

CONTRIBUTION DE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE A L'ÉTUDE DES INCENDIES CATASTROPHIQUES DE 2021 DANS UN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DE L'INCENDIE DE JBEL SOUGNA AU RIF MAROCAIN

LAKHOUAJA El houcine (1), ESSALEK B. (2), NAHLI A. (3) et HANCHANE M (4)

(1) *LAKHOUAJA El houcine , (LMME) FLSH Ben M'sik, UHII Casablanca (lakhouajah@yahoo.fr)*

(2) *ESSALEK B, (SESHUL) ENS Rabat, UMV Rabat*

(3) *NAHLI A, (LEE) FS Ben M'sik, UHII Casablanca*

(4) *HANCHANE M, (LTPH) FLSHDM, USMBA Fès*

Résumé :

Les forêts du Rif marocain ont connu, lors de l'été de l'année 2021, encore une fois, le plus grand incendie de la saison à Jbel Sougna (DEF, 2021). La présente étude consiste, de la détection et de la caractérisation du feu significatif dans les zones forestières, à travers l'indice NBR (Normalisé Burn Ratio) pré et post incendie. Ensuite, on a calculé l'indice de sévérité de brûlure dNBR (delta NBR), pour estimer la gravité de la brûlure, à travers un algorithme basé sur le seuillage des canaux thermiques et l'information sur la composition du couvert végétal issue de l'IFN.

Les résultats obtenus ont montré que plus de 40% de la superficie forestière brûlée s'est régénérée après le feu. Néanmoins, plus de 46% de cette surface brûlée a subi des brûlures graves ou élevées.

Mots clés : Télédétection spatiale ; Méditerranée ; Incendie de forêts ; Indices NBR et dNBR.

Abstract :

The forests of the Moroccan Rif experienced, in the summer of 2021, once again, the biggest fire of the season in Jbel Sougna (DEF, 2021). This study consists of the detection and characterization of significant fire in forest areas, through the NBR index (Normalized Burn Ratio) pre and post fire. Then, the burn severity index dNBR (delta NBR) was calculated, to estimate the severity of the burn, through an algorithm based on the thresholding of the thermal channels and the information on the composition of the vegetation cover obtained from the 'IFN.

The results obtained showed that more than 40% of the burned forest area regenerated after the fire. Nevertheless, more than 46% of this burned area suffered severe or high burns.

Keywords: Remote sensing; Mediterranean; Forest fire; NBR and dNBR index.

Introduction

Au regard du bilan des feux de forêt des pays du bassin méditerranéen, la situation du Maroc se démarque très fortement par rapport aux pays voisins. Le centre marocain de lutte contre les incendies révèle, en moyenne, 295 incendies déclarés en forêts ravageant 2980 ha par an (période de 1960-2020). Des maxima ont été enregistrés en 1983 et 2004 avec respectivement 11000 ha et 8660 ha de surfaces brûlées. Ces incendies sont caractérisés par une répartition spatiale et temporelle hétérogène. La région du Rif marocain est la plus affectée, en enregistrant annuellement en moyenne près de 170 incendies et en perdant près de 1600 ha de surface forestière. Une forte pression de mise à feu est localisée, pendant cette dernière période, dans la province de Chefchaouen.

L'été 2021 est marqué par des incendies spectaculaires et meurtriers dans le bassin méditerranéen. Le total des superficies parcourues par les feux dans cette région, est deux fois et demi-supérieur à la moyenne par rapport à la période 2008-2021 (effis.jrc.ec.europa.eu). Les causes

ont été associées au changement climatique, et surtout aux vagues de chaleurs (DEF, 2021). Pendant les mois de Juillet et d'Août 2021, les forêts marocaines ont subi, à l'instar des autres forêts Méditerranéens, de violents feux de forêts. Entre le 9 et le 11 juillet 2021, les conditions climatiques extrêmes ont contribué au déclenchement et à la propagation de 20 incendies ayant détruit plus de 1200 hectares de forêts marocaines, selon le bilan du Département des Eaux et Forêts.

Après l'analyse du bilan des incendies survenus en forêts marocaine et établi par le centre de lutte contre les incendies de forêts (DEF), on constate que le plus grand incendie de cette saison 2021 est enregistré dans la forêt de Jbel Sougna située dans la province de Chefchaouen, dans la mesure où il a ravagé au mois d'Août plus de 1.100 hectares de végétation. Ce sinistre a demandé plusieurs jours d'intervention pour que le feu soit maîtrisé complètement (DEF. 2021).

