

Détection des zones touchées par les incendies de forêt par l'imagerie satellitaire

Halima Nihed ADDA BOUHADDA^{1*}

Résumé

Cet article explore l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la détection et la cartographie des zones affectées par les incendies de forêt dans la wilaya de Tizi Ouzou, en Algérie. En s'appuyant sur les données Sentinel-2 et l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), l'étude compare les valeurs de NDVI avant et après les incendies de 2021 pour évaluer l'ampleur des dégâts. L'approche méthodologique inclut l'analyse d'images satellitaires moyennes du mois d'août et l'utilisation de Google Earth Engine (GEE) pour le traitement des données. Les résultats montrent une nette diminution du NDVI dans les zones brûlées, confirmant la destruction de la végétation. Ces conclusions soulignent l'importance de la surveillance continue et de la mise en place de stratégies de prévention et de restauration des écosystèmes forestiers.

Mots clés : Télédétection, NDVI, Sentinel-2, Google Earth Engine, feux de forêt..

¹ Office national de la météorologie (DG-ONM), Dar El Beida, Alger

*Correspondant : bouhadda.nihed@gmail.com / h.addabouhadda@meteo.dz

Table des matières

1	Introduction	1
2	Approches Méthodologiques	2
2.1	La Zone d'étude	2
2.2	Collecte des Données Sentinel-2 MSI	2
2.3	Méthode de Calcul du NDVI	2
2.4	Outils Utilisés	3
3	Résultats et Discussion	4
3.1	Comparaison des images NDVI	4
3.2	Détection des zones brûlées avec GEE	5
4	Conclusion	5
	Références	5

1. Introduction

L'imagerie satellitaire constitue aujourd'hui un outil incontournable dans les sciences de la Terre, notamment en météorologie, en climatologie, et dans la surveillance environnementale. Depuis le lancement du premier satellite météorologique, TIROS-1, en 1960 par la NASA, cette technologie a connu une évolution fulgurante, permettant une observation continue et globale de la planète. Dans le domaine de la météorologie, les satellites fournissent une vaste gamme de données essentielles pour :

- La préparation des bases de données physiographiques nécessaires aux modèles numériques, telles que la topographie, l'albédo, le masque terre-mer, ou encore la couverture végétale (Drobinski et al., 2012).

- L'assimilation des données dans les modèles de prévision numérique du temps (PNT), notamment pour l'initialisation des paramètres atmosphériques et de surface comme la température de surface, l'humidité du sol, ou encore l'étendue de la neige (Rabier et al., 2000).
- La détection et le suivi des phénomènes météorologiques extrêmes, comme les cyclones, les incendies de forêt, ou les vagues de chaleur, grâce aux capteurs optiques et thermiques embarqués (Justice et al., 2002).

Les satellites comme ceux du programme européen Copernicus (Sentinel) et les missions américaines (MODIS, Landsat) offrent des données en haute résolution spectrale et spatiale, qui sont aussi largement utilisées pour la cartographie de la végétation, l'analyse des sols, et le suivi des catastrophes naturelles.

Dans ce contexte, le présent article vise à détecter et cartographier les zones affectées par les incendies de forêt survenus durant l'été 2021 dans la wilaya de Tizi Ouzou, en Algérie, en utilisant les données satellites Sentinel-2 et l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). L'analyse comparative des valeurs de NDVI avant et après les incendies permettra d'évaluer l'ampleur des dommages subis par la couverture végétale.

Selon les données disponibles, les incendies de l'été 2021 ont ravagé plus de 100 000 hectares de végétation à travers 21 wilayas en Algérie, avec Tizi Ouzou étant la plus touchée, enregistrant 43 398 hectares brûlés (APS, 2021). L'étude s'appuie ainsi sur l'évolution du NDVI pour quantifier les pertes et visualiser les zones les plus durement impactées.

2. Approches Méthodologiques

2.1 La Zone d'étude

La wilaya de Tizi Ouzou, située dans le nord de l'Algérie, est caractérisée par un relief accidenté et un climat méditerranéen, propice à une couverture végétale dense et diversifiée.

Ce couvert est principalement composé de forêts de chênes-lièges (*Quercus suber*), de pins d'Alep (*Pinus halepensis*), ainsi que de maquis méditerranéens, riches en arbustes résineux et en broussailles inflammables (Meddour-Sahar et al., 2011).

