

Est-ce que les plantations de palmiers dattiers (PPD) et l'oasification peuvent être utilisées comme moyen de lutte contre la désertification et l'ensablement dans les zones arides?

Ali Mihi^{1,3}, Nacer Tarai²

¹ Université Larbi Tébessi, Faculté des Sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie, Tébessa (Algérie).

² Université Biskra, Faculté des Sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie, Biskra (Algérie).

³ Université Sétif 1, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sétif (Algérie).

e-mail: mihialeco@gmail.com, ali.mihi@univ-tebessa.dz

Résumé. Le secteur agricole a été témoin une grande expansion des agroécosystèmes Sahariennes dans le sud-est de l'Algérie, en adoptant de nouvelles technologies et de programmes agricoles pour développer le secteur. La présente étude consiste à tester l'effet des PPD (*Phoenix dactylifera* L) sur le phénomène de la désertification en utilisant les outils Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection. Une étude spatio-temporale a été réalisée à partir de trois images satellitaires (TM-1984, ETM+-1999, et OLI-2013). Une classification supervisée par maximum de vraisemblance a été utilisée pour quantifier l'évolution des PPD sur les dernières trois décennies, tandis que quatre indices de télédétection ont été extraits en tant qu'indicateurs de processus de désertification dans la zone d'étude : Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Salinity Index (SI-T), and Crust Index (CI). Le modèle mixte linéaire généralisé (GLMM) a été appliqué pour tester l'effet de l'année et de la «présence / absence» de PPD pour NDVI; année, PPD et NDVI pour CI et NDMI; année, PPD, NDVI et NDMI pour SI-T. La superficie des PPD est quadruplée au cours des trois dernières décennies avec une augmentation de 4822 ha (plus de 0,5 million d'arbres). Présence DPP influencé positivement NDVI, NDMI et CI, mais affecté négativement SI-T. Des relations très significativement positives ont été trouvées entre NDVI — PPD, NDVI — NDMI et NDVI — CI, bien que des relations significativement négatives aient été obtenues entre SI-T — NDVI et SI-T — NDMI. Les résultats ont révélé le potentiel des PPD pour contrôler et pour atténuer la désertification dans les zones arides chaudes issue de l'efficacité des programmes stratégiques de politique agricole Le Présent document rapporte, le potentiel et l'opportunité de Système d'Information géographique (SIG), et Télédétection comme des outils efficace pour cartographier, évaluer les changements ou les dégradations environnementales à long terme et avec un coût relativement faible dans les régions sahariennes.

Mots-clés. Agroécosystème - PPD (*Phoenix dactylifera* L) - Désertification - SIG - Télédétection – Imagerie par satellite.

Can date palm plantations (DPP) and oasification be used as a means for combating desertification and stranding in arid zones?

Abstract. Large Saharan agriculture in south-eastern of Algeria have been witnessed into highly agro-ecosystems farming expansion, by adopting new technologies and Agriculture programs to develop the sector. The dissertation aim is to show the agricultural mutation impact by highlighting the effect of date DPP (*Phoenix dactylifera* L) on desertification phenomenon in desert oasis (Eastern Algerian desert,) based on remote sensing and GIS tool. A spatiotemporal study was conducted using three Landsat satellite images (TM-1984, ETM+-1999 and OLI-2013). Likelihood supervised classification was used to quantify DPP change, as well as four remote sensing indices was extracted as indicators for desertification process in the study area; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Salinity Index (SI-T), and Crust Index (CI). The generalized linear model (GLM) was applied to test the significance of relationship between the response variables (NDVI, NDMI, SI-T and CI values) and explanatory variable (presence/absence of DPP) over study period. The results revealed that the DPP area and numbers quadrupled over the last three decades with 4822 ha, and more than 0.5 million date palm trees, respectively. High significance positive relationship was founded between (NDVI-DPP), (NDMI-NDVI),

and (CI- NDVI), although a high negative significance relationship occurred between (SI-T-NDVI and NDMI) at 95% confidence intervals. Hence, DPP area appeared highest NDVI, NDMI, and CI values, with lowest SI-T values compared desert area. The results yielded the potential of DPP in desertification controlling and mitigation, as result of drastic and efficient political agricultural programs. The ability of Remote sensing image processing technique for monitoring and rapid detection of land change in desert oases Landscape with accuracy and relatively low cost over a long-time period and large regions using medium resolution Satellite data.

Keywords. Agroecosystems - DPP (*Phoenix dactylifera* L) - Desertification - Remote sensing - GIS - Satellite imagery.

I - Introduction

La désertification est La dégradation des sols en région aride et semi-aride sous l'effet des changements climatiques et de l'activité humaine (ONU, 1994). Les régions les plus sensibles à ce phénomène sont celles où les précipitations sont comprises entre 300 et 200 mm par an et qui sont localisées sur les franges des déserts (Ramade, 2005, 2008). Les causes de la désertification sont multiples et complexes : des causes directes (climatiques et humaines) et des causes indirectes (facteurs sociaux, économiques et politiques) (Siddig, 2000; Nahal, 2004; Ouadah, 2007). La dégradation de terre et la désertification se produisent partout, mais plus remarquable dans les régions aride, qui couvrent approximativement 40% du superficie mondiale, et soutiennent deux milliards de personnes, 90% d'entre eux vivent les pays en voie de développement : L'Afrique, l'Asie et l'Amérique latine (Reynolds *et al.*, 2007 ; Nater *et al.*, 2008; UNCCD, 2008; Lal *et al.*, 2012). Actuellement, l'évaluation du risque de désertification, le suivi et la lutte contre la désertification restent un défi pour les scientifiques, les décideurs dans le monde entier (Chasek *et al.*, 2015; Gnacadja, 2015; Liu *et al.*, 2015; Elsen and Jetten, 2015).

Sur les 238 millions d'ha de l'Algérie, 200 millions d'ha sont occupés par la zone saharienne où les infrastructures socio-économiques sont soumises à un ensablement résultant d'un développement souvent incohérent et d'une exploitation anarchique des ressources de ces milieux sensibles. Sur les 380 millions d'ha du nord du pays, 36 millions d'ha forment la steppe et le présaharien, zone aride et semi-aride très sensible aux processus de désertification, et caractérisée par un surpâturage chronique (Ali, 2006; Melouhi, 2006). D'après la carte nationale de sensibilité à la désertification établie sur les 20 millions d'hectares de steppe fait ressortir que près de 8 millions ha sont désertifiés ou menacés par la désertification. En générale 87 % du nord de l'Algérie présente une forte à très forte sensibilité à la désertification (M'hamed, 2005).

Les oasis constituent des écosystèmes très particuliers (caractères physiques, climatiques, écologiques et sociaux spécifiques). Elles sont formées par la superposition de deux systèmes, l'un naturel en limite d'amplitude bioécologique, et l'autre artificialisé ; tous deux sont fortement conditionnés par les ressources hydriques (MATE, 2002; Shanzhong et Xiaoyu, 2010). L'oasis est un écosystème fertile dans des zones de désert, fortement dépendantes des ressources en eau, dans lequel l'agriculture fait partie des principales activités humaines (Shanzhong et Xiaoyu, 2010). Elle est structurée en végétation multi-strates composées d'espèces de plantes sauvages et cultivées, et dominée par une canopée, au-dessous de laquelle une grande biodiversité animale et végétale se produit dans la strate inférieure de la végétation (Gebauer *et al.*, 2007; Guezoul *et al.*, 2013). La dynamique des oasis dans les terres arides a deux tendances opposées : (i) l'oasification qui fait référence à l'expansion des oasis, et (ii) la désertification induisant la contraction des oasis (Xie *et al.*, 2015).

