat 8. Dans ce cas, les bandes B2, B3, B4, B5, B6, B7 sont extraites de l'image et utilisées pour la prochaine étape d'analyse.

```

14 // Calcul des indices de végétation
15 var ndvi = img.expression(
16   '((NIR - RED) / (NIR + RED))', {
17     'NIR': img.select('B5'),
18     'RED': img.select('B4')
19   }).rename('NDVI');
20
21 var ndti = img.expression(
22   '((SWIR1-SWIR2)/(SWIR1 + SWIR2))', {
23     'SWIR1': img.select('B6'),
24     'SWIR2': img.select('B7')
25   }).rename('NDTI');
26
27 var evi = img.expression(
28   '2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1))
29   'NIR': img.select('B5'),
30   'RED': img.select('B4'),
31   'BLUE': img.select('B2')
32   }).rename('EVI');
33
34 var ndbi = img.expression(
35   '(MIR - NIR)/(MIR + NIR)', {
36     'NIR': img.select('B5'),
37     'MIR': img.select('B6')
38   }).rename('NDBI');
39
40 var mndwi = img.expression(
41   '(GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)', {
42     'GREEN': img.select('B3'),
43     'MIR': img.select('B6')
44   }).rename('MNDWI');

```

Figure 17 : Le code Java script pour le calcul des indices de végétations

- ✓ Calcul des indices de végétation : Trois indices de végétation sont calculés à partir de l'image composite : NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDTI (Normalized Difference Tillage Index) et MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index). Ces indices sont des mesures utilisées pour évaluer la santé et la distribution de la végétation, la présence d'eau et les zones cultivées.

```

46 // Création de la composition d'images
47 var stack = img.select(['B4', 'B5', 'B7']);
48 stack = stack.addBands(ndti);
49 stack = stack.addBands(mndwi);
50
51 // Affichage de la composition d'images
52 Map.addLayer(stack.clip(zone), { bands: ['B4', 'B5', 'B7'], min: 0, max: 0.3 }, 'Composition d'images');
53
54 // Définition des points d'entraînement
55 var trainingPoints = agriculture.merge(water).merge(baresoil).merge(forest).merge(builtup).merge(terre_agri).merge(sebkha);

```

Figure 18 : Le code Java script pour la création de la composition d'images

- ✓ Créer une composition : Des bandes sélectionnées de l'image composite sont combinées en une construction d'image qui constitue la base de la classification. Dans ce cas, les bandes B4 (rouge), B5 (proche infrarouge) et B7 (moyen infrarouge) sont utilisées.

```
57 // Création des données d'entraînement
58 var trainingRegions = stack.select(stack.bandNames()).sampleRegions({
59   collection: trainingPoints,
60   properties: ['landcover'],
61   scale: 30
62 });
63
```

Figure 19 : Le code Java script pour la création des données d'entraînement

- ✓ Définition des points d'entraînement : Des points d'entraînement sont définis en utilisant des informations sur les types de couverture terrestre que vous souhaitez classer. Dans le code, les points d'entraînement sont regroupés dans une seule collection de données comprenant différentes classes de couverture terrestre, telles que l'agriculture, l'eau, le sol nu, la forêt, les zones construites, etc.
- ✓ Échantillonnage des régions d'entraînement : Les points d'entraînement sont utilisés pour extraire des régions d'intérêt à partir de la composition d'images créée précédemment. Ces régions serviront de données d'entraînement pour le modèle de classification.
- ✓ Répartition des données d'entraînement et de test : La région d'apprentissage est divisée au hasard en un ensemble d'apprentissage (70 %) et un ensemble de validation (30 %) pour évaluer les performances du modèle de classification.

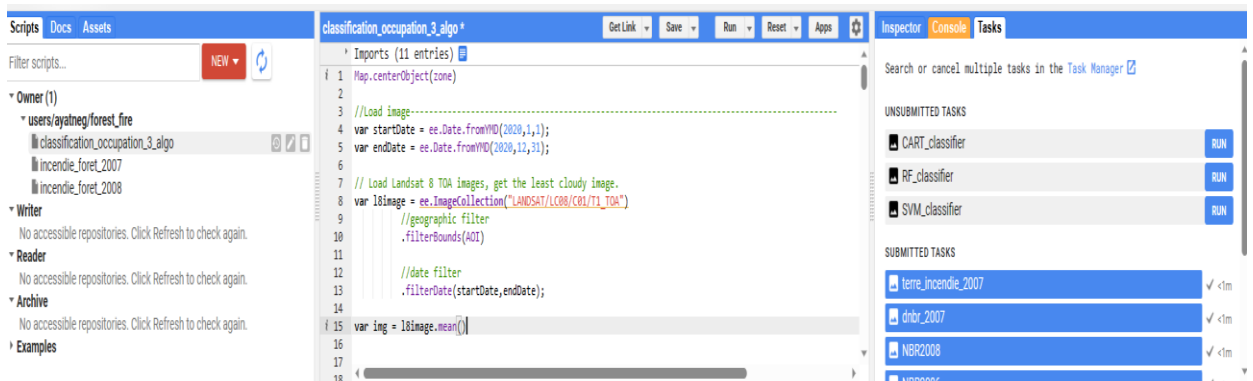
```
64 // Classification CART
65 var classifieur = ee.Classifier.smileCart().train({
66   features: trainingRegions,
67   classProperty: 'landcover',
68   inputProperties: stack.bandNames()
69 });
70
71 var classifieur = stack.classify(classifieur).clip(zone);
72
73 Map.addLayer(classifieur, { min: 1, max: 6, palette: ['yellow', 'blue', 'tan', 'black', 'red', 'green'] }, 'CART');
74
75 // Classification Random Forest
76 var randomForestClassifier = ee.Classifier.smileRandomForest(10).train(trainingRegions, 'landcover');
77
78 var classifieurRandomForest = stack.class
79
```

Figure 20 : Le code Java script pour la classification supervisée

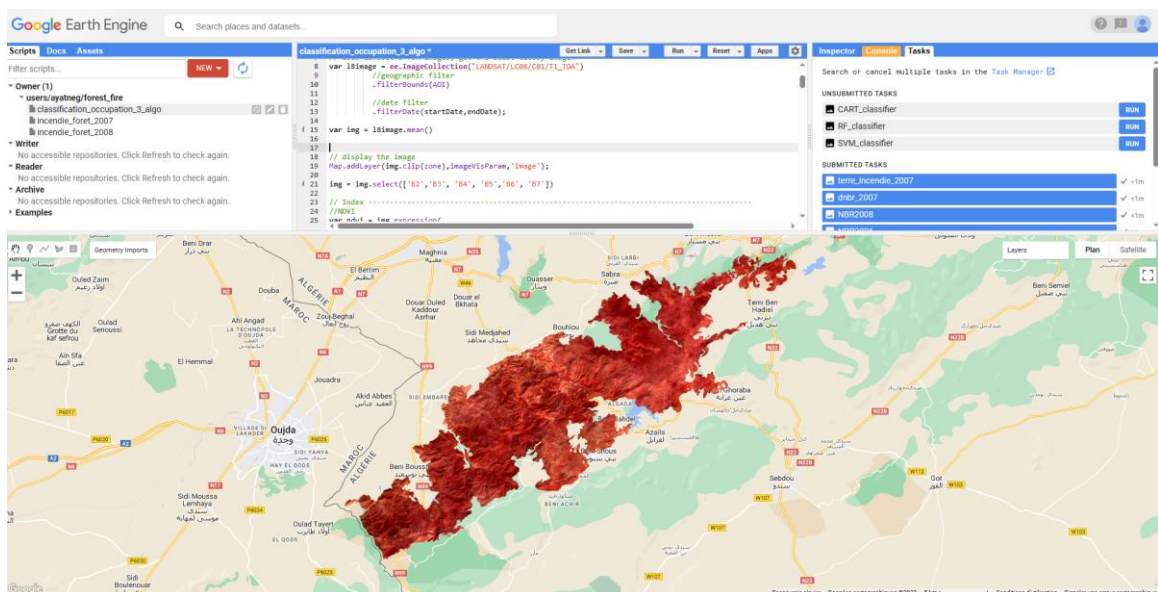
- ✓ **Classification:** Ce code utilise deux algorithmes de classification. CART (Classification and Regression Trees) et Random Forest. Un modèle de classification est entraîné à l'aide d'une région d'entraînement et d'une bande sélectionnée de constructions d'image. Une fois les modèles formés, ils sont appliqués à la composition de l'image pour classer chaque pixel en fonction de ses propriétés spectrales et spatiales.
- ✓ **Affichage et évaluation des résultats :** Les classifications obtenues à partir des modèles de classification sont ajoutées à la carte pour visualisation.

5.3 Machine learning classification :

1- Importer les données Landsat 8 et sélectionner la date souhaitée.



2- Visualisation RVB (infrarouge couleur)



3- Calculer l'indice spectral souhaité

```

Scripts Docs Assets
Filter scripts... NEW
Owner (1)
  - users/ayatneg/forest_fire
    - classification_occupation_3_algo
    - incendie_foret_2007
    - incendie_foret_2008
Writer
  No accessible repositories. Click Refresh to check again.
Reader
  No accessible repositories. Click Refresh to check again.
Archive
  No accessible repositories. Click Refresh to check again.
Examples

classification_occupation_3_algo *
24 //NDVI
25 var ndvi = img.expression(
26   '(NIR - RED) / (NIR + RED)', {
27     'NIR': img.select('B5'),
28     'RED': img.select('B4')
29   }).rename('NDVI');
30 var clipndvi = ndvi.clip(AOI)
31
32 //Display the NDVI Result
33
34 var ndti = img.expression(
35   '((SIR1-SIR2)/(SIR1 + SIR2))', {
36     'SIR1': img.select('B6'),
37     'SIR2': img.select('B7')
38   }).rename('NDTI');
39 var clipndti = ndti.clip(AOI)
40
41
42 //EVI
43 var evi = img.expression(
44   '2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1))', {
45     'NIR': img.select('B5'),
46     'RED': img.select('B4'),
47     'BLUE': img.select('B2')
48   }).rename('EVI');
49 var clipievi = evi.clip(AOI)
50
51
52 //MNDWI
53 var mndwi = img.expression(
54   '(NIR - NIR1) / (NIR + NIR1)', {
55     'NIR': img.select('B5'),
56     'NIR1': img.select('B6')
57   }).rename('MNDWI');
58 var clipmndwi = mndwi.clip(AOI)
59
60 //MNDWI
61 var mndwi = img.expression(
62   '(GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)', {
63     'GREEN': img.select('B3'),
64     'NIR': img.select('B6')
65   }).rename('MNDWI');
66 var clipmndwi = mndwi.clip(AOI)
67
68 //Make a composite-----
69

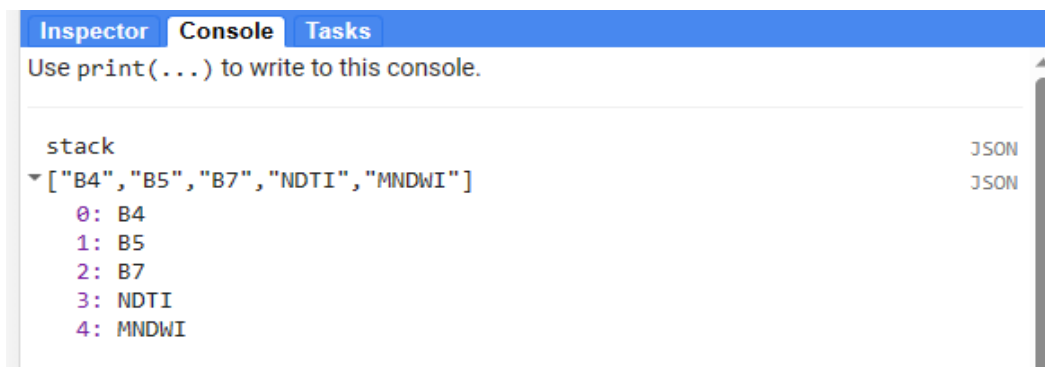
```

4- Créer une composition d'images

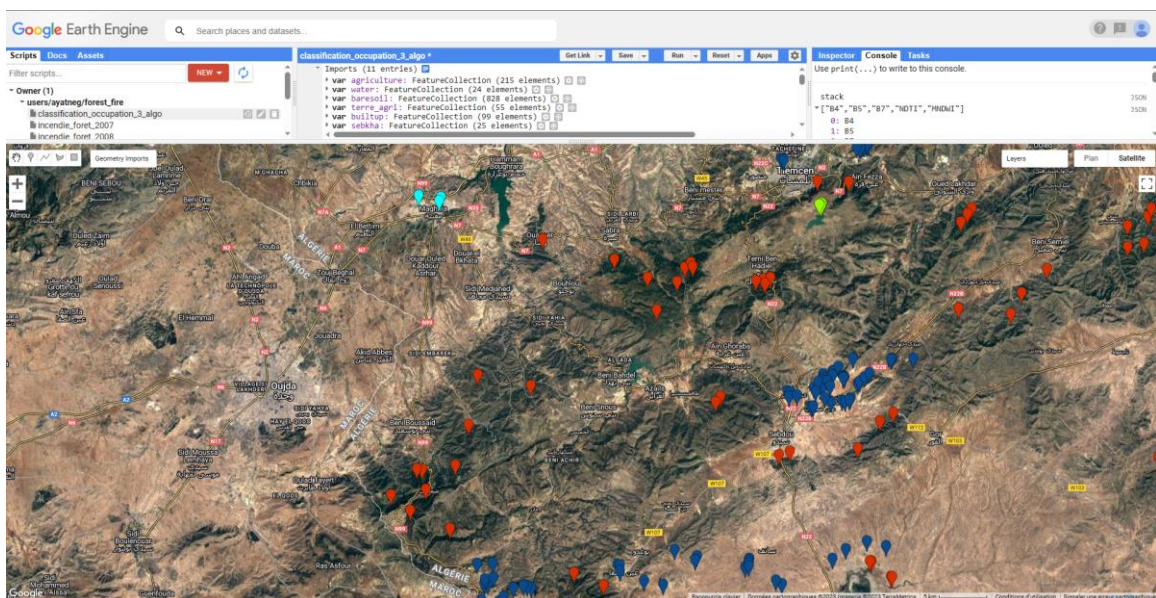
```

//Make a composite-----
var stack = img.select(['B4', 'B5', 'B7'])
//stack = stack.addBands(ndvi)
stack = stack.addBands(ndti)
stack = stack.addBands(mndwi)
// // Clip and display the image
var stack = stack.clip(AOI);
print ('stack', stack.bandNames());

