



HAL
open science

Étude de la dynamique des accumulations éoliennes dans une région aride du Sud est tunisien : cas du bassin versant d'oued Bouhamed (Jeffara septentrionale)

Nesrine Arrak, Aziza Ghram, Dalel Ouerchefani

► To cite this version:

Nesrine Arrak, Aziza Ghram, Dalel Ouerchefani. Étude de la dynamique des accumulations éoliennes dans une région aride du Sud est tunisien : cas du bassin versant d'oued Bouhamed (Jeffara septentrionale). *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 2021, 5, pp.48-71. hal-03393399

HAL Id: hal-03393399

<https://hal.science/hal-03393399>

Submitted on 12 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de la dynamique des accumulations éoliennes dans une région aride du Sud est tunisien : cas du bassin versant d'oued Bouhamed (Jeffara septentrionale)

Nesrine ARRAK¹, Aziza GHRAM-MESSEDI¹ et Dalel OUERCHEFANI²

¹Université de Tunis (FSHST et laboratoire CGMED), nesrinarrak@yahoo.fr ; ggramaziza@gmail.com

²Institut des régions arides de Médenine, ourchefani_dalel@yahoo.fr

Résumé

Depuis les années 1970, certaines zones arides tunisiennes évoluent à la fois sous l'impact des actions anthropiques et au rythme des fluctuations climatiques. Le milieu naturel subit donc d'importantes transformations induites essentiellement par les changements des pratiques agro-pastorales. Cela se traduit essentiellement par la régression du couvert végétal et l'augmentation de l'intensité des processus d'érosion, pouvant mener à la désertification. Pour faire face à ces menaces, les différents décideurs locaux ont besoin d'aide pour gérer au mieux leur territoire. L'objectif visé dans ce travail est de contribuer à la mise au point d'une méthode de suivi de la dynamique des accumulations sableuses basée à la fois sur des données de terrain et les données de télédétection issues de traitements des images satellites (Landsat). La démarche engagée propose d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des accumulations sableuses à partir d'indicateurs spatialisés issus de la classification supervisée. C'est dans la région de la Jeffara septentrionale que se situe notre cas d'étude. Il s'agit du bassin versant de Bouhamed (567 km² de superficie). L'étude de la dynamique éolienne à travers des indicateurs radiométriques calculés sur environ une trentaine d'année (1985-2014) montrent une certaine diversité dans leurs évolutions. L'analyse de ces différentes dynamiques montre le rôle important que joue le milieu physique (topographie, morpho-pédologie, hydrologie) et de l'organisation des pratiques agro-pastorales sur la dynamique spatio-temporelle des accumulations sableuses. Ce type d'indicateurs de dynamique éolienne spatialisée peut aider les aménageurs à mieux intervenir pour une gestion optimale et une préservation des ressources naturelles, dans le cadre d'un développement durable.

Mots clés : les zones arides, des accumulations sableuses, télédétection, Landsat.

Abstract:

Since the 1970s, some Tunisian arid zones have been changing under the impact of human actions and at the rhythm of climatic fluctuations. The natural environment is therefore undergoing important transformations, mainly due to changes in agro-pastoral practices. This is mainly reflected in the regression of vegetation cover and the increase in the intensity of erosion processes, which can lead to desertification. To deal with these threats, the various local decision-makers need help to manage their territory in the best possible way. The aim of the present work is to contribute to the development of a method for monitoring the dynamics of sand accumulations based on both: field information and remote sensing data from satellite

image processing (Landsat). The committed approach proposes to evaluate the spatio-temporal evolution of sandy accumulations from spatialized indicators resulting from the supervised classification. Our case study is located in the northern Jeffara region, it is the Bouhamed watershed (567km²). The study of wind dynamics through radiometric indicators calculated over about thirty years (1985-2014) shows a certain diversity in their evolutions. The analysis of these different dynamics shows the important role played by the physical environment (topography, morpho-pedology, hydrology) and the organization of agro-pastoral practices on the spatio-temporal dynamics of sandy accumulations. This spatialized wind dynamics indicators can help planners to better operate for optimal management and conservation of natural resources, as part of sustainable development.

Keywords: arid zones, sandy accumulations, remote sensing, Landsat.

ملخص

منذ سبعينيات القرن الماضي، تطورت المناطق القاحلة التونسية تحت تأثير النشاط البشري وبتيرة التغيرات المناخية. ولذلك فإن البيئة الطبيعية تشهد تحولات هامة، ويرجع ذلك أساسا إلى التغيرات في الممارسات الزراعية - الرعوية. ويؤدي هذا أساسا إلى تراجع الغطاء النباتي وتفاقم ظاهرة التعرية، مما قد يؤدي إلى التصحر. ولمعالجة هذه التهديدات، يحتاج صناع القرار المحليون إلى المساعدة في إدارة التراب. الهدف من العمل المقدم هو المساهمة في تطوير طريقة رصد ديناميات تراكبات الرمال استنادا إلى الدراسات الميدانية وبيانات الاستشعار عن بعد المنبثقة عن معالجة صور الأقمار الصناعية (لاند سات). يقترح المنهج المتبع تقييم التطور المكاني والزمني لتراكم الرمال باستخدام المؤشرات المكانية المنبثقة عن استعمال طريقة التصنيف الموجه. يقع مكان البحث الخاص بهذا العمل في منطقة شمال الجفارة ويهم الحوض السفحي لواد بوحامد (567 كلم²). تُظهر دراسة ديناميات الرياح من خلال احتساب مؤشرات القياس الإشعاعي على مدى ثلاثين عامًا (1985-2014) تباينا في تطورها. ويُظهر تحليل هذه الديناميكيات المختلفة الدور الهام الذي تلعبه الظروف الطبيعية (الطبوغرافيا، المورفولوجية والتربة، الهيدرولوجيا) وتنظم الممارسات الزراعية والرعوية على التحركات المكانية والزمانية لتراكم الرمال. يمكن أن يساعد هذا النوع من مؤشرات ديناميكيات الرياح المكانية المخططين على التدخل بشكل أفضل من أجل الإدارة المثلى والحفاظ على الموارد الطبيعية، في إطار التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاح : المناطق القاحلة، التراكبات الرملية، الاستشعار عن بعد، لاندسات.

Introduction

Les régions arides de la Tunisie présaharienne sont caractérisées par des écosystèmes fragiles. Cette fragilité est due essentiellement à des conditions climatiques et physiques qui sont notées défavorables (Ex : précipitation faible et irrégulière, couverture végétale réduite et dispersée, sol peu profond, très pauvre en matière organique à texture légère...), auxquelles s'ajoutent des activités humaines inappropriées (Ex. : le surpâturage, le labour excessif, la mise en culture sur un substrat fragile...). Ces dernières aggravent la fragilité des milieux arides par perte de la protection des sols par le couvert végétal et facilitent le déclenchement des manifestations de la désertification (ensablement, baisse de la production de la phytomasse, prolifération de l'érosion hydrique et éolienne, dégradation du couvert végétal...). Cette exploitation extensive et continue de la faible couverture végétale finit par exposer les sols à dominance sableuse à sablo-limoneuse aux effets de l'érosion éolienne. Un des aspects particuliers de la désertification se manifeste par une remobilisation éolienne du matériel pédologique, qui induit une nouvelle distribution des accumulations éoliennes¹. Ces dernières vont jusqu'à gêner les occupations humaines en envahissant les terres agricoles, les parcours, les aménagements, etc. Elles provoquent même la dégradation du potentiel biologique des terres et de leur capacité à répondre aux besoins des populations (Génin *et al.*, 2006).