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une monocotylédone appartenant à la famille des Palmacées; la seule famille rattachée à l'ordre des Palmales. Cette famille renferme environ 225 genres et 2600 espèces, et peut être divisé en trois variétés en fonction de la dureté du

fruit: variété humide, variété demi-seche, et variété seche (Al-Shayeb *et al.*, 1995). L'espèce a révélé une tolérance élevée contre les conditions chaudes et un certain degré de salinité du sol (Tengberg, 2014). Le palmier dattier est l'une des cultures commerciales les plus cultivées dans les régions désertiques du monde (Al-Khayri *et al.*, 2015a, 2015b).

De nombreuses études se sont focalisées sur l'efficacité des méthodes biologiques de lutte contre la désertification à l'aide de diverses espèces végétales bien adaptées (Liu et Liu, 2001; Lu, 2001; Mubiru; 2001; Hooke et Setercock, 2012; Neffar *et al.*, 2013).

Le rôle des plantations de palmiers dattiers (PPD) dans l'arrêt de l'ensablement et l'atténuation de l'avancement de la désertification dans les déserts chauds a été rapporté dans plusieurs travaux (Bekheet et El-Sharabasy, 2015 ; Sedra, 2015 ; Salah, 2015 ; Khierallah *et al.*, 2015; Al-Yahyai *et al.*, 2015). Néanmoins, aucune étude jusqu'à ce jour n'a clairement prouvé l'impact du PPD sur les tendances de la désertification à grande ou à petite échelle. En outre, l'objectif de cette étude vise à démontrer le potentiel des PPD dans la lutte contre la désertification dans le Sahara d'Algérie, afin de promouvoir un système agro-écologique durable dans les oasis Algériennes. De plus, montrer le potentiel de l'utilisation du Système d'information Géographique pour suivre et détecter le changement de l'environnement avec exactitude et un coût relativement bas.

II - Matériels et Méthodes

1. Présentation de la région d'étude

Située dans une zone, fortement aride et hostile, le système oasien de Ziban est subi d'une grande dégradation de terre : recul de couvert végétal naturel, ensablement, urbanisation, surpâturage...wilaya de Biskra est située à l'Est du pays, et plus exactement au Sud des Aurès qui constituent sa limite naturelle au Nord. Elle s'étend au Sud-Est jusqu'à la zone des Chotts (Chott Melghir) et au Sud-Ouest jusqu'au commencement du grand Erg oriental. D'une superficie de 22 379,95 km², la Wilaya de Biskra est limitée part (ANAT, 2003) : la Wilaya de Batna au Nord, la Wilaya de M'Sila au Nord-Ouest, Djelfa au Sud-Ouest, la Wilaya d'El Oued au Sud, et la Wilaya de Khenchela au Nord et à l'Est. Elle se situe dans une zone semi-aride à semi-désertique (Figure 1). La zone d'étude couvre une superficie de ~ 890 km². L'activité humaine principale dans cette région est l'agriculture, où la culture permanente est le PPD. La région se caractérise par un climat Méditerranéen saharien avec un été chaud et sec et un hiver doux. Les sols appartiennent à trois classes : les sols peu évolués, les sols alluviaux et calcimagnésiens.

2. Acquisition des données

Trois images satellites ont été utilisées dans cette étude : (i) Landsat 5 TM acquis en juin 1984, (ii) Landsat 7 ETM + pris en juillet 1999, et (iii) Landsat 8 OLI acquis en juin 2013 (Path 194, Row 036, Projection : UTM Zone 31 N, Résolution spatiale : 30 m, Dimensions: 805x705 pixels). Toutes ces images ont été acquises en été. Vicente-Serrano *et al.* (2008) ont noté que la couverture nuageuse est moins importante pendant les mois d'été, et qu'il est plus approprié de surveiller et d'analyser l'activité de la végétation. Les images ont été recueillies à partir des archives USGS Landsat (L1T) disponibles sur <http://glovis.usgs.gov>. Elles ont une résolution spatiale de 30 m avec moins de 1% de couverture nuageuse (CN) sur la zone d'étude pour Landsat 8 et 0% pour Landsat 5 et 7.

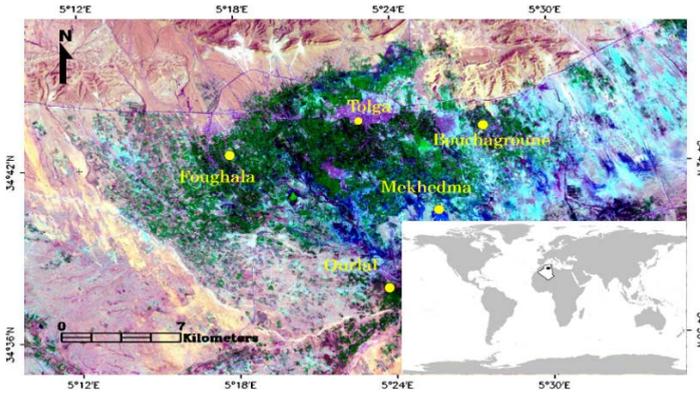


Figure 1. Zone d'étude, scène Landsat 8 OLI pour l'année 2013 (Composition fausse couleur RGB, Bandes 7-5-2).

3. Correction géométrique

Les corrections ont été effectuées grâce à l'acquisition des points amers figurant à la fois sur la composition colorée et sur l'image de référence. Toutes les images ont été corrigées à partir de l'image de référence (scène OLI 30/06/2013) à la zone de projection 31 UTM (Universal Transverse Mercator) Nord avec le système mondial géodésique (WGS) 1984. La méthode du plus proche voisin a été utilisée pour l'interpolation. Lors du traitement des données géomatiques, nous avons utilisé deux types de logiciels : ENVI 4.5 (logiciel de détection à distance) pour analyser les images satellitaires, et MapInfo 9.0 (logiciel SIG) pour créer, convertir, et combiner les données géographiques.

A. Calibration radiométrique

L'homogénéité temporelle de l'ensemble de données est nécessaire pour effectuer une étude comparative. Dans l'ensemble, la réflectance du haut de l'atmosphère (TOA) a été largement acceptée pour l'étude du changement de l'occupation des sols et de la couverture végétale (LU / LC). Par conséquent, des corrections radiométriques complexes n'ont pas été nécessaires (Vicente-Serrano *et al.*, 2008). La correction radiométrique des données permet de convertir le signal enregistré par le satellite dans une variable physique telle que, la luminance spectrale à la sonde et la réflectance de la TOA, exprimées en unités scientifiques fondamentales.

a) Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+

Les procédures de corrections radiométriques pour Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM +, brièvement présentées ci-après, sont recommandées par Chander *et al.* (2009) :

(i) Les différences de capteurs : transformation en luminance spectrale

Calculer les valeurs de luminance spectrale au capteur à partir de valeurs de Comptes Numériques (CNs) en éliminant le gain et le décalage provoqués par les capteurs en utilisant l'équation suivante (équation 1) :

$$L_{\lambda} = (LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / (Q_{calmax} - Q_{calmin}) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

ou: L_{λ} = la luminance apparente mesurée par les capteurs embarqués sur le satellite [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$], $LMAX_{\lambda}$ = sont des valeurs de luminances maximales de chaque capteur [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$], $LMIN_{\lambda}$ = sont des valeurs de luminances minimales de chaque capteur [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$], Q_{calmax} = le compte numérique maximale de chaque pixel de l'image [CN=255], Q_{calmin} = le compte numérique minimale de chaque pixel de l'image [CN=0], Q_{cal} = le compte numérique de chaque

pixel de l'image [CN]. Toutes les constantes en relation ont été obtenues à partir de l'étude de Chander *et al.* (2009).