```



5- Dessiner les échantillons d'entraînement



- 6- Créer les données d'entraînement en utilisant les échantillons d'entraînement dessinés précédemment. Divisez les données en deux ensembles : 70% pour l'entraînement du modèle de classification et 30% pour la validation et l'évaluation du modèle.

```
// Merge the hand-drawn features into a single FeatureCollection.
var trainingPoints = agriculture.merge(water).merge(baresoil).merge(forest).merge(builtup).merge(terre_agri)

// used these bands for prediciton

// Make training data by 'overlying' the points on the image.
var trainingRegions = stack.select(stack.bandNames()).sampleRegions({
  collection: trainingPoints,
  properties: ['landcover'],
  scale: 30
});

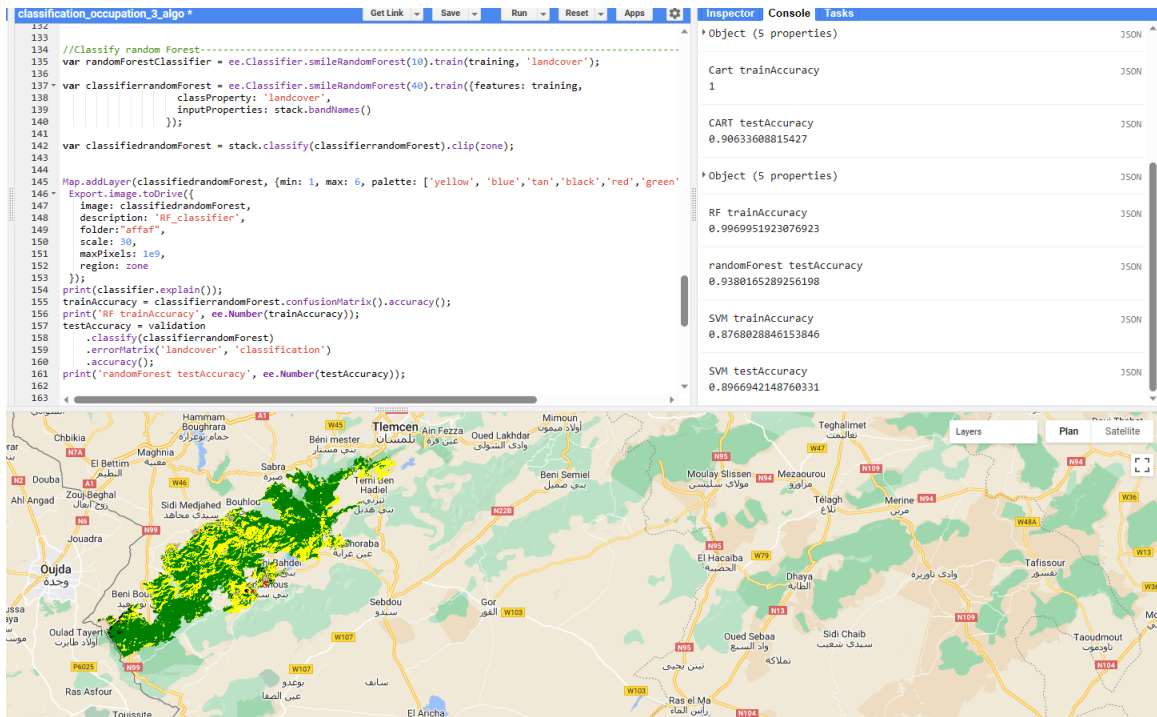
//randomise the collection
trainingRegions = trainingRegions.randomColumn({ seed: 1 });

//split training and test set
var split = 0.7; // Roughly 70% training, 30% testing.
var training = trainingRegions.filter(ee.Filter.lt('random', split));
var validation = trainingRegions.filter(ee.Filter.gte('random', split));
print(training,validation)
```

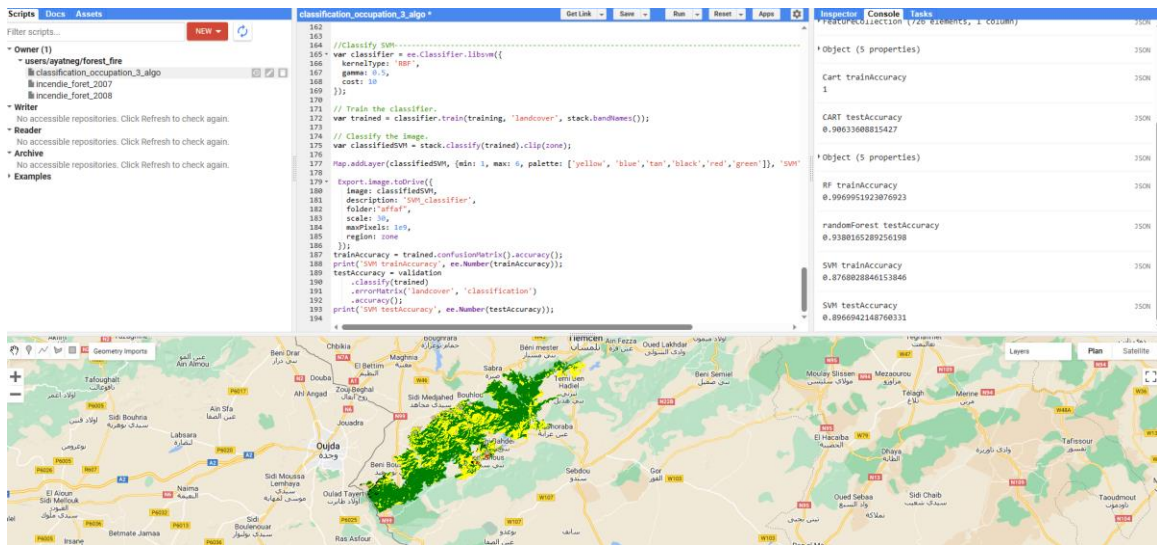
- 7- Effectuer une classification CART (Classification and Regression Tree) en utilisant les données d'entraînement. Évaluez ensuite l'exactitude de la classification en utilisant les données de validation pour déterminer la précision du modèle.

```
100 print(training,validation)
101
102 //classify Cart-----
103 // Get a CART classifier and train it.
104 var classifier = ee.Classifier.smileCart().train({
105   features: training,
106   classProperty: 'landcover',
107   inputProperties: stack.bandNames()
108 });
109
110 // Classify the Landsat clipped image.
111 var classified = stack.classify(classifier).clip(zone);
112
113 // Display the classification results.
114 Map.addLayer(classified, {min: 1, max: 6, palette: ['yellow', 'blue', 'tan', 'black', 'red', 'green']}, 'cart');
115 * Export-image to Drive({
116   image: classified,
117   description: 'CART_classifier',
118   folder: 'affat',
119   scale: 30,
120   maxPixels: 1e9,
121   region: zone
122 });
123 print(classifier.explain());
124 var trainAccuracy = classifier.confusionMatrix().accuracy();
125 print('Cart trainAccuracy', ee.Number(trainAccuracy));
126 //calculate test accuracy on test data
127 var testAccuracy = validation
128   .classify(classifier)
129   .errorMatrix('landcover', 'classification')
130   .accuracy();
131
```

- 8- Effectuer une classification RF (Random Forest) en utilisant les données d'entraînement. Évaluez ensuite l'exactitude de la classification en utilisant les données de validation pour déterminer la précision du modèle.



9- Effectuer une classification SVM (Support Vector Machine) en utilisant les données d'entraînement.



algorithme	Training accuracy	testing accuracy
random forest RF	0,996995192	0,938016529
support vector machine	0,876802885	0,896694215
classification and regression tree CART	1	0,906336088

Le meilleur est RF

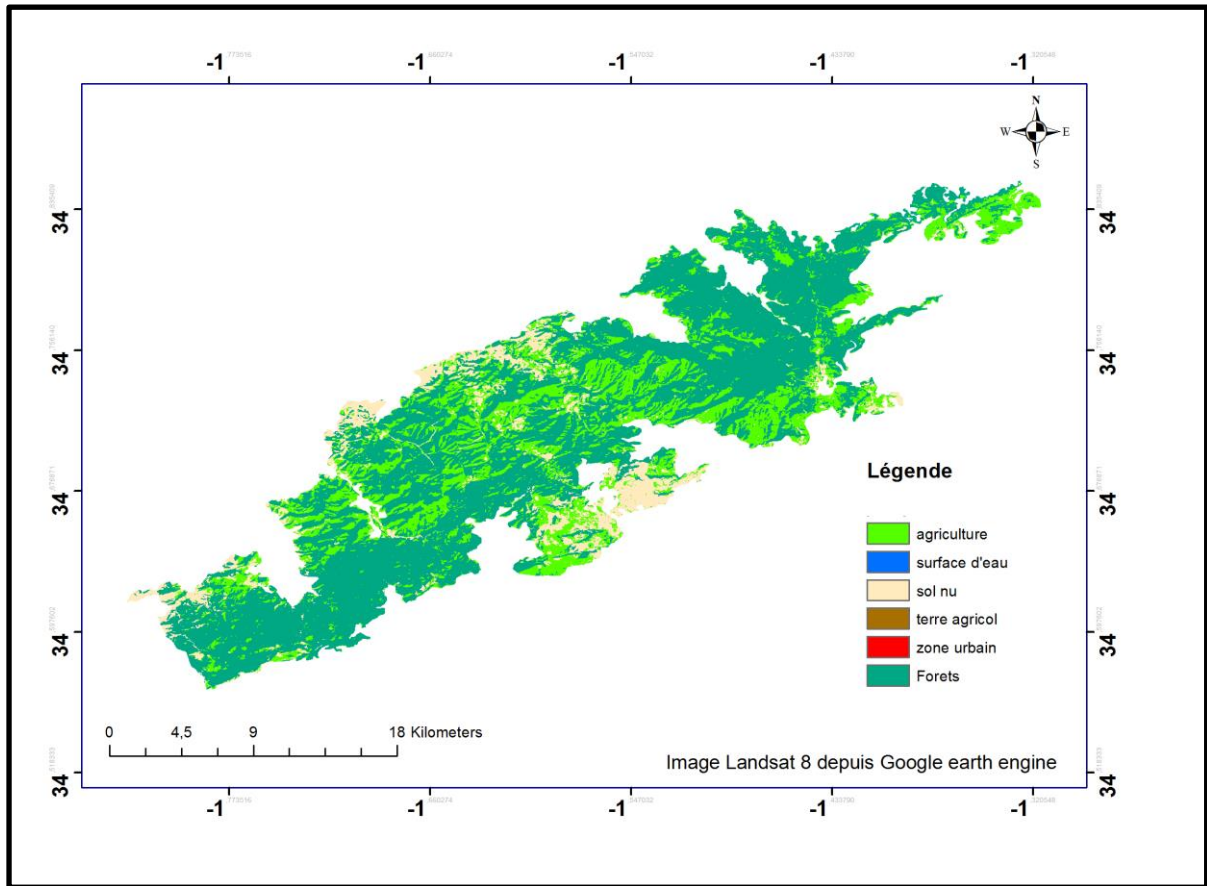


Figure 21 : Carte de l'occupation du sol de massif Hafir-Zariffet (Sud- ouest Tlemcen)

5.3.1 Carte de risque d'incendie associé à la densité de végétation :

La carte de risque de densité représente le risque de l'incendie selon le type de végétation ; dans notre cas on a distingué les classes suivantes : maquis, forêt, zone steppique, l'urbain.

Avec la fonction "Reclassify" dans ArcGIS est utilisée pour reclasser les valeurs d'un raster en leur attribuant de nouvelles valeurs en fonction de certains critères. Cela permet de regrouper les valeurs existantes en différentes classes ou catégories selon les besoins de l'analyse.

Ces classes sont groupées selon les critères suivant :

- La sensibilité aux incendies ou l'inflammabilité.
- La densité des espaces forestiers doit être importante.