Le bassin versant de Bouhamed qui fait l'objet de notre étude, il fait partie de la Tunisie présaharienne, situé plus précisément dans la Jeffara méridionale (Sud-Est). Ce bassin est marqué par des conditions climatiques et biophysiques propres aux régions arides. Il a subi depuis le début du 20^{ème} siècle des mutations socio-économiques très importantes qui ont contribué à la modification du milieu et la perturbation de son équilibre. Les modes d'utilisation du sol et de gestion de l'espace ont très vite évolué (Floret et Pontanier, 1982).

Dans ce cadre, il était nécessaire d'adopter une approche diachronique qui vise à étudier la dynamique spatio-temporelle des formations éoliennes. Cette étude a été menée sur quatre dates différentes prises pendant la saison printanière (1985, 2003, 2011 et 2014) afin d'assurer le suivi et la détection des surfaces d'accumulations. L'hypothèse de base de notre travail est qu'à partir de la radiométrie issue des images satellitaires traitées, il sera facile d'identifier les zones d'accumulations éolienne et suivre leurs évolutions spatio-temporelles. Notre approche méthodologique est basée sur la télédétection spatiale via le traitement d'images Landsat multicapteurs (TM, ETM+ et OLI), complétée par des observations de terrain intégrées dans un système d'information géographique (SIG). Au final, ces outils s'avèrent très pertinents pour la cartographie, le suivi, l'analyse et la gestion des phénomènes liés aux accumulations éoliennes. Car les données de la télédétection sont difficilement exploitables sans une bonne connaissance du terrain, qui repose dans ce cas sur la mise en place d'un réseau de stations d'observations, des levées topographiques et géomorphologiques.

I. Le bassin versant de Bouhamed : un cas d'étude

Le bassin versant d'Oued Bouhamed fait partie des régions arides de la Tunisie présaharienne. Il est situé dans le Sud Est de la Tunisie et s'étend sur une superficie de 567 km². Du point de vue administratif le bassin est situé à la limite entre le gouvernorat de Médenine à l'est et le gouvernorat de Tataouine à l'ouest. La partie amont du bassin versant d'oued Bouhamed se localise dans la région de Dahar dominée par les monts de Matmata. La partie aval

¹ L'accumulation est un dépôt d'une partie de la charge du vent qui intervient lorsque la vitesse de celui-ci faiblit. (Akrimi, 1993).

du bassin appartient à la plaine littorale de Jeffara. L'embouchure d'Oued Bouhamed se termine dans sebkhat El Maider qui est en contact direct avec le golfe de Bou-Ghrara (fig.1).

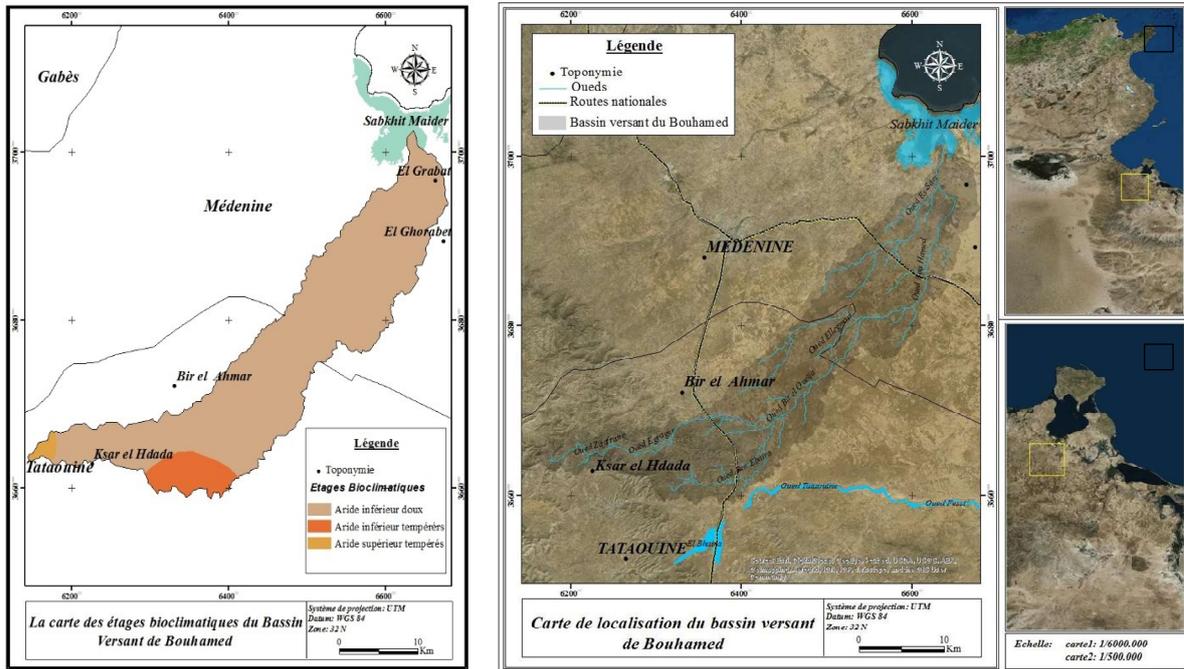


Figure 1 : Localisation du bassin versant de Bouhamed

Selon la classification d'Emberger (1955), le bassin versant Bouhamed appartient à l'étage aride inférieur avec une variante à hiver tempéré (Fig.1). La rareté, l'irrégularité et le caractère orageux des précipitations constituent des facteurs aggravant la désertification et limitant la résilience des milieux dégradés. En effet, la moyenne annuelle est estimée à 150 mm/an. Ces quantités de pluies sont caractérisées par un aspect torrentiel et par une extrême irrégularité entre les saisons et les années (fig.2). A ce caractère irrégulier des pluies s'ajoute le fort ensoleillement et les températures, parfois excessives (une moyenne de 21,5 C°), accentuent l'évapotranspiration qui est souvent plus importante que la pluviométrie. Les valeurs moyennes de l'évapotranspiration potentielle sont partout très élevées. En effet, pour l'ensemble du sud-est, les moyennes de l'ETP oscillent entre 1400 et 1700 mm/an, soit en moyenne 4 à 5 mm/jour (Ben Fraj et al 2016).