(ii) Les variations d'illumination et d'angle solaire : réflectance exoatmosphérique (TOA)

La transformation de luminance spectrale au réflectance exoatmosphérique permis de réduire la variabilité scène-scène. L'équation suivante (équation 2) permet de calculer la réflectance TOA de la terre:

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * \frac{d^2}{ESUN_{\lambda}} * \cos \theta_s \tag{2}$$

Où : ρ_{λ} = TOA Réflectance [sans unité], π = Constante mathématique égale à ~3.14159 [sans unité], L_{λ} = la luminance apparente mesurée par les capteurs embarqués sur le satellite [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$], d = Distance Terre - Soleil. [unités astronomiques], $ESUN_{\lambda}$ = est l'éclairement solaire total hors atmosphère [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$], θ_s = angle zénithal solaire [degrés].

Les valeurs $ESUN_{\lambda}$ pour les images TM ont été acquises à partir de Chander et Markhem (2003), et le manuel d'utilisation des données scientifiques Landsat-7 a été utilisé pour les images ETM+ (http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/ias/hetbook/hetbook_toc.html).

b] Landsat -8 OLI

Les coefficients de calibration de réflectance fournis dans le fichier de métadonnées du produit (données de la Bande OLI) ont été utilisés pour convertir les valeurs comptes numériques (CNs) en réflectance exoatmosphérique (TOA) pour les Bandes OLI. L'équation suivante (équation 3) a été adoptée suite à http://Landsat8document/Landsat8_using_product.php.html. Tout d'abord, réflectance TOA sans correction d'angle de soleil a été calculé:

$$\rho_{\lambda}' = M_p * Q_{cal} + A_p \tag{3}$$

Où: ρ_{λ}' = TOA réflectance planétaire, Sans correction pour l'angle solaire. Nous notera que ρ_{λ}' ne contient pas de correction pour l'angle du soleil, M_p = facteur de calibration multiplicatif spécifique à la Bande à partir des métadonnées, A_p = facteur d'ajustement additif spécifique à la Bande à partir des métadonnées, Q_{cal} = le compte numérique de chaque pixel de l'image [CN]. Ensuite, la réflectance exoatmosphérique TOA est corrigée pour l'angle du soleil (équation 4):

$$\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}' / \cos(\theta_{sz}) \tag{4}$$

Où: ρ_{λ} = TOA réflectance planétaire, θ_{SE} = angle local d'élévation du soleil. L'angle d'élévation du centre de scène en degrés est fourni dans les métadonnées, θ_{sz} = angle zénithal solaire où: $\theta_{sz} = 90^{\circ} - \theta_{SE}$.

B. Analyse d'image

Pour cartographier la dynamique spatio-temporelle du PPD dans la zone d'étude, la classification supervisée par le maximum de vraisemblance a été adoptée. Des zones d'échantillonnage représentant les catégories d'occupation du sol de la région ont été recueillies au hasard à l'aide du GPS (Geographic Position System) pour une estimation plus précise de la classification. Une seule classe (PPD) a été générée dans notre cas. La matrice de corrélation des Bandes spectrales de chaque image satellitaire a permis d'obtenir les meilleures Bandes pour une bonne discrimination de surface, qui sont, le proche infrarouge (TM 7, ETM + 7 et OLI 7), le moyen infrarouge (TM 4, ETM + 4 et OLI 5), et le bleue (TM 1, ETM + 1 et OLI 2). Quatre indicateurs environnementaux ont été utilisés (La végétation, l'humidité, la salinité et l'ensablement) pour évaluer et pour surveiller les processus de désertification. Par conséquent, quatre indices spectraux (NDVI, NDMI, SI-T et CI) ont été dérivés à partir de la

réflectance spectrale des Bandes utilisées (Tableau 1). Le logiciel ENVI 4.5 a été utilisé pour tous les traitements et analyses d'images.

Tableau 1. Les indices spectraux dérivés de la réflectance des données.

Indices	Formule	Référence
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$(NIR - R)/(NIR + R)$	Rouse et al., (1974)
Normalized difference moisture index (NDMI)	$(NIR - MIR)/(NIR + MIR)$	Wilson et Sader (2002)
Salinity index-Tripathi (SI-T)	$(R/NIR) \times 100$	Tripathi et al. (1997)
Crust index (CI)	$1 - (R - B)/(R + B)$	Karnieli (1997)

B: Bande Bleu, R: Bande Rouge, NIR: Bande Proche Infrarouge, MIR: Bande moyen infrarouge.

C. Analyse des données

Le modèle mixte linéaire généralisé (GLMM) a été utilisé pour tester l'effet du PPD sur la variation des indicateurs de désertification (NDVI, NDMI, CI et SI-T) au cours des 30 dernières années (1984-2013). Les facteurs intégrés dans les modèles étaient (i) l'année et «présence / absence» de PPD pour NDVI ; (ii) année, PPD, et NDVI pour CI ; (iii) année, PPD, et NDVI pour NDMI ; (iv) année, PPD, NDVI, et NDMI pour SI-T. Pour chaque GLMM, les interactions des variables avec les PPD ont été incluses parce que les images satellites concernent la même zone où les valeurs des indicateurs / indices de désertification ont été acquises par pixel (30 m) pour chaque année. Ainsi, ils ont été considérés comme des pseudo-répliqués et le facteur «pixel» est intégré comme un effet aléatoire dans ce cas. Les paquets R nlme (Pinheiro et al., 2015) ont été utilisés pour l'analyse statistique et les calculs, tandis que le paquet ggplot 2 (Chang, 2013) a été utilisé pour tracer les graphiques.

III - Résultats et Discussion

1. Changement de PPD au cours des trois dernières décennies

Les statistiques des changements de superficie et de nombre de PPD pour les trois années sont résumées au Tableau 02. De 1984 à 1999, on observe une augmentation évidente de la superficie du PPD avec 20,13 km² (2,26%) et un nombre de palmiers dattier égale à 241574 arbres. De même, pour la deuxième période (1999-2013), une augmentation remarquable a été enregistrée dans la superficie du PPD et le nombre de palmier dattier avec respectivement 28,09 km² (3,15%) et 343 332 arbres. En général, l'augmentation a été enregistrée à la fois dans la superficie du PPD et dans le nombre de palmier dattier au cours des 30 dernières années. Les techniques de traitement d'images par satellite Landsat ont permis de suivre la dynamique et d'évaluer les tendances du PPD dans les paysages oasiens du désert. En fait, les images satellites Landsat peuvent être utilisées dans ce cas, à condition que la superficie végétale totale de palmeraie soit supérieure à 0,4 ha (Luedeling et Buerkert, 2008; Mihi et al., 2017, 2019; Mihi, 2018). Les deux pics du PPD (1999 et 2013) coïncidant d'une part, avec la première période d'extension des cultures du palmier dattier en 1984, établie dans le cadre de l'accession à la propriété foncière agricole (APFA), qui vise à promouvoir l'agriculture saharienne, et d'autre part avec un autre programme «Programme National de Développement Agricole (PNDA), 2000» qui a coïncidé avec la deuxième grande extension du PPD dans le

Sahara Algérien. Il est clair que la variété Deglet-Noor a dominé dans la zone d'étude, en raison de sa grande valeur commerciale dans le commerce local et international. La conséquence de ce modèle de monoculture est la marginalisation, et par conséquent, l'érosion génétique des variétés indigènes (valeur commerciale moins importante). L'exploitation moderne des agrosystèmes oasiens en Afrique du Nord et au Moyen-Orient a augmenté la fragilité du système oasien et a déclenché leur vulnérabilité aux stress abiotiques et aux dégradations biologiques (Idder *et al.*, 2015; Jaradat, 2015, 2016).

Tableau 2. Résumé du changement du palmier dattier pour 1984, 1999 et 2013.

Données PDD	1984	1999	2013	Changement total (1984-2013)	Taux annuel de Changement (1984-2013)
Superficie (km ²)	54,06	74,19	102,28	+48,22	+1,66
%	06,07	08,33	11,48	+5,41	+0,19
Nombre du palmier dattier *	648,745	890,319	1,233,651	+584,906	+20,169
Précision globale (%)	96,43	95	94,68		
Coefficient de Kappa (%)	95	92	94		

* Selon Bouguedoura *et al.* (2015) (1 ha = 120 palmiers dattiers).