Il faut nécessairement un codage pour être exploitable dans notre application. Comme le montre le tableau 7

Tableau 7 : Classification de risque d'incendie selon la densité de végétation

Risque	Index	Espèce	Superficie (Ha)
Très élevé	4	Forêt	5185.79
Elevé	3	Maquis	35146.63
Moyenne	2	Zone steppique	480.79
Faible	1	L'urbain et sol nu	16.27

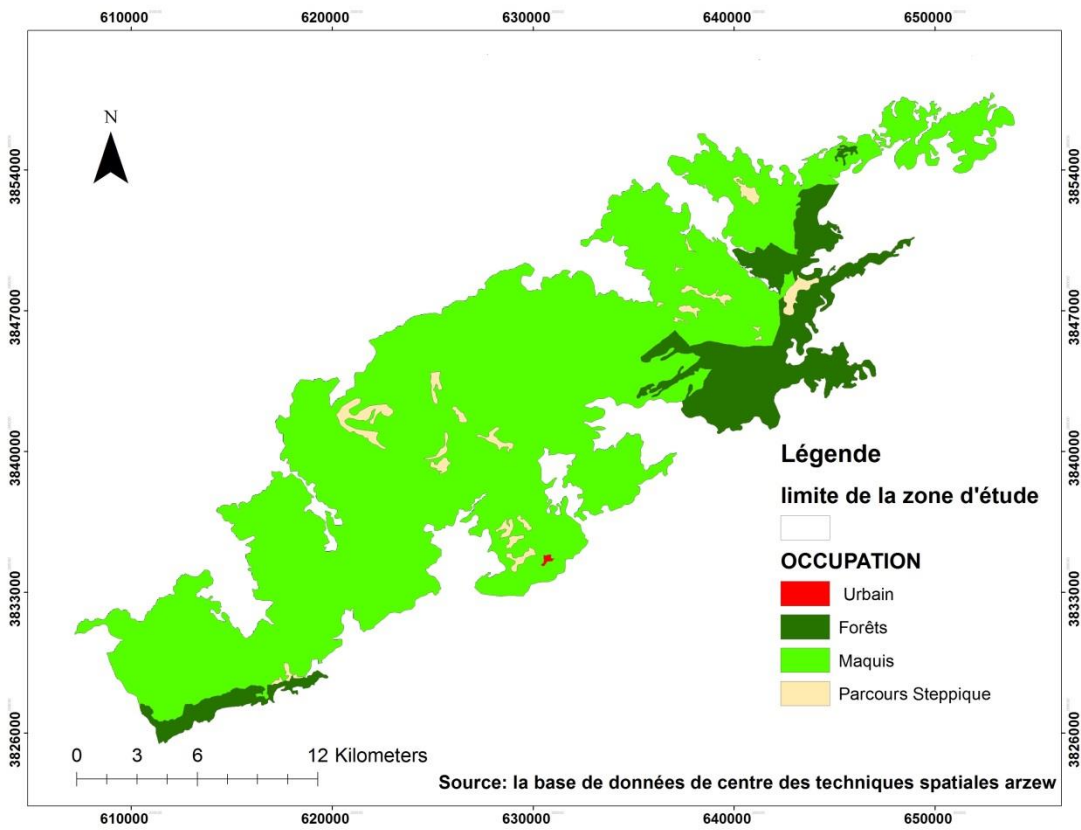


Figure 22 : Carte de l'occupation du sol (Base de données centre des techniques spatiales (Arzew))

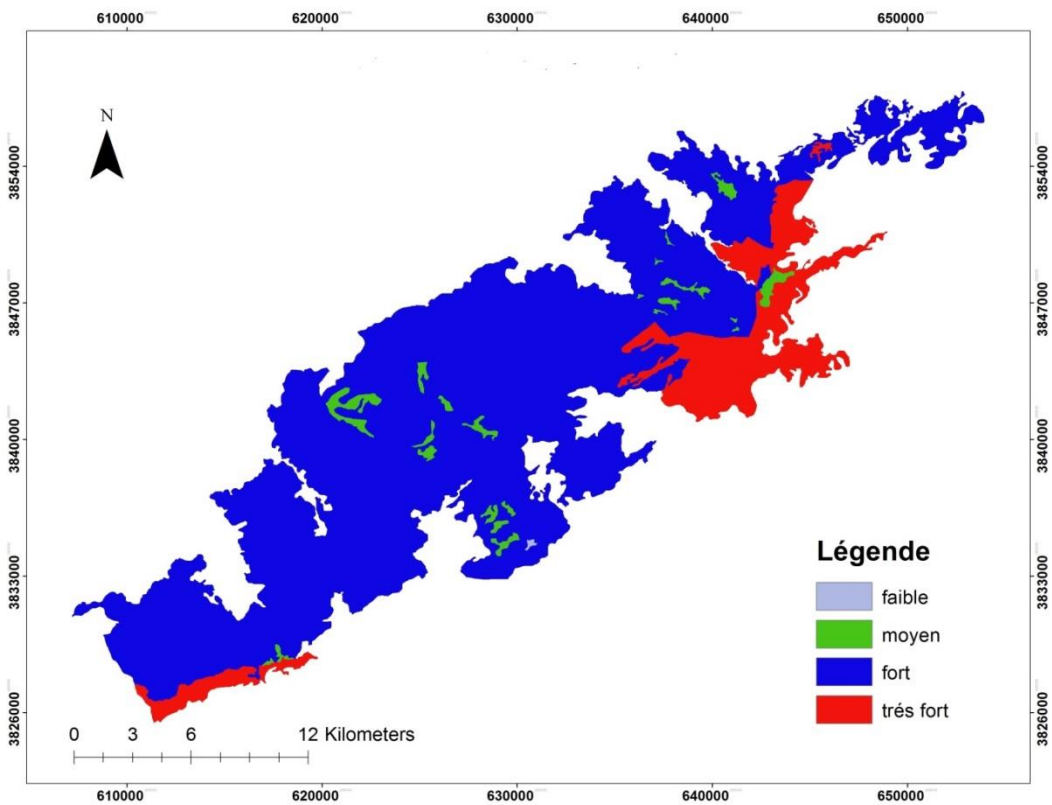


Figure 23 : Carte de risque associé à la densité de végétation

5.3.2 Carte de risque d'incendie associé à l'élévation :

Les cartes d'élévation tirées depuis les modèles numériques de terrain (MNT), représentent les changements d'élévation du terrain dans une zone donnée. Celles-ci sont généralement dérivées de données de terrain collectées par des capteurs à bord de satellites, d'avions ou de drone.

Dans le contexte de la cartographie de la vulnérabilité aux incendies de forêt, les cartes d'élévation jouent un rôle important pour plusieurs raisons.

Impact terrain :

L'élévation du terrain est un facteur important influençant la propagation des incendies de forêt. Car plus le terrain est élevé plus le combustible est exposé au soleil et aux vents intenses. Donc plus ils sont secs et les feux se propagent plus rapidement.

Tout d'abord, j'ai téléchargé un modèle numérique de terrain (DEM) sur le site Web de l'USGS. Déplacé vers la section Données géo spatiales et cartographiques sur le site Web de l'USGS. J'ai recherché l'étendue des données DEM et j'ai choisi une résolution de 30 mètres qui correspondait à la résolution de notre image satellitaire Landsat 8.

Nous avons ensuite le découper selon notre zone d'étude, avec le logiciel ARCGIS 10.8.

Puis nous avons effectué une classification en quatre classes sur ArcGIS en utilisant le MNT découpé selon des seuils afin d'obtenir les résultats les plus fiables pour notre analyse.

Tableau 8 : Classification de risque d'incendie selon l'élévation du terrain

Risque	Index	Les valeurs d'élévation en (m)
Très élevé	4	1096-1559
Elevé	3	893-1096
Moyen	2	706-893
Faible	1	411-706

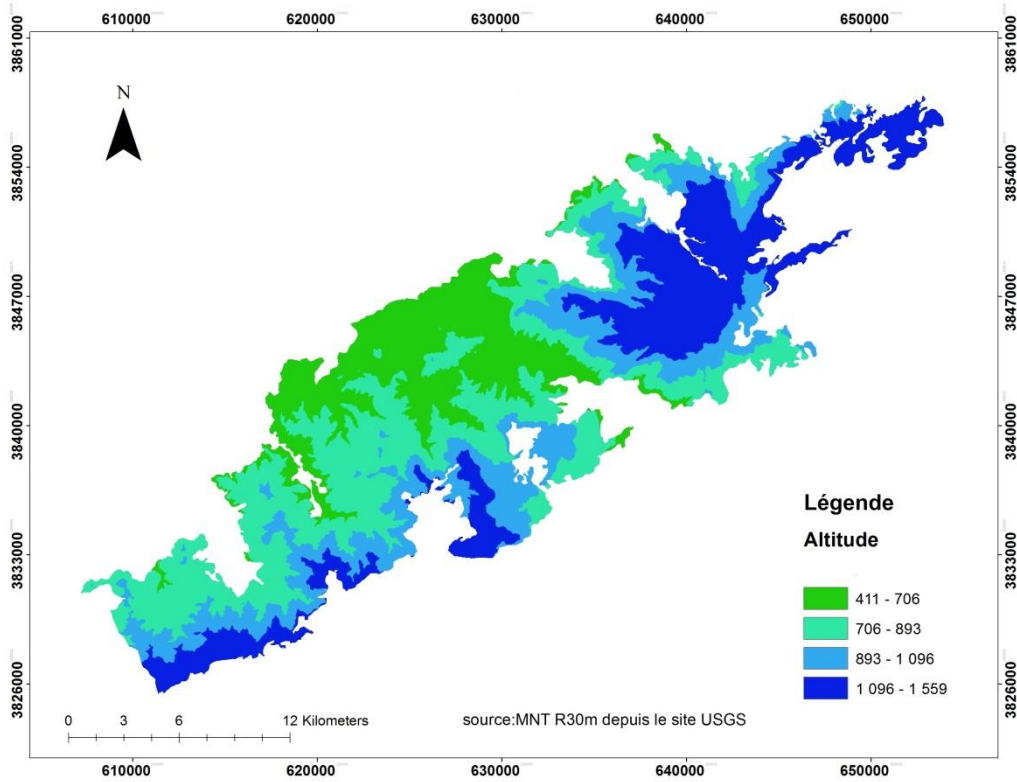


Figure 24 : Carte d'élévation

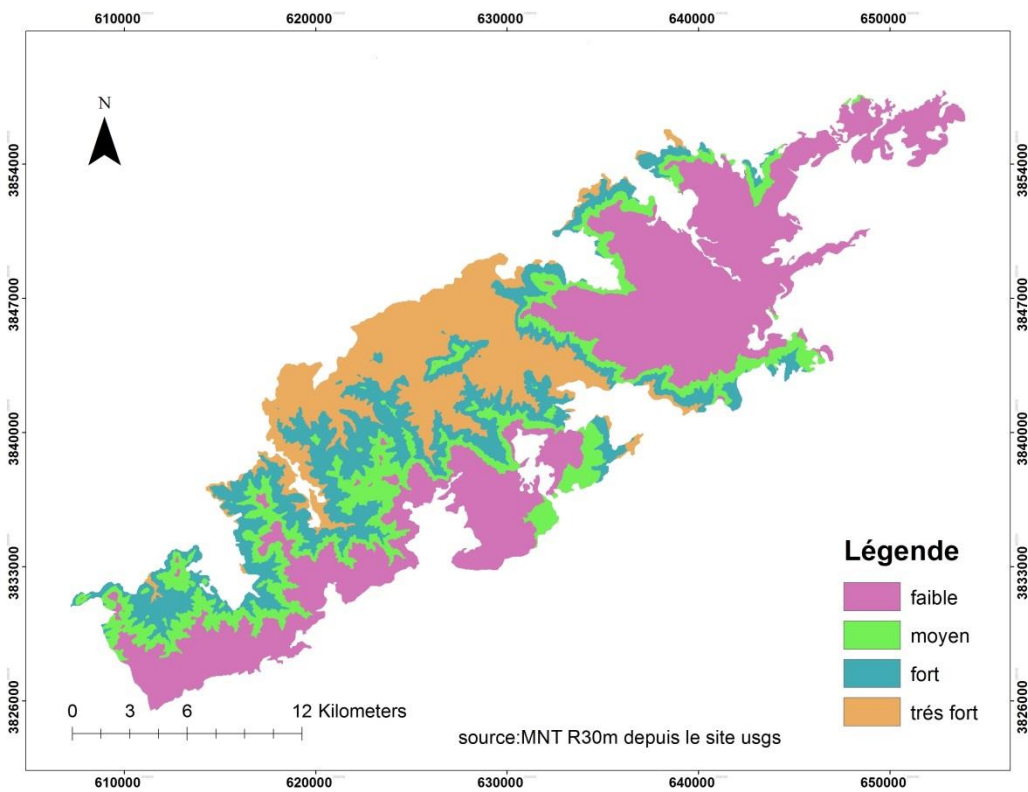


Figure 25 : Carte de risque d'incendie lié à l'élévation

5.3.3 Carte de risque d'incendie associé à la pente :

La pente du terrain joue un rôle important dans l'évaluation du risque d'incendie de forêt.

Impact sur la propagation du feu :

Les pentes accélèrent la propagation des incendies de forêt. Une forte pente favorise le mouvement ascendant de l'air, créant des conditions propices à une propagation rapide du feu. Les zones à fortes pentes peuvent créer des difficultés supplémentaires pour atteindre et éteindre les incendies. L'accès aux zones plus escarpées peut être plus difficile pour les pompiers, ce qui ralentit les efforts de lutte contre les incendies et augmente le risque de propagation du feu.

Les zones avec des pentes très raides sont considérées comme les plus à risque d'incendies de forêt. Maximise la circulation de l'air et favorise la propagation rapide du feu.

Depuis le MNT découpé on va extraire la carte des pentes puis on va la reclasser en 4 classes.

Tableau 9 : Classification de risque d'incendie selon l'inclinaison de la pente.

