

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté Des Sciences De La Nature Et De La Vie Et Sciences De La Terre Et De L'univers



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

DEPARTEMENT D'ECOLOGIE ET GENEI DE L'ENVIRENEMENT

**Thème : Evaluation des feux de forêt dans le nord-est
algérien au cours des quartes dernière décennie.**

Présenté par : GUERROUI Amine

Membre de jury

Président (e) : Mr. ATTOUSSI Sadek

Prof

Université de Guelma

Examineur : Mr. ROUIBI Alhakim

MCA

Université de Guelma

Encadrent : Mr. ZEBSA Rabah

MCA

Université de Guelma

Année universitaire 2024 /2025

Dédicaces

Avec l'aide de dieu tout puissant, on a pu achever ce modeste travail que je dédie,
mes très chers parents Mohamed, Fahima pour tous les efforts qu'ils ont entrepris et
leurs encouragements au fil de mes années d'études. Je leur dédie ce travail

Comme symbole de m'affection et de ma reconnaissance pour les sacrifices consentis.
Que Dieu les protège et leur accorde une longue vie pleine de bonheur et de santé.

Mes frères : Zaki, Jalil ,Ramy

Une spécial dédicace à :

A mes amis et tous qui m'aiment.

Remerciements

C'est avec une profonde reconnaissance et une sincère émotion que je tiens à adresser mes plus chaleureux remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration et à la réussite de ce mémoire.

Je suis également reconnaissante envers les membres du jury **ROUIBI A Hakim** et **ATOUSSE Sadek** pour leur temps, leur analyse minutieuse et leurs remarques constructives, qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma gratitude la plus profonde à mon directeur de mémoire, **Dr ZEBBA Rabah** pour sa bienveillance, sa rigueur scientifique, ses orientations éclairées et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Son expertise et son implication ont été pour moi une véritable source d'inspiration et de motivation.

Mes remerciements les plus respectueux vont également à Mme **CHORFI Amira** assistante de recherche, dont les conseils pertinents, l'accompagnement méthodique et la disponibilité ont grandement enrichi cette étude et facilité son avancement.

À travers ces lignes, je souhaite exprimer tout mon respect et ma reconnaissance à l'ensemble du corps enseignant et administratif de département de l'écologie et de l'environnement, qui ont su créer un cadre propice à l'apprentissage, à la réflexion et au dépassement de soi.

Enfin, je n'oublie pas ma famille et mes proches, véritables piliers dans cette aventure académique, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible.

À chacun d'entre vous, merci du fond du cœur.

Résumés

Cette étude se concentre sur le patron spatio-temporel des feux de forêts dans onze wilayas du nord-est de l'Algérie, sur une période allant de 1984 à 2024. L'objectif principal de ce travail est de fournir des informations approfondies sur la dynamique des incendies de forêt et d'identifier les facteurs déterminants de ce phénomène dans la région. Pour ce faire, différentes approches méthodologiques ont été mobilisées, notamment l'utilisation de l'apprentissage automatique pour la prévision des incendies, l'exploitation d'indices dérivés d'images satellitaires, ainsi que la cartographie spatiale des événements. Les résultats obtenus mettent en évidence des changements climatiques significatifs, caractérisés par une hausse des températures, une accentuation de la sécheresse, et une diminution des précipitations. Par ailleurs, une augmentation notable du nombre et de la fréquence des incendies a été observée dans les onze wilayas étudiées, soulignant ainsi des impacts environnementaux majeurs. Le modèle de prédiction développé indique que cinq variables principales contribuent de manière significative (chacune à plus de 20 %) à la prévision des incendies : le NDVI (35 %), la pente (23 %), la vitesse du vent (23 %), la radiation solaire (22 %) et la couverture forestière (22,51 %). L'accroissement du risque d'incendie de forêt, combiné aux variations climatiques et aux pressions socio-économiques, constitue un enjeu écologique de premier plan. Bien que les forêts fassent preuve d'une certaine résilience, il est impératif de mener des recherches ciblées et de recourir à des technologies avancées, telles que l'apprentissage automatique, afin d'améliorer la prévision des feux. Cette démarche contribuera à renforcer la gestion durable des forêts et à préserver les écosystèmes.

Mots clés : SIG ; NDVI ; Incendies de forêt ; Changement climatique ; Impact écologique ; Gestion des forêts.

Abstract

This study focuses on the spatiotemporal patterns of forest fires in eleven wilayas of northeastern Algeria over the period from 1984 to 2024. The main objective of this work is to provide in-depth insights into the dynamics of forest fires and to identify the key driving factors of this phenomenon in the region. To achieve this, various methodological approaches were used, including the use of machine learning for fire prediction, the exploitation of indices derived from satellite imagery, and spatial mapping of fire events. The findings reveal significant climatic changes, characterized by rising temperatures, increased drought conditions, and a decline in precipitation. In addition, a notable increase in both the number and frequency of fire events was observed across the eleven wilayas, highlighting severe environmental impacts. The developed prediction model indicates that five main variables each contribute more than 20% to fire occurrence prediction: NDVI (35%), slope (23%), wind speed (23%), solar radiation (22%), and forest cover (22.51%). The growing risk of forest fires, combined with climatic variability and socio-economic pressures, represents a major ecological challenge. Although forests demonstrate a degree of resilience, it is essential to conduct targeted research and apply advanced technologies, such as machine learning, to enhance fire prediction. This approach will contribute to sustainable forest management and help safeguard ecosystems.

Key words: GIS; NDVI; Forest fires; Climate change; Ecological impact; Forest management

ملخص

تركز هذه الدراسة على النمط المكاني والزمني لحرائق الغابات في إحدى عشرة ولاية بشمل شرق الجزائر، خلال الفترة من عام 1984 إلى عام 2024. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو توفير معلومات متعمقة حول ديناميكيات حرائق ولتحقيق ذلك تم حشد مناهج منهجية مختلفة، بما في ذلك. الغابات وتحديد العوامل المحددة لهذه الظاهرة في المنطقة استخدام التعلم الآلي للتنبؤ بلحرائق، واستغلال المؤشرات المستمدة من صور الأقمار الصناعية، بالإضافة إلى رسم وتسلط النتائج التي تم الحصول عليها الضوء على التغيرات المناخية الكبيرة، والتي تتميز. الخواطر المكانية للأحداث بالإضافة إلى ذلك لوحظت زيادة ملحوظة في عدد. بارتفاع درجات الحرارة وزيادة الجفاف وانخفاض هطول الأمطار يشير نموذج التنبؤ. وتواتر الحرائق في الولايات الإحدى عشرة المدروسة، مما يسلط الضوء على الأثر البيئية الرئيسية المتطور إلى أن خمسة متغيرات رئيسية تساهم بشكل كبير (كل منها بأكثر من 20٪) في التنبؤ بلحرائق: مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (35٪)، والانحدار (23٪)، وسرعة الرياح (23٪)، والإشعاع الشمسي (22٪)، والغطاء الحرجي

يُشكل تزايد خطر حرائق الغابات، إلى جانب التقلبات المناخية والضغط الاجتماعي والاقتصادي، تحديًا بيئيًا. (22.51٪)

ورغم أن الغابات تتمتع بقدرة معينة على الصمود، إلا أن البحوث الموجهة واستخدام التقنيات المتقدمة، مثل التعلم. كبيراً

وسيسهم هذا النهج في تعزيز الإدارة المستدامة للغابات والحفاظ على. الآلي، أمران ضروريان لتحسين التنبؤ بلحرائق النظم البيئية

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية؛ مؤشر الاختلاف في الغطاء النباتي؛ حرائق الغابات؛ تغير المناخ؛ التأثير

البيئي؛ إدارة الغابات.

Sommaire

<i>Dédicaces.....</i>	<i>2</i>
<i>Remerciements.....</i>	<i>3</i>
<i>Résumés.....</i>	<i>4</i>
<i>Abstract.....</i>	<i>5</i>
<i>ملخص</i>	<i>6</i>
<i>Références.....</i>	<i>7</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>8</i>
<i>Listes des tableaux</i>	<i>9</i>
<i>Listes des symboles et abréviations.....</i>	<i>10</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>11</i>
<i>Chapitre 1.....</i>	<i>16</i>
<i>Matériels et Méthodes.....</i>	<i>16</i>
<i>Chapitre 2 : Résultats.....</i>	<i>29</i>
<i>Chapitre 3 : Discussion générale</i>	<i>46</i>
<i>Conclusion et perspectives</i>	<i>49</i>
<i>Bibliographies</i>	<i>52</i>

Liste des figures

Figure 1 Carte géographique de la région d'étude	17
Figure 2 Modèle temporel de la température maximale annuelle (Tmax) (a) et des précipitations (b) dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes indiquent les erreurs standards	33
Figure 3 Évolution temporelle de l'indice PDSI annuel dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes indiquent les erreurs standards.....	33
Figure 4 Surfaces des zones brûlées basées sur l'indice Nbr dans chaque province durant la période d'étude	35
Figure 5 Surface brûlée par classe d'indice Nbr dans chaque province durant la période d'étude.	37
Figure 6 Changement temporel de l'indice NBR annuel dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes correspondent aux erreurs standards.....	39
Figure 7 Courbe ROC du modèle CART.	40
Figure 8 Courbe ROC du modèle Random Forest.	41
Figure 9 Carte montrant la moyenne de l'NDVI et l'occupation du sol dans la région durant la période d'étude	41
Figure 10 Carte montrant la vitesse moyenne du vent, l'humidité, la température, les précipitations et la radiation dans la région durant la période d'étude.....	42
Figure 11. Carte montrant le facteur topographique : TWI moyen, aspect et pente dans la région durant la période d'étude.....	43
Figure 12. Carte montrant la distance moyenne aux centres de population et la distance aux rivières dans la région durant la période d'étude.....	43
Figure 13 Carte prédite de la vulnérabilité de la zone brûlée basée sur toutes les variables avec le modèle Random Forest (RF) dans la région d'étude.....	45

Listes des tableaux

Tableau 1 Synthèse des variables utilisés selon les sources, résolutions spatiales et justifications scientifiques	27
Tableau 2 Résumé du modèle linéaire général pour évaluer la variabilité climatique dans 11 wilayas de 1984 à 2024. La province d'Annaba est utilisée comme niveau de référence pour le calcul des contrastes.....	31
Tableau 3 Superficie totale (Km ²) affectée par les incendies dans chaque wilaya d'étude, classée selon l'indice NBR, de 1984 à 2024.....	36
Tableau 4 . Résumé du modèle linéaire général pour déterminer le modèle temporel de l'indice NBR à travers les 11 wilayas	38
Tableau 5 Performance et optimisation des deux modèles appliqués.....	39
Tableau 6 Importance des variables dans le model RF.....	44

Listes des symboles et abréviations

*** indique une probabilité significative

*** $p < 0.001$.

** $p < 0.01$.

* $p \leq 0.05$.

CART: Classification and Regression Tree

IQR : interquartile range

NBR: Standardized Burn Rate

NDVI: Normalized Differential Vegetative Index

PDSI: Palmer Drought Severity Index

RF : Radiofrequency

ROC: Receiver Operating Characteristic Curve

TMAX : annual maximum temperature

Introduction générale

Introduction générale

Le changement climatique est un phénomène mondial en progression, caractérisé par des variations significatives de la température et des conditions météorologiques (Merlo, 2024). Ce phénomène est principalement attribuable à une augmentation des gaz à effet de serre (GES), elle-même principalement causée par des activités humaines telles que la combustion de combustibles fossiles, la déforestation et l'agriculture intensive (CHADLI et Lasserre, 2022). Ses dernières années et avec le réchauffement climatique, les étés deviennent plus chauds et secs, ce qui augmente la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur et des sécheresses, ainsi que la propension aux incendies de forêt, menaçant la faune, la flore et la vie humaine (Bouramdane, 2022). Bien que la foudre soit la principale cause d'incendies dans certaines zones, comme les forêts boréales, mais l'influence humaine est déterminante dans la fréquence et la localisation des incendies, notamment dans les régions méditerranéennes, en Californie et en Australie, où la plupart des incendies sont d'origine anthropique (Bouisset, 2021).

Des travaux montrent que dans les zones à risque d'incendie, la présence humaine est fortement corrélée aux incendies, que ce soit par des actions volontaires (défrichements, actes de vengeance) ou involontaires (imprécations, accidents) (Messaoudi, 2022). Selon (Kim *et al.*, 2019), La plupart des incendies de forêt en Corée du Sud sont causés par des activités humaines, ce qui rend les facteurs socio-économiques essentiels pour évaluer leur probabilité. Dans une analyse de cause à effet des incendies forestières, les facteurs anthropiques, tels que la proximité des bâtiments et des routes, influencent la propagation des incendies (Chou, Minnich, et Chase, 1993). Un indice d'incendie a été développé, prenant en compte la densité des routes et de la population, et montre que les routes forestières augmentent les incendies d'origine humaine. Plus l'activité humaine est élevée, plus le risque d'incendie de forêt croît, surtout dans les zones densément peuplées et routières, à 5 km et 10 km (Kolanek *et al.*, 2021).

Les incendies de forêt constituent un risque naturel majeur à l'échelle mondiale. Malgré des efforts significatifs de prévention et d'extinction, leur fréquence reste élevée, affectant les infrastructures et les habitations, et touchant de nombreuses populations (Nichane et Rabti, 2024) Au cours des dernières décennies, l'Europe a été

Introduction générale

Confrontée à une augmentation significative du nombre d'incendies et de l'étendue des zones incendiées. Cette tendance a été attribuée à l'altération des combustibles par l'homme et au changement climatique (Gonçalves *et al.*, 2024). Les dernières données des incendies de forêt montrent que l'activité des incendies a augmenté ces dernières années, avec des incendies de forêt record. Les années 2020, 2021 et 2023 figurent parmi les pires années à l'échelle mondiale [1]. En juillet 2023, le système européen d'information sur les feux de forêt (EFFIS) a signalé que plus de 234 516 hectares de terres au sein de l'Union européenne avaient été affectés par des incendies durant cette même année [2]. De plus, les conditions les plus chaudes et les plus sèches du Canada ont alimenté des incendies extrêmes qui ont duré cinq mois entraînant la destruction de 4,5 millions d'hectares seulement en 2023 (Bélisle *et al.*, 2024). En outre, au cours des 23 dernières années la Russie a connu une perte de 5,4 millions d'hectares de couvert arboré liée aux incendies [3].