L'objectif principal de cette étude est d'identifier et d'analyser les changements spatio-temporels de la zone brûlée avec une grande précision à l'aide des données issues du satellite Sentinel 2 (JUSTICE et al. 2006 ; GHESLAGHI et al. 2020).

1. Présentation de la zone d'étude :

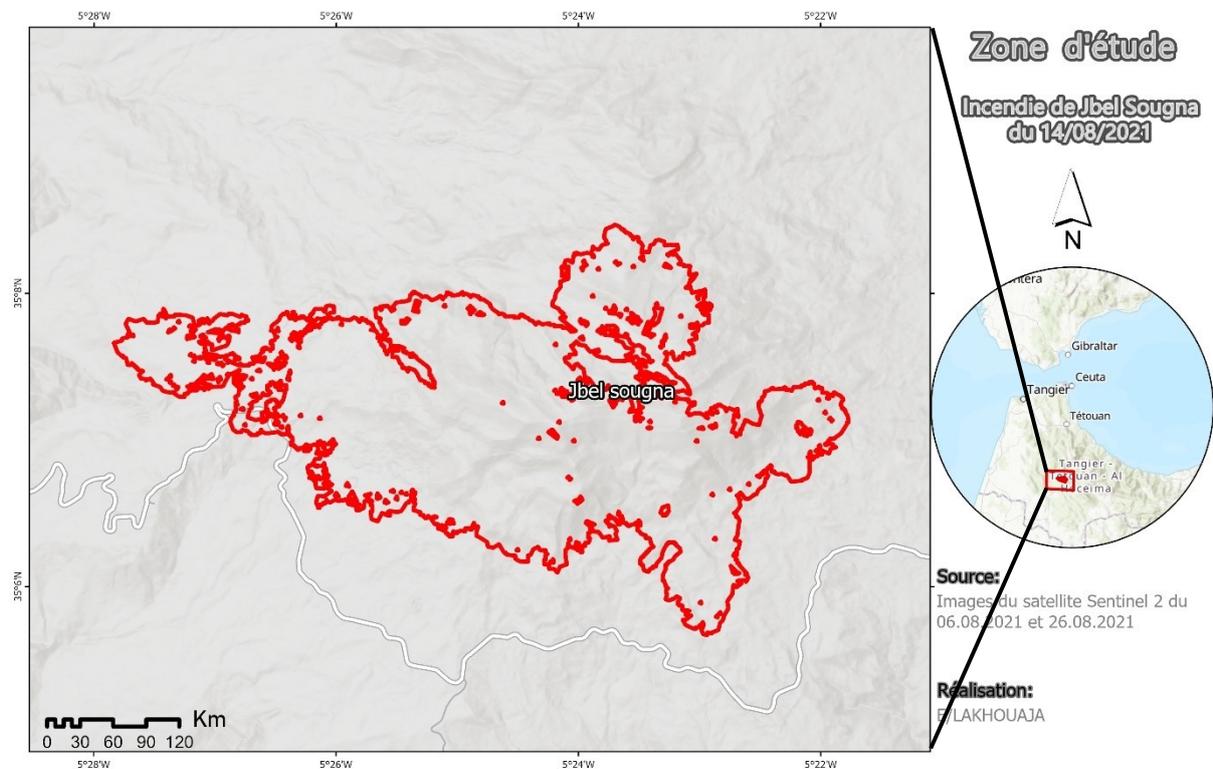


Figure 1 : Localisation géographique de l'incendie de Jbel Sougna du 14/08/2021 (Province de Chefchaouen)

La zone d'étude s'étale entre les latitudes Nord 35°6' et 35°9' et les longitudes Ouest 5°22' et 5°28', sur une surface qui s'élève à 1876 Ha dans l'unité montagnarde de Jbel Sougna, du piémont jusqu'au sommet, entre les altitudes 600 m et 1598 m (point culminant). Elle se situe au Sud-Ouest de la ville de Chefchaouen dans le Rif Occidental marocain. Administrativement, elle appartient à la région Tanger-Tétouan-Al Hoceima (Figure 1).

Du point de vue géologique, ce territoire est essentiellement constitué de Flyschs et de Grès (EL GHARBAOUI, 1981). La majorité de la zone brûlée du massif de Jbel Sougna s'insère dans les étages de végétation méso et supra-méditerranéens caractérisant les massifs montagneux dont les précipitations dépassent la moyenne de 2 000 mm par an, caractérisant un bioclimat humide (BENABID, 1984).