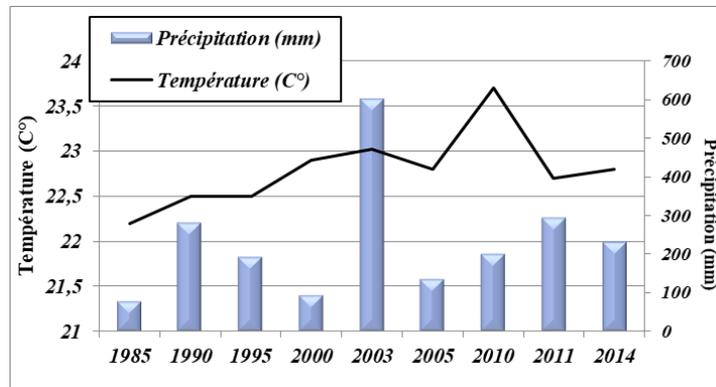


Figure.2 : la répartition annuelle des pluies et des températures dans la station de Médénine Source : CRDA Médénine

Les vents soufflent à longueur d'année sont, secs à forte vitesse et parfois violents. De novembre à avril, les vents dominants sont les vents de l'Ouest, Nord-Ouest et Sud-Ouest. Ces vents sont généralement très violents, secs et froids accompagnés parfois par des tempêtes de sable. De mai à octobre la direction du vent s'inverse et change, les vents sont d'origine maritime et le sens du vent dominant devient de l'Est, Nord-Est et Sud-Est.

Le bassin versant de Bouhamed prend une forme allongée. Sa direction principale d'allongement est Sud-Ouest–Nord-Est. De l'amont vers l'aval trois grands ensembles topographiques peuvent être distingué (fig.3) entre un plateau et un piémont bien rétréci avec des pentes plus ou moins fortes (entre 25% et 15%), et une plaine bien étendue où les pentes prennent un aspect diminutif (entre 5% et 0%). Cette plaine est dominée par un sol peu évolué d'apport (hydrique ou éolien).

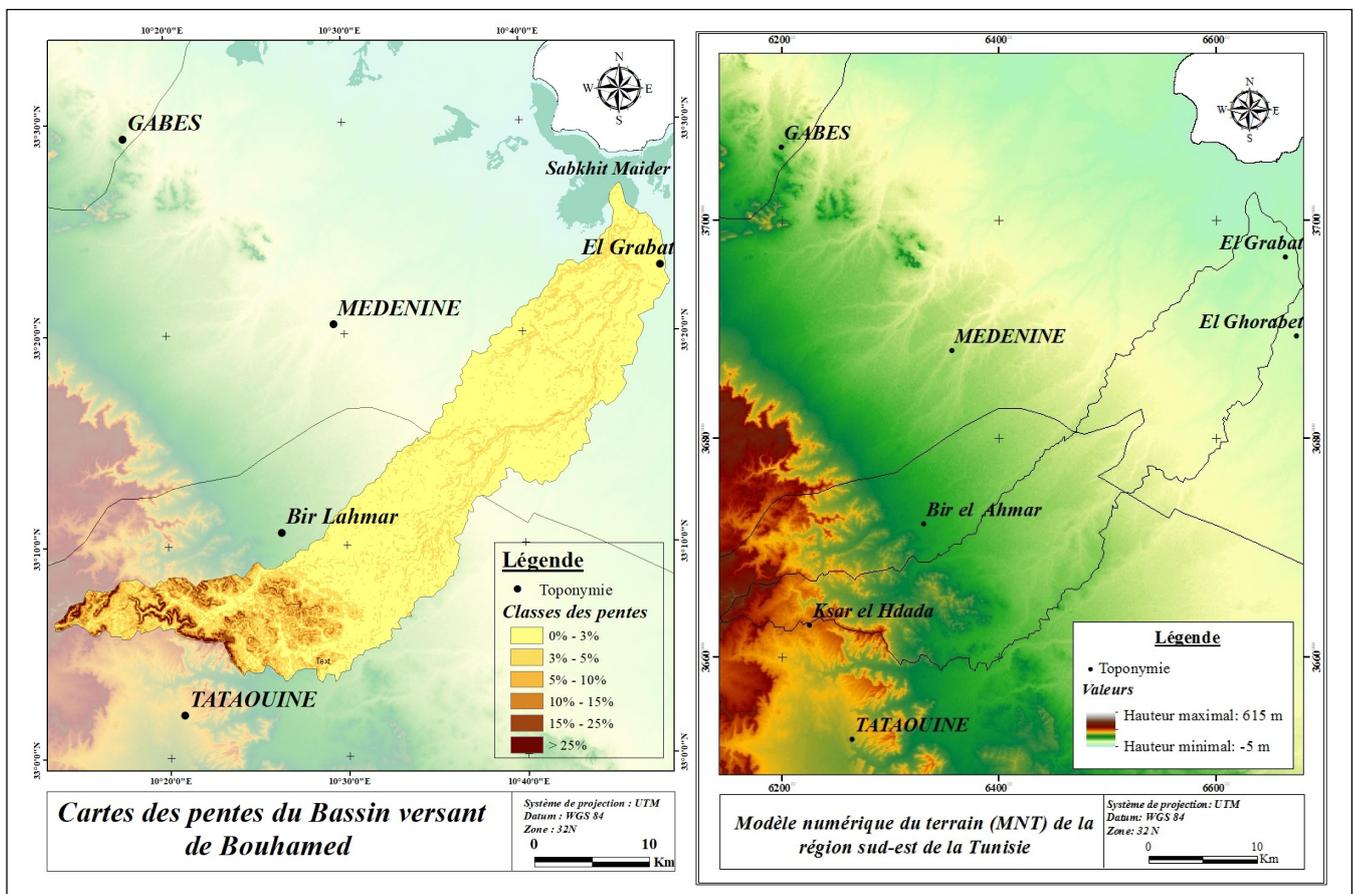


Figure 3 : Topographie du bassin versant de Bouhamed

Les facteurs et les processus de l'érosion n'interviennent pas de la même manière dans l'ensemble du bassin. En effet, une différenciation du paysage naturel est nettement remarquée en fonction des unités morphologiques (fig., 4). Le plateau est fortement disséqué, par un réseau hydrographique dense. C'est une région de moyenne montagne qui atteint une altitude moyenne de 400 m (Ben Fraj, 2012). Ce plateau est dominé par des formes structurales monoclinales de type cuesta. Sur cette zone du plateau des terrasses sont identifiées (Oued Zaafrane, Oued Graguer, Oued el Ghordhab). La zone de piémont est dominée par des cônes de déjection caractérisés par un dépôt formé de blocs métriques mêlé dans une matrice sablo-limoneuse. Le passage vers la plaine est marqué par l'apparition des surfaces d'érosion.