Chaque été, l'Algérie fait face à des incendies de forêt de plus en plus intenses, exacerbés par le changement climatique, la sécheresse et les vagues de chaleur (Khelali *et al.*, 2025). Entre le 17 et le 21 août 2022, Des incendies dans l'est du pays ont causé au moins 43 morts et 200 blessés. Depuis début juin, environ 1 240 incendies ont ravagé 10 000 hectares de forêt, affectant particulièrement le parc national d'Al-Kala et à El Tarf, ces incendies ont fait 36 victimes et détruit 5 670 hectares de végétation, dont 1 164 hectares de forêt. (IFRC, 2022).Entre 1986 et 2017, la wilaya de Tizi Ouzou a subi 145 incendies majeurs, détruisant 47,942 ha, dont 24 incendies catastrophiques ayant ravagé 23,372 ha. Le mois d'août a été le plus touché, avec Azeffoun et Azazga comme dairas les plus affectées, respectivement avec 12,500 ha et 12,000 ha brûlés (Sahar, Hamel, & Meddour, 2020). Entre le 9 et le 14 août 2021, des incendies à Tizi Ouzou et Bejaïa ont ravagé environ 42,910 hectares de couverture végétale, dont 31,216 hectares à Tizi Ouzou et 11,694 hectares à Bejaïa (Boulghobra *et al.*, 2022).

Les incendies de forêt représentent une des principales perturbations naturelles des écosystèmes terrestres et constituent une catastrophe majeure pour les forêts(Zhang *et al.*, 2023). Le changement climatique figure parmi les principaux facteurs de risque des incendies de forêt. En effet, celui-ci intensifie les périodes de sécheresse et les vagues de chaleur, et accroît significativement la superficie des zones végétales arides propices aux

Introduction générale

Incendies (Fu *et al.*, 2025). Dans ce contexte, L'humidité et la vitesse du vent jouent un rôle crucial dans le déclenchement et la propagation des incendies, la vitesse du vent étant le facteur principal de leur propagation et la principale cause des incendies catastrophiques (Soualah *et al.*, 2024). L'étude de (Ferreira *et al.*, 2024), montre que Les risques d'incendies de forêt sont exacerbés dans les zones où l'activité humaine augmente. Les d'incendies sont influencés par la proximité des transports et des zones urbaines, ainsi que par l'agriculture. Les conditions environnementales, telles que la météo, le combustible et la topographie, sont également déterminantes, notamment dans les régions méditerranéennes. Un gradient géographique distingue les incendies d'origine humaine de ceux causés par la foudre (Ganteaume *et al.*, 2013).

Les variations de température et d'humidité menacent la végétation forestière en Afrique du Nord, soulignant la fragilité écologique des écosystèmes. Pour mieux comprendre les interactions entre incendies de forêt, changement climatique et vulnérabilité des communautés, il est nécessaire d'utiliser des techniques de recherche avancées, telles que la logique floue et les systèmes d'information géographique (SIG) (Soualah *et al.*, 2024). Les chercheurs utilisent la télédétection, les SIG et des outils statistiques pour analyser les incendies de forêt, en extrayant des données sur les combustibles et en calculant la vitesse de propagation (Qiao *et al.*, 2018). Les cartes de risques d'incendie sont essentielles pour la gestion des risques et la protection des ressources forestières (SİVRİKAYA et DEMİREL, 2025). Bien que les techniques de SIG et de télédétection soient cruciales, l'analyse des modèles patio- temporels est souvent négligée. Le satellite MODIS détecte les anomalies thermiques pour localiser les incendies, et de nombreux pays développent des outils similaires (Parajuli *et al.*, 2020).

Ce mémoire vise à évaluer les feux de forêt dans le nord-est de l'Algérie au cours de la dernière décennie pour :

- 1- Analyser la variation des facteurs climatiques (précipitations, température maximale, indice de sécheresse PDSI) dans 11 wilayas dans le nord-est algérien
- 2- Évaluation spatio-temporelle des superficies affectées par les incendies par télédétection en utilisant les images satellitaires et l'indice Nbr

Introduction générale

3- Prédiction des incendies de forêt par apprentissage automatique en utilisant des différentes variables environnementales dans les 11 wilayas Nord-est Algérien.

Chapitre 1 :

Matériels et Méthodes

1. Matériel et méthodes

1.1. Description du site d'études

Ce travail de mémoire a été réalisé dans les forêts des onze wilayas du nord-est algérien, à savoir : Annaba, Bejaïa, Constantine, El Tarf, Guelma, Jijel, Mila, Oum El Bouaghi, Souk Ahras, Sétif et Skikda.

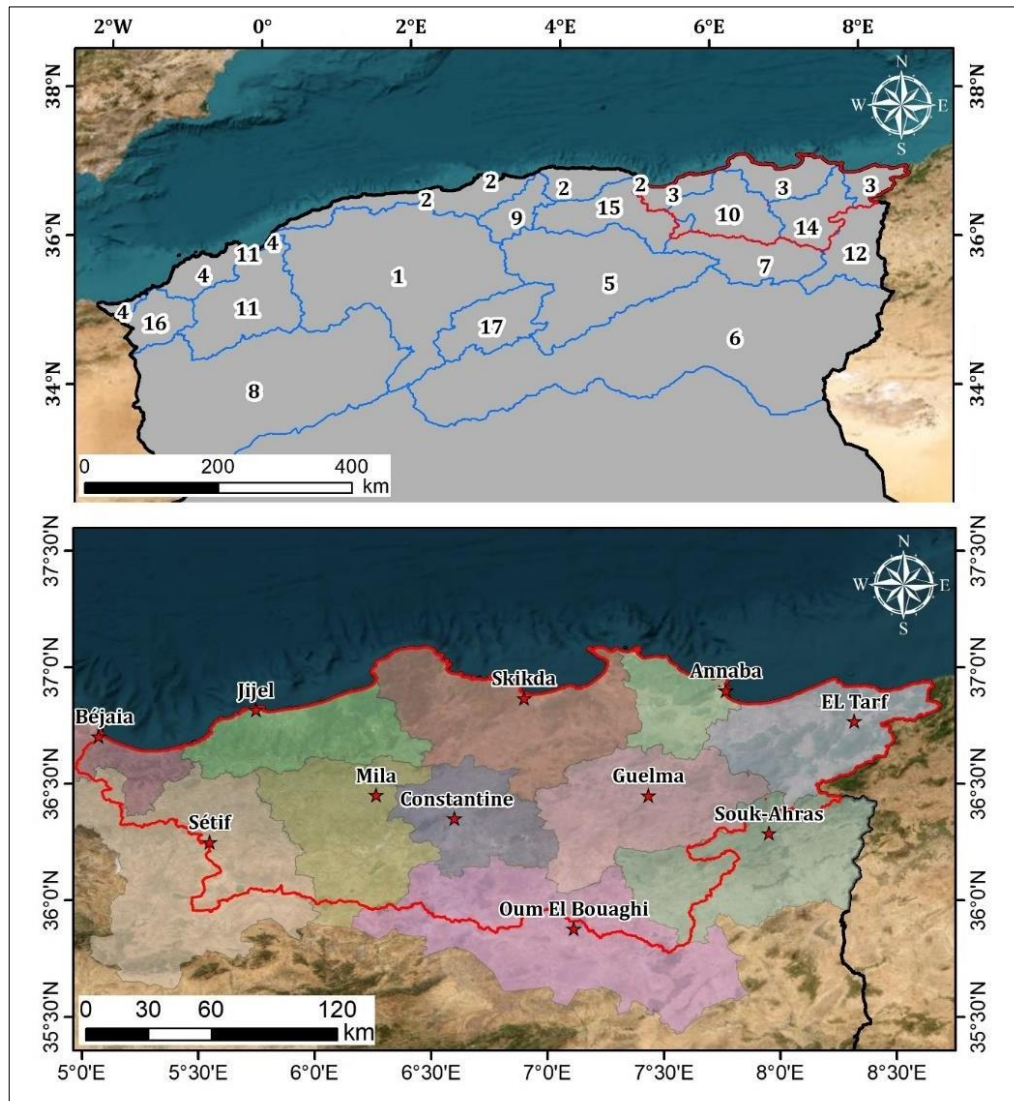


Figure 1 Carte géographique de la région d'étude

Wilaya	localisation géographique	Superficie	Climat	Relief et Hydrologie	Patrimoine forestier
Annaba	La wilaya d'Annaba, à 152 km au nord-est de Constantine et 536 km à l'est d'Alger, est une métropole littorale située à environ 100 km de la frontière tunisienne, avec une population de plus de 600 000 habitants. Elle se trouve entre 36° 54' 15" N, 7° 45' 07" E.	1400 Km ²	Annaba a un climat méditerranéen, caractérisé par des étés longs, chauds et secs, et des hivers doux et humides, avec peu de neige. Les pluies y sont fréquentes et parfois très fortes, tandis que les températures sont particulièrement élevées de mi-juillet à mi-août.	La région d'Annaba se compose de trois formes morphologiques : la plaine d'Annaba, un cordon dunaire et des reliefs montagneux, incluant les djebels Edough au nord et les massifs de Belleleita et Bouhammra au sud. Le massif de l'Edough, dôme anticlinal cristallophyllien, s'étend entre la plaine et la mer, délimité par le lac Fetzara et la mer. Sa crête atteint 1008 m au Kef Sbaa. La région montagneuse présente des versants raides et un réseau hydrographique dense, avec des oueds qui peinent à atteindre la mer en raison de la faible pente de la plaine et d'une barrière dunaire.	La superficie forestière de la wilaya d'Annaba est estimée à environ 43 900 hectares .
Bejaïa	Bejaïa est une wilaya côtière d'Algérie, bordée au nord par la mer Méditerranée, au sud par Borj-Bou Arreridj et Sétif, à l'est par Jijel, et à l'ouest par Bouira et Tizi-Ouzou. En 2008, sa population était estimée à 912 577 habitants, soit 279 habitants par km ² , répartis sur 19 daïras et 52 communes.	3223,5Km ²	La région de Béjaïa a un climat sub-humide à hiver chaud, influencé par son relief et l'orientation des montagnes. La zone littorale et la vallée de la Soummam connaissent un hiver doux et pluvieux, et un été sec et chaud, tandis que les zones montagneuses partagent également un été sec et chaud.	Le relief se divise en trois ensembles : 1. Ensemble montagneux : 75% de la wilaya, incluant les chaînes des Babors et du Djurjura. 2. Ensemble des piémonts : zone ondulée de collines entre la plaine et la montagne. 3. Ensemble des plaines : comprenant la vallée de la Soummam, longue de 80 km et large de 4 km. le sous-bassin versant de Boussellam maritime, l'un des dix sous-bassins du bassin versant de la Soummam, et se distingue par un relief marqué et un réseau hydrographique dense.	Le patrimoine forestier de la Wilaya couvre 122 050 Ha , soit 37,57% de sa superficie, incluant 58 700 Ha de forêts (47,91%) et 63 800 Ha de maquis (52,08%). Les principales essences présentes sont le chêne liège, le chêne zen, le chêne Afares, le chêne vert, le cèdre et le pin d'Alep.

Constantine	La wilaya de Constantine, située dans le nord-est de l'Algérie à environ 400 km d'Alger, est reconnue pour son importance stratégique et son riche patrimoine historique et culturel. Elle est entourée par les wilayas de Skikda, Guelma, Mila et Oum El Bouaghi, et se trouve à une latitude de 36° 17' 00" nord et une longitude de 6° 37' 00".	2.244 km ²	Le climat de Constantine est sec et venteux, avec des variations saisonnières marquées en températures et précipitations. La wilaya se trouve entre la Méditerranée et le nord du Sahara, présentant deux étages bioclimatiques : subhumide au nord et semi-aride au sud.	La wilaya de Constantine se divise en trois zones géographiques : 1. Zone montagneuse : Comprend les chaînes de Djebel Chettaba (900 m) et Djebel Ouahch (785 m), séparées par l'Oued Rhumel et ses gorges. 2. Zone intérieure: Formée de bassins dépressifs avec des altitudes inférieures, s'étendant du bassin de Mila au bassin de Hamma Bouziane, entrecoupés de vallées. 3. Zone de hautes plaines : Située au sud, elle inclut des plateaux élevés. L'hydrographie est caractérisée par un réseau dense de cours d'eau, notamment Oued Boumerzoug, Oued Smendou et Oued El Rhumel, avec des affluents temporaires.	Le patrimoine forestier de la wilaya de Constantine s'étend sur environ 29 000 hectares, dominé par des espèces telles que le pin d'Alep, l'eucalyptus, le cyprès et le chêne liège. Le taux de boisement y est d'environ 8,3%. Ce patrimoine offre des opportunités d'exploitation, notamment pour la valorisation du pin pignon, la création de pépinières, l'élevage de gibier et l'aménagement de jardins d'attraction.
El Tarf	La région d'El Tarf est située entre la latitude 36°75'00" et la longitude 08°16'66" à l'extrême Nord Est algérien sur l'axe routier El Kala – Annaba à 60 km à l'ouest d'Annaba. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud et au Sud-Ouest par les wilayas de Souk-Ahras et de Guelma, à l'Ouest par la wilaya d'Annaba et à l'Est par la frontière Algéro- Tunisienne	2891 Km ²	La région a un climat méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et pluvieux, et des étés chauds et humides.	La wilaya d'El-Tarf se distingue par sa richesse hydrographique, incluant oueds, lacs et marais, notamment dans le parc national d'El-Kala, qui couvre 76 438 ha, soit 26 % de la région, et englobe neuf communes. Trois oueds principaux, Seybousse, Bounamoussa et Kebir Est, se rejoignent à l'embouchure de l'oued Mafragh. Le nord-est de la wilaya présente des reliefs modérés, avec des altitudes variant de 200 à 400 m, atteignant jusqu'à 600 m près de la frontière tunisienne, notamment autour de Djebel Addeda et Djebel Kourine. Les reliefs s'étendent du nord au sud, de Djebel Oukdeyab au poste frontalier d'El Ayoune.	La wilaya d'El Tarf possède un patrimoine forestier s'étendant sur 197.031 hectares, soit 62% de son territoire. Selon l'inventaire forestier national de 2008, les principales essences sont : chêne liège (78.457 ha), chêne zeen (6.000 ha), pin maritime (13.896 ha), eucalyptus (11.222 ha), ainsi que d'autres essences comme le peuplier et l'oléastre (4.819 ha), et le maquis (59.031 ha)