Risque	Index	Les valeurs de pente (degré)
Très élevé	4	45-68
Elevé	3	15-45
Moyen	2	5-15
Faible	1	0-5

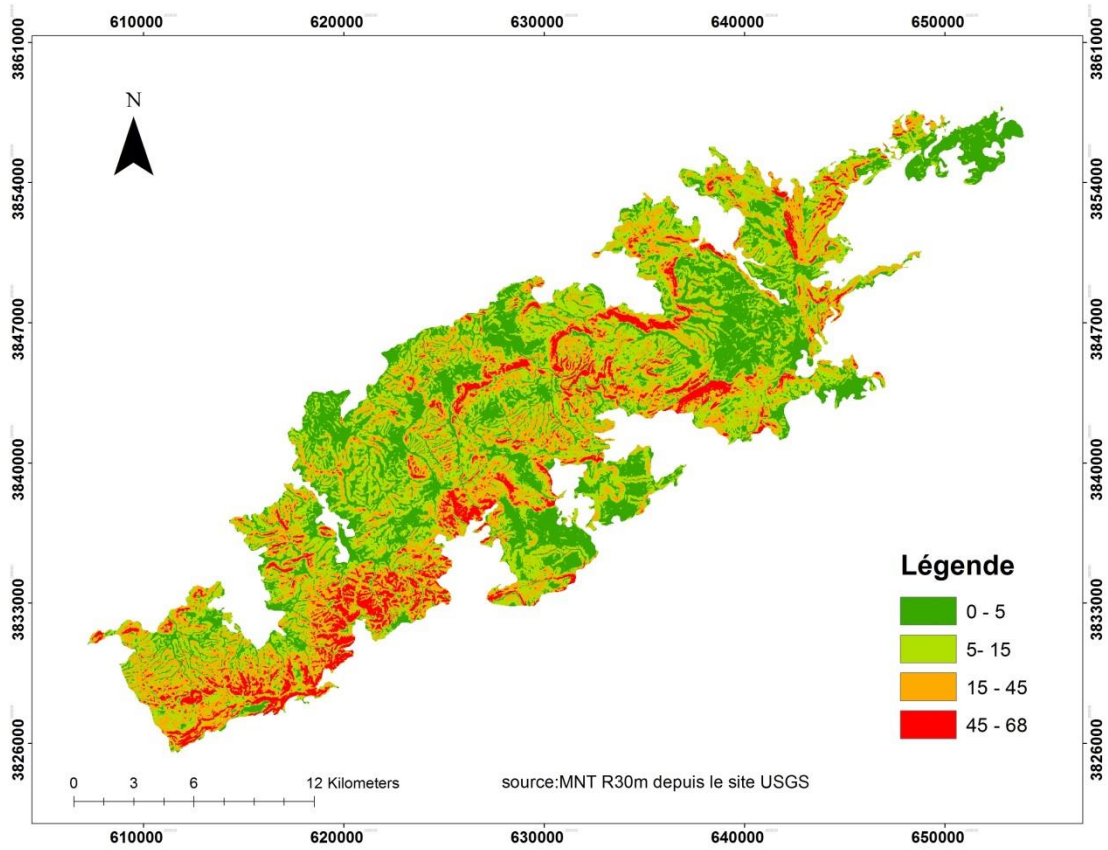


Figure 26 : Carte des pentes

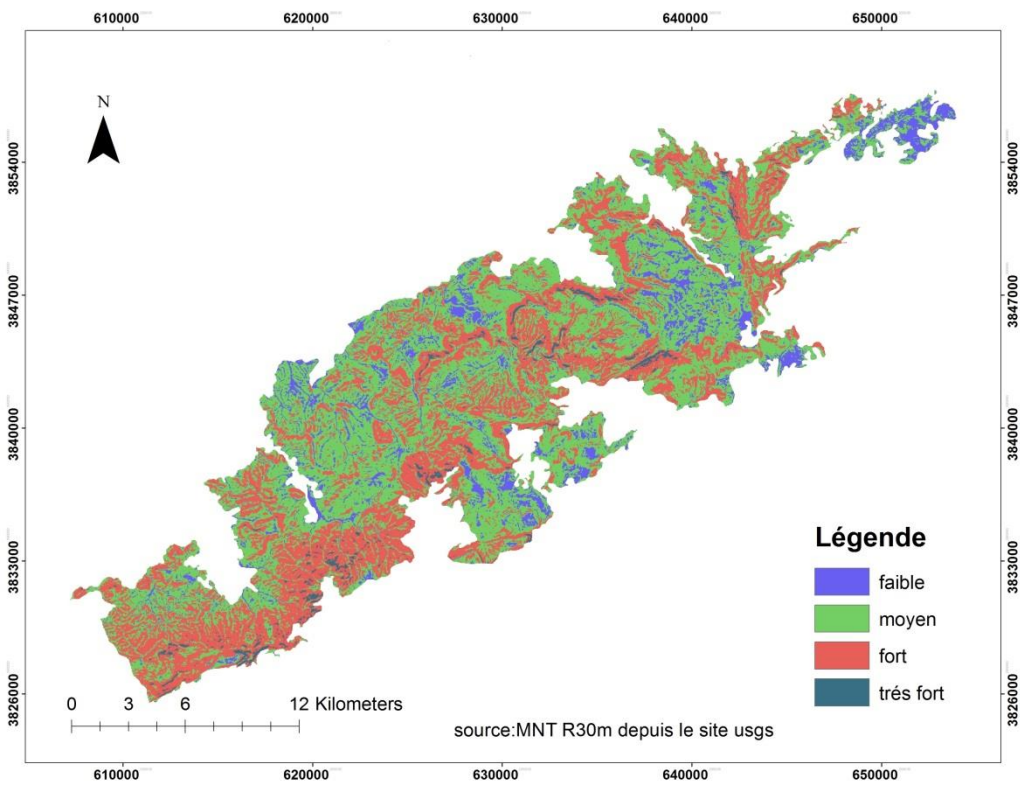


Figure 27 : Carte de risque d'incendie lié à la pente

5.3.4 Carte de risque d'incendie associé à l'exposition :

L'exposition au soleil des matériaux combustibles accéléré grandement leur vitesse de dessèchement. Exposition est déterminée par rapport aux quatre points cardinaux. Ces valeurs sont exprimées en degrés avec le nord comme origine.

On va reclasser la carte d'exposition en quatre classe aussi comme suit :

Risque	Index	Les valeurs de l'angle (degré)
Très élevé	4	269-360 ouest
Elevé	3	180-269 sud
Moyen	2	90-180 Est
Faible	1	0-90 Nord

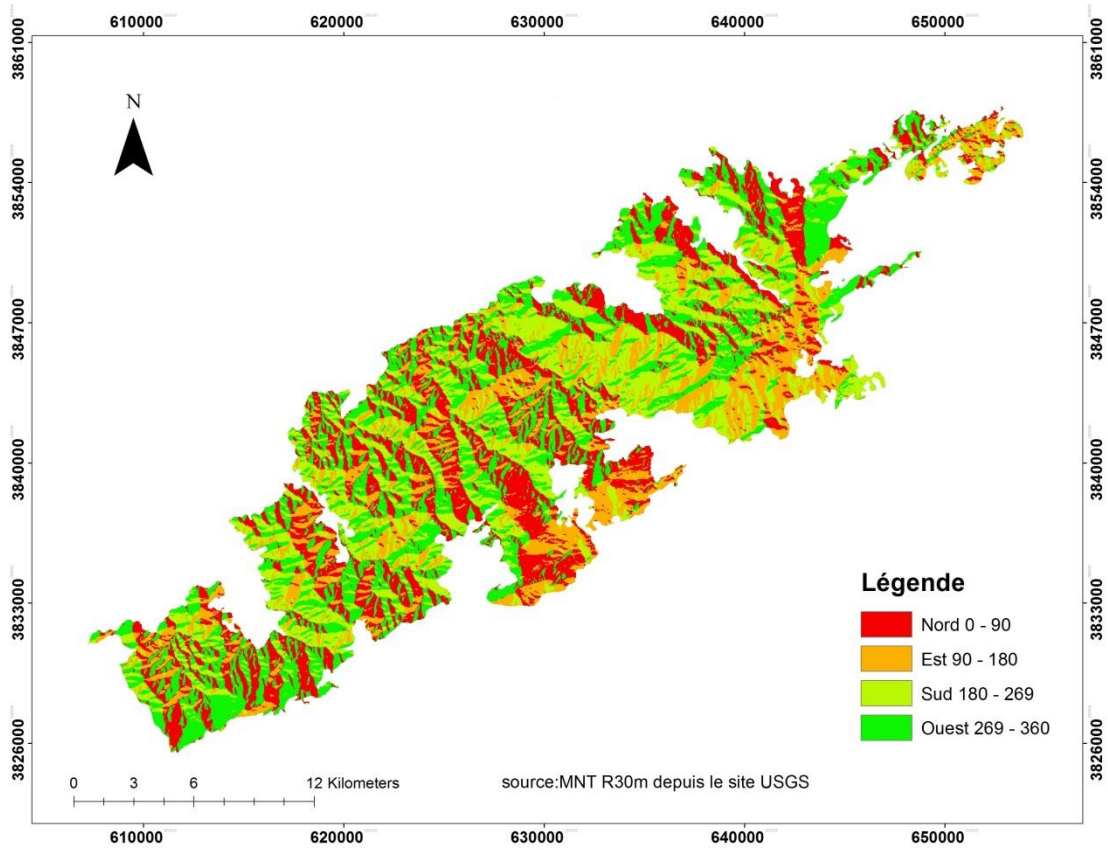


Figure 28 : Carte d'exposition

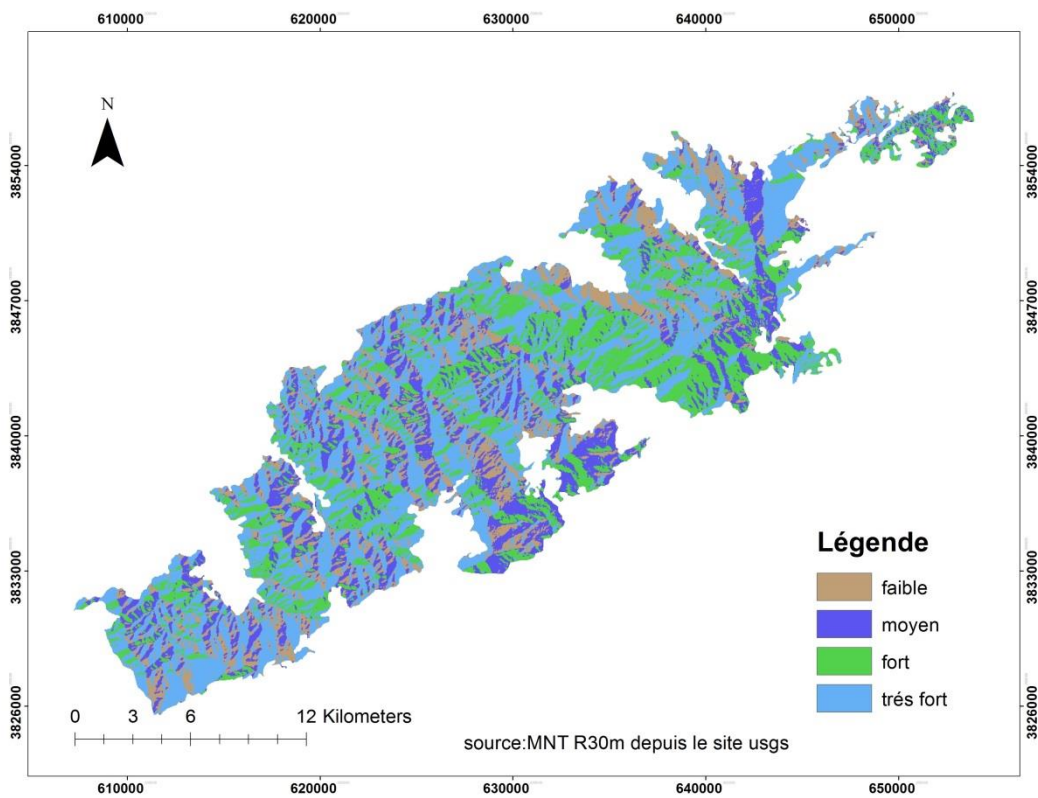


Figure 29 : Carte de risque lié à l'exposition

5.3.5 Carte de proximité à la route :

Cette carte est très importante pour contrôler le déclenchement du feu de forêt et sa propagation car Dans le contexte de la vulnérabilité des incendies de forêt, il est important de reconnaître que l'activité humaine peut contribuer au risque d'incendie. Les gestes humains imprudents, négligents ou intentionnels peuvent déclencher des incendies de forêt et exposer les forêts.

Nous avons utilisés le buffer car il est largement utilisé en analyse spatiale pour calculer la proximité entre des entités géographiques. Un buffer est une zone tampon créée autour d'une entité géographique, telle qu'un point, une ligne ou un polygone, en utilisant une distance spécifiée. La création d'un buffer permet d'identifier les autres entités qui se trouvent à une certaine distance de l'entité d'origine.