Cette végétation, en plus de son importance écologique, constitue un facteur aggravant dans la propagation rapide des feux de forêt. En été, la combinaison de températures élevées, d'une faible humidité relative, et d'une végétation sèche rend la région particulièrement vulnérable aux départs de feu. La densité et la composition du couvert végétal jouent ainsi un rôle déterminant dans l'intensité et la vitesse de propagation des incendies.

2.2 Collecte des Données Sentinel-2 MSI

Les satellites Sentinel-2, faisant partie du programme européen Copernicus. Ils sont équipés de l'instrument MultiSpectral Instrument (MSI), qui capture des images dans 13 bandes spectrales à différentes résolutions : **bandes à 10 mètres**, couvrant le visible et le proche infrarouge ; **6 bandes à 20 mètres**, incluant notamment le bord rouge et l'infrarouge à ondes courtes (SWIR)

https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR ; et **3 bandes à 60 mètres**, utilisées principalement pour la correction atmosphérique.

La mission Sentinel-2, développée dans le cadre du programme européen Copernicus et gérée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), a pour objectif principal la surveillance continue de la surface terrestre, incluant le suivi de la végétation, de l'eau, des zones côtières, et des changements d'occupation du sol. Elle se distingue par une **largeur de fauchée de 290 km** et un **temps de revisite de 5 jours**, grâce à la coordination des deux satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B. Ces satellites sont opérationnels depuis le **28 mars 2017** et fournissent des images à différentes résolutions : **10 mètres pour les bandes visibles et proche infrarouge, 20 mètres pour les bandes SWIR et bord rouge, et 60 mètres pour**

les bandes dédiées à la correction atmosphérique. Les données Sentinel-2 sont prétraitées par le logiciel Sen2Cor, qui applique une correction atmosphérique et améliore la qualité radiométrique des images. Ces caractéristiques font de Sentinel-2 une source précieuse pour des applications telles que le suivi de la végétation,

la gestion des ressources hydriques, ou encore la cartographie

des zones sensibles aux catastrophes naturelles (ESA Sentinel Handbook, 2015).

Nous avons construit une base de données d'images satellitaires Sentinel-2 MSI couvrant la période estivale (juin, juillet, août et septembre) entre 2020 et 2023. L'année 2018 a été utilisée comme année de référence, car cette année n'a pratiquement connu aucun feu de forêt selon la Protection Civile algérienne.

2.3 Méthode de Calcul du NDVI

Le NDVI, est l'un des indicateurs les plus utilisés en télédétection

pour évaluer l'état de la végétation. Il a été développé dans les années 1970 par Rouse et al. (1973) au Laboratoire de télédétection du Texas AM University, dans le cadre de recherches sur l'analyse de la couverture végétale à l'aide de capteurs multispectraux embarqués sur satellites. Cet indice est rapidement devenu un outil de référence dans l'analyse de la biosphère terrestre, grâce à sa simplicité de calcul et son efficacité dans la détection des variations de biomasse végétale (Tucker, 1979).

Le NDVI est un indicateur essentiel en télédétection pour évaluer la densité et la santé de la végétation. Il est particulièrement utile dans le contexte des incendies de forêt pour :

- Identifier les zones à risque : Des valeurs élevées de NDVI indiquent une végétation dense, potentiellement inflammable en période sèche.
- Évaluer les dommages post-incendie : Une diminution significative du NDVI après un incendie reflète la perte de biomasse végétale.
- Suivre la régénération : Le NDVI permet de monitorer la repousse de la végétation sur les zones brûlées, offrant des données sur la résilience des écosystèmes.

La formule du NDVI est :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

où :

- NIR représente la réflectance dans le Proche Infrarouge.
- RED représente la réflectance dans le Rouge.

Pour les données Sentinel-2, les bandes utilisées pour le calcul du NDVI sont :