Guelma	La wilaya de Guelma, située au Nord-Est de l'Algérie à environ 60 km de la Méditerranée, est entourée par plusieurs autres wilayas : Annaba au Nord, Skikda au Nord-Ouest, El Tarf au Nord-Est, Constantine à l'Ouest, et Souk Ahras et Oum-El Bouagui au Sud-Est. 36.457741N, 7.423325E	3686,84 km²	La Wilaya présente un climat subhumide au centre et au Nord, et semi-aride au Sud, avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds. Les températures oscillent entre 4°C en hiver et 35,4°C en été, avec une moyenne de 17,3°C. La pluviométrie varie de 654 mm/an à Guelma, 627 mm/an à Ain Larbi, et 526 mm/an à Medjez Amar, allant de 400 à 500 mm/an au Sud et atteignant près de 1000 mm/an au Nord.	La région de Guelma, ancien bassin d'effondrement, a accumulé des sédiments du miocène au quaternaire. Les mouvements tectoniques du plio-quaternaire ont modifié sa morphologie, créant terrasses et cônes de déjection. Son relief complexe se caractérise par des terrasses fluviales le long de la Seybouse. Morphométriquement, c'est une plaine de faible altitude, variant de 150 m à l'Est à 300 m à l'Ouest, avec un réseau hydrographique dense dominé par l'oued Seybouse et ses principaux affluents.	La région de Guelma abrite une diversité d'écosystèmes forestiers, couvrant plus d'un tiers de la wilaya, soit 116 864,95 ha, avec un taux de couverture de 31,70%. Cette superficie se divise en trois catégories : les maquis (70 384,4 ha, 60%), les forêts (32 588,55 ha, 28%) et les terrains nus (13 982 ha, 12%). Les principales forêts de la wilaya incluent celles de Béni Salah, de la Mahouna, de Houara et la forêt dense de Beni Medjaled à Bouhamdane .
Jijel	La wilaya de Jijel, située au nord-est de l'Algérie, a été créée en 1974. Elle est bordée au nord par la mer Méditerranée, au sud-ouest par Sétif, au sud par Mila, au sud-est par Constantine, à l'est par Skikda et à l'ouest par Bejaia. La zone d'étude s'étend entre la 5° 25 et 6° 30 E .36° 10 et 36° 50 N. comprend 11 daïras et 28 communes.	2 396 km²	climat tempéré chaud, avec des précipitations plus importantes en hiver qu'en été. La température moyenne annuelle est de 18,2 °C et les précipitations moyennes atteignent 814 mm, avec une différence de 136 mm entre le mois le plus sec et le plus humide. La température annuelle varie de 14,7 °C.	La région présente un relief montagneux avec une altitude moyenne de 600 à 1000 m, divisé en deux zones : les plaines côtières au nord, incluant les petites plaines de Jijel et plusieurs vallées, et les montagnes, qui occupent 82 % du territoire. Ces montagnes se classifient en zones de moyennes montagnes, riches en végétation et en ressources en eau, et en zones de montagnes difficiles au sud, où se trouvent les sommets les plus élevés. La région bénéficie d'une pluviométrie importante, avec des ressources en eau superficielles estimées à 1,2 milliard de mètres cubes par an, principalement issues des ruissellements.	Les formations forestières couvrent 137 457 Ha , avec un taux de boisement de 57 %. Les forêts, incluant les reboisements, s'étendent sur 99 123 Ha (72 %), présentant une diversité d'essences et une bonne croissance. Les maquis clairs occupent 21 102 Ha (15 %), et les maquis arborés, 17 232 Ha (13 %), dont 8 548 Ha sont denses.

Mila	La wilaya de Mila, à 400 km à l'est d'Alger, est entourée au nord par Jijel et Skikda, à l'est par Constantine, à l'ouest par Sétif, et au sud par Batna et Oum El Bouaghi. Ses coordonnées géographiques sont 36° 26' 59" N et 6° 15' 51" E (Douaa & LARABA, 2021).	3407,60 km2	Le climat de la wilaya de Mila est méditerranéen, avec des hivers doux et pluvieux et des étés longs, chauds et secs, s'étendant de mai à octobre. La forêt de Tamentout présente un climat méditerranéen humide à subhumide, influencé par l'altitude, favorisant une pédogenèse active et la formation de divers types de sols.	La wilaya de Mila se distingue par un relief varié, comprenant trois zones principales : au nord, les montagnes et collines du Nord Constantinois, au sud, les plaines fertiles de Milev, et à l'extrême sud, des hauts plateaux. Elle abrite le barrage de Beni Haroun, le plus grand d'Algérie, qui fournit de l'eau potable et d'irrigation à l'est du pays, ainsi que le barrage d'Oued Athmania. Les principaux cours d'eau de la région sont le Rhummel et l'Oued-El-Kebir.	Les forêts de la wilaya de Mila couvrent 33 870 ha, dominées par le pin d'Alep (48,57%), présent dans les forêts de Ferdjioua, Ain-Beida, Bouhatem, Mila, Chelghoum-Laid et Tadjanet. Le chêne liège représente 16,73% de la superficie, localisé dans les forêts de Grarem, Sidi Meroune, Tassadane et Tarai Beinen. D'autres essences, comme le chêne zeen, le pin pignon, le frêne et l'eucalyptus, occupent des superficies plus réduites (1,29%, 1,77%, 0,59% et 0,29% respectivement).
------	---	-------------------------------	--	--	--

Oum El Bouaghi	La wilaya d'Oum El Bouaghi, créée en 1974 et redécoupée en 1984, se situe dans le bassin des hautes plaines constantinoises, au centre du Nord-Est algérien. Elle est entourée par sept autres wilayas : Guelma, Constantine, Souk Ahras, Mila, Batna, Khenchla et Tébessa. situer entre <u>35° 53' nord, 7° 07' est</u>	7638,13 km²	La wilaya d'Oum El Bouaghi, située entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, subit l'influence de son climat montagnard. Les vents violents et les hivers rigoureux résultent de la barrière montagneuse qui bloque les influences méditerranéennes et sahariennes. En été, des hautes pressions tropicales entraînent des coups de Sirocco. La pluviométrie y est irrégulière, avec des précipitations majoritairement issues des perturbations du nord-ouest.	La wilaya est située entre le Tell et les Aurès, avec des versants méridionaux appelés Sraouate au nord. Elle présente une haute plaine à 750-900 mètres d'altitude, entourée de massifs montagneux, dont le point culminant est le Djebel Guerioun (1 729 m). D'autres sommets notables incluent le Djebel Sidi Rgheiss (1 635 m), le Djebel Tolba (1 540 m) et le Djebel Fortas (1 477 m). À l'est, se trouvent le Djebel Serdies (1 455 m) et le Amama (1 337 m). Le réseau hydrographique est dominé par des oueds endoréiques menant à des lacs salés, à l'exception de l'oued Settara qui se jette dans l'oued Cherf, puis l'oued Seybouse, ainsi que d'autres oueds comme Bumerzoug, Sigus et Meskiana.	Les forêts couvrent 82 766 hectares, représentant 13,23% de la superficie totale. Les principales forêts naturelles de la wilaya, situées au nord et au sud, incluent le pin d'Alep (66 400 hectares), le chêne vert (8 150 hectares) et les cyprès (1 200 hectares).
----------------	---	---------------------------	---	---	--

Souk Ahras	La région de Souk-Ahras, située dans le nord-est de l'Algérie (36°17'11"N, 7°57'4"E), est bordée au nord-est par la wilaya d'El Taraf, au nord-ouest par celle de Guelma, au sud par Tessa, au sud-ouest par Oum El Bouaghi, et à l'est par la Tunisie. Elle est divisée en 26 communes (Chorfi et al., 2022).	4,359.65 km²	La wilaya, située dans l'Atlas Tellien, connaît un climat méditerranéen au nord et désertique au sud, avec des étés chauds (25 à 35°C) et des hivers froids (1 à 15°C). La température moyenne annuelle à Souk Ahras est de 14,5 °C, avec des précipitations annuelles de 735 mm, surtout en hiver, essentielles pour les systèmes hydrologiques continentaux, avec une variabilité significative.	La wilaya de Souk-Ahras se divise en deux zones : le Nord montagneux, partie de l'Atlas Tellien, et le Sud de hautes plaines. Elle comprend trois régions : le Nord-est, montagneux et forestier ; le Sud-ouest, avec des plaines agricoles et des pâturages ; et le Sud, caractérisé par des étendues plates et un sol dégradé sous un climat aride. Trois oueds principaux traversent la région : Oued Mllegue, Oued Medjerda et Oued Echaref, avec des débits moyens respectifs de 210, 400 et 99 millions de m³/an.	Le couvert forestier de la wilaya de Souk-Ahras s'étend sur 96.463 hectares, soit 23,4 % de la région. Les principales espèces incluent le chêne liège et le chêne zeen dans le Nord, et le pin d'Alep dans les zones sèches. Au sud, un climat aride favorise la végétation steppique, notamment l'alfa sur 9.200 hectares, ainsi qu'une petite forêt de cèdres à Djebel M'cid, couvrant 315 hectares.
------------	--	---------------------------------------	---	---	--

Sétif	La wilaya de Sétif, située dans l'est de l'Algérie à plus de 1000 m d'altitude, a pour chef-lieu la ville de Sétif, à 1200 m d'altitude. Elle se trouve à 300 km d'Alger et à proximité de plusieurs villes : 120 km de Constantine, 110 km de Bejaia et Jijel, et 120 km de M'sila. Sétif est entourée par six autres wilayas : Bejaia et Jijel au nord, M'sila et Batna au sud, Mila à l'est, et Bordj-Bou-Arréridj à l'ouest. située entre 36°11'28" N 5°24'49" E.	6 500 km ²	Le climat de la wilaya de Sétif est méditerranéen continental semi-aride, caractérisé par des hivers pluvieux et frais et des étés secs et chauds. Avril est le mois le plus pluvieux, tandis que juillet est le plus sec. La topographie locale limite les influences maritimes, malgré la proximité de la mer Méditerranée. Les données climatiques sont issues de la station météorologique de Sétif (Ain Sfiha)(Laadel, 2021).	La wilaya de Sétif, surnommée capitale des hauts plateaux, se divise en trois zones principales : la zone montagneuse, les hautes plaines et la frange semi-aride. Son réseau hydrographique est structuré autour des montagnes, avec la moitié nord drainant ses eaux vers le bassin méditerranéen via plusieurs oueds, tels que l'Oued Bou Sellam et l'Oued Rhumel, qui alimentent des barrages et retenues. L'autre partie de la région présente une hydrographie endoréique centrée sur les Chotts.	La wilaya de Sétif possède un patrimoine forestier significatif, couvrant 100 232 ha, soit 15,30% de sa superficie totale. Les principales essences sont le pin d'Alep (74%) et le chêne vert (21%), représentant ensemble 96% du couvert végétal. Les massifs forestiers se situent principalement dans la chaîne des Babors au nord et dans celle de Hodna au sud, avec des forêts de feuillus, notamment de chêne zeen et chêne liège, bien représentées dans la forêt de Tamentout(Laadel, 2021).
-------	--	-----------------------	---	--	--

Skikda	La wilaya de Skikda, située dans le nord-est de l'Algérie, est bordée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par Annaba, au sud par Constantine et Guelma, et à l'ouest par Jijel. Elle s'étend sur 140 km de côtes, allant de la Marsa à Oued Z'hour, et est limitrophe des wilayas de Mila et Jijel. située entre 36°05' et 36°15' de N et 7°15' et 7°30' E (Fella, 2017).	4.137,68 km ²	La wilaya de Skikda présente un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Elle se divise en zones bioclimatiques humides dans les montagnes et subhumides sur la majorité du territoire, avec une pluviométrie de 1000 à 1500 mm/an. Les températures varient de 11°C en hiver à 24°C en été sur le littoral, tandis que l'intérieur enregistre 9°C en hiver et 27°C en été. L'humidité relative moyenne est de 65,5 %.	La région présente un relief varié avec trois types de pentes : 9% de pentes faibles (0 à 3%) dans la plaine de Benazzouz et une partie de Skikda, 23% de pentes moyennes (3 à 12%), et 68% de pentes fortes (12% et plus) dans les hauts piémonts. Elle se divise en trois zones topographiques : montagnes, plaines et piémonts. Le réseau hydrologique comprend plusieurs oueds, dont El Kébir, Fendekh et Maboul, ainsi que des sous-bassins à Skikda et Annaba. La nappe phréatique d'Azzaba est alimentée par des formations numidiennes et contient des eaux dans des dépôts récents.	la wilaya de Skikda possède un patrimoine forestier évalué à 198 409 ha soit un taux de boisement de l'ordre de 48%.
--------	---	--------------------------	--	---	--

Les incendies de forêt constituent une menace croissante sous l'effet du changement climatique et des activités anthropiques. Ce travail propose un cadre intégré combinant **téledétection, variables environnementales et algorithmes d'apprentissage automatique** pour prédire les zones à risque. Inspiré des travaux de Chuvieco et al. (2019), notre approche exploite la puissance de calcul de **Google Earth Engine (GEE)** pour traiter des jeux de données multi-sources à haute résolution spatiale et temporelle.

2. Collecte et Prétraitement des Données

2.1. Données d'Inventaire des Incendies

L'inventaire des incendies repose sur un croisement de plusieurs sources. Les dates et localisations des grands feux ont été extraites à partir de bases de données officielles, complétées par des rapports de terrain fournis par la Direction Générale des Forêts (DGF). Pour chaque événement recensé, des images Sentinel-2 ont été acquises avant et après l'incendie, afin d'évaluer les changements survenus.