2. Indicateurs de la désertification basés sur les plantations de palmiers dattiers

A. Effets du PPD sur l'NDVI

L'indice NDVI de la zone d'étude pour chaque année est présenté dans le Tableau 8. Les boxplots montrent une augmentation rapide de la biomasse verte au cours les années (Figure 2). La moyenne de l'NDVI est de $0,12 \pm 0,04$ (moyenne \pm écart type) en 1984, puis de $0,13 \pm 0,07$ en 1999, et elle a atteint $0,18 \pm 0,10$ en 2013. Pour chaque année, les valeurs du NDVI augmentent avec la présence de PPD, tandis que le NDVI diminue significativement avec l'absence de PPD (Figure 2 et Tableau 8).

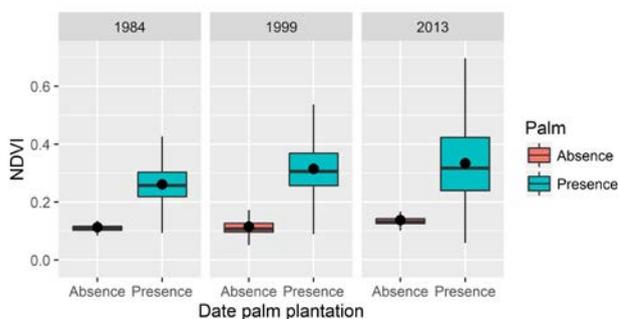


Figure 2. Variation des valeurs de NDVI dans la région de Ziban (désert du Sahara algérien) pendant la période 1984-2013 suite à la présence / absence de PPD. Les cercles pleins indiquent les moyennes.

Le GLMM a révélé des augmentations significatives importantes ($P < 0,0001$) dans les valeurs du NDVI entre les années d'étude, alors qu'il a indiqué que dans la même année, la présence de PPD a montré des valeurs de NDVI significativement plus élevées ($P < 0,0001$) par rapport à

la zone non plantée avec le PPD (Tableau 03). Généralement, les valeurs élevées de l'indice NDVI représentent la zone cultivée avec PPD. Cependant, de faibles valeurs de NDVI se rapportent à des zones non cultivées (sans PPD). Les valeurs élevées de NDVI indiquent la végétation boisée, dans ce cas les vergers de PPD où leur activité photosynthétique est plus élevée, comme il a été noté par Luedeling et Buerkert (2008), comparativement aux communautés de plantes désertiques dispersées, caractérisées par de faibles valeurs de NDVI. Lamchin et al. (2016), rapportent que les valeurs du NDVI sont fortement recommandées pour différencier entre les zones désertifiées et non désertifiées. En effet, les zones affectées par la désertification ont été caractérisées par des valeurs de NDVI <0,50, autrement dit, les zones non désertifiées ont des valeurs supérieures à ce seuil.

Tableau 3. GLMM relatif aux effets des années, présence / absence de PPD, et leur interaction 'année' PPD 'sur le changement du NDVI

Variables	Valeur	Std. Erreur	DDL	t-théorique	p-valeur
Interception	0,114	4,3E-05	1979339	2669,32	<0,001
Année 1999	0,003	5,3E-05	1979339	55,60	<0,001
Année 2013	0,026	5,5E-05	1979339	462,97	<0,001
Présence de PPD	0,125	1,7E-04	1979339	747,47	<0,001
Année 1999 x Présence de PPD	0,049	2,0E-04	1979339	238,82	<0,001
Année 2013 x Présence de PPD	0,059	1,8E-04	1979339	319,51	<0,001

B. Influences du NDVI et du PPD sur le CI

Les valeurs de CI varient significativement entre les années ($P < 0,0001$) avec une moyenne de $0,77 \pm 0,04$, $0,79 \pm 1,09$ et $0,79 \pm 0,08$ respectivement pour les années 1984, 1999 et 2013 (Tableau 8). Le GLMM indique que l'augmentation observée entre l'année est statistiquement significative. Une relation positive significative ($P < 0,0001$) est obtenue entre les deux indices NDVI et CI. Les valeurs de CI augmentent avec l'augmentation des valeurs de NDVI. Par ailleurs, la présence de PPD induit une augmentation significative de l'indice de CI ($P < 0,0001$) (Tableau 4 et Figure 3).

Tableau 4. Résultats de la GLMM relatifs aux effets des variables 'Année', 'PPD' et 'NDVI' sur CI

Variables	Valeur	Std. Erreur	DDL	t-théorique	p-valeur
Interception	0,689	4,2E-05	1979340	16220,21	<0,001
Année 1999	0,012	2,2E-05	1979340	551,06	<0,001
Année 2013	-0,016	2,5E-05	1979340	-642,30	<0,001
Présence de PPD	0,009	6,0E-05	1979340	150,75	<0,001
NDVI	0,639	2,8E-04	1979340	2253,10	<0,001

En fait, les valeurs élevées de l'indice CI se réfèrent à des zones avec PPD, alors que de faibles valeurs de CI indiquent des zones avec des communautés de plantes psammophytes qui se trouvent dans les dunes de sable, ou simplement des sols dénudés avec une végétation

désertique dispersée et clairsemée. Lorsque les valeurs de CI varient entre 0,56 et 0,78, cela indique un paysage de végétation sableuse (Karnieli, 1997). Les dunes de sable actives et mobiles sans couverture végétale possèdent des valeurs de CI $\leq 0,56$ et des valeurs de NDVI $\leq 0,01$ (Maman *et al.*, 2011). La relation négative entre la couverture végétale verte et l'ensablement est en accord avec l'étude de Wang (2013), qui a signalé que l'ensablement diminue avec l'augmentation de la couverture végétale. Zhou *et al.* (2004) ont affirmé également que la teneur en sable dans le sol oasien est plus faible par rapport à la teneur en argile. Wang (2013) a rapporté qu'il existe une relation solide entre la salinisation et l'ensablement dans les zones désertiques, parce que l'évaporation continue de l'eau provoque une augmentation progressive de l'accumulation de sels dans le sol, qui déclenche à son tour la dégradation et la diminution de la couverture végétale naturelle en raison du stress abiotique et / ou biotique. Pratiquement, les PPD de la région de Ziban sont situées dans un couloir de vent de mouvement du sable à partir du bassin de Hodna vers les grands Ergs algériens orientaux dans le Sahara, ce qui explique la répartition des dépôts de sable dans les oasis abandonnées à l'Ouest de la zone d'étude (Boureboune et Benazzouz, 2009). Par conséquent, la direction de l'ensablement commence du Nord-Ouest vers le Sud-Est de l'Algérie (Ballais, 2005). Ainsi, de nombreuses espèces de plantes ont été enterrées sous les masses de sable et remplacées par des taxons de végétation de dunes de sable, comme les communautés psammophytiques.

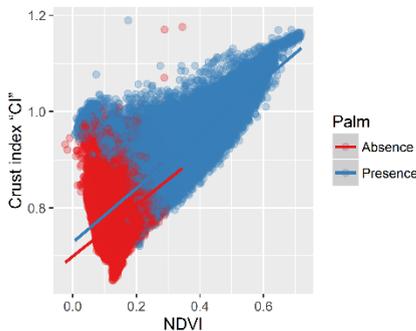


Figure 3. Relation entre CI et NDVI par présence / absence de PPD (à gauche) et changement de l'indice CI entre 1984, 1999 et 2013 (à droite). Les lignes représentent une régression linéaire avec un modèle linéaire généralisé (GLM). Les cercles pleins dans les boxplots indiquent les moyennes de CI.