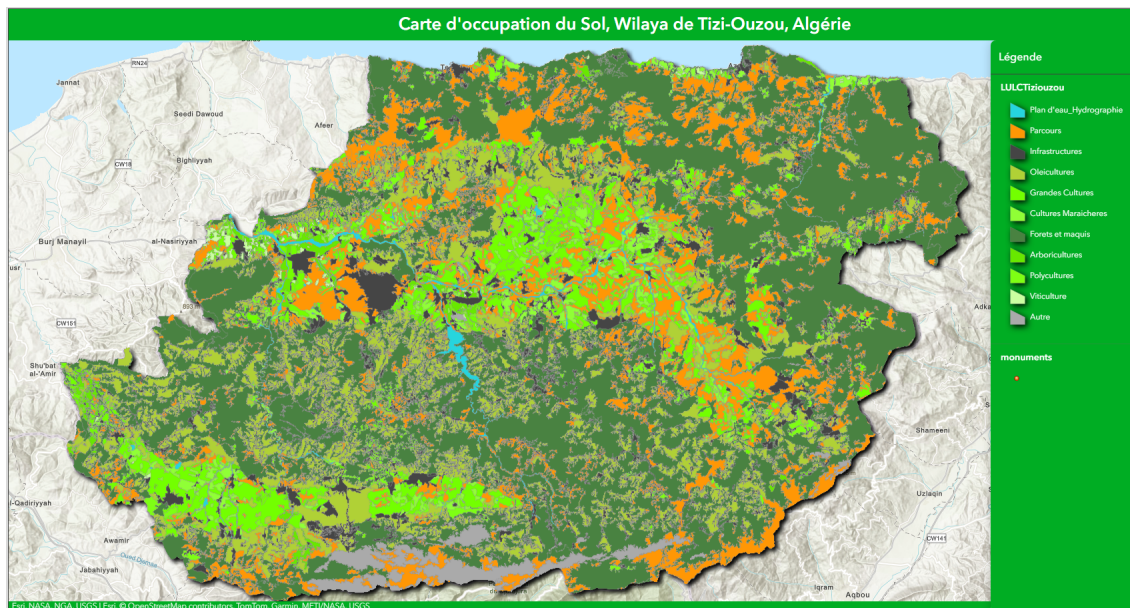


FIGURE 1. Carte montrant la répartition des types de végétation (forêts, zones agricoles, zones urbaines, etc.) dans toute la wilaya de Tizi Ouzou. (Source : fr-fr.topographic-map.com ou ArcGIS Dashboard.)

- Bande 8 (NIR - Proche Infrarouge) : 842 nm, résolution de 10 m.
- Bande 4 (RED - Rouge) : 665 nm, résolution de 10 m.

Le NDVI varie entre -1 et +1 :

- Valeurs proches de +1 : Indiquent une végétation dense et en bonne santé.
- Valeurs proches de 0 : Indiquent des sols nus ou des surfaces non végétalisées.
- Valeurs négatives : Indiquent de l'eau ou des zones urbaines.

2.4 Outils Utilisés

Nous avons utilisé Google Earth Engine (GEE), une plateforme cloud développée par Google à partir de 2010, officiellement lancée en 2011 pour le grand public scientifique (Gorelick et al., 2017). Elle permet un accès simplifié à une

vaste bibliothèque d'images satellitaires et de jeux de données géospatiales, ainsi qu'à des outils puissants pour le traitement, l'analyse et la visualisation des données à grande échelle. Grâce à son infrastructure distribuée, GEE offre des capacités avancées de traitement en temps quasi réel, facilitant la détection des zones affectées par les incendies, l'évaluation des dégâts, et le suivi de la régénération de la végétation sur de longues périodes.

Cette plateforme est particulièrement adaptée aux analyses environnementales, notamment celles impliquant des séries temporelles et des données de télédétection haute résolution. Dans cette étude, GEE a été utilisé pour importer et traiter les images Sentinel-2, calculer l'indice NDVI, et générer les cartes de détection des zones brûlées.

Le Script utilisé pour le calcul du NDVI sur Google Earth Engine (GEE) est :

```
// Chargement de l'image Sentinel-2
var image = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
    .filterDate('XX-XX-XX', 'XX-XX-XX') // Remplacement des dates par 'XX'
    .filterBounds(zone_etude) // Remplacement par la géométrie de la zone d'étude
    .median();

// Calcul du NDVI
var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');
```

FIGURE 2. Le script utilisé pour le calcul du NDVI sur Google Earth Engine (GEE).

Ce script permet de charger les images Sentinel-2 sur la zone d'étude, de calculer le NDVI et de visualiser les résultats

directement sur Google Earth Engine. Les dates ont été remplacées par 'XX' et la géométrie représente la zone d'étude définie dans le script.

Nous avons également employé QGIS, un logiciel SIG open-source, pour effectuer un post-traitement détaillé des images NDVI et générer des cartes de synthèse facilitant l'interprétation visuelle des résultats.