Le traitement des données satellitaires a permis le calcul de l'indice dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio), reconnu pour mesurer la sévérité des incendies (Key & Benson, 2006). Il est basé sur la différence entre la réflectance dans le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge à ondes courtes (SWIR2), selon la formule suivante :

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2}}, \quad dNBR = NBR_{\text{pré-feu}} - NBR_{\text{post-feu}}$$

Ce différentiel permet de détecter les zones brûlées en mesurant l'intensité du changement spectral. Ces valeurs ont été utilisées pour générer des échantillons ponctuels. Un échantillonnage aléatoire stratifié a été réalisé, distinguant les points de présence de feu (1) et absence de feu (0), afin de limiter le biais spatial et d'équilibrer les classes dans les phases ultérieures d'apprentissage.

2.2. Variables Explicatives

Un total de 12 variables prédictives a été extraites et classées selon quatre grandes catégories : topographie, végétation, climat et facteurs anthropiques. Le tableau suivant synthétise les variables utilisées, leurs sources, résolutions spatiales et justifications scientifiques :

Tableau 1 Synthèse des variables utilisés selon les sources, résolutions spatiales et justifications scientifiques

Catégorie	Variables	Source	Résolution	Justification
Topographie	Pente, Aspect, TWI	SRTM (30m)	30m	Contrôle du ruissellement et de l'humidité du sol (Sorensen 2006)
Végétation	NDVI, Couvert végétal (ESA WorldCover)	Sentinel-2 (10m), ESA WorldCover	10m	Stress hydrique et inflammabilité (Bauer, 2020)
Climat	Température, radiation, humidité Précipitations	Terra Climate (4km)	4km	Sécheresse et conditions météorologiques critiques (Abatzoglou <i>et al.</i> , 2018)
Anthropique	Distance aux rivières, zones urbaines	OSM, ESA WorldCover	10m	Accès humain et barrières naturelles (Syphard <i>et al.</i> , 2017)

3. Développement des Modèles

3.1. Partitionnement des Données

- **Training (70%) / Validation (30%)** avec Random Seed (**k=5**) pour éviter le surapprentissage.
- **Équilibrage de classes** : Suréchantillonnage (Random Seed) SMOTE pour corriger le déséquilibre présence/absence.

3.2. Algorithmes Utilisés (Machine Learning models)

1. Random Forest (RF) :

Hyperparamètres : 200 arbres, profondeur maximale 10, critère Gini.

Avantage : Gère les non-linéarités et les interactions complexes (Breiman, 2001).

CART (Classification and Regression Trees):

Utilisé comme modèle de référence pour évaluer la complexité nécessaire.

4.2. Cartographie du Risque

Seuil optimal : Défini par le point de Youden (maximisation de TPR - FPR) sur la courbe ROC.

Classes de risque :

- **Faible** (0–0.3), **Modéré** (0.3–0.6), **Élevé** (0.6–0.9), **Extrême** (>0.9).

5. Analyses Statistiques :

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 4.2.2 (Team R Development Core, 2023). La normalité a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, les hypothèses d'homogénéité et les profils résiduels des données ont été vérifiés (Zuur *et al.*, 2007). Nous avons d'abord examiné les trajectoires spatiotemporelles des températures maximales, des précipitations et de l'indice PDSI pour l'ensemble de la région de recherche entre 1984 et 2024. Nous avons analysé onze provinces (Wilaya), permettant une compréhension approfondie des variations et de l'évolution de chaque variable climatique grâce à une régression linéaire générale. Ensuite, nous avons évalué la structure temporelle de l'indice Nbr afin de comprendre la tendance de l'intensité et de la vulnérabilité des zones brûlées dans les provinces à l'aide d'un modèle de régression linéaire. Pour prédire les zones vulnérables aux incendies, nous avons utilisé différentes méthodes d'apprentissage automatique (forêt aléatoire, modèle CARAT) afin de déterminer les facteurs environnementaux importants contribuant à l'intensité des feux de forêt. Le modèle et la cartographie ont été construits à l'aide de la plateforme Google Earth Engine.

Chapitre 2 : Résultats

Résultats**1. Modèles spatiotemporels des variables climatiques**

Pour évaluer les tendances climatiques, un modèle linéaire a été appliqué aux variables de température maximale (Tmax en °C), de précipitations (en mm) et à l'indice PDSI. Sur une période de plus de 40 ans, une tendance climatique positive significative a été observée pour la température maximale, avec une augmentation de 0,03 °C par an. En revanche, une tendance négative a été notée pour les précipitations, affichant une diminution de -0,28 mm par an (voir Tableau 1). Concernant les différences spatiales, les résultats indiquent que plusieurs provinces présentent des valeurs de Tmax significativement inférieures à celles de la province d'Annaba. Par exemple, Sétif enregistre la plus forte différence négative en Tmax, avec une baisse de -2,61 °C, suivie de Béjaïa (-2,10 °C), Jijel (-1,96 °C) et Mila (-1,88 °C), toutes hautement significatives. Ces valeurs de Tmax plus fraîches peuvent être attribuées à des altitudes plus élevées ou à une géographie côtière et montagneuse, ce qui contribue à des températures maximales modérées. En revanche, El Tarf et Guelma ne présentent pas de différences significatives par rapport à la province d'Annaba (voir Tableau S1). Enfin, notre modèle met en évidence un déclin temporel significatif des précipitations au fil du temps (voir Tableau 1).

Spatialement, nous avons identifié une variabilité substantielle des précipitations entre les provinces. Des provinces telles qu'Oum El Bouaghi (-30,80 mm), Souk Ahras (-20,63 mm), Guelma (-15,89 mm) et Sétif (-15,21 mm) reçoivent significativement moins de précipitations qu'Annaba. En revanche, Jijel se distingue par des précipitations significativement plus élevées (+16,75 mm), probablement en raison de sa localisation côtière et montagneuse qui favorise des précipitations plus importantes. El Tarf et Skikda ne montrent pas de différence significative par rapport à Annaba, suggérant des conditions climatiques similaires. Ces résultats soulignent à la fois un déclin préoccupant des précipitations au fil du temps et des différences spatiales prononcées.

L'indice PDSI révèle une tendance temporelle négative forte et significative (Tableau 1, Figure 2), indiquant un déclin constant des valeurs PDSI au fil du temps, ce qui signifie que les conditions de sécheresse s'intensifient d'année en année dans la région étudiée. Plus de 30 % des valeurs PDSI sont inférieures à -4, ce qui indique une classe extrême de sécheresse dans la région. Cette tendance soutient les observations généralisées d'une intensification de la sévérité de la sécheresse dans les régions

Méditerranéennes et nord-africaine. En termes de variation spatiale, la plupart des provinces ne diffèrent pas significativement d'Annaba en ce qui concerne les valeurs PDSI, à l'exception de Béjaïa, qui présente un PDSI légèrement inférieur (-0,366, $p = 0,0352$), indiquant des conditions légèrement plus sèches par rapport à la référence. Bien que d'autres provinces comme Sétif, Souk Ahras et Oum El Bouaghi montrent également des coefficients négatifs (suggérant des conditions plus sèches), ces différences ne sont pas statistiquement significatives.

Concernant l'indice VHI

Tableau 2 Résumé du modèle linéaire général pour évaluer la variabilité climatique dans 11 wilayas de 1984 à 2024. La province d'Annaba est utilisée comme niveau de référence pour le calcul des contrastes

Tmax	Estimation	SE	t value	p value
(Intercept)	-40.762952	16.974619	-2.401	0.016366 *
Année	0.031836	0.008469	3.759	0.000172 ***
Province				
Bejaia	-2.101813	0.469996	-4.472	7.91e-06 ***
Constantine	-1.481104	0.469996	-3.151	0.001634 **
El_Tarf	0.401963	0.469996	0.855	0.392452
Guelma	-0.424073	0.469996	-0.902	0.366942
Jijel	-1.964373	0.469996	-4.180	2.97e-05 ***
Mila	-1.883961	0.469996	-4.008	6.19e-05 ***
Oum_El_Bouaghi	-1.026062	0.469996	-2.183	0.029069 *
Setif	-2.609915	0.469996	-5.553	2.94e-08 ***
Skikda	-1.010676	0.469996	-2.150	0.031568 *
Souk_Ahras	-1.225923	0.469996	-2.608	0.009123 **
Précipitation				
(Intercept)	645.87979	136.01373	4.749	2.10e-06 ***
Année	-0.28746	0.06786	-4.236	2.31e-05 ***

Province				
Bejaia	-8.82595	3.76597	-2.344	0.019134 *
Constantine	-14.47594	3.76597	-3.844	0.000122 ***
El_Tarf	4.12794	3.76597	1.096	0.273077
Guelma	-15.89462	3.76597	-4.221	2.48e-05 ***
Jijel	16.74651	3.76597	4.447	8.89e-06 ***
Mila	-13.29370	3.76597	-3.530	0.000419 ***
Oum_El_Bouaghi	-30.79635	3.76597	-8.178	3.58e-16 ***
Setif	-15.21133	3.76597	-4.039	5.44e-05 ***
Skikda	3.49070	3.76597	0.927	0.354017
Souk_Ahras	-20.63129	3.76597	-5.478	4.49e-08 ***
PDSI				
(Intercept)	141.027382	6.284354	22.441	<2e-16 ***
Année	-0.070781	0.003135	-22.576	<2e-16 ***
Province				
Bejaia	-0.366473	0.174002	-2.106	0.0352 *
Constantine	-0.124595	0.174002	-0.716	0.4740
El_Tarf	-0.132852	0.174002	-0.764	0.4452
Guelma	-0.122814	0.174002	-0.706	0.4803
Jijel	-0.126221	0.174002	-0.725	0.4682
Mila	-0.205787	0.174002	-1.183	0.2370
Oum_El_Bouaghi	-0.267078	0.174002	-1.535	0.1249
Setif	-0.277162	0.174002	-1.593	0.1112
Skikda	0.034957	0.174002	0.201	0.8408
Souk_Ahras	-0.257669	0.174002	-1.481	0.1387

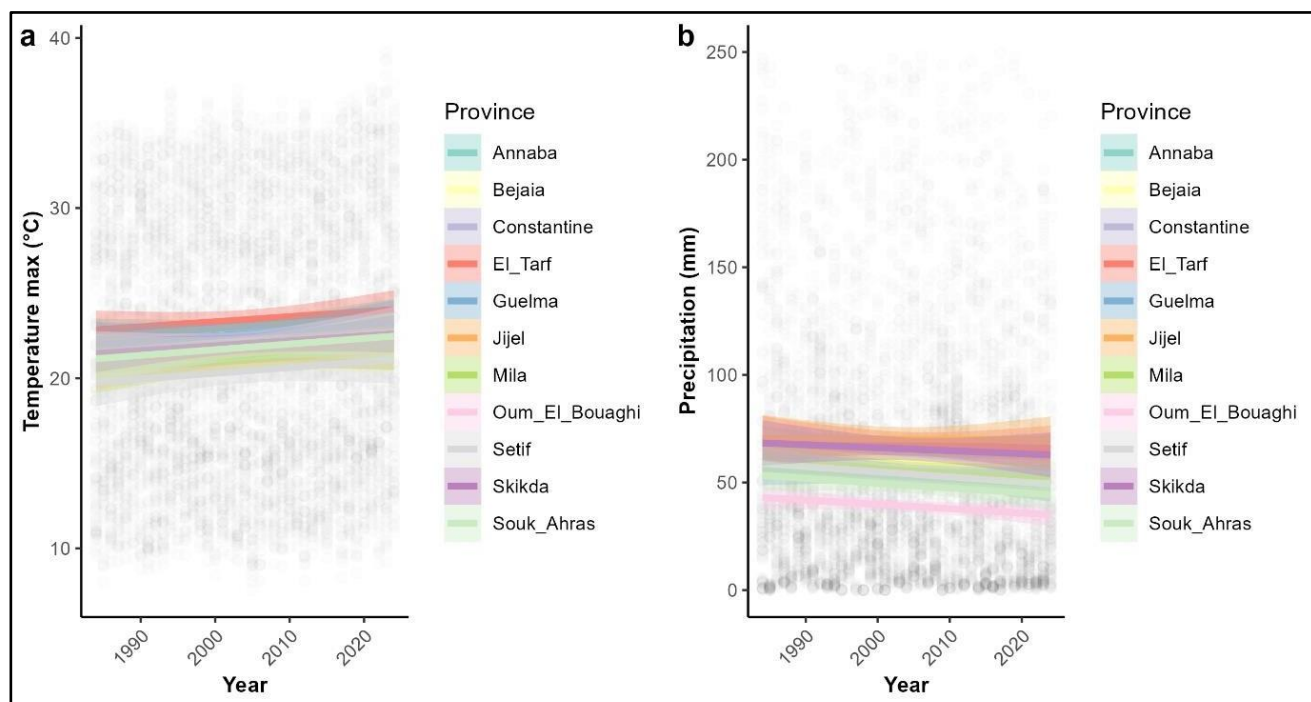


Figure 2. Modèle temporel de la température maximale annuelle (Tmax) (a) et des précipitations (b) dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes indiquent les erreurs standards

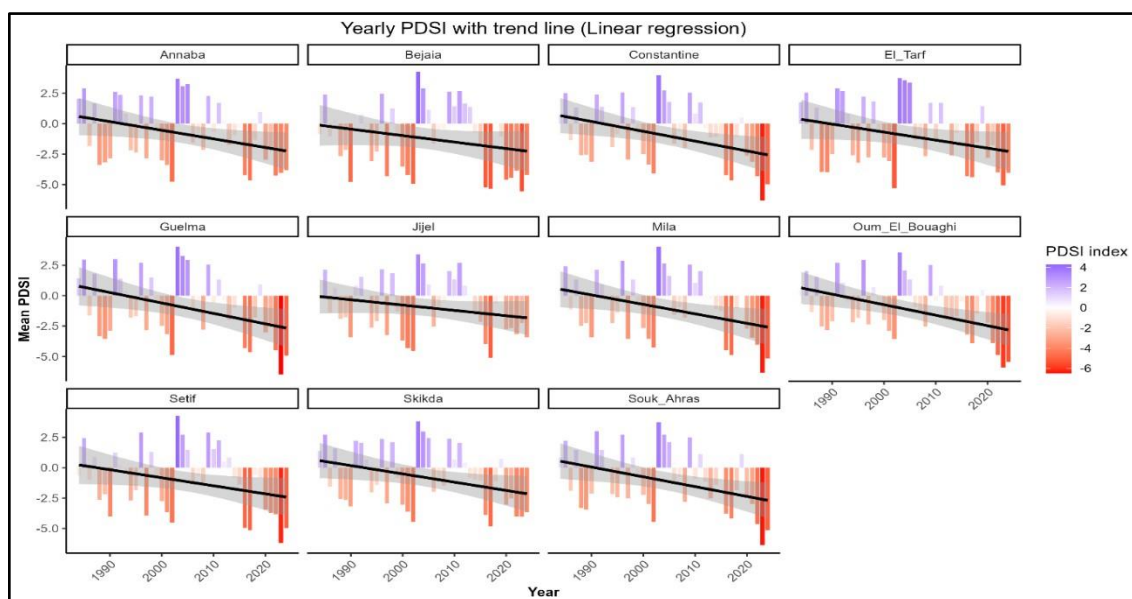


Figure 3 Évolution temporelle de l'indice PDSI annuel dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes indiquent les erreurs standards.