C. Influence du NDVI et du PPD sur NDMI

Tableau 8 illustre les sorties des valeurs d' NDMI pour 1984, 1999 et 2013 dans la région du Ziban. Les valeurs de l'indice NDMI montrent une petite différence entre les trois années. En 1984, le NDMI atteint une moyenne de $-0,03 \pm 0,07$, puis augmente jusqu'à $-0,01 \pm 0,08$ en 1999 pour atteindre $-0,01 \pm 0,11$ en 2013. Le GLMM révèle que ces augmentations sont significatives entre les années. De plus, le modèle indique que la présence de PPD affecte positivement les valeurs de l'NDMI ($t = 53,40$, $P < 0,001$) (Tableau 5).

Une relation positive significative ($P < 0,0001$) apparaît entre les valeurs de l'NDMI et de l'NDVI. Les valeurs de l'NDMI augmentent avec l'augmentation des valeurs de l' NDVI et vice versa. Les sorties de GLMM prouvent que les valeurs de l'NDMI augmentent de façon significative ($P < 0,0001$) avec l'augmentation des valeurs de l'NDVI, mais cette augmentation est plus élevée avec la présence de PPD que dans la zone où le PPD est absent (Figure 4 et Tableau 5). Globalement, les valeurs élevées de NDMI caractérisent les zones irriguées (présence de PPD), alors que les faibles valeurs NDMI caractérisent les zones non irriguées (absence de PPD). Les résultats du changement du NDMI sont semblables aux résultats de Dedkov et Gunin (2014), ce qui a confirmé l'importance du contenu d'humidité de sol dans les zones oasiennes comparées aux habitats dénudés ou non-plantés dans le désert. Selon Aldakheel (2011), le PPD demeure toujours vert avec des valeurs de l'indice NDVI élevées en raison de la disponibilité de l'eau d'irrigation, autrement dit, la végétation naturelle est apparue avec de faibles valeurs de NDVI en raison des conditions de stress hydrique dans les sols non irrigués. En outre, la

structure dense de la canopée a une forte teneur en humidité par rapport à la structure de la canopée ouverte ou les habitats ouverts. Cela est principalement dû à l'ombre créée par les canopées qui réduit à la fois la température, l'évaporation, et l'évapotranspiration ainsi que l'humidité du sol qui reste plus longtemps par rapport aux sols désertiques dénudés (Assal *et al.*, 2016).

Tableau 5. GLMM relatif au changement de l'NDMI sous l'effet des années, présence/absence du PPD, NDVI, et l'interaction `PPD*NDVI`.

Variables	Valeur	Std. Erreur	DDL	t-théorique	p-valeur
Interception	-0,142	9,6E-05	1979339	-1478,11	<0,001
Année 1999	0,011	3,0E-05	1979339	370,10	<0,001
Année 2013	-0,034	3,7E-05	1979339	-912,16	<0,001
Présence de PPD	0,009	1,7E-04	1979339	53,40	<0,001
NDVI	0,890	7,7E-04	1979339	1155,54	<0,001
Présence de PPD x NDVI	0,082	8,3E-04	1979339	98,13	<0,001

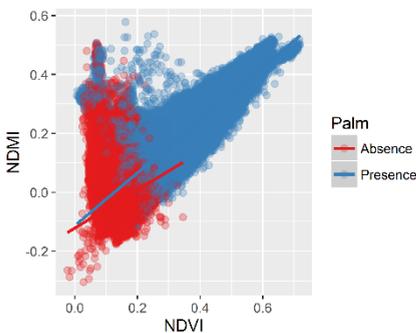


Figure 4. Relation entre NDMI et NDVI par présence / absence de PPD (à gauche), et changement de l'indice NDMI entre 1984, 1999 et 2013 (à droite). Les lignes représentent une régression linéaire avec un modèle linéaire généralisé (GLM). Les cercles pleins dans les boxplots indiquent les moyennes de NDMI.

D. Effets du NDVI, PPD, et NDMI sur le SI-T

Les valeurs de l'indice SI-T diminuent de façon significative ($P < 0,0001$) au cours des années d'étude, passant d'une moyenne de $78,47 \pm 6,00$ en 1984, à $77,20 \pm 8,85$ en 1999, afin d'atteindre $70,50 \pm 12,20$ en 2013 (Tableau 8). Les valeurs de SI-T diminuent aussi significativement avec la présence de PPD ($P < 0,0001$). En se référant aux résultats de GLMM, une relation négative significative s'est produite entre les indices SI-T et NDVI ($P < 0,0001$). Les valeurs de SI-T diminuent et les valeurs de NDVI augmentent (Figure 5a et Tableau 6), mais cette diminution est significativement plus élevée lorsqu'elle est associée à la présence de PPD par rapport aux zones non plantées (Absence de PPD). En général, les zones ayant des valeurs élevées de l'indice SI-T sont occupées et recouvertes par les Sabkhas (lacs salins temporels), comme l'indiquent Albed *et al.* (2014a), ou des communautés de plantes halophytes (absence de PPD).

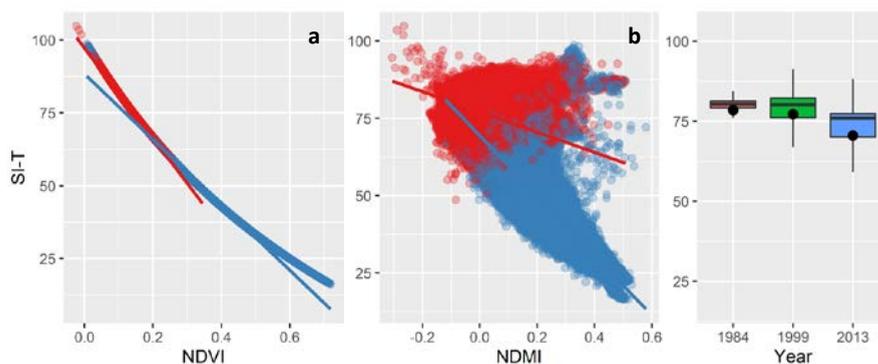


Figure 5. (a) Relation entre SI-T et NDVI par présence / absence de PPD (à gauche), et changement de l'indice SI-T entre 1984, 1999 et 2013 (à droite). Les lignes représentent une régression linéaire avec un modèle linéaire généralisé (GLM). Les cercles pleins dans les boxplots indiquent les moyennes de SI-T, (b) Relation entre SI-T et NDMI par présence / absence de PPD. Les lignes représentent une régression linéaire avec un modèle linéaire généralisé (GLM).

Tableau 6. Modelage des effets des années, présence/absence de PPD, et NDVI sur le changement de l'indice SI-T

Variables	Valeur	Std. Erreur	DDL	t-théorique	p-valeur
Interception	93,514	0,002	1979340	56386,11	<0,001
Année 1999	-0,031	0,001	1979340	-25,36	<0,001
Année 2013	-0,636	0,001	1979340	-495,63	<0,001
Présence de PPD	-1,398	0,003	1979340	-492,98	<0,001
NDVI	-122,563	0,013	1979340	-9774,3	<0,001

Contrairement, les zones à faible valeurs de SI-T sont couvertes par des vergers de PPD. Le GLMM révèle que l'indice NDMI influence négativement ($P < 0,0001$) les valeurs de l'indice SI-T, et cette influence négative est également associée à la présence de PPD (Figure 5b ; Tableau 7). La relation négative entre le SI-T et le NDVI a été confirmée par l'étude d'Aldakheel (2011), dans laquelle les valeurs élevées de NDVI sont considérées liées aux faibles valeurs de salinité d'eau d'irrigation dans la PPD. Les mêmes résultats ont été trouvés avec l'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Alhamadi et Glenn, 2008; Allbed *et al.*, 2014a). En outre, le PPD supporte un niveau élevé de salinité par rapport à d'autres plantations permanentes (Yaish et Kumar, 2015). Bien qu'un seuil de 4 dS / m soit fixé pour les effets de la salinité du sol sur le rendement du PPD (King et Thomas, 2014). En fait, le seuil de tolérance du palmier dattier contre le stress salin varie entre les cultivars du palmier dattier (Al-Abdoulhadi *et al.*, 2011). En réalité, les techniques modernes de pompage et la surexploitation des nappes aquifères ont entraîné la salinisation des aquifères d'eau douce et l'expansion de la salinité des sols, affectant négativement le PPD, et autres cultures associées (Allbed *et al.*, 2014b). Le niveau de salinisation des sols dans le système oasien moderne est plus élevé que l'ancienne oasis due aux mauvaises pratiques d'irrigation (Wang *et al.*, 2008). La relation opposée observée entre les indices SI-T et NDVI est liée à la différence des taux d'évaporation entre les différents paysages désertiques. Dans les zones cultivées, la structure des canopées du PPD a contribué à diminuer le niveau d'évaporation dans le sol irrigué sous les palmiers dattiers, et donc réduit le niveau de salinité (Alam et AlShaikh, 2013). En revanche, dans les zones non cultivées, la

salinité augmente dans les sols non irrigués en raison de la végétation dispersée et de l'évaporation qui dépassent habituellement les précipitations (Howari et Goodell, 2009).