Afin de raffiner l'analyse et d'optimiser la lisibilité cartographique, un post-traitement détaillé des images NDVI a été effectué à l'aide du logiciel QGIS. Ce traitement a comporté plusieurs étapes clés :

- Importation des images NDVI au format GeoTIFF, générées sur GEE.
- Reprojection des données au système de coordonnées local (UTM zone 31N) pour une meilleure précision spatiale.
- Classification des valeurs NDVI en classes thématiques (par exemple : végétation dense, moyenne, faible, zones brûlées) à l'aide de la symbologie personnalisée.
- Application d'un masque de nuages et d'eau, basé sur les bandes de qualité de Sentinel-2, pour éviter les artefacts d'analyse.
- Extraction vectorielle des zones brûlées : les pixels à NDVI très bas (souvent < 0.1) ont été isolés, puis convertis en polygones vectoriels pour une quantification précise des surfaces affectées.
- Superposition des cartes NDVI 2018 et 2021 afin de produire une carte comparative des pertes végétales.

- Ajout de couches SIG complémentaires (limites administratives, routes, localités) pour contextualiser les résultats dans l'environnement local.

Ce post-traitement permet ainsi non seulement une visualisation plus claire, mais également une extraction quantitative et spatiale des zones impactées, indispensable pour des analyses de gestion des risques et de planification écologique post-incendie.

3. Résultats et Discussion

3.1 Comparaison des images NDVI

L'analyse des images NDVI avant et après les incendies montre une nette diminution des valeurs NDVI en 2021 par rapport à 2018, indiquant une forte dégradation de la végétation. Cette baisse traduit une perte importante de biomasse due aux feux de forêt, entraînant une modification significative de la couverture végétale.

Afin d'assurer une meilleure précision, nous avons utilisé des images moyennes du mois d'août pour chaque année analysée. Cette approche permet d'atténuer les variations dues

aux conditions météorologiques ponctuelles et d'obtenir une vision plus représentative de l'état de la végétation avant et après les incendies.

La comparaison des images montre que les zones autrefois densément couvertes en 2018 présentent en 2021 des indices proches de zéro, témoignant d'une destruction quasi-totale de la végétation. L'analyse spatiale réalisée à l'aide de GEE permet de cartographier précisément ces zones et de quantifier l'impact des incendies sur l'écosystème local.

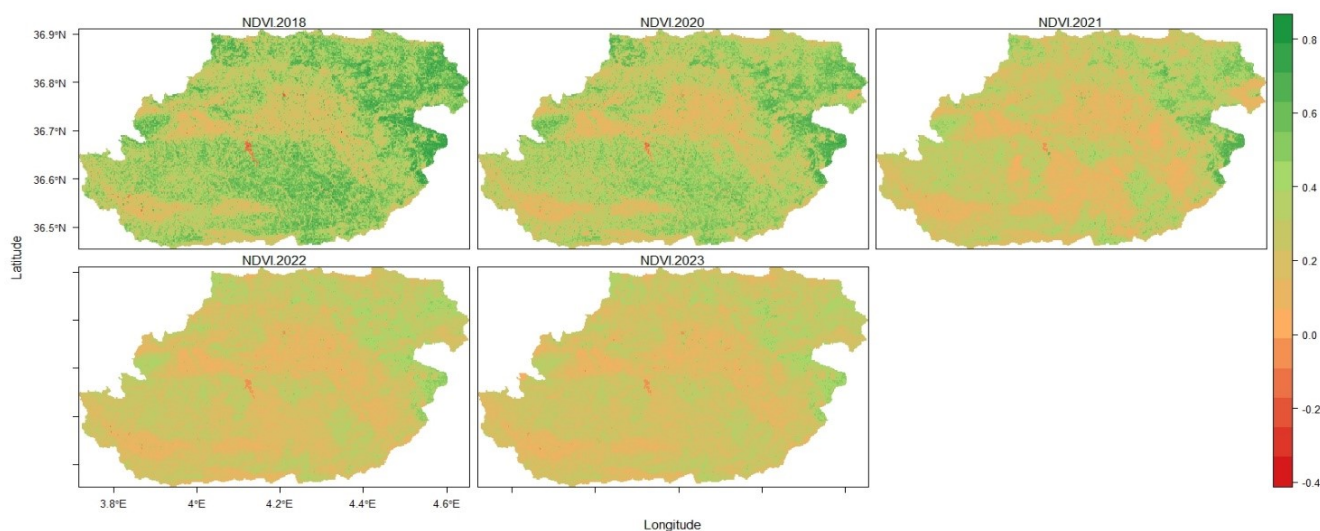


FIGURE 3. Variation mensuelle moyenne de l'indice NDVI pour le mois d'août de 2018 à 2021 dans la wilaya de Tizi Ouzou.