Figure 30 : Classification du risque de proximité a la route

Risque	Index	Proximité à la route (m)
Très élevé	4	200
Elevé	3	400
Moyen	2	600
Faible	1	800

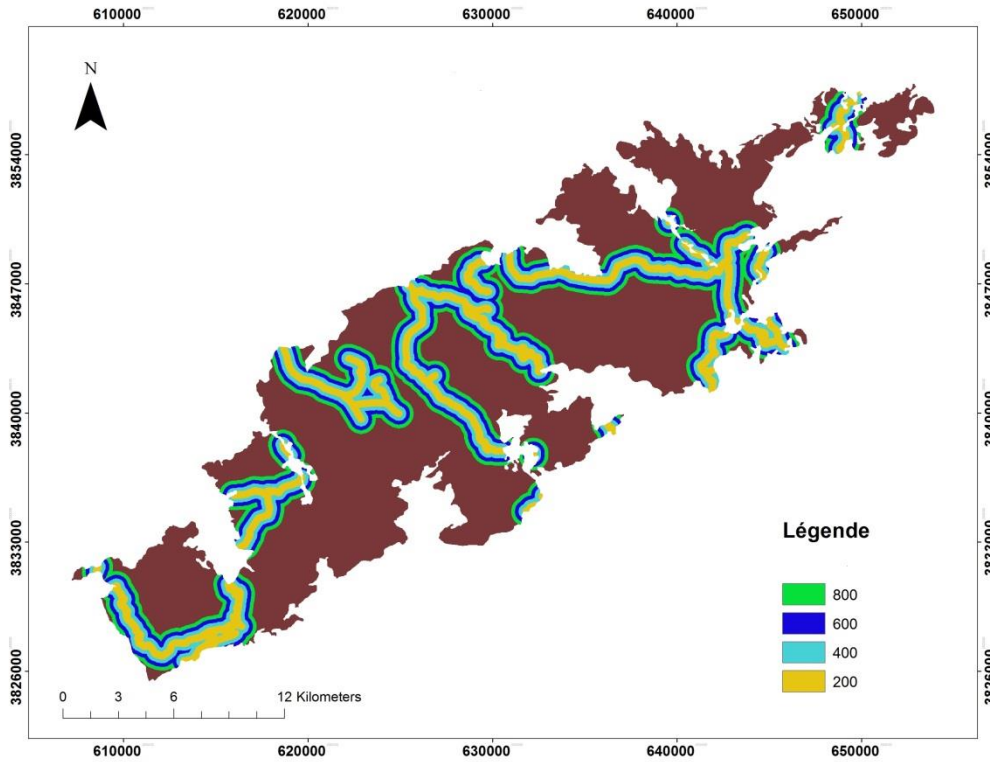


Figure 31 : Carte de proximité à la route

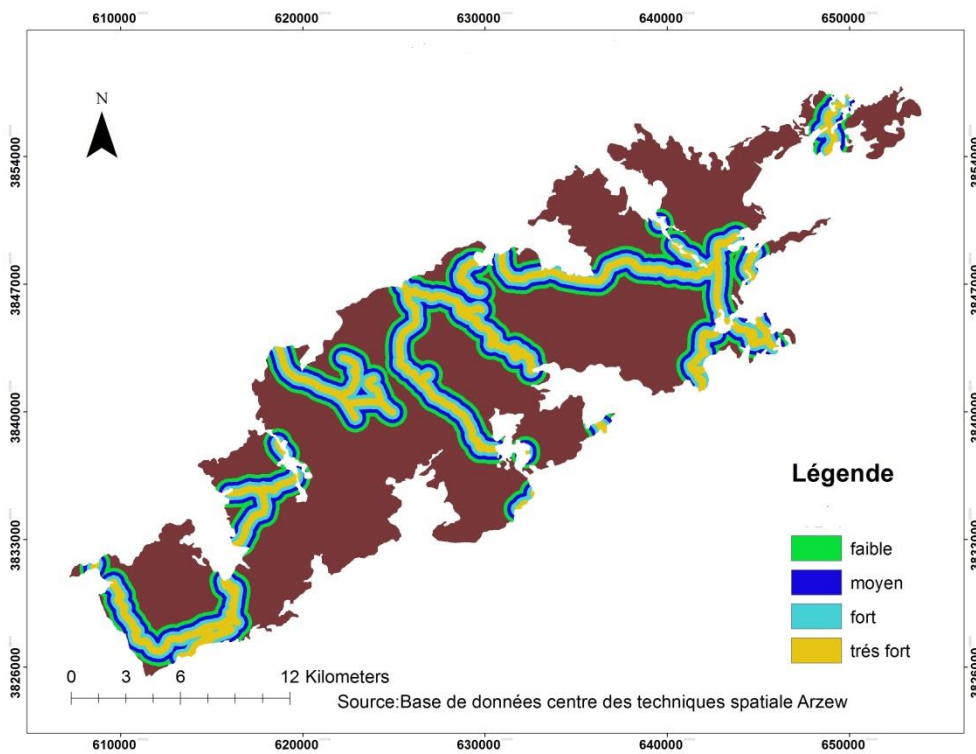


Figure 32 : Carte de risque lié à la proximité à la route

5.3.6 La création de la carte de vulnérabilité :

Une fois que nous avons préparé les classes de facteurs raster et les poids correspondants à l'aide de l'analyse AHP (Analytic Hierarchy Process), on peut procéder à la création de la carte de vulnérabilité sur ArcGIS :

On va utiliser l'outil "Raster Calculator" pour effectuer un calcul raster en multipliant chaque facteur raster par son poids correspondant.

Puis on va reclasser le raster résultant avec l'outil "Reclassify" pour convertir le raster résultant en une carte de vulnérabilité.

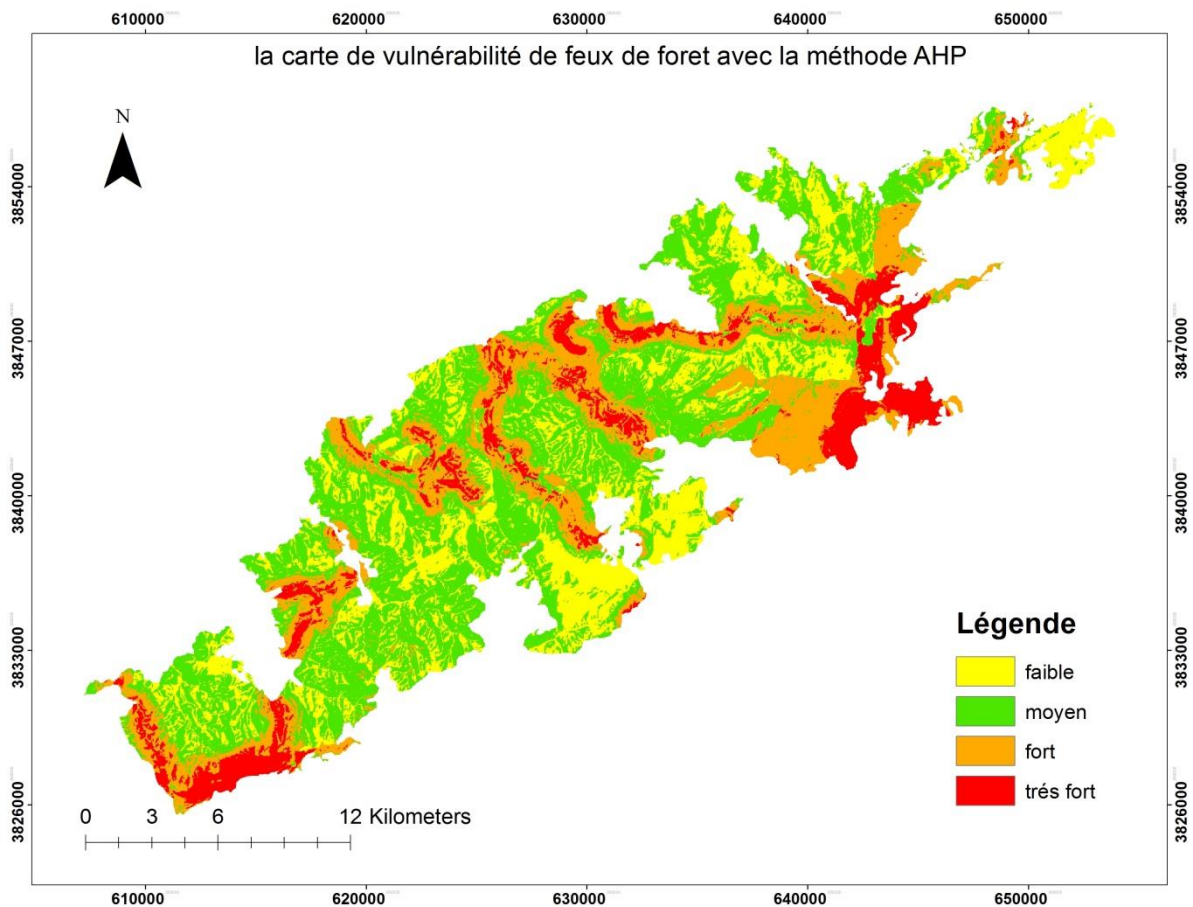


Figure 33 : Carte de vulnérabilité de feux de forêt

Tableau 10 : Table statistique de la carte de vulnérabilité :

Zonation	Superficie (Ha)	Pourcentage
Zone à faible risque	9771.9	24 ,6
Zone a moyen risque	17176.22	42.6
Zone à fort risque	9258.94	23
Zone à très fort risque	4058.1	9.8

6 Conclusion :

En conclusion, la création de la carte de vulnérabilité représente une avancée significative dans notre compréhension des facteurs de vulnérabilité et renforce notre capacité à prendre des mesures préventives efficaces.

Cependant, il est important de souligner que la validation de cette carte de vulnérabilité est une étape essentielle pour garantir sa fiabilité et son utilité. Dans le prochain chapitre, nous aborderons en détail le processus de validation

Chapitre 4 : Validation et discussions des résultats

7 Chapitre 4: Validation et discussion des résultats

7.1 Introduction :

En raison du manque de données historiques précises sur les feux de forêt, une approche différente a dû être adoptée pour évaluer les zones brûlées et valider la carte de vulnérabilité. Pour ce faire, nous avons utilisé une méthode basée sur l'indice de ratio de brûlure normalisé différentiel (dNBR) utilisant la télédétection spectrale pour comprendre l'impact du feu sur le paysage.

Cet indice est couramment utilisé dans l'analyse des incendies de forêt. Déterminez l'étendue de la zone brûlée en comparant la réponse spectrale avant et après l'incendie. Cette méthode repose sur l'utilisation des images satellites ou aériennes prises avant et après l'incendie. À l'aide d'images multi spectrales, sur L'indice de ratio de brûlure normalisé différentiel (dNBR) a été calculé en soustrayant la réflectance infrarouge après incendie de la réflectance infrarouge avant incendie et en divisant le résultat par la somme des deux réflectances infrarouges. Cela a créé une image qui représentait un changement radical dans le paysage.

En analysant cette image dNBR, nous avons pu identifier les zones brûlées lors de l'incendie. Les zones avec des valeurs dNBR élevées indiquent un incendie plus intense, tandis que des valeurs plus faibles indiquent un incendie plus faible. Ces informations ont été utilisées pour valider la carte de vulnérabilité en comparant les zones brûlées réelles aux zones identifiées comme à haut risque.

7.2 Le Ratio de Brûlure Normalisé (Normalized Burn Ratio - NBR)

Le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) est utilisé pour identifier les zones brûlées. La formule est similaire à celle de l'indice de végétation différenciée normalisée (NDVI), à la différence qu'elle utilise les parties proche infrarouge (NIR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR) du spectre électromagnétique (Lopez, 1991 ; Key and Benson, 1995).

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

L'indice de brûlure normalisée (Normalized Burn Ratio - NBR) utilise les parties infrarouge à ondes courtes (SWIR) et proche infrarouge (NIR) du spectre électromagnétique.

Les parties NIR et SWIR du spectre électromagnétique sont une combinaison puissante de bandes à utiliser pour cet indice, étant donné que la végétation se reflète fortement dans la région NIR du spectre électromagnétique et faiblement dans le SWIR. Alternativement, il a été

démonstré qu'une cicatrice de feu qui contient de la végétation ligneuse brûlée et du sol réfléchira plus intensément dans la partie SWIR du spectre électromagnétique et au-delà (voir figure ci-dessous).

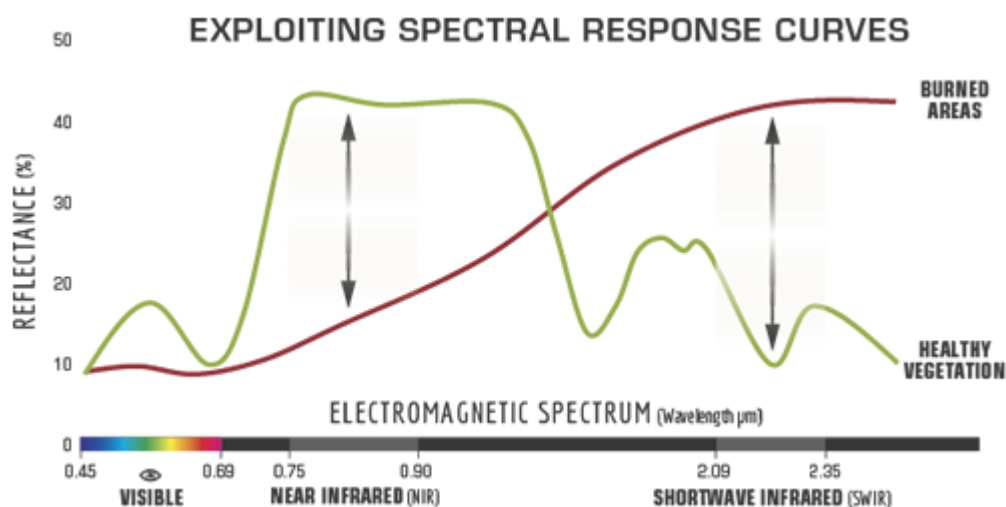


Figure 34 : La réponse spectrale

Les plantes se reflètent fortement dans la partie proche infrarouge (NIR) du spectre, mais se reflètent beaucoup moins intensément dans la partie infrarouge à ondes courtes (SWIR), ce qui rend cette combinaison puissante pour identifier les zones présentant des tiges mortes debout (bois ou écorce brûlés) et le sol / la terre. Source : Service forestier des États-Unis.

7.3 Bandes NBR

L'indice NBR a été initialement développé pour être utilisé avec les bandes 4 et 7 des capteurs Landsat TM et ETM+, mais il peut fonctionner avec n'importe quel capteur multispectral possédant une bande NIR entre 760 et 900 nm et une bande SWIR entre 2080 et 2350 nm. Ainsi, cet indice peut être utilisé avec Landsat 8, MODIS et d'autres capteurs multispectraux (et hyperspectraux).

7.4 Différence NBR

Le Ratio de Brûlure Normalisé est particulièrement efficace en tant qu'outil pour mieux comprendre l'étendue et la gravité des incendies lorsqu'il est utilisé après le calcul de la différence entre les conditions pré et post-incendie. Cette différence est mieux mesurée en utilisant des données collectées immédiatement avant l'incendie, puis immédiatement après celui-ci. Le NBR est moins efficace si du temps s'est écoulé et que la repousse / régénération de la végétation a commencé après l'incendie. Une fois que la régénération de la végétation a commencé, la cicatrice de feu commencera à refléter un signal plus fort dans la partie NIR du spectre, car les plantes saines se reflètent fortement dans cette partie en raison des propriétés de la chlorophylle.