Tableau 7. GLMM relatif aux effets de présence/absence de PPD, et l'NDMI sur le changement de l'indice SI-T

SI-T	Valeur	Std. Erreur	DDL	t-théorique	p-valeur
Interception	75,717	0,004	1979342	21115,37	<0,001
Présence de PP	-11,863	0,012	1979342	-958,13	<0,001
NDMI	-64,401	0,047	1979342	-1372,12	<0,001

Tableau 8. Statistiques descriptives des quatre indices spectraux (NDVI, NDMI, SI-T et CI).

Variable	Year	Min	Max	Mean	St. dev
NDVI	1984	0,06	0,48	0,12	0,04
	1999	0,01	0,59	0,13	0,07
	2013	-0,02	0,72	0,18	0,10
NDMI	1984	-0,14	0,38	-0,03	0,07
	1999	-0,18	0,54	-0,01	0,08
	2013	-0,31	0,58	-0,01	0,11
SI-T	1984	35,11	88,78	78,47	6,00
	1999	25,74	98,71	77,20	8,85
	2013	16,31	104,82	70,50	12,20
CI	1984	0,69	0,99	0,77	0,04
	1999	0,70	1,09	0,79	0,06
	2013	0,65	1,19	0,79	0,08

E. Plantations de palmier dattier comme ceinture refuge contre la désertification

Dans l'ensemble, la zone cultivée avec PPD ont les valeurs de NDVI, de NDMI et de CI les plus élevées, mais aussi les valeurs de SI-T les plus faibles. À l'inverse, les zones non cultivées (communautés désertiques) ont des valeurs de NDVI, NDMI et CI plus faibles à l'opposé des valeurs SI-T pendant la période étudiée. Les variations des valeurs de NDVI, NDMI, et SI-T et CI dans le PPD sont dues à l'effet des cultivars, de l'âge et de la densité des PPD. D'une part, les vieux vergers de PPD se caractérisent par des arbres âgés, une diversité variétale élevée et une densité élevée en raison de la faible distance entre les pieds de palmiers dattiers, qui sont inter-plantées avec divers arbres fruitiers (Figue, vigne, citron, grenade...). D'autre part, les plantations de palmiers modernes se caractérisent par de jeunes plantations, une faible diversité variétale, principalement dominée par le cultivar Deglet-Noor (monoculture), et la faible densité d'arbres due au grand espacement entre les arbres. D'après Bouzaher et Alkama (2013), les agriculteurs de la zone d'étude utilisent habituellement deux types de distance entre les arbres (7m x 7m et 5m x 5m), mais le modèle 5 x 5 a été révélé plus approprié selon les conditions de la zone d'étude. Al-Barrak (1990) a montré que le palmier dattier améliore la fertilité du sol en termes de carbone organique par rapport au sol non cultivé (sans PPD). De

plus, le palmier dattier est l'une des cultures les plus adaptées aux conditions édaphiques des régions chaudes désertiques (Kawy et El-Magd, 2013). Par ailleurs, Cherif *et al.* (2015) ont signalé que les communautés endophytes des racines du palmier dattier renforcent la tolérance des espèces contre les conditions de stress dû à la sécheresse. Donc, comme il est prévu, le palmier dattier représente une espèce clé précieuse comme brise-vent des terres agricoles pour contrôler l'exacerbation de la désertification dans les zones arides. Il fournit également des services agricoles et écologiques clés pour les populations humaines vivant dans les zones arides.

IV - Conclusions

Dans la région du Ziban, le plus grand et le plus productif de dattes en Algérie, le patrimoine du PPD a connu une expansion significative en termes de superficie et de nombre d'arbres au cours des 30 dernières années, avec une augmentation de 48,22 km² (5,42%), et plus du 1,5 million de palmiers, avec un taux de changement équivalent à 1,66 km² / an et 20169 palmiers dattiers / an. Les modèles statistiques ont montré une relation positive très significative entre NDVI-DPP, NDMI-NDVI et CI-NDVI. Toutefois, des relations négatives ont été trouvées d'une part, entre SI-T et NDVI-NDMI, et d'autre part, les zones du PPD ont indiqué des valeurs de NDVI, de NDMI et de CI élevées, mais de faibles valeurs de SI-T. Cependant, les régions sans PPD ont montré des valeurs de NDVI, NDMI et CI faibles, avec des valeurs de SI-T élevées. Nos résultats ont révélé que le PPD apparaît comme une ceinture refuge protectrice contre la désertification et l'ensablement. La politique agro-économique adoptée par le gouvernement algérien dans les zones arides représente un modèle réussi pour le développement de l'agriculture aride au Sud du pays. En outre, les outils de Télédétection et SIG ont fourni une approche utile pour surveiller, détecter les changements, et ainsi conserver les écosystèmes fragiles sur une grande zone en un temps et une rentabilité raisonnables.

Lexique

ETM+: Enhanced Thematic Mapper plus

OLI: Operational Land Imager

NASA: National Aeronautics and Space Administration

TM: Thematic Mapper

USGS: United States of Geological Study

Références

- Al-Barrak S.A., 1990.** Characteristics of some soils under date palm in Al-Hassa eastern oasis, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University*, 2(1): 115-130.
- Al-Abdoulhadi I.A., Dinar H.A., Ebert G. et al., 2011.** Effect of salinity on leaf growth, leaf injury and biomass production in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars. *Indian Journal of Science and Technology*, 4(11): 1542-1546.
- Alam S., AlShaikh A.A., 2013.** Use of palm fronds as shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 25(1): 55-58. [doi: 10.1016/j.jksues.2012.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2012.01.003)
- Aldakheel Y.Y., 2011.** Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia. *Journal of the Society of Remote Sensing*, 39(2): 171-180. [doi: 10.1007/s12524-010-0057-z](https://doi.org/10.1007/s12524-010-0057-z)
- Alhammadi M.S., Glenn E.P., 2008.** Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6): 745-1765. [doi: 10.1080/01431160701395195](https://doi.org/10.1080/01431160701395195)
- Ali G., 2006.** Problematique de la desertification en Algerie: état et mesures de lutte pour la protection des ressources naturelles. In: Kepner W.G., Rubio J.L., Mouat D.A., Pedrazzini F. (eds.). *Desertification in the Mediterranean region. A security issue*. Dordrecht: Springer, p. 167-185. NATO security through science series. [doi: 10.1007/1-4020-3760-0_06](https://doi.org/10.1007/1-4020-3760-0_06)
- Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V., 2015a.** *Date palm genetic resources and utilization*. Vol. 1. *Africa and the Americas*. Dordrecht: Springer. [doi: 10.1007/978-94-017-9694-1](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1)
- Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V., 2015b.** *Date palm genetic resources and utilization*. Vol. 2. *Asia*