3.2 Détection des zones brûlées avec GEE

Les images traitées avec GEE ont permis de localiser précisément les zones touchées par les incendies d'août 2021. L'analyse des images NDVI a permis de mettre en évidence les zones les plus impactées par les incendies de 2021.

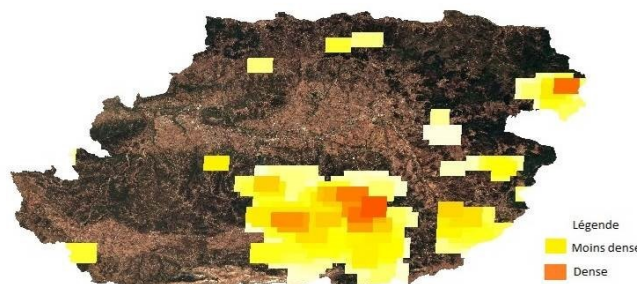


FIGURE 4. Carte générée à partir d'images Sentinel-2 datées du 5 août 2021 (avant incendies) et du 25 août 2021 (après incendies). Les zones en rouge indiquent les secteurs les plus sévèrement touchés par les feux de forêt.

L'analyse des images NDVI a permis de mettre en évidence les zones les plus impactées par les incendies de 2021. En comparant les valeurs de NDVI avant et après les incendies, on observe une diminution significative de l'indice dans les secteurs touchés, indiquant une destruction quasi-totale de la végétation.

Les images NDVI moyennes du mois d'août ont révélé une nette différence entre les années analysées. En 2018, les valeurs NDVI étaient plus élevées, traduisant une couverture végétale dense et en bonne santé. En revanche, en 2021, on constate une importante réduction de ces valeurs, particulièrement dans les zones brûlées, où le NDVI est proche de zéro. Grâce à l'analyse des données Sentinel-2 et à l'utilisation de Google Earth Engine (GEE), nous avons pu localiser avec précision les surfaces affectées. L'intégration des cartes de détection des feux a permis de confirmer la correspondance entre les baisses de NDVI et les zones réellement brûlées, validant ainsi l'efficacité de cette méthodologie pour la surveillance post-incendie.

L'étude met en évidence la nécessité de renforcer la surveillance et la gestion des zones à risque, notamment par des stratégies de prévention et de reboisement adaptées.

- L'analyse montre une corrélation directe entre la diminution des valeurs NDVI et la localisation des feux de forêt.
- Les cartes produites confirment que les zones brûlées correspondent aux secteurs à NDVI proche de zéro.

4. Conclusion

L'exploitation des données Sentinel-2 et l'utilisation de Google Earth Engine ont permis de détecter et cartographier avec précision les zones touchées par les incendies de forêt

en 2021. Les résultats montrent une nette dégradation de la végétation après ces incendies. L'étude met en évidence la nécessité de stratégies de surveillance continue et de gestion proactive des écosystèmes forestiers pour prévenir et limiter les impacts futurs des feux de forêt.

Les indices NDVI calculés dans le cadre de cette étude pourront être utilisés pour la mise à jour du couvert végétal appliqué pour le calcul de l'indice feux de forêt HDW (Hot-Dry-Windy) calculé dans le cadre de la vigilance feux de forêts, notamment pour la région de Tizi-Ouzou. En effet, le HDW utilise, actuellement, un couvert végétal statique issu du modèle numérique AROME. Pour cela, la correction permanente de ce couvert végétal après un incendie de forêt par le NDVI est nécessaire et permettra d'améliorer considérablement la carte de vigilance feux de forêt au niveau de l'ONM et minimisera les faux alertes sur des endroits défavorables.

Références

- [1] Drobinski, P., Alonzo, B., Bastin, S., Silva, N. D., Muller, C. (2012). Scaling and impact of land-atmosphere interactions in mesoscale models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**(1), 267-286.
- [2] Rabier, F., Järvinen, H., Klinker, E., Mahfouf, J. F., Simmons, A. (2000). The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I : Experimental results with simplified physics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **126**(564), 1143-1170.
- [3] Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., ... Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, **83**(1-2), 244-262.
- [4] Meddour-Sahar, O., Derridj, A., Malki, M. (2011). Les feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle, causes et impacts. *Revue Forêt Méditerranéenne*, **32**(3), 255-262.
- [5] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Vol. I*.
- [6] Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**(2), 127-150.
- [7] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [8] Documentation officielle de Google Earth Engine : <https://developers.google.com/earth-engine>