2. Les zones impactées par les incendies forestiers

La figure 3 illustre des différences interprovinciales claires en matière d'activité incendiaire, mesurées par le pourcentage de surface brûlée. Alors que certaines régions font face de manière constante à une exposition modérée aux incendies, d'autres connaissent une grande variabilité et des événements de brûlage extrêmes, ce qui pourrait refléter des vulnérabilités localisées ou des stress climatiques épisodiques. Par exemple, Annaba et Béjaïa présentent une large variabilité dans le pourcentage de surface brûlée, avec des médianes autour de 20 à 25 %, mais avec plusieurs cas extrêmes (jusqu'à près de 60 %) et des valeurs aberrantes, indiquant que certaines années ou zones ont connu une activité incendiaire significativement plus élevée. Oum El Bouaghi et Mila affichent une gamme similaire, avec des valeurs aberrantes notables au-dessus de 60 %, mais aussi des instances de faible brûlage. Cela suggère des événements d'incendie sporadiques mais sévères dans certaines années ou localités au sein de ces provinces. Sétif se distingue par une plage interquartile étroite (IQR), suggérant une activité incendiaire plus cohérente d'année en année, bien qu'à un niveau modéré (médiane autour de 20 %). Souk Ahras et Skikda montrent des médianes et une variabilité relativement modérée, bien que Souk Ahras ait une tendance centrale légèrement plus élevée. Certaines provinces comme Jijel, Constantine et Guelma présentent un brûlage modéré et relativement constant (les IQR et les médianes sont plus serrés), suggérant un régime d'incendie plus stable ou possiblement une meilleure gestion des incendies. El Tarf montre un profil de brûlage équilibré sans extrêmes, avec la plupart des points de données dans la plage centrale de 50 %.

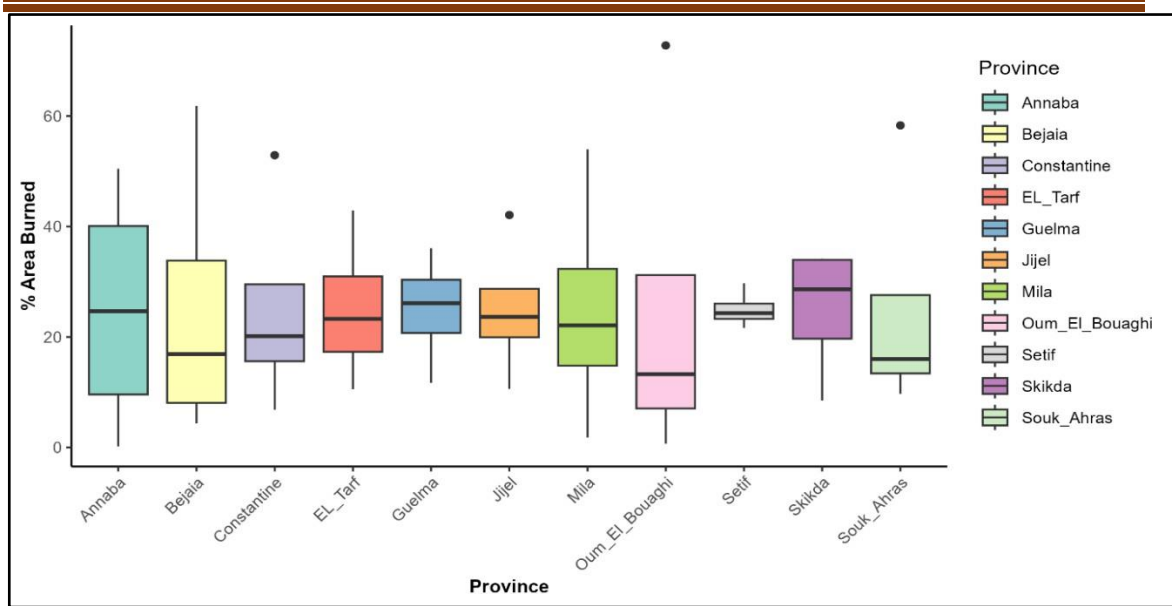


Figure 4 Surfaces des zones brûlées basées sur l'indice Nbr dans chaque province durant la période d'étude.

Nos résultats ont montré une variation spatiale claire tant en ce qui concerne la superficie totale brûlée que la distribution à travers les classes de sévérité (Tableau 3, Figure 4). Des provinces comme Guelma, Skikda et El Tarf affichent des valeurs constamment élevées à tous les niveaux de sévérité, indiquant que ces zones sont régulièrement et gravement touchées par des incendies de forêt. Par exemple, Guelma présente la plus grande superficie totale brûlée dans les catégories Faible et Modérée (1322,84 et 1043 km² respectivement), et maintient des superficies brûlées substantielles dans les classes « Élevée » et « Extrême », soulignant une exposition large et récurrente à l'activité des incendies de forêt.

En revanche, d'autres provinces montrent des schémas de sévérité des incendies asymétriques. Mila à la plus grande superficie brûlée à faible sévérité (1783 km²) mais une sévérité extrême relativement faible (59,38 km²), ce qui suggère des incendies fréquents mais moins intenses, possiblement en raison de différences de paysage ou de végétation. Bejaia présente une faible superficie totale brûlée mais une part élevée dans la classe Extrême (489,65 km²), impliquant moins d'événements d'incendie mais plus intenses. Pendant ce temps, Setif se distingue par une superficie totale brûlée relativement plus faible dans les classes faible et modérée, mais une superficie notablement élevée dans la classe Extrême (577,10 km²), indiquant une tendance à des incendies plus sévères mais moins fréquents. Ces schémas soulignent la nécessité de stratégies de gestion des incendies différenciées : certaines provinces nécessitent des efforts axés sur le contrôle

Des incendies fréquents, tandis que d'autres doivent se préparer à des incendies de forêt rares mais dévastateurs.

Tableau 3 Superficie totale (Km²) affectée par les incendies dans chaque wilaya d'étude, classée selon l'indice NBR, de 1984 à 2024.

WILAYA	Faible	Modéré	Haut	Extrême
ANNABA	712,8634224	517,6796856	179,6905586	2,538491167
BEJAIA	34,40085961	73,62209157	194,0505866	489,6524658
CONSTANTINE	1189,274811	488,7909211	416,6143492	152,7734119
EL-TARF	1208,732382	760,5100369	551,1253759	297,634766
GUELMA	1322,842932	1043,75155	870,4680832	428,2212955
JIJEL	551,3314058	1006,367439	580,1430832	253,1455057
MILA	1783,383015	830,0090637	630,8842443	59,38172712
OUM EL BOUAGHI	1660,237126	395,6825449	209,3612877	15,24454714
SETIF	462,5021591	419,9420902	481,8209679	577,1048542
SIKIKDA	1399,473505	1411,526788	967,2847072	350,8424651
SOUK-AHRAS	856,1353882	254,5492257	214,6599689	142,6039964

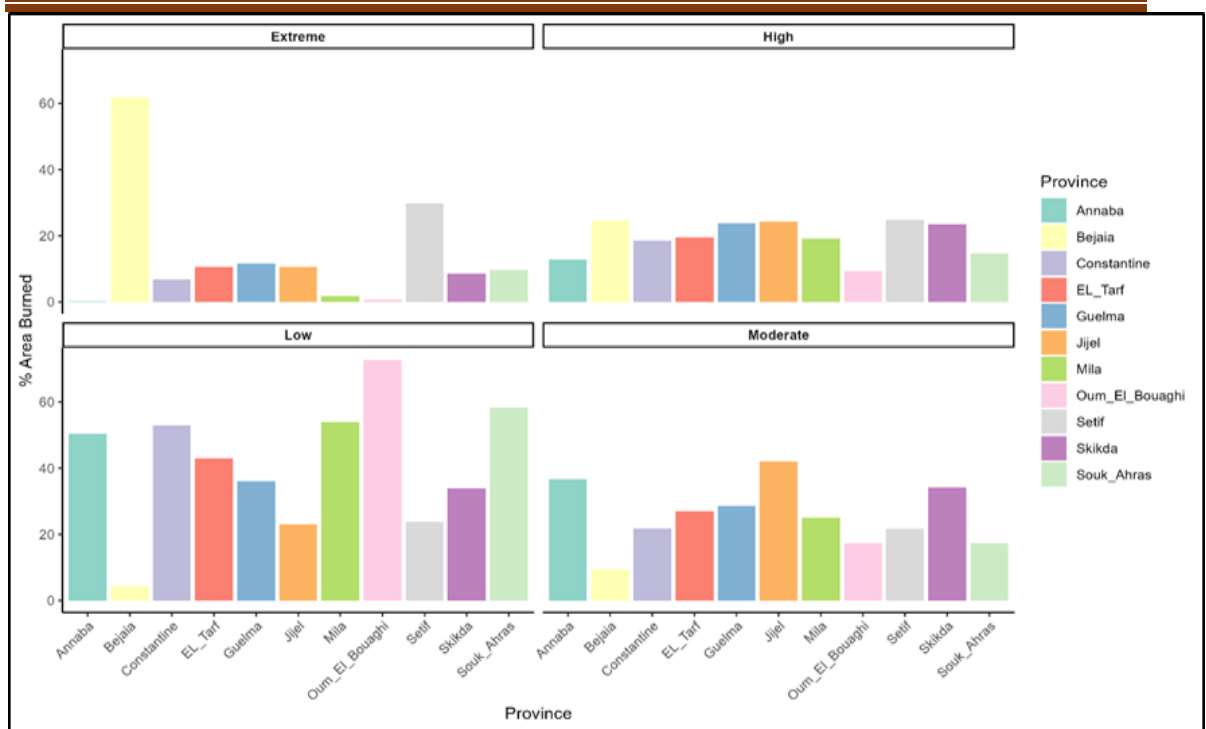


Figure 5 Surface brûlée par classe d'indice Nbr dans chaque province durant la période d'étude.

3. Modèle temporel de l'indice NBR.

Les résultats du modèle linéaire indiquent que l'indice NBR (Normalized Burn Ratio), qui reflète la sévérité des brûlures de la végétation, a significativement augmenté au fil du temps (Tableau 4). Cela suggère une tendance générale à l'augmentation de l'impact des incendies sur la végétation ou à un changement dans la récupération de la végétation après un incendie. Les différences régionales sont substantielles (Figure 5) : des provinces comme Jijel, El Tarf, Bejaia et Skikda affichent des valeurs NBR significativement plus élevées par rapport à la référence (Annaba), ce qui implique une sévérité de brûlure moindre ou une meilleure récupération de la végétation dans ces zones. En revanche, des provinces telles qu'Oum El Bouaghi, Mila, Setif et Constantine présentent des valeurs NBR significativement plus faibles, suggérant une plus grande sévérité des incendies ou une régénération de la végétation moins efficace.

Tableau 4. Résumé du modèle linéaire général pour déterminer le modèle temporel de l'indice NBR à travers les 11 wilayas

	Estimation	SE	t value	p value
(Intercept)	2.138e-02	5.648e-03	3.785	0.000155 ***
Année	3.215e-06	2.964e-07	10.845	< 2e-16 ***
Bejaia	3.560e-02	5.988e-03	5.946	2.92e-09 ***
Constantine	-6.965e-02	5.988e-03	-11.632	< 2e-16 ***
El_Tarf	4.358e-02	5.988e-03	7.279	3.86e-13 ***
Guelma	-1.091e-02	5.988e-03	-1.821	0.068593.
Jijel	7.853e-02	5.988e-03	13.116	< 2e-16 ***
Mila	-8.140e-02	5.988e-03	-13.596	< 2e-16 ***
Oum_El_Bouaghi	-1.054e-01	5.988e-03	-17.604	< 2e-16 ***
Setif	-6.613e-02	5.988e-03	-11.044	< 2e-16 ***
Skikda	3.702e-02	5.988e-03	6.183	6.73e-10 ***
Souk_Ahras	-4.615e-02	5.988e-03	-7.708	1.51e-14 ***

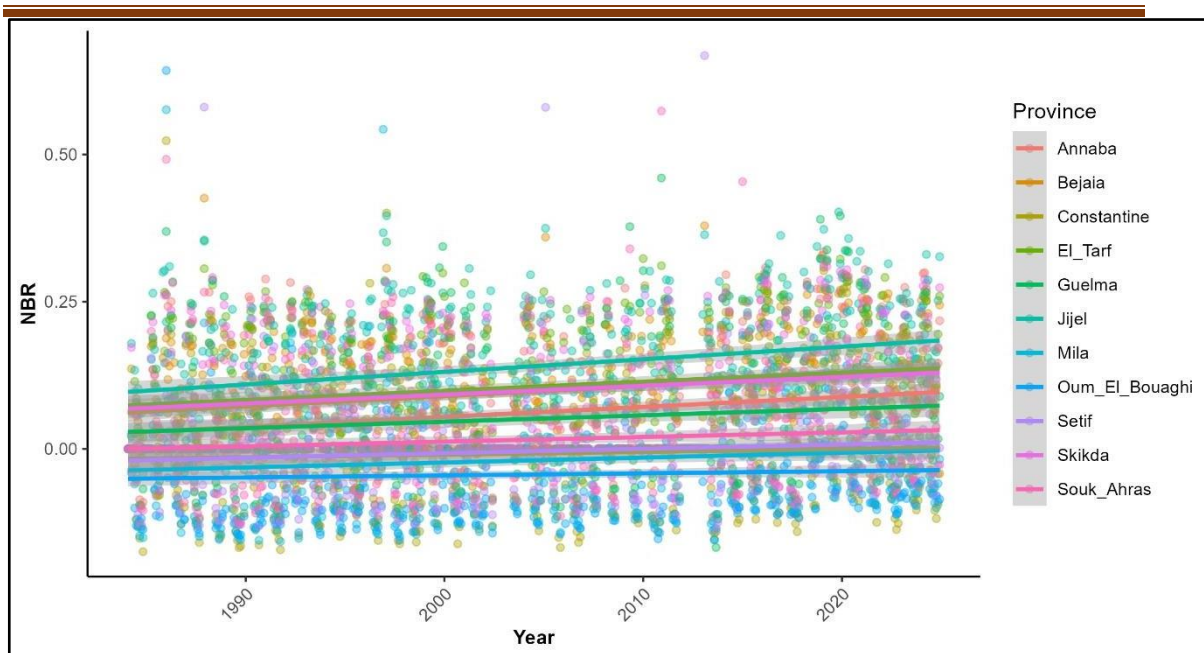


Figure 6 Changement temporel de l'indice NBR annuel dans les 11 provinces de 1984 à 2024. Les lignes représentent des régressions linéaires et les bandes correspondent aux erreurs standards.