- and Europe. Dordrecht: Springer. doi: [10.1007/978-94-017-9707-8](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9707-8)
- Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y.Y., 2014a.** Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 230-231: 1-8. doi: [10.1016/j.geoderma.2014.03.025](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025)
- Allbed A., Kumar L., Sinha P., 2014b.** Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. *Remote Sensing*, 6(2): 1137-1157. doi: [10.1016/j.geoderma.2014.03.025](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025)
- Al-Shayeb S.M., Al-Rajhi M.A., Seaward M.R.D., 1995.** The date palm (*Phoenix dactylifera* L.) as a biomonitor of lead and other elements in arid environments. *Science of the Total Environment*, 168(1): 1-10. doi: [10.1016/0048-9697\(95\)04556-G](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04556-G)
- Al-Yahyai R., Khan M.M., 2015.** Date palm status and perspective in Oman. In: Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization*. Dordrecht: Springer, pp. 207-240. doi: [10.1007/978-94-017-9707-8_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9707-8_6)
- ANAT, 2003.** *Schéma directeur des ressources en eau, Wilaya de Biskra, Rapport de Synthèse, Phase II*. p. 5-16, 50.
- Assal T.J., Anderson P.J., Sibold J., 2016.** Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 365: 137-151. doi: [10.1016/j.foreco.2016.01.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.017)
- Ballais J. L., 2005.** Les villes sahariennes et les ressources en eau. In: Côte M. (ed.). *La ville et le désert, le Bas-Sahara algérien*. Paris–Aix-en-Provence: Karthala–IREMAM, pp. 73-93.
- Bekheet S.A., El-Sharabasy S.F., 2015.** Date palm status and perspective in Egypt. In: Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization*. Dordrecht: Springer, pp. 75-123. doi: [10.1007/978-94-017-9694-1_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1_3)
- Boureboune L., Benazzouz M.T., 2009.** Aeolian morphogenesis and strategy of fight against desertification in Algeria (Hodna and Zibans Basin). In: Marini A., Talbi M. (eds.). *Desertification and risk analysis using high and medium resolution satellite data*. Dordrecht: Springer, pp. 91-103. doi: [10.1007/978-1-4020-8937-4_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8937-4_8)
- Bouzaher S.L., Alkama D., 2013.** The requalification of the palm trees of Ziban as a tool for sustainable planning. *Procedia. Social and Behavioral Sciences*, 102: 508-519. doi: [10.1016/j.sbspro.2013.10.767](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.767)
- Chander G., Markham B., 2003.** Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2674-2677. doi: [10.1109/TGRS.2003.818464](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464)
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L., 2009.** Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 13(5): 893-903. doi: [10.1016/j.rse.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007)
- Chang W., 2013.** *R graphics cookbook*. Sebastopol: O'Reilly Media.
- Chasek P., Safriel U., Shikongo S., Fuhrman V.F., 2015.** Operationalizing zero net land degradation: The next stage in international efforts to combat desertification? *Journal of Arid Environments*, 112: 5-13. doi: [10.1016/j.jaridenv.2014.05.020](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.05.020)
- Cherif H., Marasco R., Rolli E. et al., 2015.** Oasis desert farming selects environment-specific date palm root endophytic communities and cultivable bacteria that promote resistance to drought. *Environmental Microbiology Reports*, 7(4): 668-678. doi: [10.1111/1758-2229.12304](https://doi.org/10.1111/1758-2229.12304)
- Dedkov V.P., Gunin P.D., 2014.** On the microclimate of natural oases of the extremely arid desert of the Transaltai Gobi. *Arid Ecosystems*, 4(4): 253-258. doi: [10.1134/S2079096114040039](https://doi.org/10.1134/S2079096114040039)
- Elsen E. van den, Jetten U., 2015.** Combatting desertification using a multidisciplinary approach. *Catena*, 128: 211-213. doi: [10.1016/j.catena.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.001)
- Gebauer J., Luedeling E., Hammer K., Nagieb M., Buerkert A., 2007.** Mountain oases in northern Oman: an environment for evolution and *in situ* conservation of plant genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54(3): 465-481. doi: [10.1007/s10722-006-9205-2](https://doi.org/10.1007/s10722-006-9205-2)
- Gnacadjia L., 2015.** New challenges in science and policies to combat desertification. *Journal of Arid Environments*, 112: 1-4. doi: [10.1016/j.jaridenv.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.10.010)
- Guezoul O., Chenchouni H., Sekour M., Ababsa L., Souttou K., Doumandji S., 2013.** An avifaunal survey of mesic manmade ecosystems "Oases" in Algerian hot-hyperarid lands. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1): 37-43. doi: [10.1016/j.sjbs.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.10.001)
- Hooke J., Sandercock P., 2012.** Use of vegetation to combat desertification and land degradation: Recommendations and guidelines for spatial strategies in Mediterranean lands. *Landscape and Urban Planning*, 107(4): 389-400. doi: [10.1016/j.landurbplan.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.07.007)
- Howari F.M., Goodell P.C., 2009.** Characterization of salt-crust build-up and soil salinization in the United Arab Emirates by means of field and remote sensing techniques. In: Metternicht G., Zinck J.A. (eds.). *Remote sensing of soil salinization: Impact on land management*. Boca Raton: CRC Press, pp. 141-154.