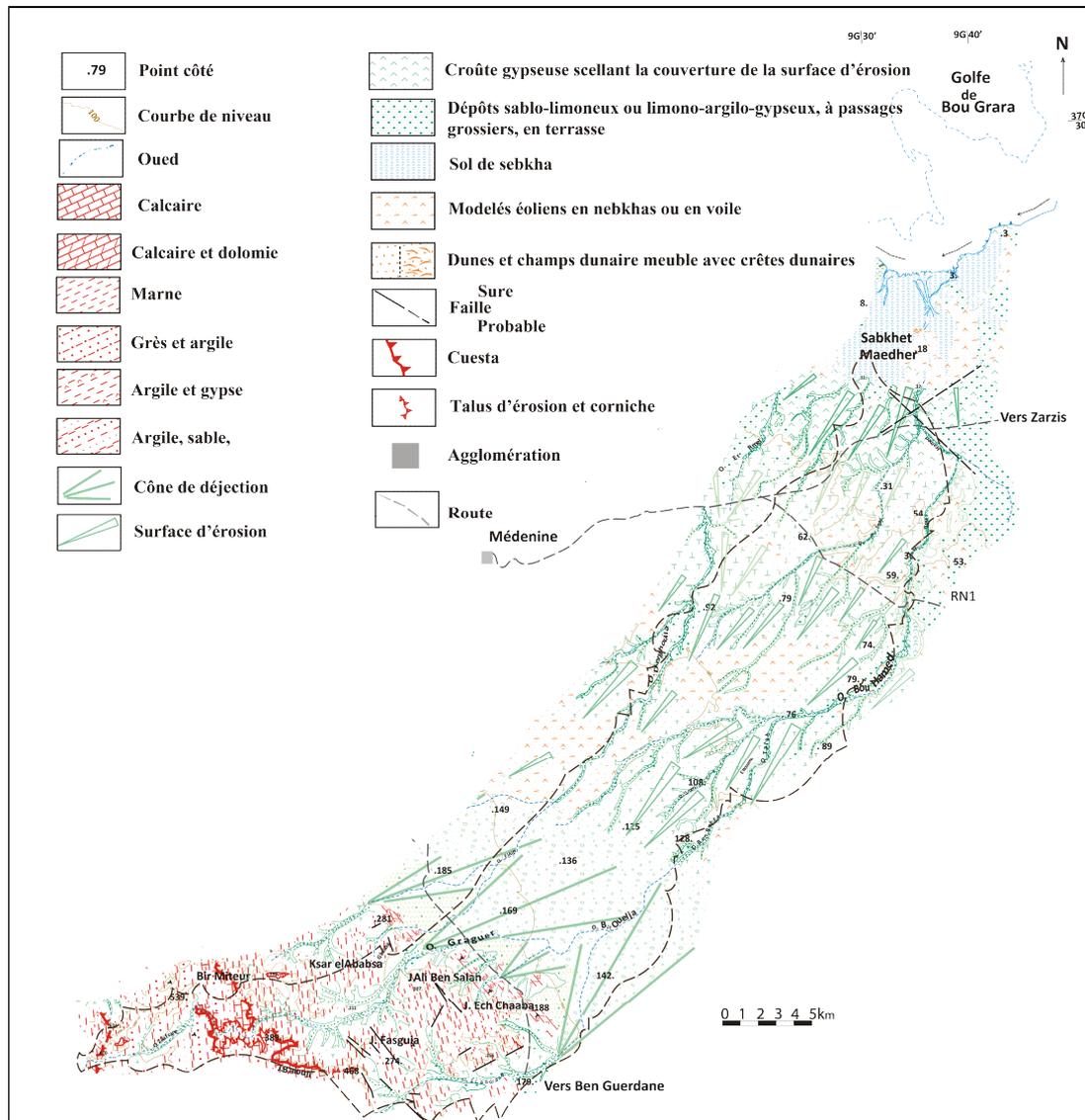


Figure 4 : Extrait de la carte géomorphologique de la Jeffara (Ben Fraj, 2012)

Comme toute la région de la Jeffara tunisienne, l'unité géographique de Bouhamed, a été le siège, depuis la période précoloniale, d'une série de transformations touchant les structures économiques et sociales et par conséquent le mode d'exploitation et d'occupation de l'espace et du milieu écologique (Abaab, 1986). Ces transformations entraînent des modifications profondes du paysage (Khattali et al., 1989). En effet, depuis le début du 20ème siècle, la région connaît des changements socio-économiques qui ont marqué et marquent encore le paysage. Ces changements sont caractérisés par le passage d'une occupation et d'une utilisation extensives de l'espace et de ses ressources naturelles, dans le cadre d'un mode de vie nomade et semi-nomade (terres collectives et dominance du pastoralisme), à une occupation et une utilisation relativement intensive de l'espace dans le cadre d'un mode de vie sédentaire, basé sur une diversification de l'activité économique (terres privées avec une limitation des aires de transhumance et l'extension de la céréaliculture et de l'arboriculture) (Floret et Pontanier, 1982, Abaab, 1986, Auclair et al., 1997). La région est marquée par trois grandes phases de changement (Abaab, 1986, Talbi, 1993, Auclair et al., 1997) :

1. Phase de nomadisme et d'équilibre du milieu de l'époque précoloniale : le nomadisme est l'aspect général qui caractérise cette phase avec une absence de pression sur les terres et le potentiel physique (Talbi, 1993). Le pastoralisme et la céréaliculture épisodique sont les activités principales et le système écologique est bien équilibré.
2. Phase du semi nomadisme de l'époque coloniale : L'intervention coloniale provoque l'enclenchement d'un processus de déstructuration des modes de vie (politique de sédentarisation, limitation des aires de transhumance, privatisation des terres collectives, etc.) et d'intensification des modes d'usage de l'espace et des ressources naturelles (Guillaume & al., 2003). Cette phase est caractérisée par la régression des activités pastorales et le développement d'un début de front de colonisation agricole vers la plaine.
3. Phase sédentaire de l'époque post-coloniale : Les dynamiques engagées connaissent un nouveau seuil à partir des années 1960-1970 sous l'effet de la croissance démographique et des politiques de l'État tunisien (Guillaume & al., 2005). Cette période est caractérisée par la sédentarisation (avec l'abandon de l'habitat troglodyte), la progression de l'emprise agricole (l'accélération de la privatisation des terres et la politique d'aides publiques à l'oléiculture). Cette phase ne se caractérise pas seulement par une artificialisation croissante du milieu mais aussi par un développement accéléré de l'emprise agricole sur des zones à risque ; stratégies de forte mobilisation des ressources en eau et d'aménagement du territoire mises en œuvre par l'État national. (Romagny et al, 2004).

Il ressort de cette présentation sommaire des caractéristiques physiques de la région d'étude, qu'il s'agit d'un milieu à équilibre fragile. Toute activité humaine reposant sur l'exploitation irrationnelle de ces ressources conduit à la dégradation de plus en plus poussée du milieu, qui peut aller jusqu'à nuire à un développement durable. En effet, la pression anthropique est considérée comme la cause principale de la prolifération des manifestations de désertification (Ouerchefani, 2012) (fig. 5).