4. Prédiction des incendies de forêts en relation avec les facteurs environnementales

Après validation et comparaison des modèles RF (Random Forest) et CART (Classification and Regression Tree) à l'aide de la courbe ROC (Tableau 5 ; Figures 6 et 7), nos résultats indiquent que la sélection des différents facteurs contribuant aux feux de forêts a été effectuée uniquement via la méthode de permutation du modèle RF, afin d'identifier les prédicteurs clés (Figure 8, 9, 10, 11). Notre modèle montre que cinq facteurs principaux contribuent chacun à plus de 20 % de l'importance dans la prédiction des feux (Figure 10), à savoir : le NDVI (35 %), la pente (23 %), la vitesse du vent (23 %), la radiation solaire (22 %), et enfin la couverture forestière (Tableau 6).

Tableau 5 Performance et optimisation des deux modèles appliqués.

	AUC	Seuil du meilleur point ROC
Forêt aléatoire	0.9836	0.508508509
CART	0.9408	0.334334334

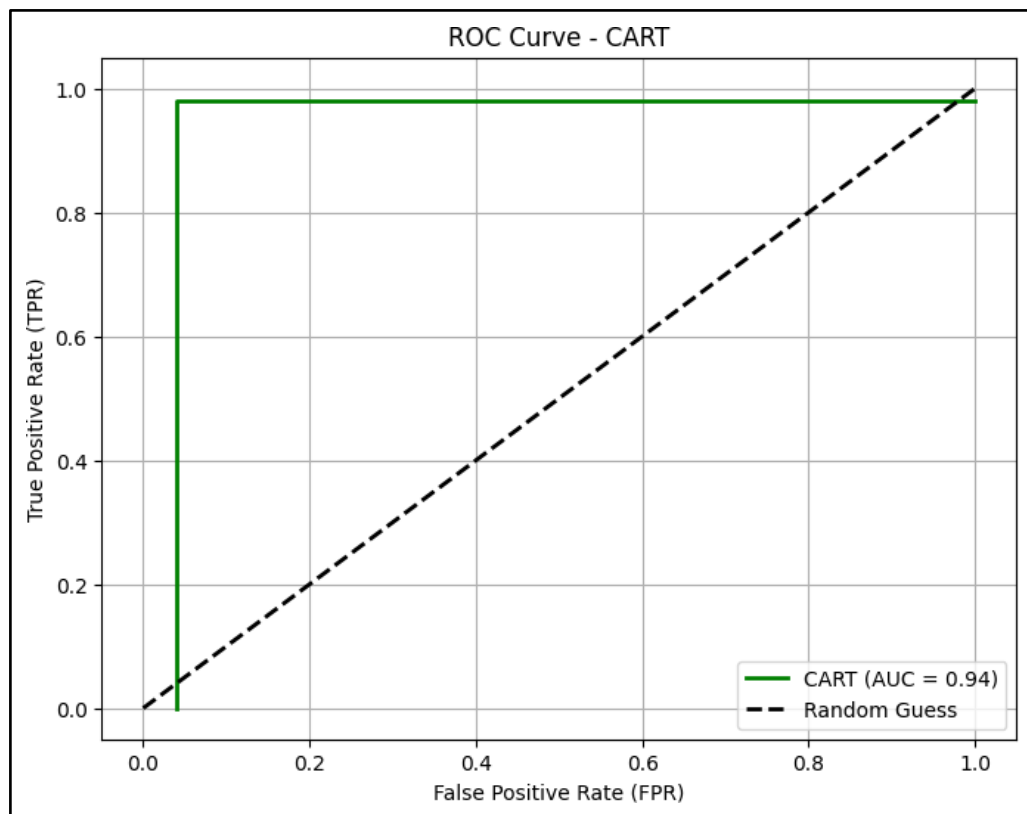


Figure 7 Courbe ROC du modèle CART.

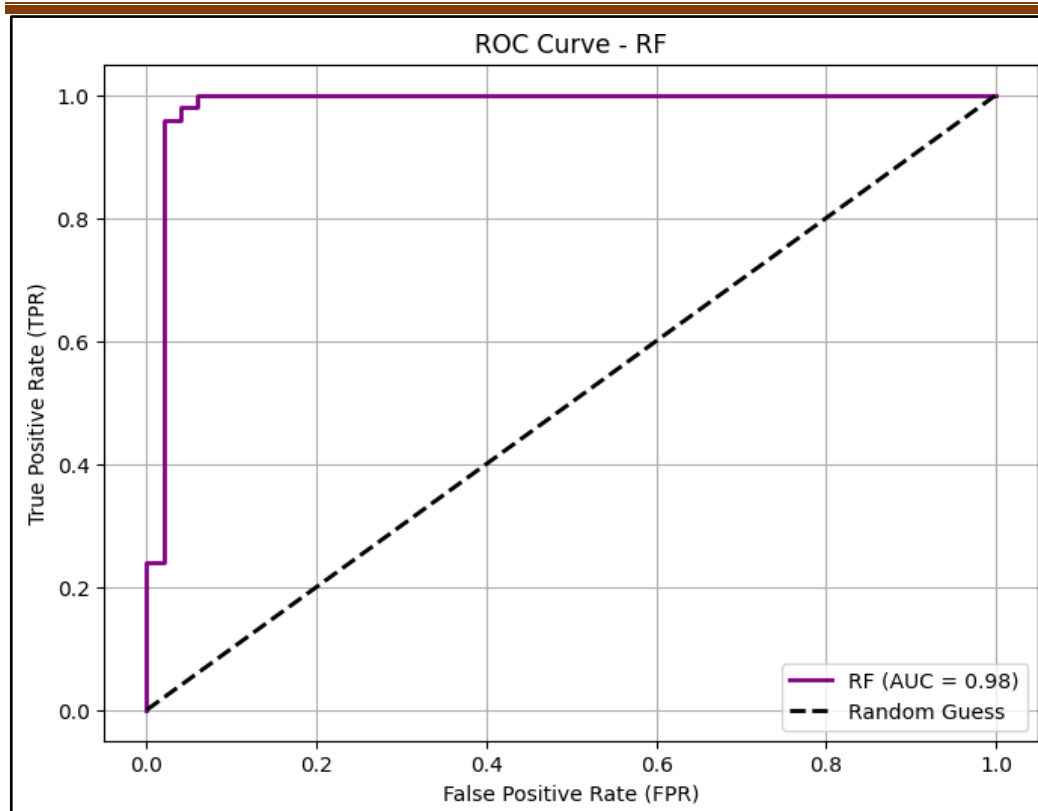


Figure 8 Courbe ROC du modèle Random Forest.

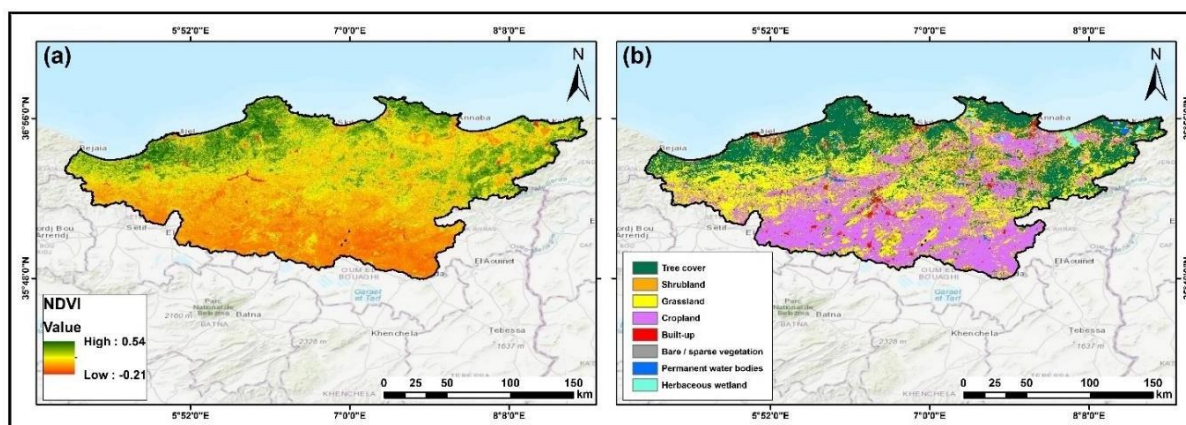


Figure 9 Carte montrant la moyenne de l'NDVI et l'occupation du sol dans la région durant la période d'étude.

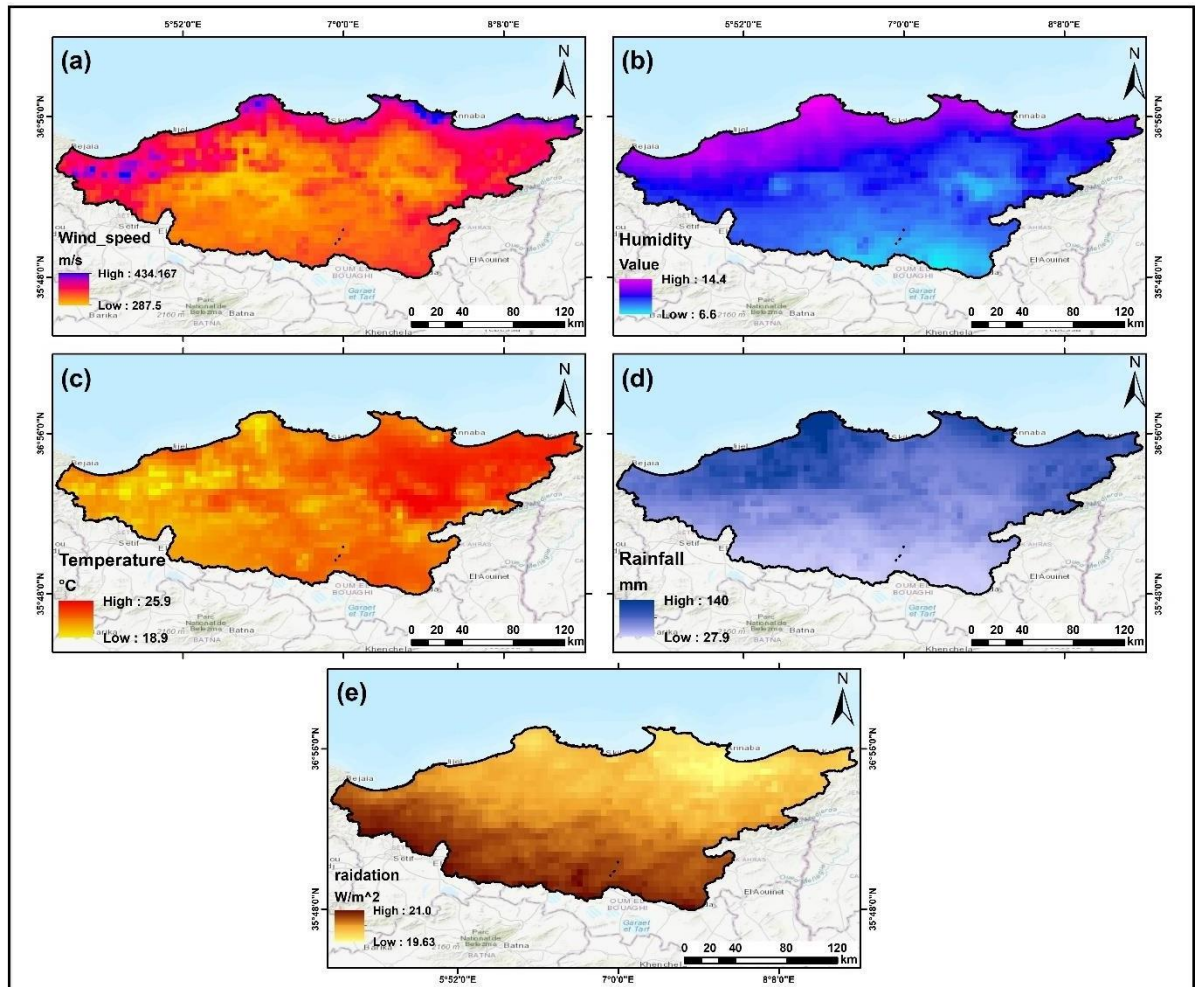


Figure 10 Carte montrant la vitesse moyenne du vent, l'humidité, la température, les précipitations et la radiation dans la région durant la période d'étude.