2. Données satellitaires et traitements préalables

Les satellites d'observation de la terre ont l'avantage de fournir des images des espaces naturels en temps quasi-réel, encourageant ainsi le développement de méthodes alternatives d'évaluation de l'état des forêts incendiées. Pour l'étude de la sévérité d'un incendie dans une forêt, les données du satellite Sentinel-2, avec treize canaux spectraux assurant la capture de l'état de la végétation, fournissent une couverture mondiale périodique avec une résolution de 10 à 60 m dans les zones spectrales du visible, du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge courte (SWIR). La présence de deux satellites dans l'orbite du domaine méditerranéen permet des relevés répétés tous les 2 ou 3 jours (scihub.copernicus.eu).

L'Open Access Hub offre un accès gratuit aux produits Sentinel-2, à partir des archives de données de l'European Space Agency (ESA) (<https://scihub.copernicus.eu>). Il convient de noter que la haute résolution spectrale et spatiale des images Sentinel 2 permet la détection et la cartographie des incendies à une signature spectrale allant jusqu'à 10 m de résolution spatiale.

Pour cette étude, nous avons opté pour les images multispectrales du Sentinel 2, en utilisant les bandes de proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge courte (SWIR). Deux images ont été choisies selon plusieurs critères (couverture nuageuse, erreurs de prise, dates) et correspondent à deux dates afin d'encadrer la période de l'incendie : la première est prise le 06/08/2021, soit une semaine avant l'incendie, et la deuxième est prise le 26/08/2021, soit dix jours après.

Tableau 1 : Images retenues pour l'étude

	Image du 06/08/2021	Image du 26/08/2021
<i>Date</i>	2021-08-06 Time 11 :01 :51	2021-08-26 Time 10 :59 :45
<i>Satellite</i>	Sentinel-2	Sentinel-2
<i>Satellite number</i>	A	A
<i>Instrument name</i>	Multi-Spectral Instrument (MSI)	Multi-Spectral Instrument (MSI)
<i>Cloud cover percentage</i>	1.626007	1.7254103

La combinaison colorée des bandes spectrales du Rouge, du proche infrarouge et de l'infrarouge courte, des images Sentinel retenues (avant et après l'incendie), a reflété une signature spectrale permettant la caractérisation de la zone incendiée par une simple interprétation visuelle. Les taches de couleur rouge sur l'image signifient une zone brûlée. L'étendue de la superficie brûlée s'élève donc à 1857 Ha.

Les différentes bandes spectrales de ces images ont subi des calibrations radiométriques et des corrections géométriques et atmosphériques, avant de servir pour le calcul des indices retenus (AVTAR et al., 2019 ; LUO et al., 2019).

L'information sur la composition du couvert végétal de la zone d'étude a été préparée à partir de la couche de l'Inventaire National Forestier (IFN) de 2006, sur la base des traitements de la photographie aérienne à très haute résolution spatiale. Leurs validations ont été effectuées avec des missions de terrain menées par des ingénieurs forestiers.

Enfin, des relevés floristiques par placettes et d'autres informations mises en ligne dans l'application web (www.sysfeu.com) conçue par le département des eaux et forêts marocain, ont été utilisés pour compléter et valider les données.

3. Méthodologie

La détection des zones forestières brûlées par un incendie est basée sur la différence de contraste des bandes du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge courte (SWIR). Deux indices ont été adoptés lors de cette étude pour identifier et analyser les zones brûlées en se basant sur les données émanant du satellite Sentinel 2.

L'indice NBR (Normalized Burn Ratio) est utilisé en science écologique pour déterminer la gravité d'un incendie et les endroits concernés. Il est calculé à partir de deux images relatives à deux dates encadrant le jour de l'incendie. Cet indice est calculé selon la formule suivante (COCKE et al., 2005 ; Miller et al., 2007 ; ESCUIN et al., 2008) (Figure 2) :