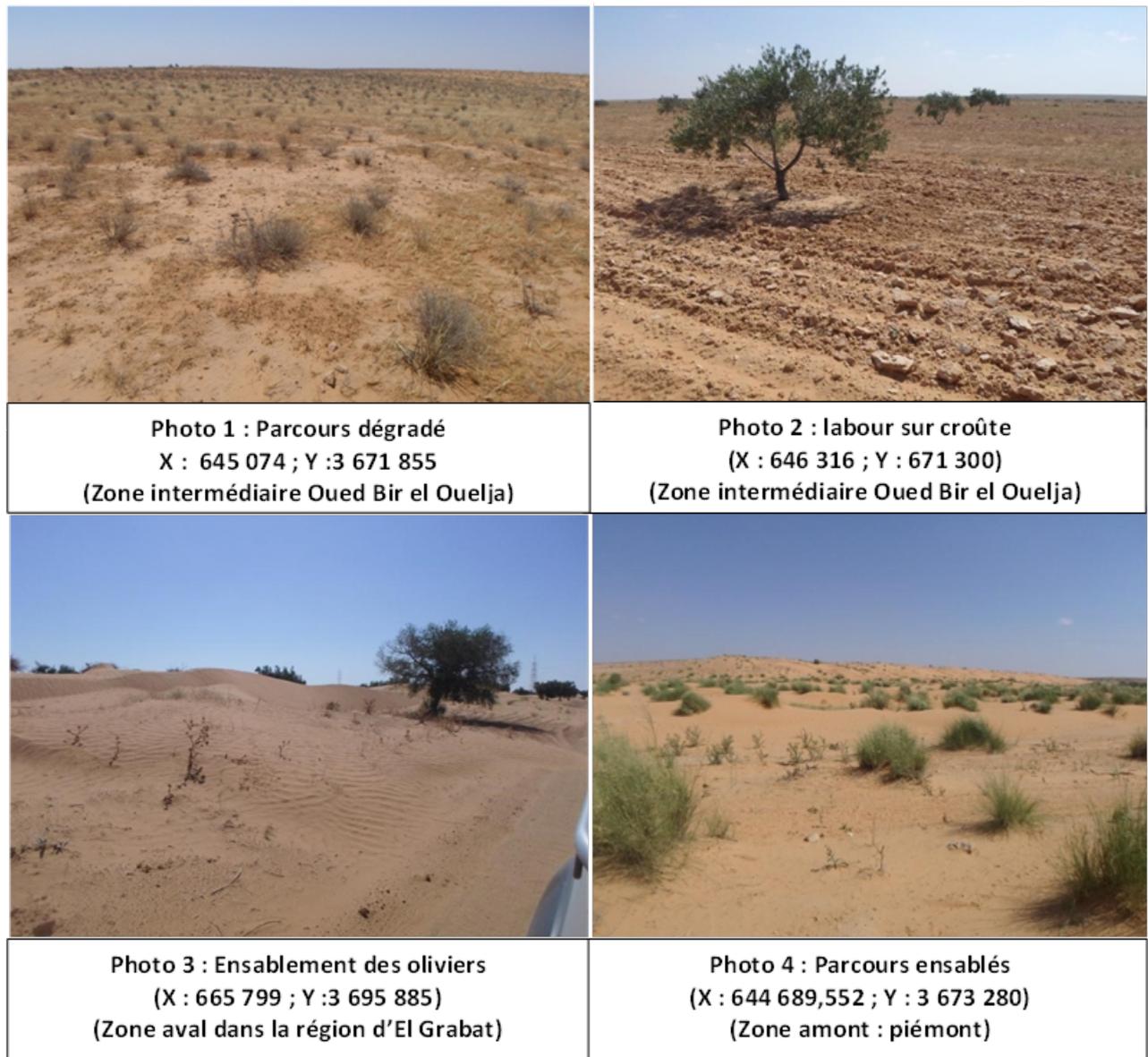


Figure 5 : Les manifestations de désertification dans le bassin versant de Bouhamed

(Cliché Nesrine Arrak 2014)

II. Une approche méthodologique de suivi des accumulations éoliennes

Dans le présent travail, on a développé une méthode d'évaluation de la dégradation des milieux arides à partir de la détection et le suivi des accumulations éoliennes, tout en valorisant l'apport de la télédétection et l'observation du terrain dans cette étude. La télédétection est l'outil qui a permis d'adopter une approche diachronique sur une période qui s'étend sur une trentaine d'années (entre 1985 et 2014) (fig., 6). Cette approche repose particulièrement sur l'utilisation des données radiométriques issues de prétraitements et traitements d'images satellites du capteur Landsat. Les données de terrain issues de relevés par GPS ont aidé à valoriser et interpréter les informations apportées par les données de télédétection. Grâce aux données radiométriques

issues d'une classification supervisée reposant sur l'identification des zones d'entraînement² issues du terrain ont permis de discerner, de caractériser et de suivre les accumulations éoliennes. L'intégration de ces données, issues de la classification radiométrique, dans un système d'information géographique décrivant l'état biophysique et anthropique du bassin versant de Bouhamed a facilité l'interprétation et l'explication de la répartition spatiale des accumulations et leurs dynamiques au cours du temps.