- Idder M.A., Ighili H., Mitiche B., Chenchouni H., 2015.** Influence of date fruit biochemical characteristics on damage rates caused by the carob moth (*Ectomyelois ceratoniae*) in Saharan oases of Algeria. *Scientia Horticulturae*, 190: 57-63. doi: [10.1016/j.scienta.2015.04.015](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.015)
- Jaradat A.A., 2015.** Biodiversity, genetic diversity, and genetic resources of date palm. In: Al-Khayri J.M. Jain S.M., Johnson D.V. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization*. Dordrecht: Springer, p. 19-71. doi: [10.1007/978-94-017-9694-1_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1_2)
- Jaradat A.A., 2016.** Genetic erosion of *Phoenix dactylifera* L.: Perceptible, probable, or possible. In: Ahuja M.R., Jain S.M. (eds.). *Genetic diversity and erosion in plants*. Dordrecht: Springer, p. 131-213. doi: [10.1007/978-3-319-25954-3_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25954-3_4)
- Karnieli A., 1997.** Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1207-1220. doi: [10.1080/014311697218368](https://doi.org/10.1080/014311697218368)
- Kawy W.A.M.A., El-Magd I.H.A., 2013.** Use of satellite data and GIS for assessing the agricultural potentiality of the soils South Farafra Oasis, Western Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7): 2299-2311. doi: [10.1007/s12517-012-0518-5](https://doi.org/10.1007/s12517-012-0518-5)
- Khierallah H.S., Bader S.M., Ibrahim, K.M., Al-Jboory I.J., 2015.** Date palm status and perspective in Iraq. In: Al-Khayri J.M. Jain S. M., Johnson D.V. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization*. Dordrecht: Springer, p. 97-152. doi: [10.1007/978-94-017-9707-8_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9707-8_4)
- King C., Thomas D.S.G., 2014.** Monitoring environmental change and degradation in the irrigated oases of the Northern Sahara. *Journal of Arid Environments*, 103: 36-45. doi: [10.1016/j.jaridenv.2013.12.009](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.12.009)
- Lal R., Safriel U., Boer B., 2012.** *Zero net land degradation: A new sustainable development goal for Rio+20*. Report prepared for the Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification. UNCCD.
- Lamchin M., Lee J.-Y., Lee W.-K., Lee E. J., Kim M., Lim C.-H., Choi H.-A., Kim S.-R., 2016.** Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57(1): 64-77. doi: [10.1016/j.asr.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006)
- Liu S., Wang T., Kang W., David M., 2015.** Several challenges in monitoring and assessing desertification. *Environmental Earth Sciences*, 73(11): 7561-7570. doi: [10.1007/s12665-014-3926-x](https://doi.org/10.1007/s12665-014-3926-x)
- Liu W., Liu M., 2001.** Reversing desertification with *Tamarix* in China. In: Pasternak D., Schlissel A. (eds.). *Combating desertification with plants*. Boston: Springer, pp. 301-313. doi: [10.1007/978-1-4615-1327-8_29](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1327-8_29)
- Lu R. 2001.** Combating desertification with seabuckthorn. In: Pasternak D., Schlissel A. (eds.). *Combating desertification with plants*. Boston: Springer, pp. 291-299. doi: [10.1007/978-1-4615-1327-8_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1327-8_28)
- Luedeling E., Buerkert A., 2008.** Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 1181-1195. doi: [10.1016/j.rse.2007.08.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.007)
- M'hamed R., 2005.** *Les risques écologiques en Algérie, quelle riposte*. Alger: APIC.
- Maman S., Blumberg D.G., Tsoar H., Mamedov B., Porat N., 2011.** The Central Asian ergs: A study by remote sensing and geographic information systems. *Aeolian Research*, 3(3): 353-366. doi: [10.1016/j.aeolia.2011.09.001](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.09.001)
- MATE, 2002.** *Plan National d'Actions pour l'Environnement et le développement durable* (PNAE-DD).
- Melouhi M.S., 2006.** Lutte contre la désertification en Algérie : «de l'expérience à l'action». Communication at the Conference *La lutte contre la désertification et l'impératif international de politique de soutien*, 17-19 décembre 2006, pp. 97-99.
- Mihi A., 2018.** *Etude écologique et cartographique de l'écosystème oasien par l'outil SIG et Télédétection : cas de l'oasis de Biskra, Algérie sud*. Université Ferhat Abbas Sétif 1. Thèse en Sciences biologiques.
- Mihi A., Nacer T., Chenchouni H., 2019.** Monitoring dynamics of date palm plantations from 1984 to 2013 using landsat time-series in sahara desert oases of Algeria. In: El-Askary H., Lee S., Heggy E., Pradhan B. (eds.) *Advances in remote sensing and geo informatics applications*. Cham: Springer, p. 225-228. doi: [10.1007/978-3-030-01440-7_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_52)
- Mihi A., Tarai N., Chenchouni H., 2017.** Can palm date plantations and oasisification be used as a proxy to fight sustainably against desertification and sand encroachment in hot drylands? *Ecological Indicators*, 105: 365-375. doi: [10.1016/j.ecolind.2017.11.027](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027)
- Mubiru R., 2001.** Combating desertification with trees. In: Pasternak D., Schlissel A. (eds.). *Combating desertification with plants*. Boston: Springer, pp. 419-426. doi: [10.1007/978-1-4615-1327-8_40](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1327-8_40)
- Nahal I., 2004.** *La désertification dans le monde: Causes-processus-conséquences-lutte*. Paris: L'Harmattan.
- Nater E., Duchrow A., Sorensen L., 2008.** *Desertification: coping with today s global challenges in the context of the Strategy of the United Nations Convention to Combat Desertification*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit.
- Neffar S., Chenchouni H., Beddiar A. et al., 2013.** Rehabilitation of degraded rangeland in drylands by Prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) plantations: effect on soil and spontaneous vegetation. *Ecologia*

Balkanika, 5(2): 63-76.

- ONU, 1994.** *Convention de lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique.*
- Ouah N. (ed.), 2007.** *Guide éducatif pour l'enseignant, Kit pédagogique sur l'environnement dans les zones arides.* Pont-Évêque: Nature Vivante.
- Pinheiro J., Bates D., DebRoy S. et al., 2015.** *Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-120.* <http://cran.r-project.org/package=nlme>
- Ramade F., 2005.** *Éléments d'Écologie, Écologie appliquée: cours. Licence. Master.* Paris: Dunod.
- Ramade F., 2008.** *Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité.* Paris: Dunod.
- Reynolds J. F., Smith D. M. S., Lambin E. F. et al., 2007.** Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316(5826): 847-851. [doi: 10.1126/science.1131634](https://doi.org/10.1126/science.1131634)
- Rouse J.W., Haas R.W., Schell J.A. et al., 1974.** *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation.* Greenbelt: NASA/GSFC.
- Salah M.B., 2015.** Date palm status and perspective in Sub-Saharan African Countries: Burkina Faso, Chad, Ethiopia, Mali, Senegal, and Somalia. In: Al-Khayri J., Jain S., Johnson D. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization.* Vol. 1. *Africa and the Americas.* Dordrecht: Springer, p. 369-386. [doi: 10.1007/978-94-017-9694-1_10](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1_10)
- Sedra M.H., 2015.** Date palm status and perspective in Morocco. In: Al-Khayri J., Jain S., Johnson D. (eds.). *Date palm genetic resources and utilization.* Vol. 1. *Africa and the Americas.* Dordrecht: Springer, p. 257-323. [doi: 10.1007/978-94-017-9694-1_8](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1_8)
- Shanzhong Q., Xiaoyu L., 2010.** Effect of population pressure on oasis agriculture (1984-2003) in Jinta Oasis, arid Northwest China. *The Environmentalist*, 30(2): 131-132. [doi: 10.1007/s10669-009-9252-2](https://doi.org/10.1007/s10669-009-9252-2)
- Siddig E. A., 2000.** Discours-programme: Causes et conséquences de la désertification sur la gestion des ressources en eau dans les zones arides. In: *Actes du Séminaire International sur la Lutte contre la Désertification. Ressources en eau douce et réhabilitation des terres dégradées dans les zones arides.* N'Djamena Tchad, 30 octobre - 4 novembre 2000.
- Tengberg M., 2014.** Date palm: Origins and development. In: Smith C. (ed.). *Encyclopedia of global archaeology.* New York: Springer, 2033-2035. [doi: 10.1007/978-1-4419-0465-2_2175](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_2175)
- Tripathi N.K., Rai B.K., Dwivedi P., 1997.** Spatial modeling of soil alkalinity in GIS environment using IRS data. In: *The 18th Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur, 20-24 October 1997.*
- UNCCD, 2008.** *Human rights and desertification, exploring the Complementarity of International Human Rights law and the United Nations Convention to Combat Desertification.*
- Vicente-Serrano S.M., Pérez-Cabello F., Lasanta T., 2008.** Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3916-3934. [doi: 10.1016/j.rse.2008.06.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.011)
- Wang X. 2013.** Sandy desertification: borne on the wind. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 2395-2403. [doi: 10.1007/s11434-013-5771-9](https://doi.org/10.1007/s11434-013-5771-9)
- Wang Y., Li Y., Xiao D. 2008.** Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis, Northwest China. *Environmental Geology*, 56(2): 439-446. [doi: 10.1007/s00254-007-1181-0](https://doi.org/10.1007/s00254-007-1181-0)
- Wilson E.H., Sader S.A. 2002.** Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3): 385-396. [doi: 10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- Xie Y., Wang G., Wang X., 2015.** Spatio-temporal process of oasisification in the middle-Heihe River basin during 1368–1949 AD, China. *Environmental Earth Sciences*, 73(4): 1663-1678. [doi: 10.1007/s12665-014-3519-8](https://doi.org/10.1007/s12665-014-3519-8)
- Yaish M. W., Kumar P. P., 2015.** Salt tolerance research in date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.), past, present, and future perspectives. *Frontiers in plant science*, 6: 348. [doi: 10.3389/fpls.2015.00348](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00348)
- Zhou, X., Wan, L., Fang, B., Cao W.B., Wu S.J., Hu F.S., Feng W.D., 2004.** Soil moisture potential and water content in the unsaturated zone within the arid Ejina Oasis in Northwest China. *Environmental Geology*, 46(6-7): 831-839. [doi: 10.1007/s00254-004-1068-2](https://doi.org/10.1007/s00254-004-1068-2)