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

La fréquence et la gravité de l'incendie sont déterminées en distinguant ces deux couches d'indice selon la formule de l'indice dNBR suivante :

$$dNBR = (NBR^{\text{Pre-fire}} - NBR^{\text{Post-fire}})$$

Une plage de valeurs élevées de dNBR indique des dommages plus graves et des valeurs de plage négatives suggèrent une productivité de la végétation après un incendie. Cette formule utilise la différence significative des coefficients de réflexion dans les canaux spectraux des bandes NIR et SWIR, correspondant à la forêt saine et aux territoires incendiés. Tout d'abord, les déplacements des pixels brûlés et non brûlés dans les espaces bispectraux SWIR et NIR avant/après le feu, ont été analysés pour discriminer les niveaux de gravité. Après, nous avons évalué la gravité de l'incendie, en faisant la distinction entre les pixels brûlés et non brûlés en fonction de la valeur de l'indice NBR avant et après incendie (ALGANCI et al., 2010 ; TARIQ A et al., 2021). Les seuils calculés pour ces indices ont permis une hiérarchisation de l'espace incendié selon les niveaux de gravité allant d'un non brûlé ou gravité faible, modérée et élevée jusqu'aux espaces ayant subi une haute gravité de brûlure (VERAVERBEKE et al., 2011 ; PARKS et al., 2014 ; MALLINIS et al., 2018). Ensuite, nous avons analysé la réponse de la végétation forestière avec différentes sévérités de l'incendie en utilisant l'information sur la composition floristique dérivée de la couche de l'IFN.

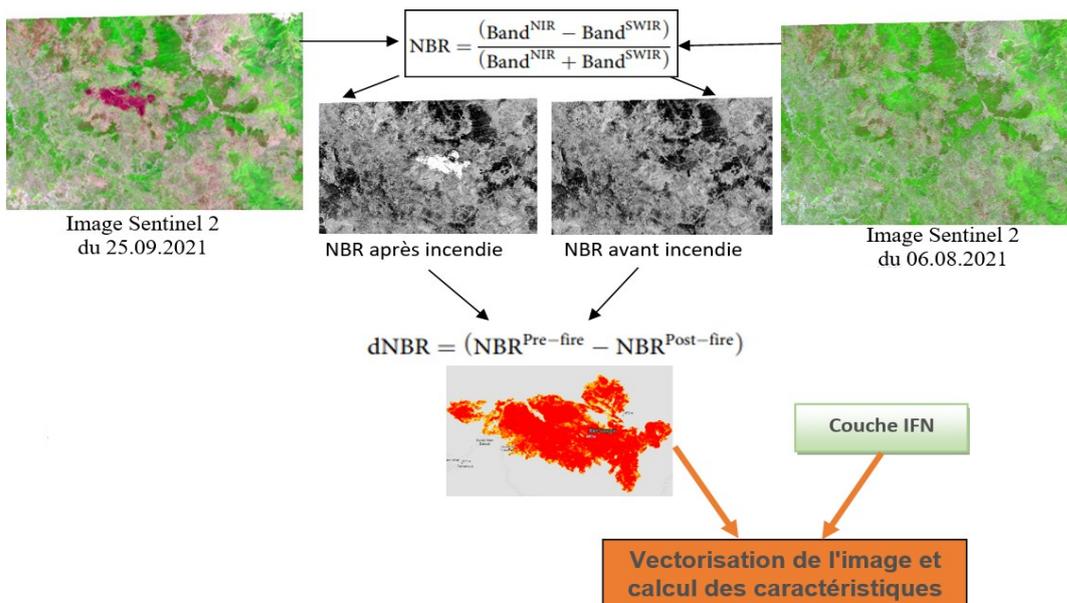


Figure 2 : Organigramme méthodologique

4. Résultats :

La carte de l'indice NBR avant incendie illustre des taux élevés, compris entre 0.3 et 1 au sein du polygone étudié, indiquant ainsi une végétation saine. Après l'incendie, on constate des faibles valeurs de l'indice NBR comprises entre -0.82 et 0 indiquant un sol nu et des zones brûlées. Les surfaces non brûlées ont généralement des valeurs proches de zéro.

La zone gravement brûlée, normalisée par des valeurs élevées de l'indice dNBR, reflète des niveaux de sévérité d'incendie élevés et hauts qui s'étalent sur d'environ 46% de la surface de la zone étudiée. Cette surface concerne principalement les formations arborées denses de chêne liège et les reboisements de pins. Ainsi, l'indice dNBR indique des superficies considérables de la zone étudiée (plus de 40 %) ayant connu des croissances après le feu et que 3 % de la zone étudiée se situe dans les niveaux de sévérité des zones non brûlées (Figures 3).