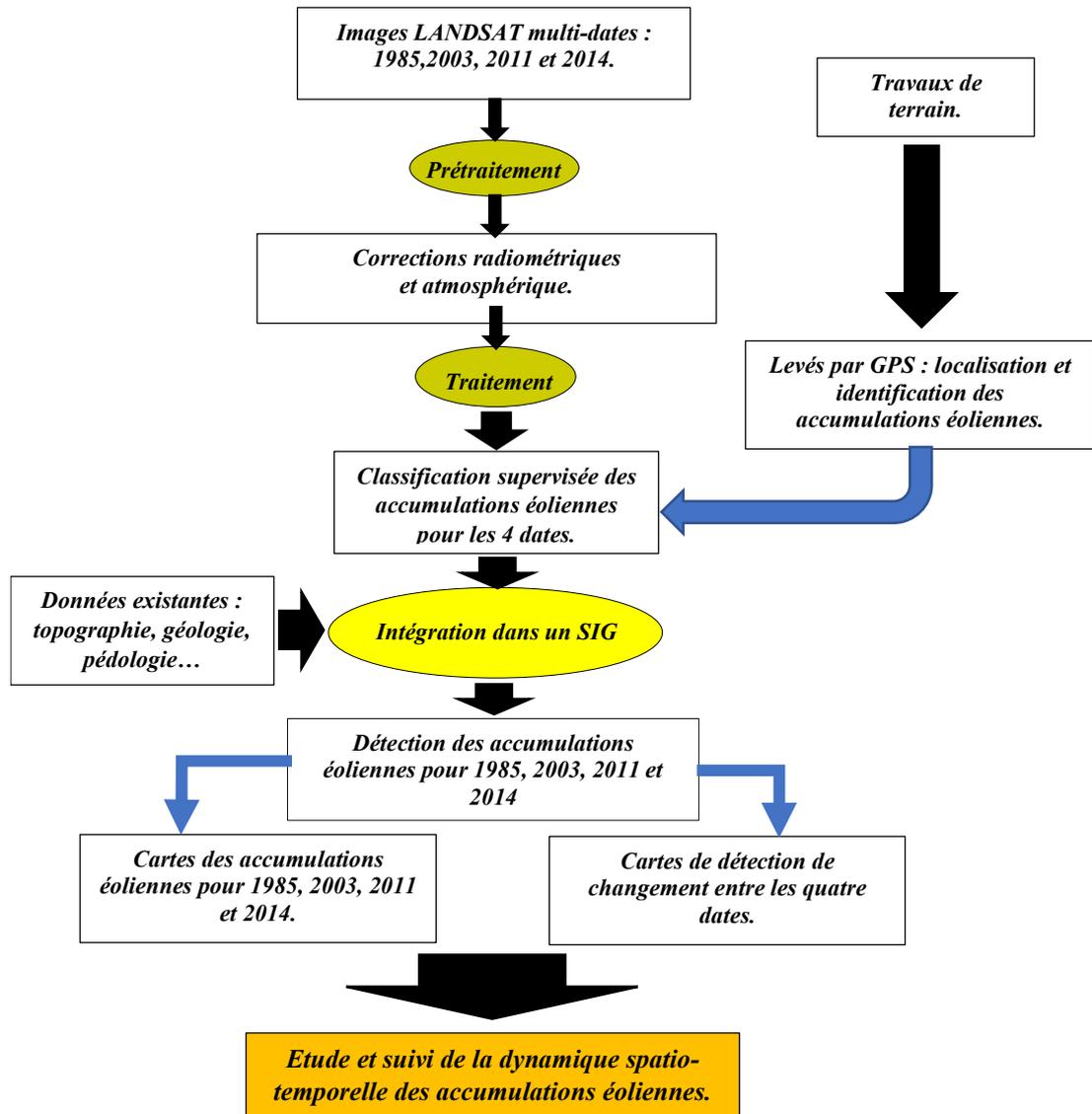


Figure 6 : Une méthode de suivi de la dynamique spatio-temporelle des accumulations Éolienne

1. Les données utilisées

a. Les levés de terrain :

La collecte des données sur terrain s'est basée sur un échantillonnage d'un ensemble de stations en prenant comme référence l'image satellite Landsat de 2014. Pour chaque station, des

² Region of interest (ROI)

fiches descriptives ont été élaborées. Ces fiches contiennent des levées par GPS qui localisent les zones d'accumulations éoliennes, une description du milieu biophysique et une caractérisation des types d'occupation anthropique. Une trentaine de points d'appui sont identifiés. Ces points sont choisis selon leur position topographique (Fig., 7).

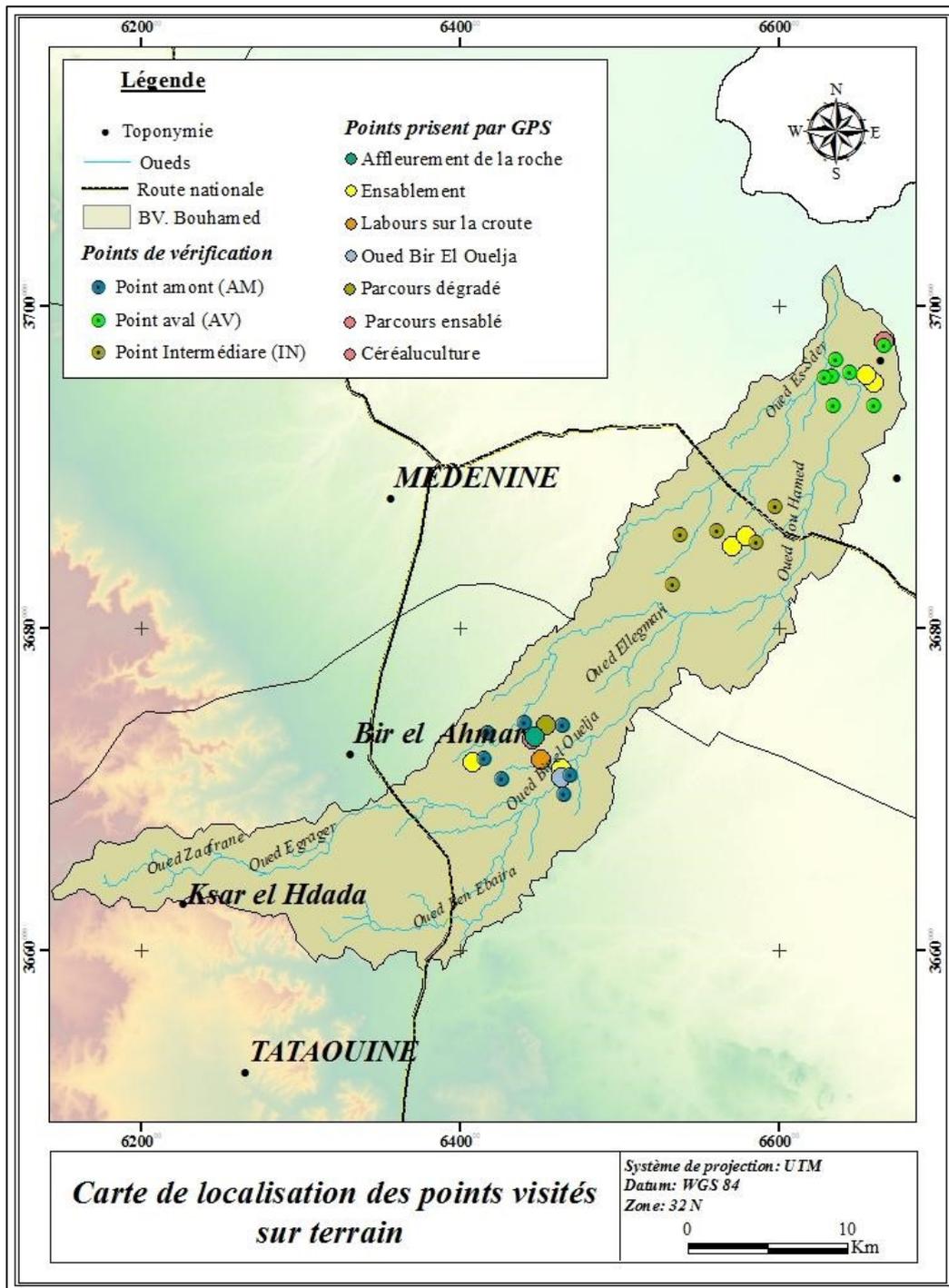


Figure 7 : Localisation de l'ensemble des stations de référence sur le bassin versant

b. Données satellites :

Le choix des différentes dates pour mener une étude comparative entre plusieurs périodes est contraint par la disponibilité des images et leur qualité. Ainsi le recouvrement temporel n'a pas pu être continu, surtout pour les années 1990. Ceci est considéré comme un facteur limitant pour mener une étude diachronique basée sur des intervalles temporels équivalents et sans lacunes. Les images utilisées dans ce travail sont au nombre de quatre et leurs caractéristiques sont présentées dans un tableau (Tab. 1). Pour notre étude, les quatre images satellites sélectionnées ont été prises pendant le printemps (mois de mars, avril et mai), lors de l'optimum du développement de la végétation naturelle ainsi que celle des cultures en sec. Ces images sont issues des différents capteurs du satellite Landsat (TM, ETM et OLI)

Tableau 1 : Images satellites utilisées

Numéro de l'image	Date d'acquisition	Type du capteur	Numéro du satellite	Nombre des bandes	Résolution spatiale
Image N°1	02/04/1985	TM	Landsat 5	7 bandes	Optique : 30 m THER : 120 m
Image N°2	30/05/2003	ETM+	Landsat 7	8 bandes	Optique : 30 m PAN : 15 m THER : 120 m
Image N°3	25/03/2011	TM	Landsat 5	7 bandes	Optique: 30 m THER : 120 m
Image N°4	02/04/2014	OLI	Landsat 8	11 bandes	Optique : 30 m PAN : 15 m THER : 60 m

c. Données existantes

Ces données sont sous forme de cartes portant diverses caractéristiques : topographie, réseau hydrographique, pédologie, végétation, climat, géologie, activités humaines, limites administratives, infrastructures. Dans ce travail, on a essayé d'élaborer une base de données géographique (Géodatabase) précise et relativement exhaustive sur la région.