Pour cette raison, le ratio NBR fonctionne mieux dans des zones comme les États-Unis, où la régénération végétale est attendue pour se produire plus lentement. Dans des zones comme les tropiques, qui sont humides et caractérisées par une repousse rapide, le NBR peut être moins efficace.

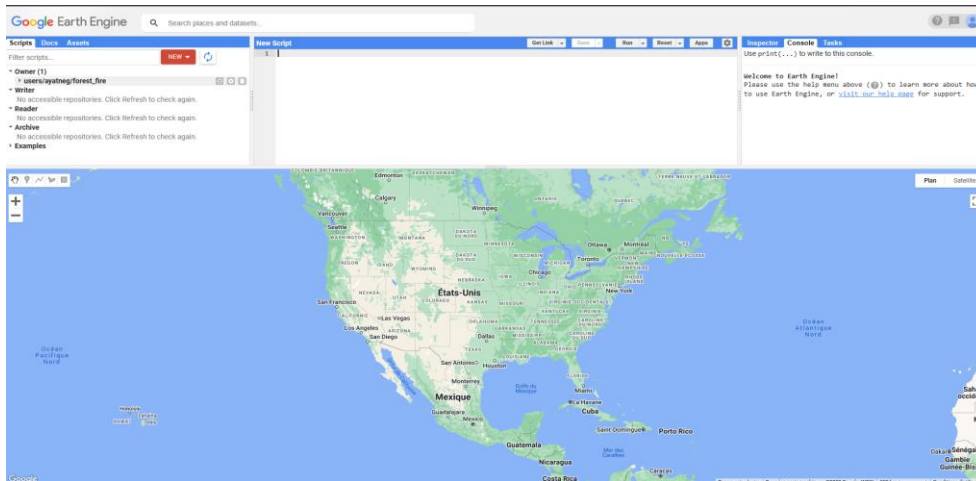
Pour calculer la différence NBR, vous soustrayez le raster NBR post-incendie du raster NBR pré-incendie de la manière suivante :

$$dNBR \text{ or } \Delta NBR = \text{PrefireNBR} - \text{PostfireNBR}$$

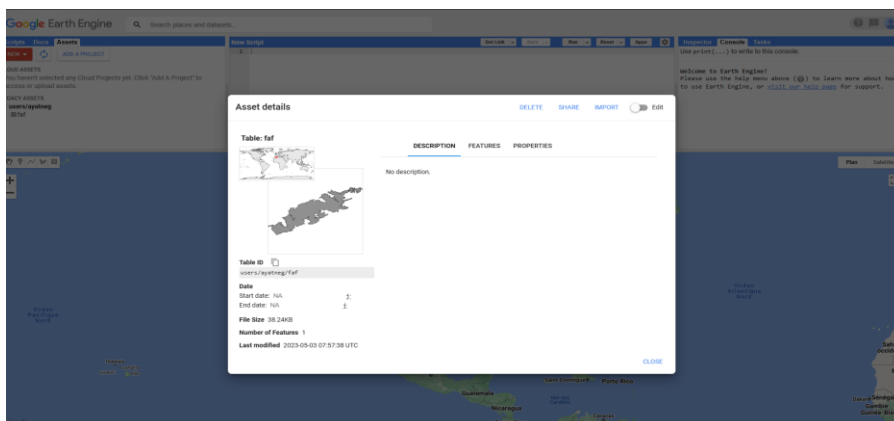
(difference NBR (dNBR) equation. [Source Humboldt.edu](https://www.humboldt.edu))

7.5 Les étapes pour calculer le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) sur GEE

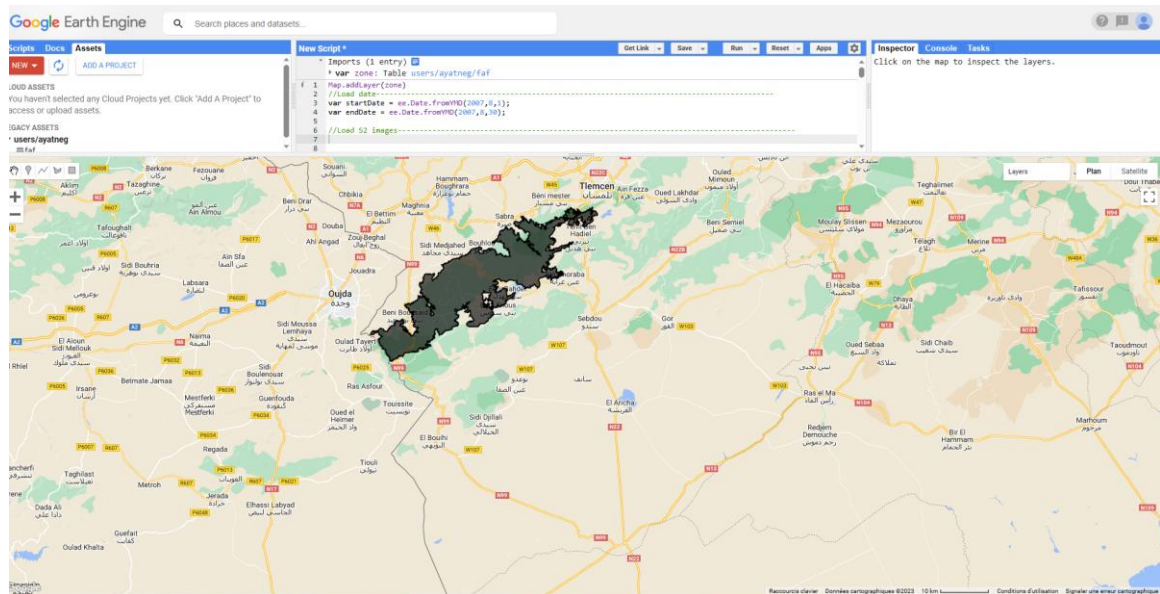
1- Ouvrir l'éditeur de code:



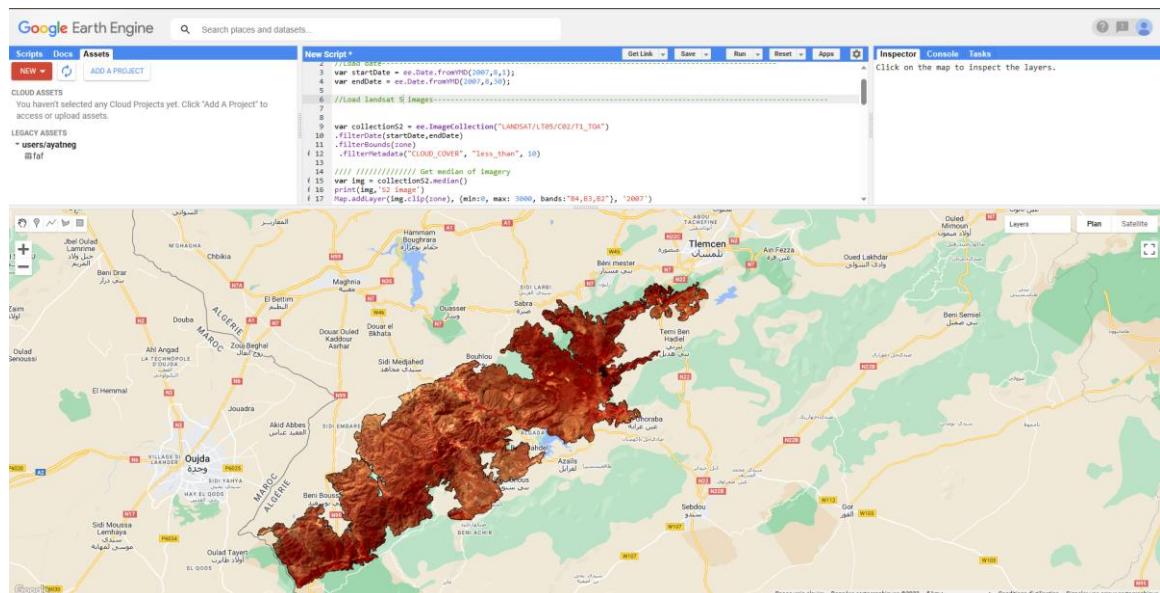
2- Importer la zone



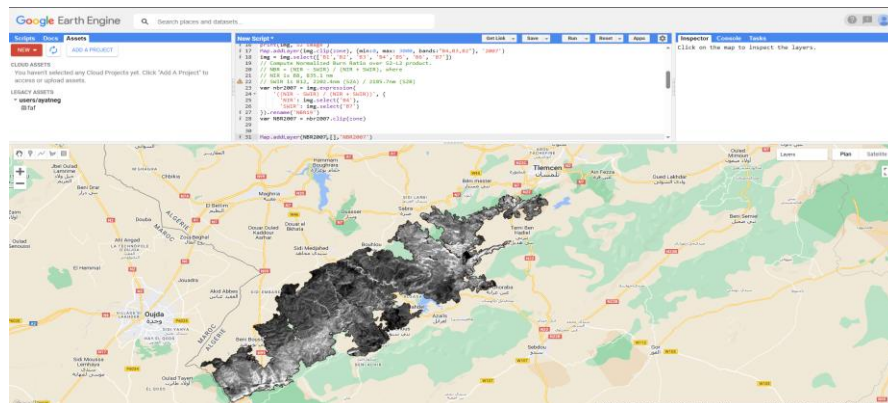
3- Charger les données et visualiser la zone :



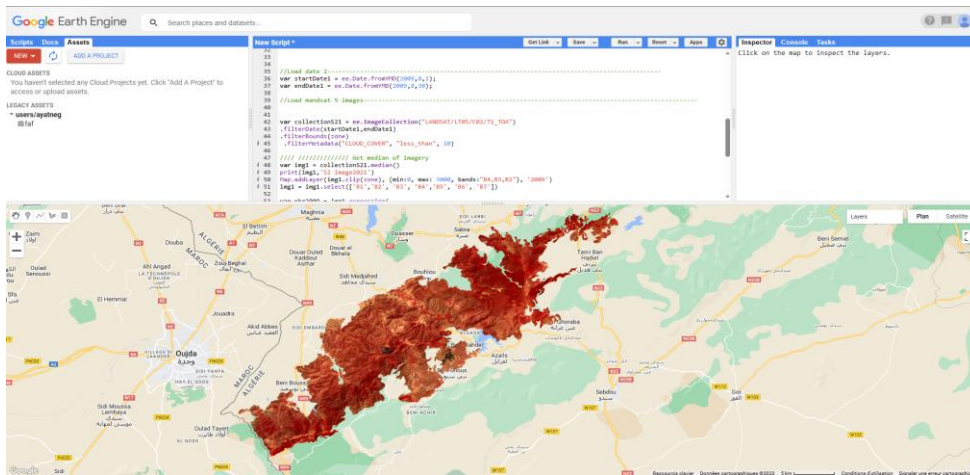
4- Charger Landsat 5 et visualiser en RVB (année 2007)



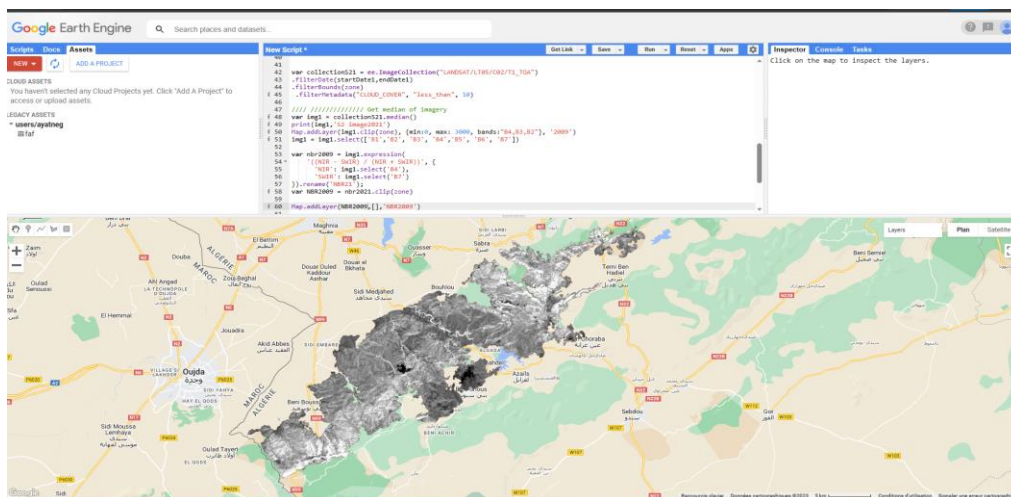
5- Calculer le NBR (Normalized Burn Ratio) pour l'année 2007.



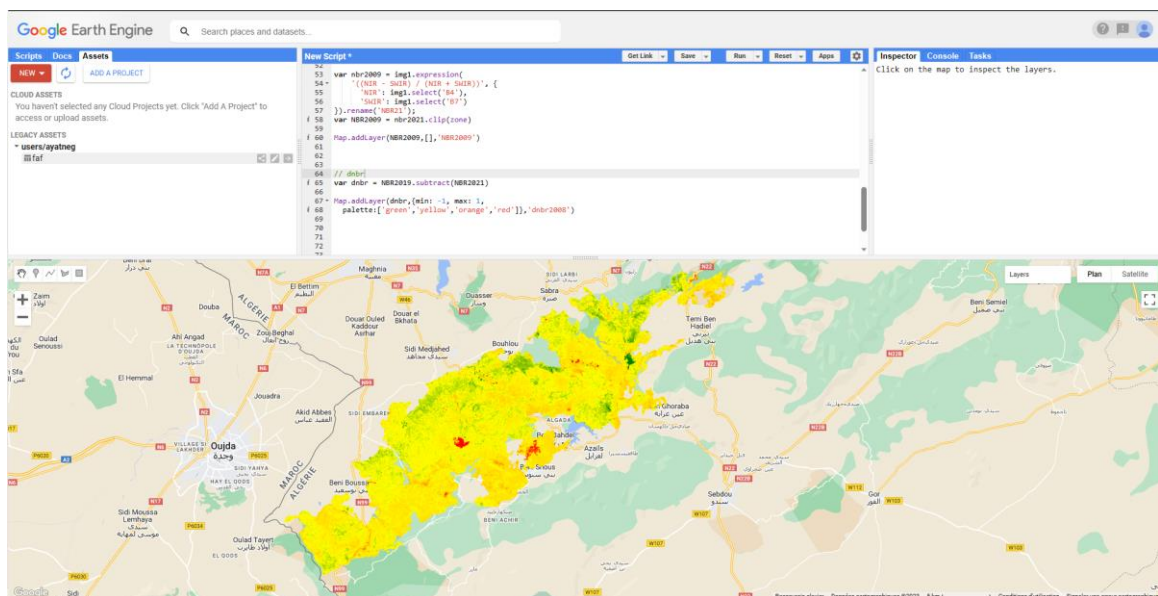
6- Charger les données Landsat 5 pour l'année 2008.