La superposition de la carte de l'indice dNBR et de la couche des essences forestières, dévoile que les valeurs élevées de l'indice dNBR concernent les peuplements denses des formations arborées de chêne liège et de Pins (70% de la superficie étudiée). Par contre, les strates herbacées (des essences secondaires) et arbustives du matorral sont les moins parcourues par l'incendie (30% de la superficie étudiée). En conséquence, les dégâts graves se sont produits dans les zones à haute densité et stratification.

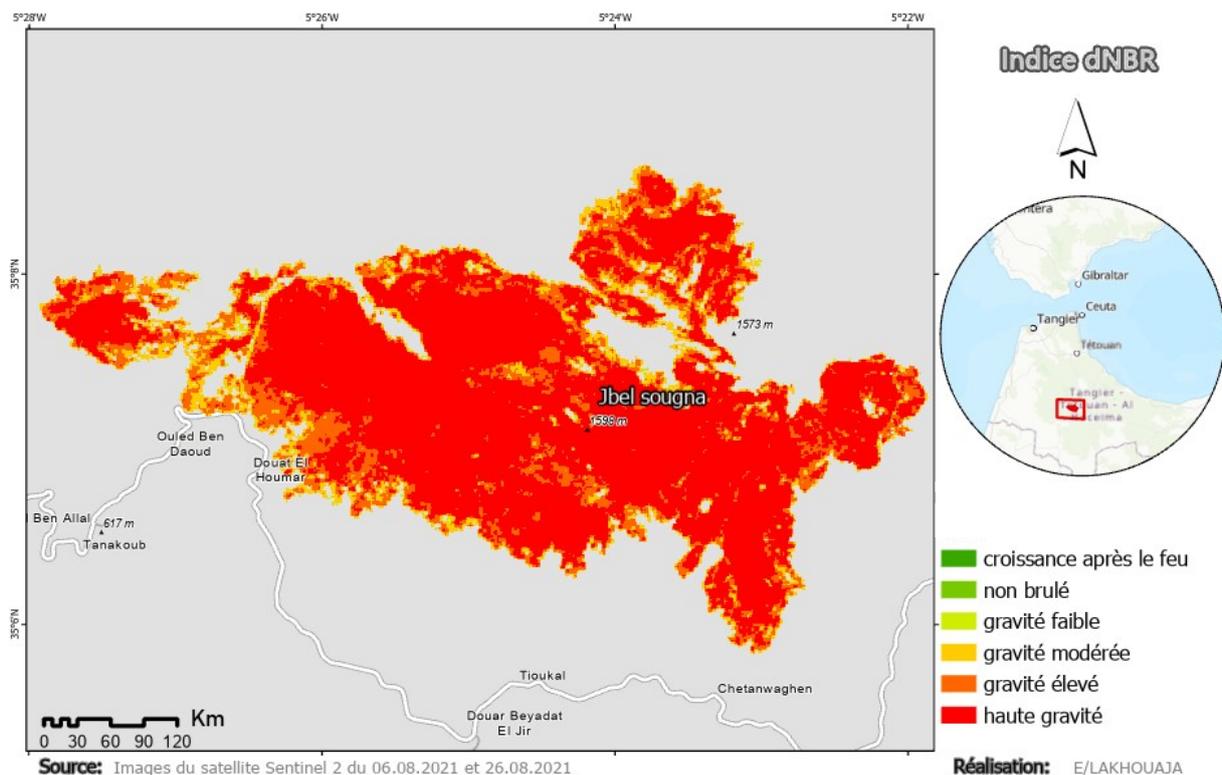


Figure 3 : Carte des classes d'indice dNBR de la zone étudiée

5. Conclusion

Les incendies de forêt constituent un défi contemporain majeur pour la conservation des ressources forestières dans le Rif marocain. Leur détection à l'aide d'images satellites à haute résolution spatiale (Sentinel 2) est l'un des moyens potentiels pour identifier et mesurer leur gravité.

L'estimation de la superficie brûlée au niveau de Jbel Sougna pendant le mois d'Août 2021 à l'aide des images Sentinel 2, a dévoilé un grand décalage entre la superficie déclarée par le Département des Eaux et Forêts (1100 Ha) et celle extraite automatiquement des images Sentinel 2 (1876 Ha). Ainsi

la télédétection spatiale permet d'augmenter la fiabilité des données sur la superficie des forêts brûlées.