2. Méthodes

a. Prétraitement des données satellites

Dans une étude basée sur la surveillance d'un milieu durant plusieurs années et dont l'objectif principal est la détection des changements, il est nécessaire d'avoir à disposition une série d'images satellitaires multi-date, qui sont acquises si possible à la même saison pour observer et détecter tous les types de changement et d'évolution dans un milieu.

Les images acquises pour ce travail sont déjà géoréférencées. Mais pour les utiliser, elles doivent présenter les caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que les différences provenant de leur comparaison puissent être associées à de réels changements (Lounis, 2005).

La comparaison entre ces différentes images nécessite aussi une élimination de toute perturbation qui affecte la signature spectrale des différents objets sur terrain, pour cela et afin de rendre l'image utile, une étape de correction radiométrique est nécessaire. Dans ce contexte, des corrections radiométriques et atmosphériques ont été effectuées sur la série d'images utilisées dans ce travail.

- **La correction radiométrique :** Afin de réaliser une comparaison spatio-temporelle correcte entre des images LANSDAT multidates, il a été nécessaire de restaurer pour

chaque pixel d'une image traitée sa propre réflectance mesurée à la surface terrestre. Les données TM et ETM+ sont codées à la source en compte numérique (Digital Number : DN) sur 8 bits, soit avec des valeurs comprises entre 0 et 255. Les données OLI sont codées quant à elles sur 16 bits, avec des valeurs allant de 0 à 65536. Ces comptes numériques doivent être convertis en unité d'énergie. Pour assurer ce passage, deux étapes doivent être réalisées : la première consiste à convertir les comptes numériques en radiance spectrale ; la seconde est de convertir la radiance spectrale en réflectance apparente. Ces conversions se font en appliquant les deux équations du tableau 2 et en prenant en considération le type du capteur.

Tableau 2 : Equations de conversion des comptes numériques en radiance spectrale et de la radiance spectrale en réflectance apparente

Type de capteur : TM et ETM+	Type de capteur : Landsat OLI
<p>Équation N°1 : convertir en radiance spectrale</p> $L_{\lambda} = ((LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$ <p>Avec :</p> <p>L_{λ} : valeur en radiance, QCAL : Compte numérique (digital number), LMIN$_{\lambda}$: valeur de luminance minimale propre à chaque bande, LMAX$_{\lambda}$: valeur de luminance minimale propre à chaque bande, QCALMIN : la valeur minimale de pixel calibrée quantifiée (généralement = 1), QCALMAX : la valeur maximale de pixel calibrée quantifiée (généralement = 255).</p> <p>Équation N°2 : convertir en réflectance apparente</p> $\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * d^2 / ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s$ <p>Avec :</p> <p>ρ_{λ} : valeur en réflectance, L_{λ} : radiance spectrale, d : distance soleil-terre, ESUN$_{\lambda}$: irradiation exo-atmosphérique solaire, θ_s : angle de zénith solaire.</p>	<p>Équation N°1 : convertir en radiance spectrale</p> <p>Les données de bande OLI et TIRS peuvent être converties en luminosité spectrale en utilisant les facteurs de rééquilibrage de rayonnement fournis dans le fichier de métadonnées :</p> $L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L$ <p>Avec :</p> <p>L_{λ} : Radiance spectrale (Watts/ (m² * srad * μm)), M$_L$: Facteur multiplicatif spécifique à une bande à partir des métadonnées, A$_L$: Facteur additif spécifiques à une bande à partir des métadonnées, Q$_{cal}$: Quantités calibrées des valeurs de pixels (CN).</p> <p>Équation N°2 : convertir en réflectance apparente</p> $\rho_{\lambda} = M_p * Q_{cal} + A_p$ <p>Avec :</p> <p>ρ_{λ} : Réflectance planétaire sans la correction de l'angle solaire, M$_p$: Facteur multiplicatif spécifique à une bande à partir des métadonnées, A$_p$: Facteur additif spécifique à une bande à partir des métadonnées, Q$_{cal}$: Quantités calibrées des valeurs de pixels (CN).</p>

▪ **La correction atmosphérique :** Après le passage en réflectance apparente, il est important d'appliquer une correction atmosphérique pour obtenir finalement la réflectance au niveau du sol. Différentes méthodes ont été développées pour corriger l'influence atmosphérique sur les données de télédétection (Gilmore *et al.*, 2015). Dans la littérature, on distingue entre les méthodes empiriques et celles basées sur le transfert radiatif. Selon Van der Meer (1999) les méthodes de correction atmosphérique empirique (la méthode de la ligne empirique) nécessitent des informations complexes tandis que les techniques de base d'image connues sous le nom de correction de transfert radiatif ou absolues sont, par contre, pratiques et relativement faciles à maîtriser dans une image.

La méthode utilisée dans ce travail est dite *Dark object subtraction* (DOS), elle se base sur la soustraction des faibles comptes numériques de l'histogramme de fréquence d'une image. C'est un modèle de correction qui a été discuté dans plusieurs articles précédents (Vincent, 1972 ; Chavez, 1975,1988 et 1989 ; Gilmore *et al.*, 2015). Cette méthode est jugée dépendante des données d'image et bien acceptée par la communauté géospatiale pour corriger la diffusion de la lumière dans les données de télédétection (Song *et al.*, 2000).

Toutefois, la méthode DOS a été développée pour les capteurs Landsat de première génération (TM), et récemment elle a été testée sur les données OLI et elle a montré son efficacité (Gilmore *et al.*, 2015).

Le logiciel ENVI[®] a été utilisé pour effectuer la correction radiométrique des quatre images utilisées.

b. Traitement des données satellite et extraction de l'information radiométrique :

• **Calcul d'indice de Cartographie Éolienne (Eolian Mapping Index) EMI :**

Dans ce travail, afin de mieux cerner les zones ensablées nous avons eu recours à un calcul simple d'indice de Cartographie éolienne (Eolian Mapping Index EMI) pour les quatre dates (1985, 2003, 2011 et 2014). Cet indice a été utilisé surtout pour raffiner la classification supervisée et aider à choisir les zones d'entraînement essentiellement pour les dates (1985, 2003, 2011) pour lesquelles nous ne disposons pas de levés de terrain. L'indice de cartographie éolienne était conçu par le United States Geological Survey (USGS). Le postulat de base est que dans les régions arides et semi-arides, la réflectance des sols varie en fonction de leur composition et de leur texture (CISSOKHO, 2011). Ces deux paramètres influent directement sur l'estimation l'intensité de l'érosion éolienne. Plus la réflectance est élevée, plus les sables fins dominent, donc plus grand est le potentiel de mobilisation des particules par le vent (CISSOKHO, 2011). Les cartes issues du EMI sont des images couleurs produites en superposant les bandes du proche infrarouge, du rouge ainsi que de leur rapport. Dans cette image, diverses nuances de jaune indiquent des niveaux différents de faible densité de végétation et de sols à haute réflectance, et servent d'estimer le potentiel d'érosion ou/et sa vulnérabilité au vent. Dans les images Landsat, les jaunes plus brillants présentent un potentiel d'érosion plus élevé que les jaunes plus ternes, les non-jaunes ayant peu ou pas de potentiel d'érosion par le vent (<https://geochange.er.usgs.gov>).