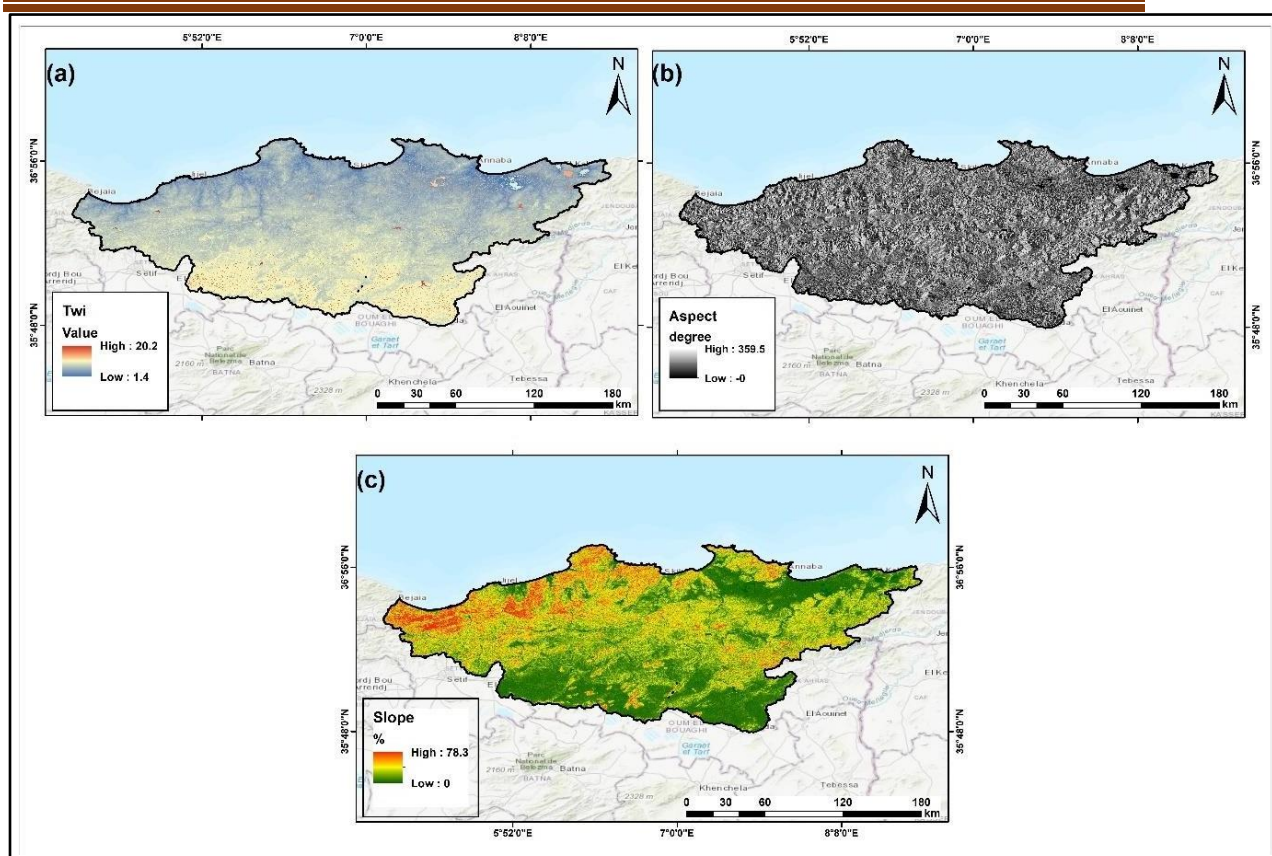


Figure 11. Carte montrant le facteur topographique : TWI moyen, aspect et pente dans la région durant la période d'étude.

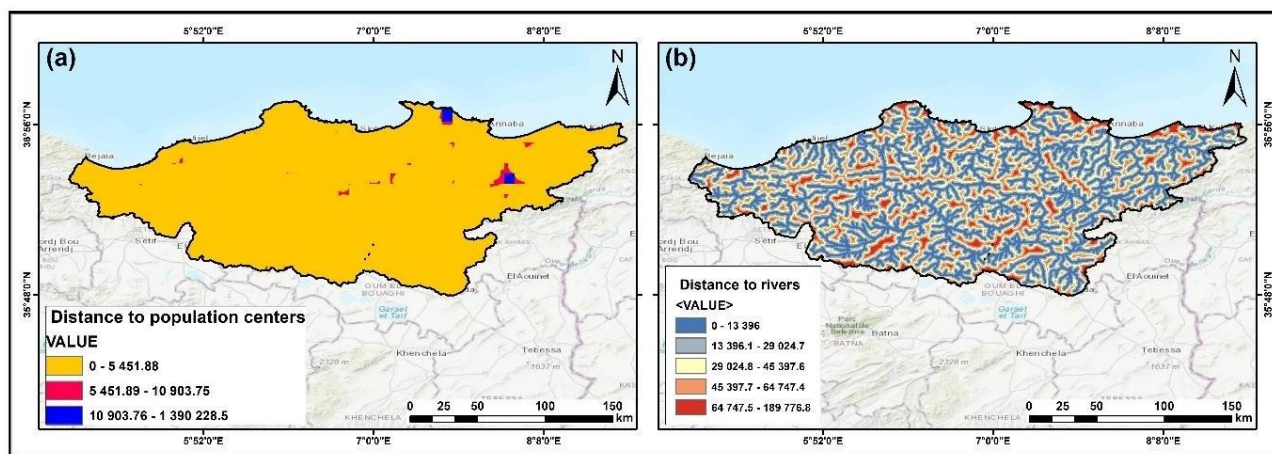


Figure 12. Carte montrant la distance moyenne aux centres de population et la distance aux rivières dans la région durant la période d'étude.

Tableau 6 Importance des variables dans le model RF.

Propriété	Modèle de forêt aléatoire
Aspect	18,279.749
Humidité	18,540.079
Couverture du sol	22,519.904
NDVI	35,276.742
Rayonnement	22,381.399
Rainfall	18,800.536
Pente	23,427.704
TWI	13,969.3
Température	15,222.972
Vitesse du vent	23,339.527
Distance_aux_centres_de_population	18,343.127
Distance_aux_rivières	16,063.114

La figure 12 illustre la distribution spatiale de la vulnérabilité aux incendies de forêt dans la région d'étude, dérivée du modèle Random Forest (RF), qui intègre plusieurs prédicteurs environnementaux et climatiques. Les niveaux de vulnérabilité sont classés en quatre catégories en fonction de la probabilité prédite d'occurrence d'incendie : Faible (0–0,3) en bleu, Modéré (0,3–0,6) en vert, Élevé (0,6–0,9) en orange, et Extrême (>0,9) en rouge. Il est évident que les parties sud et centrale de la région, en particulier les zones proches de Guelma, Oum El Bouaghi et El Tarf, présentent des zones substantielles de vulnérabilité extrême (rouge) et élevée (orange). Ces zones correspondent probablement à des régions à végétation dense, à pentes plus raides et à des conditions climatiques propices à l'ignition et à la propagation des incendies. En revanche, les zones nord et côtières, notamment autour d'Annaba, Jijel et Skikda, sont principalement classées comme à risque faible à modéré, suggérant une susceptibilité relativement plus faible aux incendies dans ces zones.

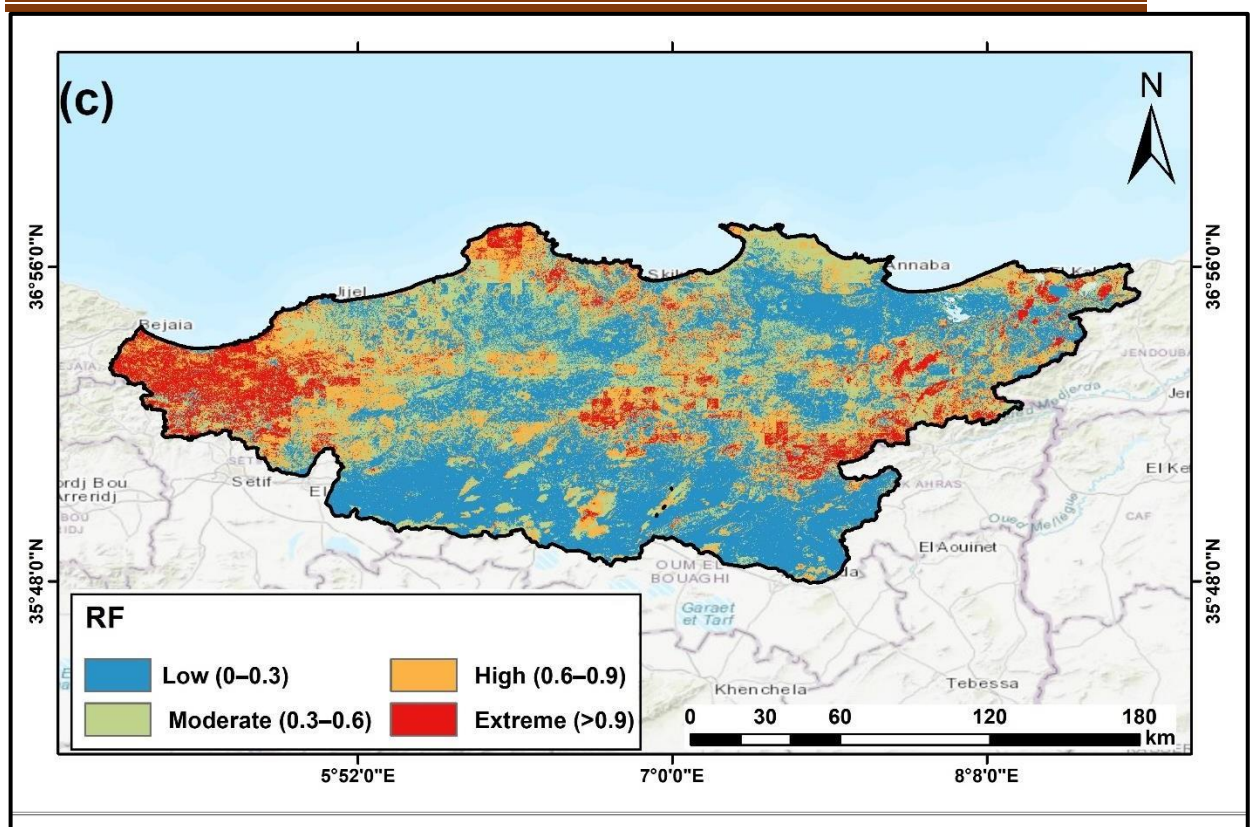


Figure 13 Carte prédite de la vulnérabilité de la zone brûlée basée sur toutes les variables avec le modèle Random Forest (RF) dans la région d'étude.

Chapitre 3 : Discussion générale

Discussion

Les incendies de forêt représentent une menace sérieuse pour les écosystèmes et les communautés, tout en perturbant les schémas climatiques (Soualah *et al.*, 2024). L'Algérie, notamment dans sa région nord-est, est particulièrement touchée par ces feux, qui sont exacerbés par les activités humaines et le changement climatique (Zaidi, 2023).

L'analyse spatiotemporelle des variables climatiques révèle une tendance significative à l'augmentation de la température maximale (Tmax), avec une élévation de 0,03 °C par an sur une période de plus de 40 ans. En revanche, les précipitations montrent une diminution de -0,28 mm par an. Des disparités spatiales notables se manifestent, notamment avec des provinces telles que Sétif, qui affichent une baisse de Tmax de -2,61 °C par rapport à Annaba, suivie de Béjaïa (-2,10 °C), Jijel (-1,96 °C) et Mila (-1,88 °C). Ces températures plus fraîches sont étroitement liées à des altitudes plus élevées. Cette augmentation progressive de la température maximale, qui s'établit à 0,03 °C par an sur plus de quatre décennies, souligne un réchauffement climatique préoccupant. Parallèlement, la diminution des précipitations de -0,28 mm par an engendre des risques accrus de stress hydrique et de sécheresse aiguë. L'indice de sécheresse PDSI présente une tendance négative significative, indiquant une intensification des conditions de sécheresse dans la région étudiée. En effet, plus de 30 % des valeurs PDSI se situent en dessous de -4, ce qui correspond à une sécheresse extrême. Cette tendance s'inscrit dans le cadre d'une aggravation générale des conditions de sécheresse observée dans les zones méditerranéennes et nord-africaines. Ces résultats indiquent que le changement climatique, les sécheresses et Différences spatiales sont les principales causes des feux de forêt dans les zones étudiées cela et en accord avec l'étude de (Benderradji *et al.*, 2004), cette étude mentionne que La déforestation en Algérie s'aggrave en raison de la composition forestière, du climat sec, de la sécheresse prolongée. Chaque année, environ 30 000 hectares de forêt disparaissent, ce qui est alarmant pour un pays désertique.

Les variations interprovinciales de l'activité incendiaire, illustrées par le pourcentage de surface brûlée. Certaines régions, comme Annaba et Béjaïa, montrent une variabilité importante, avec des médianes de 20 à 25 % et des pics atteignant près de 60 %. Oum El Bouaghi et Mila présentent également des valeurs similaires, avec des cas extrêmes au-dessus de 60 % et des périodes de faible brûlage. Ces observations indiquent des vulnérabilités locales et des événements d'incendie sporadiques influencés par des stress

climatiques et ainsi par les facteurs anthropiques tels que l'urbanisme, de sorte que les forêts préurbaines sont très vulnérables à l'incendie par rapport aux forêts localisées loin comme le cas chez la forêt d'Akfadou Est (W. de Bejaia) (Houria et al., 2022). En outre, d'après l'étude de (Houda, 2022), Le risque d'incendies demeure élevé toute la semaine, avec un pic entre midi et 16 heures, L'analyse pyrologique identifie les zones vulnérables et les essences forestières menacées dans la wilaya de Mila. Pour prévenir les feux de forêt, il est conseillé d'améliorer la sensibilisation, le renseignement, le débroussaillage, d'installer des postes de vigie, de multiplier les points d'eau et d'augmenter les véhicules ainsi que l'ouverture de pistes dans les forêts.

Le modèle temporel de l'indice NBR montre une augmentation significative, signalant une intensification des impacts des incendies sur la végétation ou un changement dans sa récupération. Des différences régionales sont observées : Jijel, El Tarf, Bejaia et Skikda présentent des valeurs NBR élevées, suggérant une moindre sévérité des brûlures ou une meilleure récupération, tandis qu'Oum El Bouaghi, Mila, Setif et Constantine affichent des valeurs plus faibles, indiquant une plus grande sévérité des incendies ou une régénération moins efficace.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Les feux en Algérie, bien que fréquents et historiques, posent aujourd'hui un problème croissant, surtout dans le nord-est, la région la plus touchée en raison de son boisement élevé et de son cycle de feu court. Bien que la forêt algérienne ait développé une capacité à "renaître de ses cendres", l'augmentation des incendies est souvent liée à des contextes politiques, socio-économiques ou climatiques exceptionnels (Lakhdari *et al.*, 2024).