En combinant l'information satellitaire et l'inventaire forestier, il a été constaté, que dans certaines zones à couverture forestière dense et arborée (Chêne liège et Pins), des gravités de brûlure majeures se sont produits. Ces résultats peuvent aider à élaborer des plans de réhabilitation et de restauration d'urgence après l'incendie. Dans cette étude, l'importance de la télédétection dans l'analyse et la détection des incendies de forêt est soulignée.

Bibliographie :

- Gong A., Li, Y. J., Yang, Y., Chen, T., Zeng, J., Wu, J., Li, Chen, Y., H. Tang, Yue J., 2020 : *ANALYSIS OF RESPONSE AND RECOVERY OF VEGETATION TO FOREST FIRE*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2020, 2020 XXIV ISPRS Congress (2020 edition) pp 1207-1212.* <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1207-2020>
- Abedi Gheshlaghi H., Feizizadeh B. & Blaschke T. ,2020 : *GIS-based forest fire risk mapping using the analytical net work process and fuzzy logic.* *Journal of Environmental Planning & Management*, 63(3), 481-499.
- ALGANCI Ugur, SERTEL Elif, and ORMECI Cankut, 2010 : *Forest Fire Damage Estimation Using Remote Sensing and GIS*, *Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage*, Rainer Reuter (Editor) EARSeL, 2010.
- Avtar R, Sahu N, Aggarwal AK, Chakraborty S, Kharrazi A, Yunus AP, Dou J, Kurniawan TA. 2019 : *Exploring renewable energy resources using remote sensing and GIS—a review.* *Resources*. 8(149):23.
- Benabid, A. ,1984 : *Étude phytoécologique des peuplements forestiers et pré-forestiers du Rif centro-occidental (Maroc).* *Trav. Inst. Sci. Sér. Bot.* 34. Rabat.
- Cocke, A. E., Fulé, P. Z., & Crouse, J. E., 2005 : *Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data.* *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 189–198
- DEF 2021 : *Rapport sur les incendies de forêts, Département des eaux et forêts* 52 p. Maoc
- DEF, 2020 : *Rapport sur les incendies de forêts, Département des eaux et forêts* 48 p. Maoc
- El Gharbaoui, A. ,1981 : *La terre et l'homme dans la péninsule tingitane : Etude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif Occidental.* *Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie Géographie Physique*, 15, 1-439.
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernandez, P., 2008 : *Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images.* *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053–1073.
- Hnatushenko, Vik V., Vik Hnatushenko, D. K. Mozgovyi, and V. V. Vasiliev., 2016 : *"Satellite Technology of the forest fires Effects Monitoring."* *Scientific Bulletin of National Mining University*, vol. 1, 2016.
- IFN, 2006 : *Couche Shapfil de l'inventaire forestier*, Maoc.
- Justice C, Giglio L Boschetti L., Roy D; Csiszar, I., Morisette J. & Kaufman Y., 2006 : *Modis Fire Products (Version 2.3, 1 October 2006) on line visited 06/10/08* http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf
- LAKHOUAJA El houciné, Faleh Ali et Chaouan Jamal, 2019 : *'Modélisation de risque d'incendies de forêts : Indice de risque temporel Cas de la commune rurale de Bab Taza, Province de Chefchaouen*, *Travaux du 3ème congrès des jeunes géographes marocaines* ISBN : 978-9920-37-409-5, pp.129-142.
- Luo Z, Ding S., 2019 : *Object detection in remote sensing images based on GaN.* *ACM Int Conf Proceeding Ser.* 57(6) : 499–503
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., & Chrysafi, I.,2018 : *Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece.* *GIScience & Remote Sensing*, 55(1), 1–18.
- Miller, J. D., & Thode, A. E.,2007 : *Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR).* *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80.
- Parks, S. A., Dillon, G. K., & Miller, C.,2014 : *A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio.* *Remote Sensing*, 6(3), 1827–1844

Tariq A, Shu H, Saddiqui S, Mousa BG, Munir I, Nasri A, Waqas H, Baqa MF, Lu L ,2021 : *Forest fire monitoring using spatial-statistical and Geo-spatial analysis of factors determining forest fire in Margalla Hills, Islamabad, Pakistan. Geomatics Nat Hazards Risk. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1920477>*

Veraverbeke, S., Harris, S., Hook, S.,2011 : *Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. Remote Sensing of Environment, 115(10), 2702–2709*