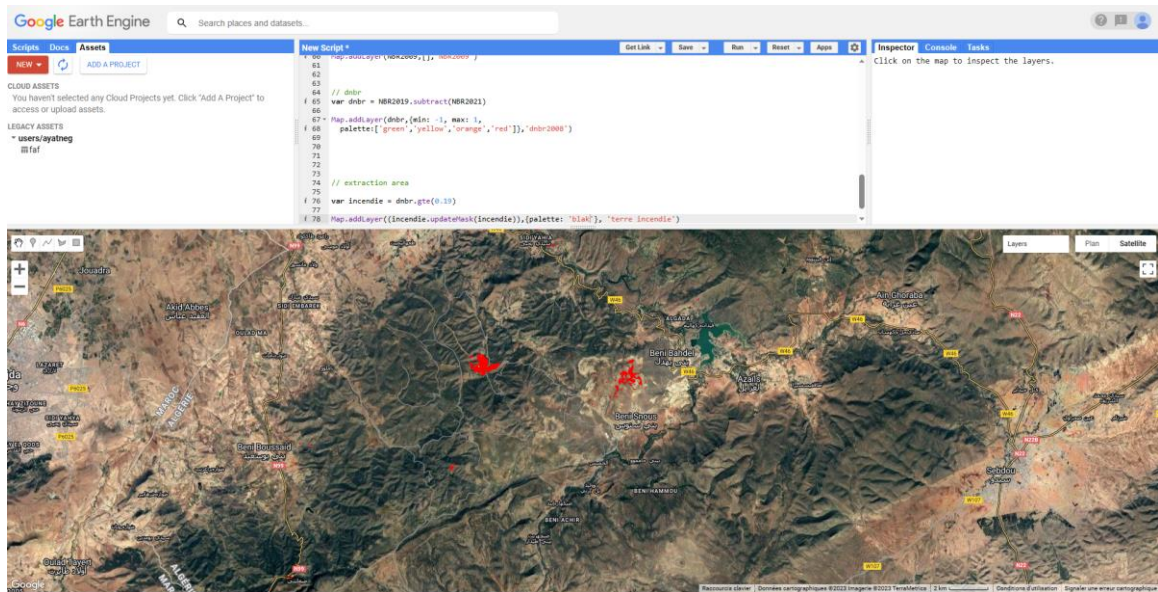
6- Calculer le NBR (Normalized Burn Ratio) pour l'année 2009.



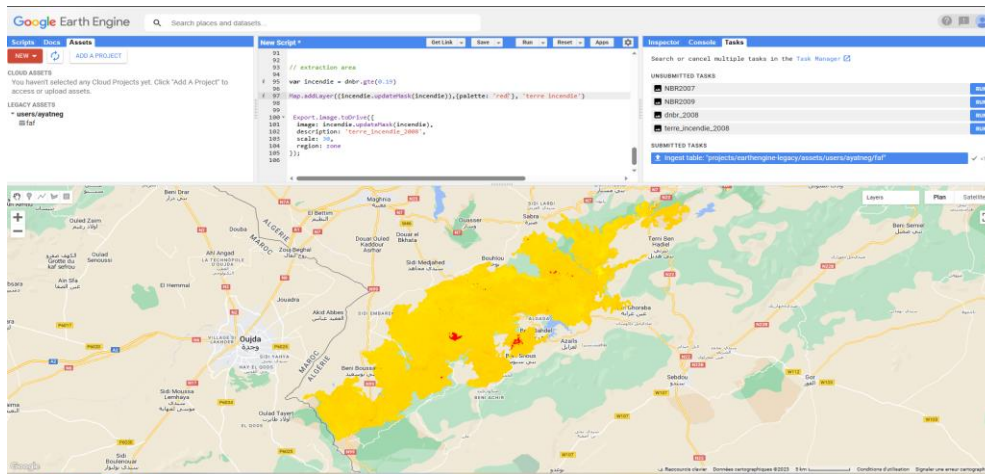
7- Calculer le DNBR (Difference Normalized Burn Ratio) en soustrayant le NBR de 2009 du NBR de 2007.



8- Extraction de la zone brûlée en utilisant le DNBR



9- Exporter les résultats de la zone brûlée obtenue



7.6 APPLICATION WEB :

Ci-dessous vous allez trouver les liens pour ouvrir l'application fait sur Google Earth Engine

- **Application 2007**

<https://ayatneg.users.earthengine.app/view/fire2007>

- **Application 2008**

<https://ayatneg.users.earthengine.app/view/fire2008>

7.7 L'explication du code pour calculer le Ratio de Brûture Normalisé (NBR) :

```
1 Map.centerObject(zone)
2
3 Map.addLayer(zone)
4 //Load date-----
5 var startDate = ee.Date.fromYMD(2006,7,1);
6 var endDate = ee.Date.fromYMD(2006,8,30);
7
8 //Load landsat 5 images
9 -----
10
11 var collectionS2 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
12 .filterDate(startDate,endDate)
13 .filterBounds(zone)
14 .filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 10)
15
16 //// //////////////// Get median of imagery
17 var img = collectionS2.median()
18 print(img,'S2 image')
19 Map.addLayer(img.clip(zone), imageVisParam4, '2006')
20 img = img.select(['B1','B2', 'B3', 'B4','B5', 'B6', 'B7'])
21 // Compute Normalized Burn Ratio over S2-L2 product.
22 // NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), where
23 // NIR is B8, 835.1 nm
24 // SWIR is B12, 2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)
25 var nbr2006 = img.expression(
26 var nbr2006 = img.expression(
27   '((NIR - SWIR) / (NIR + SWIR))', {
28     'NIR': img.select('B4'),
29     'SWIR': img.select('B7')
30   }).rename('NBR19')
31 var NBR2006 = nbr2006.clip(zone)
32
33 Map.addLayer(NBR2006,imageVisParam2,'NBR2006')
34
35
36 Export.image.toDrive({
37   image: NBR2006,
38   description: 'NBR2006',
39   scale: 30,
40   region: zone
41 });
42
43 //Load date 2-----
44 -----
45 var startDate1 = ee.Date.fromYMD(2008,8,1);
46 var endDate1 = ee.Date.fromYMD(2008,8,30);
47 //Load mandsat 5 images
```

Figure 35 : Le code pour le chargement et affichage des images Landsat 5 pour la 1^{ère} date 2006:

- ✓ Les lignes 2 à 8 définissent la période de recherche des images en spécifiant les dates de début et de fin.
- ✓ La ligne 11 charge la collection d'images Landsat 5 filtrée en fonction des dates et de la zone d'intérêt.
- ✓ La ligne 14 calcule l'image composite en prenant la médiane des images de la collection.
- ✓ Les lignes 16 à 18 sélectionnent les bandes d'intérêt de l'image composite.

- ✓ Les lignes 23 à 28 calculent le Ratio de Brûlure Normalisé (NBR) en utilisant les bandes NIR et SWIR de l'image composite.
- ✓ La ligne 32 ajoute la couche du NBR2006 à la carte.
- ✓ Les lignes 35 à 43 exportent l'image NBR2006 vers Google Drive.

```

44 var startDate1 = ee.Date.fromYMD(2008,8,1);
45 var endDate1 = ee.Date.fromYMD(2008,8,30);
46
47 //Load mandsat 5 images
-----
-----
48
49
50 var collectionS21 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
51 .filterDate(startDate1,endDate1)
52 .filterBounds(zone)
53 .filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 10)
54
55 //// ////////////////////// Get median of imagery
56 var img1 = collectionS21.median()
57 print(img1,'S2 image2021')
58 Map.addLayer(img1.clip(zone), imageVisParam5, '2008')
59 img1 = img1.select(['B1','B2', 'B3', 'B4','B5', 'B6', 'B7'])
60
61 var nbr2008 = img1.expression(

```

```

61 var nbr2008 = img1.expression(
62   '((NIR - SWIR) / (NIR + SWIR))', {
63     'NIR': img1.select('B4'),
64     'SWIR': img1.select('B7')
65   }).rename('NBR21');
66 var NBR2008 = nbr2008.clip(zone)
67
68 Map.addLayer(NBR2008,imageVisParam3,'NBR2008')
69
70
71 Export.image.toDrive({
72   image: NBR2008,
73   description: 'NBR2008',
74   scale: 30,
75   region: zone
76 });
77
78
79 // dnbr
80 var dnbr = NBR2006.subtract(NBR2008)

```

```

81
82 Map.addLayer(dnbr,imageVisParam,'dnbr2007')
83
84
85 Export.image.toDrive({
86   image: dnbr,
87   description: 'dnbr_2007',
88   scale: 30,
89   region: zone

```

Figure 36 : Le code pour le chargement et affichage des images Landsat 5 pour la 2^{ème} date 2008:

- ✓ Les lignes 46 à 52 définissent une deuxième période de recherche des images.
- ✓ La ligne 55 charge une deuxième collection d'images Landsat 5 filtrée pour cette période.
- ✓ La ligne 58 calcule l'image composite pour la deuxième période.
- ✓ Les lignes 60 à 62 sélectionnent les bandes d'intérêt de l'image composite.

- ✓ Les lignes 67 à 72 calculent le NBR pour la deuxième période.
- ✓ La ligne 76 ajoute la couche du NBR2008 à la carte.
- ✓ Les lignes 79 à 87 exportent l'image NBR2008 vers Google Drive.

:

```

94 // extraction area
95
96 var incendie = dnbr.gte(0.3)
97
98 Map.addLayer((incendie.updateMask(incendie)),{palette: 'black'},
    'terre incendie')
99
100
101 Export.image.toDrive({
102   image: incendie.updateMask(incendie),
103   description: 'terre_incendie_2007',
104   scale: 30,
105   region: zone
106 });

```

Figure 37 :Le code pour le Calcul de la différence de NBR (delta NBR) et Détection des zones d'incendie :

- ✓ La ligne 96 crée une image binaire où les valeurs de delta NBR supérieures ou égales à 0.3 sont considérées comme des zones d'incendie potentielles. Cela est réalisé à l'aide de l'opérateur de comparaison "gte" (greater than or equal to).
- ✓ La ligne 98 ajoute la couche des zones d'incendie à la carte en utilisant la méthode. Les zones d'incendie sont représentées en noir car la palette de couleurs est définie sur 'black'.
- ✓ Les lignes 101 à 106 exportent l'image des zones d'incendie vers Google Drive. L'image exportée est créée en appliquant un masque aux zones d'incendie avec une échelle de 30 (mètres).

```

1 Map.centerObject(zone)
2
3 Map.addLayer(zone)
4 //Load date-----
5
6 var startDate = ee.Date.fromYMD(2007,8,1);
7 var endDate = ee.Date.fromYMD(2007,8,30);
8
9 //Load landsat 5 images
10
11 var collectionS2 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
12 .filterDate(startDate,endDate)
13 .filterBounds(zone)
14 .filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 10)
15
16 //// //////////////// Get median of imagery
17 var img = collectionS2.median()
18
19 print(img,'S2 image')
20 Map.addLayer(img.clip(zone), imageVisParam, '2007')
21 img = img.select(['B1','B2', 'B3', 'B4','B5', 'B6', 'B7'])
22 // Compute Normalized Burn Ratio over S2-L2 product.
23 // NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), where
24 // NIR is B8, 835.1 nm
25 // SWIR is B12, 2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)
26 var nbr2007 = img.expression(
27   '((NIR - SWIR) / (NIR + SWIR))', {
28     'NIR': img.select('B4'),
29     'SWIR': img.select('B7')
30   }).rename('NBR19')
31 var NBR2007 = nbr2007.clip(zone)
32
33 Map.addLayer(NBR2007,imageVisParam2,'NBR2007')
34
35
36 Export.image.toDrive({
37   image: NBR2007,
38   description: 'NBR2007',
39   scale: 30,
40   region: zone
41 });
42
43 //Load date 2-----
44
45 var startDate1 = ee.Date.fromYMD(2009,8,1);
46 var endDate1 = ee.Date.fromYMD(2009,8,30);
47
48 //Load mandsat 5 images
49
50 var collectionS21 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
51 .filterDate(startDate1,endDate1)
52 .filterBounds(zone)
53 .filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 10)
54
55 //// //////////////// Get median of imagery
56 var img1 = collectionS21.median()
57 print(img1,'S2 image2021')
58 Map.addLayer(img1.clip(zone), imageVisParam3, '2009')

```



```

61 var nbr2009 = img1.expression(
62   '((NIR - SWIR) / (NIR + SWIR))', {
63     'NIR': img1.select('B4'),
64     'SWIR': img1.select('B7')
65   }).rename('NBR2009');
66 var NBR2009 = nbr2009.clip(zone)
67
68 Map.addLayer(NBR2009, imageVisParam4, 'NBR2009')
69
70
71 Export.image.toDrive({
72   image: NBR2009,
73   description: 'NBR2009',
74   scale: 30,
75   region: zone
76 });
77
78
79 // dnbr
80 var dnbr = NBR2007.subtract(NBR2009)
81
82 Map.addLayer(dnbr, imageVisParam5, 'dnbr2008')

```

```

85 Export.image.toDrive({
86   image: dnbr,
87   description: 'dnbr_2008',
88   scale: 30,
89   region: zone
90 });
91
92
93
94 // extraction area
95
96 var incendie = dnbr.gte(0.15)
97
98 Map.addLayer((incendie.updateMask(incendie)), {palette: 'black'},
99   'terre incendie')
100
101 Export.image.toDrive({
102   image: incendie.updateMask(incendie),
103   description: 'terre_incendie_2008',
104   scale: 30,

```

Figure 38 : Le code pour le Calcul de la différence de NBR (delta NBR) et Détection des zones d'incendie 2007-2009:

- ✓ Ce code effectue une analyse similaire à celle précédente, mais pour l'année 2007 et l'année 2009. Il utilise des images Landsat 5 pour calculer le NBR (Normalized Burn Ratio) et détecter les zones d'incendie potentielles.