Cette étude vise à examiner les feux de forêt dans le nord-est de l'Algérie au cours de la dernière décennie, en se déclinant en trois volets principaux : tout d'abord, une analyse des variations climatiques, incluant les précipitations, les températures maximales et l'indice de sécheresse PDSI, dans 11 wilayas ; ensuite, une évaluation spatio-temporelle des surfaces touchées par les incendies, réalisée grâce à la télédétection et aux images satellitaires, en utilisant l'indice NBR ; enfin, une prédiction des incendies de forêt par le biais de l'apprentissage automatique, intégrant diverses variables environnementales dans ces wilayas.

L'analyse des variables climatiques sur plus de 40 ans montre une augmentation significative de la température maximale (T_{max}) de $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ par an, tandis que les précipitations diminuent de $-0,28\text{ mm}$ par an. Des disparités régionales sont observées, avec des provinces comme Sétif affichant une baisse de T_{max} de $-2,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à Annaba. Cette tendance au réchauffement climatique, couplée à la diminution des précipitations, accroît les risques de stress hydrique et de sécheresse, comme l'indique l'indice de sécheresse PDSI en déclin.

L'analyse de l'indice NBR révèle une tendance inquiétante concernant l'impact des incendies sur la végétation, avec une intensification des effets observée dans certaines régions. Les disparités régionales soulignent des situations variées : tandis que des provinces comme Jijel, El Tarf, Bejaia et Skikda montrent une meilleure résilience de la végétation, d'autres comme Oum El Bouaghi, Mila, Sétif et Constantine souffrent d'une plus grande sévérité des brûlures et d'une régénération moins efficace. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'adapter les stratégies de gestion des forêts et de la biodiversité en fonction des spécificités régionales pour mieux faire face aux défis posés par les incendies.

En réponse à cette problématique, il est essentiel de comprendre que les incendies de forêt, qui affectent principalement la région nord-est de l'Algérie, sont le résultat d'une interaction complexe entre des facteurs climatiques, politiques et socio-économiques. Bien que la forêt

algérienne ait développé une certaine résilience, l'augmentation des incendies et les variations climatiques observées, telles que l'élévation des températures et la diminution des précipitations, exacerbent les risques de stress hydrique et de dégradation de la végétation. Les disparités régionales dans la sévérité des impacts des incendies soulignent l'importance d'une approche ciblée et adaptée à chaque zone.

Pour l'avenir,

-Dans le cadre de la compréhension des dynamiques des incendies et de leur impact sur l'écosystème, il s'avère impératif de consolider les efforts de recherche et de surveillance.

-L'intégration de technologies avancées, telles que l'apprentissage automatique pour la prédiction des incendies, pourrait jouer un rôle crucial dans la gestion proactive des forêts.

-Il devient impératif d'impliquer les communautés locales dans les stratégies de prévention et de régénération, afin de favoriser une gestion durable des ressources forestières et de renforcer la résilience des écosystèmes face aux défis environnementaux croissants.

Bibliographies

Bibliographies

- Bélisle, A. C., de l'Abitibi-Témiscamingue, B. C., & Boucher, Y. (2024). La saison des feux de forêt 2023 au Québec: un aperçu des conditions extrêmes, des impacts, des leçons apprises et des considérations pour l'avenir.
- Bouisset, C. (2021). Incendies de forêt à l'heure de l'anthropocène: questions d'échelles. *Les risques et l'anthropocène: Regards alternatifs sur l'urgence environnementale*, p. 59.
- Boulghobra, N., Merdas, S., & Benmalek, A. (2022). Evaluation et cartographie des feux de forêts généralisés d'août 2021 à Bejaia et Tizi Ouzou: Approche géomatique. *Journal Algérien des Régions Arides*, 14(2), 60-67.
- Bouramdane, A.-A. (2022). Chaleur Caniculaire, Incendies Gigantesques à Répétition: Des Signes du Changement Climatique. *Énergie/Mines Carrières*, 2.
- CHADLI, Y., & Lasserre, F. (2022). CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AVANTAGES DE L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE POUR LES ENTREPRISES MARITIMES. *Revue des Études Multidisciplinaires en Sciences Économiques et Sociale*, 7(2).
- Chou, Y. H., Minnich, R. A., & Chase, R. A. (1993). Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA. *Environmental Management*, 17, 129-140.
- Ferreira, C., Pinto, L. C., & Valente, M. (2024). Forest fire causes and prevention strategies in Portugal: Insights from stakeholder focus groups. *Forest Policy and Economics*, 169, 103330.
- Fu, Z., Gong, A., Wan, J., Ba, W., Wang, H., & Zhang, J. (2025). Forest fire risk assessment model optimized by stochastic average gradient descent. *Ecological Indicators*, 170, 113006.
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*, 51, 651-662.
- Gonçalves, J., de Castro, E., Loureiro, F., & Pereira, P. (2024). Assessment of forest fires impacts on geoheritage: A study in the Estrela UNESCO Global Geopark, Portugal. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(4), 580-605.
- IFRC. (2022). Forest Fires in Algeria.
- Khelali, M., Kadid, S., Bouhata, R., Djabri, A. D., & András, J. (2025). Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) to Assessment Forest Fire Vulnerability in Eastern Aures, Algeria.
- Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., . . . Lee, W.-K. (2019). Multi- temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing*, 11(1), 86.
- Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human activity affects forest fires: The impact of anthropogenic factors on the density of forest fires in Poland. *Forests*, 12(6), 728.
- M*, N., & A, R. (2024). Forest Fires in Region of Souk Ahras (North Eastern Algeria) Assessment and Analysis. *Journal of Earth and Environmental Science Research*. doi: [https://doi.org/10.47363/JEESR/2024\(6\)209](https://doi.org/10.47363/JEESR/2024(6)209)
- Merlo, J. (2024). Étude de l'effet du changement climatique sur la production d'énergie renouvelable en Belgique sur base de simulations TRNSYS.
- Messaoudi, H. (2022). *Contribution à l'étude du bilan des incendies de forêt dans la wilaya de Bouira (période 2011-2020)*. Université Mouloud Mammeri.
- Parajuli, A., Gautam, A. P., Sharma, S. P., Bhujel, K. B., Sharma, G., Thapa, P. B., . . . Poudel, S. (2020). Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major landscapes of Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2569-

Bibliographie

2586.

Qiao, C., Wu, L., Chen, T., Huang, Q., & Li, Z. (2018). *Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS*. Paper presented at the IOP conference series: earth and environmental science.

- Sahar, O., Hamel, H., & Meddour, R. (2020). Etude des grands feux de forêts en Algérie: Cas de la wilaya de Tizi Ouzou. *Geo-Eco-Trop*, 44(3), 427-442.
- SİVRİKAYA, F., & DEMİREL, D. (2025). Fire Risk Mapping Using Machine Learning Method and Remote Sensing in the Mediterranean Region. *Advances in Space Research*.
- Soualah, L., Bouzekri, A., & Chenchouni, H. (2024). Hoping the best, expecting the worst: Forecasting forest fire risk in Algeria using fuzzy logic and GIS. *Trees, Forests and People*, 17, 100614.
- Zhang, W., Wang, J., Wang, Q., Cao, H., Wang, J., Zuo, J., & Wang, J. (2023). Research progress of remote sensing detection technology of forest fire. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(01), 123-130.
- Bauer, M. E. (2020). Remote sensing of environment: history, philosophy, approach and contributions, 1969–2019. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111522.
- Bélisle, A. C., de l'Abitibi-Témiscamingue, B. C., & Boucher, Y. (2024). La saison des feux de forêt 2023 au Québec: un aperçu des conditions extrêmes, des impacts, des leçons apprises et des considérations pour l'avenir.
- Benderradji, M., Alatou, D., & Arfa, A. (2004). Bilan des incendies de forêts dans le Nord-Est algérien Cas de Skikda, Annaba et El tarf, période 1990-2000. *Forêt méditerranéenne*, 25(3), 211-218.
- Bouisset, C. (2021). Incendies de forêt à l'heure de l'anthropocène: questions d'échelles. *Les risques et l'anthropocène: Regards alternatifs sur l'urgence environnementale*, p. 59.
- Boulghobra, N., Merdas, S., & Benmalek, A. (2022). Evaluation et cartographie des feux de forêts généralisés d'août 2021 à Bejaia et Tizi Ouzou: Approche géomatique. *Journal Algérien des Régions Arides*, 14(2), 60-67.
- Bouramdane, A.-A. (2022). Chaleur Caniculaire, Incendies Gigantesques à Répétition: Des Signes du Changement Climatique. *Énergie/Mines Carrières*, 2.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
- CHADLI, Y., & Lasserre, F. (2022). CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AVANTAGES DE L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE POUR LES ENTREPRISES MARITIMES. *Revue des Études Multidisciplinaires en Sciences Économiques et Sociale*, 7(2).
- Chorfi, A., Hafid, H., Baaloudj, A., Rizi, H., Aouissi, H. A., Chaib, S., . . . Houhamdi, M. (2022). CHARACTERIZATION AND DIVERSITY OF MACROINVERTEBRATES IN GROUNDWATER IN THE REGION OF SOUK-AHRAS (NORTH-EAST OF ALGERIA). *Ekológia*, 41(3), 219-227.
- Chou, Y. H., Minnich, R. A., & Chase, R. A. (1993). Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA. *Environmental Management*, 17, 129-140.
- Douaa, C., & LARABA, L. (2021). Contribution à l'étude de la qualité des eaux du Barrage Hammam Grouz dans la Wilaya de Mila. university center of abdalhafid boussouf-MILA.
- Fella, B. (2017). Etude diachronique de l'évolution de la végétation forestière par télédétection : cas de la wilaya de Skikda.
- Ferreira, C., Pinto, L. C., & Valente, M. (2024). Forest fire causes and prevention strategies in Portugal: Insights from stakeholder focus groups. *Forest Policy and Economics*, 169, 103330.

Bibliographie

- Fu, Z., Gong, A., Wan, J., Ba, W., Wang, H., & Zhang, J. (2025). Forest fire risk assessment model optimized by stochastic average gradient descent. *Ecological Indicators*, 170, 113006.
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*, 51, 651-662.
- Gonçalves, J., de Castro, E., Loureiro, F., & Pereira, P. (2024). Assessment of forest fires impacts on geoheritage: A study in the Estrela UNESCO Global Geopark, Portugal. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(4), 580-605.
- Houda, L. (2022). *Analyse des incendies des forêts de la wilaya de Mila*. university center of abdalhafid boussouf-MILA.
- Houria, B., Bahia, L., Manal, N., & Naima, D. (2022). Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord algérien: cas de la forêt d'Akfadou Est (W. de Bejaia).
- IFRC. (2022). Forest Fires in Algeria.
- Khelali, M., Kadid, S., Bouhata, R., Djabri, A. D., & András, J. (2025). Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) to Assessment Forest Fire Vulnerability in Eastern Aures, Algeria.
- Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., . . . Lee, W.-K. (2019). Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing*, 11(1), 86.
- Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human activity affects forest fires: The impact of anthropogenic factors on the density of forest fires in Poland. *Forests*, 12(6), 728.
- Laadel, N. (2021). *Etude de la faune entomologique des différents reboisements des essences forestières de la région de setif et relation plantes-faune*.
- Lakhdari, S., Kellil, H., Hamli, S., Dib, D., Nedjar, Y., Guilal, S., . . . Valles, V. (2024). Diversity of the associated vegetative community of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller) in a pine forest of Ouled Yagoub (northeast Algeria, North Africa). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9(2), 909-920.
- Merlo, J. (2024). Étude de l'effet du changement climatique sur la production d'énergie renouvelable en Belgique sur base de simulations TRNSYS.
- Messaoudi, H. (2022). *Contribution à l'étude du bilan des incendies de forêt dans la wilaya de Bouira (période 2011-2020)*. Université Mouloud Mammeri.
- Nichane, & Rabti. (2024). Forest Fires in Region of Souk Ahras (North Eastern Algeria) Assessment and Analysis. *Journal of Earth and Environmental Science Research*. doi: [https://doi.org/10.47363/JEESR/2024\(6\)209](https://doi.org/10.47363/JEESR/2024(6)209)
- Parajuli, A., Gautam, A. P., Sharma, S. P., Bhujel, K. B., Sharma, G., Thapa, P. B., . . . Poudel, S. (2020). Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major landscapes of Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2569-2586.
- Qiao, C., Wu, L., Chen, T., Huang, Q., & Li, Z. (2018). *Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS*. Paper presented at the IOP conference series: earth and environmental science.

Bibliographie

- Sahar, O., Hamel, H., & Meddour, R. (2020). Etude des grands feux de forêts en Algérie: Cas de la wilaya de Tizi Ouzou. *Geo-Eco-Trop*, 44(3), 427-442.
- SİVRİKAYA, F., & DEMİREL, D. (2025). Fire Risk Mapping Using Machine Learning Method and Remote Sensing in the Mediterranean Region. *Advances in Space Research*.
- Soualah, L., Bouzekri, A., & Chenchouni, H. (2024). Hoping the best, expecting the worst: Forecasting forest fire risk in Algeria using fuzzy logic and GIS. *Trees, Forests and People*, 17, 100614.
- Zaidi, A. (2023). Predicting wildfires in Algerian forests using machine learning models. *Heliyon*, 9(7).
- Zhang, W., Wang, J., Wang, Q., Cao, H., Wang, J., Zuo, J., & Wang, J. (2023). Research progress of remote sensing detection technology of forest fire. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(01), 123-130.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Smith, G. M. (2007). *Analysing ecological data* (Vol. 680): Springer.

Webographie

- [1]: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires&ved=2ahUKewiJ7Zyf3-mMAxX-dqQEHWD5GMSQFnoECFkQAQ&usg=AOvVaw2HzaQfcLlnB4YPqfvuYVdA>.
- [2]: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/?category=fires>.
- [3]: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires&ved=2ahUKewiJ7Zyf3-mMAxX-dqQEHWD5GMSQFnoECFkQAQ&usg=AOvVaw2HzaQfcLlnB4YPqfvuYVdA>