7.8 La validation de la carte de vulnérabilité :

Pour réaliser la validation de votre carte de vulnérabilité à l'aide d'ArcGIS,

- ✓ On doit importer nos données de référence sur les zones réellement touchées par les incendies dans ArcGIS.
- ✓ Superposez les données de référence avec la carte de vulnérabilité
- ✓ Effectuez une analyse spatiale on utilise les outils d'analyse spatiale d'ArcGIS pour comparer les zones d'incendie réelles avec les zones détectées dans notre carte de vulnérabilité. tels que "Intersection", "Identity" ou "Tabulate Intersection".

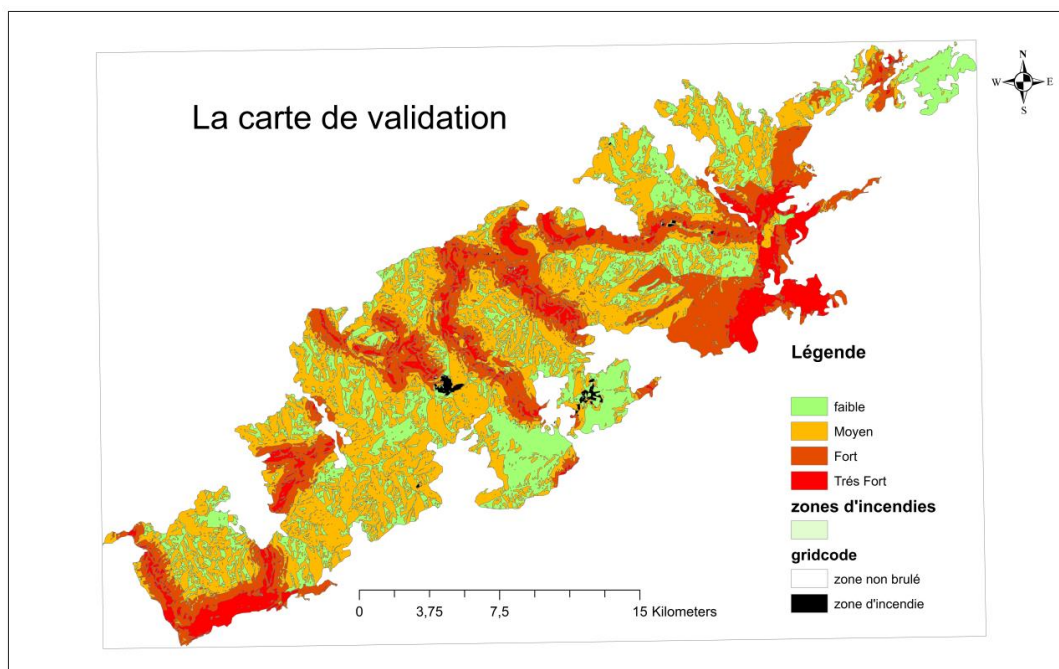


Figure 39 : Carte de validation de la vulnérabilité aux incendies historiques

Tableau 11 : Table statistique de la carte de validation

Risque	Surface brûlée (Ha) sur les zones de vulnérabilités	Pourcentage de la zone brûlée sur les zones de vulnérabilités
Faible	92.63	55.13
Moyen	52.61	33.31
Fort	12.76	7.59
Très Fort	5.99	3.56

8 Discussion des résultats

L'analyse spatiale des deux tableaux sur les statistiques de la carte de vulnérabilité et celle de la validation révèle des résultats significatifs sur la relation entre les zones de risque et de vulnérabilité, en mettant l'accent sur la surface brûlée.

En examinant les résultats, nous pouvons observer les tendances suivantes :

- Zonage des risques :

La zone à fort risque couvre la plus grande superficie, s'étendant sur 9 258,94 hectares. Elle est suivie de près par la zone à moyen risque, qui s'étend sur 17 176,22 hectares.

Les zones à faible risque et à très fort risque occupent des superficies relativement plus petites, avec respectivement 9 771,9 hectares et 4 058,1 hectares.

- Risque et pourcentage de la zone brûlée par rapport à la surface de l'incendie total :

Dans la zone de risque faible, la surface brûlée atteint 92,63 hectares, représentant 55,13% de la surface totale de l'incendie et dans la zone de risque moyen, la surface brûlée s'élève à 52,61 hectares, soit 33,31% de la surface totale de l'incendie.

Dans la zone de risque fort, la surface brûlée est de 12,76 hectares, correspondant à 7,59% de la surface totale de l'incendie et celle de risque très fort, la surface brûlée couvre 5,99 hectares, équivalant à 3,56% de la surface totale de l'incendie.

Ces résultats mettent en évidence la relation entre la surface brûlée et la surface totale de l'incendie, en fonction des niveaux de risque. Bien que les zones de risque faible et moyen aient des surfaces brûlées plus importantes en termes absolus, leur pourcentage par rapport à la surface totale de l'incendie est relativement faible. Les zones de risque fort et très fort présentent des pourcentages encore plus bas, indiquant leur moindre contribution à l'incendie global.

Donc ils mettent en évidence l'importance de prendre en compte à la fois la surface brûlée absolue et le pourcentage par rapport à la surface totale de l'incendie lors de l'évaluation de l'impact des incendies dans différentes zones de risque. Cela permet de mieux comprendre les différences dans la vulnérabilité et la résilience des différentes zones face aux incendies et d'orienter les efforts de gestion et de prévention en conséquence.

8.1 Conclusion :

En conclusion, la validation de la carte de vulnérabilité des feux de forêt représente une étape importante dans le processus d'évaluation et de gestion des risques. L'utilisation de l'indice de ratio de brûlure normalisé différentiel (dNBR) et de l'analyse multi-critère basée sur l'AHP a permis d'identifier les zones à haut risque et de les cartographier.

La comparaison des zones brûlées réelles avec les zones identifiées comme à haut risque sur la carte de vulnérabilité a permis de juger l'efficacité et la fiabilité de cette dernière

Conclusion générale

9 Conclusion Générale :

Ce mémoire de fin d'étude a exploré l'évaluation de la vulnérabilité des forêts au feu dans la région du massif Haffir-Zarrifet, en Algérie. En utilisant des méthodes basées sur la géomatique et l'analyse multicritère, l'étude a permis de cartographier la vulnérabilité au risque d'incendie de cette zone forestière spécifique.

La recherche a débuté par une revue de la littérature existante sur l'évaluation de la vulnérabilité des forêts au feu, ce qui a permis de situer le travail dans le contexte scientifique actuel. Ensuite, la zone d'étude, le massif Haffir-Zarrifet, a été présentée, en mettant en évidence ses caractéristiques géographiques, hydrologiques, climatiques et écologiques essentielles.

La méthodologie utilisée pour évaluer la vulnérabilité des feux de forêt dans la zone d'étude a été basée sur l'analyse multicritère, en se concentrant spécifiquement sur la méthode de l'Analytic Hierarchy Process (AHP). Cette approche a permis d'intégrer différents critères, tels que la topographie, la densité de végétation, la proximité des routes et la densité de population, dans l'évaluation de la vulnérabilité. La combinaison de ces critères a fourni une évaluation globale de la vulnérabilité des forêts au feu dans la région étudiée.

Pour valider les résultats obtenus, l'indice de ratio de brûlure normalisé différentiel (dNBR) a été utilisé. Cet indice est un outil couramment utilisé pour évaluer l'ampleur des dommages causés par les incendies de forêt. En comparant les résultats obtenus par le modèle avec les données dNBR, il a été possible de vérifier l'efficacité de la méthode proposée.

En conclusion, ce mémoire de fin d'étude a permis la compréhension de la vulnérabilité des forêts au feu dans la région du massif Haffir-Zarrifet en Algérie. En utilisant des techniques géomatiques et l'analyse multicritère, le travail a permis de cartographier la vulnérabilité au risque d'incendie, ce qui peut aider les décideurs et les gestionnaires de l'environnement à prendre des mesures préventives et à élaborer des plans de gestion appropriés.

En perspective, il convient de souligner que bien que cette étude ait fourni une évaluation de la vulnérabilité des forêts au feu dans la région du massif Haffir-Zarrifet en Algérie, les résultats obtenus ne peuvent être considérés comme étant à 100 % fiables. Les modèles et les méthodes utilisés reposent sur des données et des hypothèses spécifiques, qui peuvent comporter des limites et des incertitudes.

Si j'avais disposé de plus de temps et de données supplémentaires, j'aurais pu intégrer d'autres facteurs de risque, tels que les conditions climatiques, dans l'application. Les conditions météorologiques, notamment la sécheresse, la température et les précipitations, jouent un rôle important dans le déclenchement et la propagation des incendies de forêt. En les incluant dans l'analyse, il aurait été possible d'améliorer davantage la précision et la fiabilité de l'évaluation.

Articles de recherche :

Adab, H., Kanniah, K.D. and Solaimani, K. (2013) "Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques," *Natural Hazards*, 65(3), pp. 1723–1743. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>.

Alexandrian D., Esnault F., Calabri G., 1998. Feux de forêt dans la région méditerranéenne. Réunion de la FAO sur les politiques publiques concernant les feux de forêt, Rome, Italie, 28-30 octobre 1998.

Belhadj-Aissa, M., Belhadj-Aissa, A., & Smara, Y. (2006). Application du SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts en Algérie. *Bulletin des Sciences Géographiques*, N° 17, Avril.

Boultif, M. and Benmessaoud, H. (2017) "Using climate-soil-socioeconomic parameters for a drought vulnerability assessment in a semi-arid region: Application at the region of El Hodna, (M'sila, Algeria)," *Geographica Pannonica*, 21(3), pp. 142–150. Available at: <https://doi.org/10.5937/geopan1703142b>.

Benguerai, A., Benabdeli, K., & Harizia, A. (2019). Forest Fire Risk Assessment Model Using Remote Sensing and GIS Techniques in Northwest Algeria. *Acta Silv. Lign. Hung.*, Vol. 15, Nr. 1, 9–21. DOI: 10.2478/aslh-2019-0001.

Darlea, L. (2010) Un Système de Classification Supervisée à Base de Règles Implicatives. Available at: <https://hal.science/tel-01222735>.

Letreuch-Belarouci, A., Boumediene, M., Letreuch-Belarouci, N., & Aumasson, P. (Année). Stratégie de développement et conservation des suberaies des monts de Tlemcen (Algérie). HAL Id: hal-03449629. Récupéré de <https://hal.science/hal-03449629> .

Missoumi, A., Mederbal, K., & Benabdeli, K. (2002). Apport des Systèmes d'information géographiques dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts. Exemple de la forêt domaniale de Kounteidat, Algérie. *Forêt Méditerranéenne*, XXIII(1), 11-22. HAL Id: hal-03558691.

Taibi, B. E., Dridi, H., & Bouhata, R. (2020). Cartographie de la susceptibilité des incendies de forêt à l'aide de données de télédétection, des analyses SIG et AHP (étude de cas de Souhan, Algérie). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 28(4), 885-894. ISSN 2028-9324. URL: <http://www.ijias.issr-journals.org/> .

Rahmani, S., & Benmassoud, H. (Year). Modelling of Forest Fire Risk Spatial Distribution in the Region of Aures, Algeria. *Geoadria*, Volume(Issue), pages. DOI: 10.15291/geoadria.2846.

Singh, C. P. (2012). Role of Geomatics in Forest Fire Monitoring and Danger Assessment: A Review. Indian Space Research Organization. Article publié en février 2012. Disponible sur ResearchGate : <https://www.researchgate.net/publication/274896459> .

Mémoires et thèses :

Aggoun, F., & Amghar, K. (2019). Contribution à l'étude des retours d'expérience sur les feux de forêt : synthèse bibliographique. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Département des Sciences Agronomiques.

Bouhabila, A. (2019). La forêt algérienne face au changement global : quelle place pour l'agroforesterie ? Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master de spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement. Année académique 2018-2019. Sous la direction de Serge Schmitz.

Dehane, B., Bouhraoua, R., & Belhoucine, L. (2018). Etat des lieux post-incendie de deux subéraies (Zarieffet et Hafir) du nord-ouest Algérien. Département des Sciences de l'Agronomie et des Forêts, Faculté SNVTU, Laboratoire Gestion Conservatoire de l'Eau, Sol et Forêts (LGCSF), Rocade1, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie.

LES livres :

LES SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE LANDSAT livre -. Available at:

https://www.google.com/search?q=LES+SATELLITES+D%E2%80%99OBSERVATION+DE+LA+TERRE+LANDSAT+livre&rlz=1C1CHBD_enDZ785DZ785&oq=LES+SATELLITES+D%E2%80%99OBSERVATION+DE+LA+TERRE+LANDSAT+livre&aqs=chrome..69i57j0i546l3.3347j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8.