Le logiciel ArcGIS[®] a été utilisé pour calculer l'indice EMI pour les quatre dates.

• **La classification radiométrique :**

La classification supervisée a été retenue dans ce travail. Le principe de base de cette classification consiste à grouper les pixels qui renferment la même signature spectrale dans la même classe. Toutefois, l'objectif de réaliser une classification supervisée est d'extraire seulement les zones ensablées (à forte présence d'accumulations éoliennes). Dans ce cadre nous avons choisi deux classes : la première correspond aux accumulations éoliennes ou les surfaces ensablées et la deuxième englobe toutes les autres composantes du paysage de la région d'étude tels que : les étendues minérales, les croûtes, les parcours, les zones cultivées et les labours...).

Pour la date de l'année 2014 la détection des zones ensablées, ayant une forte présence d'accumulations éoliennes s'est reposée sur les levés terrain. Par ailleurs, ceci n'était pas le cas pour les autres dates, il était un peu difficile de réaliser des cartes précises et compatibles avec la réalité de terrain. Pour ces dates les parcelles d'apprentissage utilisées pour la classification ont été sélectionnées directement à partir de la carte d'indice de cartographie éolienne (EMI).

L'évaluation et la validation de la classification s'appuie sur le calcul d'une matrice de confusion. La qualité de la classification a été évaluée à l'aide du coefficient de Kappa³. Lorsque le coefficient de Kappa dépasse 0,8 (80%), la classification est conventionnellement considérée comme pertinente (Landis et Koch, 1977). Dans notre cas et pour les quatre classifications réalisées le coefficient de kappa a dépassé 0.9 (CK 1985 : 0.96, CK 2003 : 1, CK 2011 : 2011 et CK 2014 : 0.92).

Tableau 3 : Matrices de confusion pour les quatre dates

Matrice de confusion 1985 en (%)				Matrice de confusion 2003 en (%)			
Classes	Ensemblement-vérification	Autres-vérification	Total	Classes	Ensemblement-vérification	Autres-vérification	Total
Pixels non classés	0	0	0	Pixels non classés	0	0	0
Ensemblement	100	26	3,54	Ensemblement	100	0	3,33
Autres	0	99,74	96,46	Autres	0	100	96,67
Total	100	100	100	Total	100	100	100
Matrice de confusion 2011 en (%)				Matrice de confusion 2014 en (%)			
Classes	Ensemblement-vérification	Autres-vérification	Total	Classes	Ensemblement-vérification	Autres-vérification	Total
Pixels non classés	0	0	0	Pixels non classés	0	0	0
Ensemblement	100	0	7,53	Ensemblement	88,89	0	18,29
Autres	0	100	92,47	Autres	11,11	100	81,71
Total	100	100	100	Total	100	100	100

III. Le suivi de la dynamique spatio-temporelle des accumulations éoliennes

1. La cartographie et le suivi des accumulations éoliennes

Une série de cartes de la répartition des accumulations sableuses est issue de la classification des différentes images aux quatre dates. La comparaison entre ces cartes a révélé d'importantes transformations spatio-temporelles. En effet, la superficie de ces accumulations fluctue d'une année à une autre et d'une unité morpho-pédologique à une autre, en relation avec les aléas du climat, avec la topographie mais aussi avec les changements des stratégies d'occupation humaine.

L'analyse de la distribution spatiale des accumulations dans le bassin versant de Bouhamed nous mène à constater une variation spatio-temporelle au cours de la période d'étude. Ainsi, les surfaces sableuses sont marquées par un changement au niveau de la superficie, d'où nous avons remarqué la disparition des grandes accumulations sableuses ou l'apparition d'autres dans des endroits variés. Ces différentes formes d'accumulations éoliennes sont observées fréquemment sur les parcours dégradés, dans les embouchures des oueds et dans les champs mis en culture (terrains de céréaliculture et d'oléiculture) (Mekrazi, 2003). Un champ dunaire mobile est nettement distingué à l'embouchure d'oued Bouhamed. En effet, le développement des champs dunaire est dû souvent au remaniement par le vent des épandages des oueds. Leur morphologie présente plusieurs crêtes de dunes coalescentes orientées perpendiculairement au sens de l'écoulement des oueds (Ben Fraj, 2012). D'autres formes d'accumulation sont observées sur le terrain. Il s'agit des surfaces de déflation qui apparaît sous forme de petites

³ Coefficient de Kappa : correspond au rapport entre l'erreur associée à une classification réalisée et l'erreur associée à une classification aléatoire.

taches aux pieds déchaussés des oliviers (fig. 5 photo2) et d'autres surfaces de reg dénudé dans les zones de parcours.

En général, la plus importante étendue d'accumulation s'observe en 2003 et la plus faible caractérise l'année 2014 (tab. 4).

Tableau 4 : Évolution des superficies des accumulations éoliennes

<i>Date</i>	1985	2003	2011	2014	<i>Total BV</i>
<i>Superficie</i>					
<i>En Km²</i>	88	136,08	72	44,7	567 km ²
<i>En %</i>	5.5	4	4	,9	

Dans le détail, pour l'année 1985 (fig. 7), les accumulations sableuses ont représenté 15.5% de la superficie totale du bassin versant étudié, ce qui est équivalent à 88 km². L'aspect général des accumulations est sous forme de petites quantités de sables dispersées et réparties sur presque la totalité du bassin versant. Les accumulations sableuses se répartissent selon une hiérarchie topographique aval amont. Les accumulations sableuses les plus distinguées sont localisées dans la partie aval et plus précisément dans le secteur d'El Ghrabet connu par l'extension des parcelles d'oliviers et par de très importantes dunes de sable. D'autres accumulations sableuses s'étendent dans les zones d'interfluves, ces zones occupent, en effet, des grandes surfaces, témoin d'un ancien glacis ou des surfaces d'érosion. Ces surfaces se localisent entre Oued Bouhamed et Oued Es-sder et sont marquées par une importante quantité de sable. Des accumulations de sables très étendues peuvent être remarquées aussi sur la terrasse de la rive droite de l'Oued Bouhamed. Cette terrasse est constituée par des éléments sableux et limoneux fins (Khatteli, 1981), et est considérée comme l'origine de l'ensablement qui menace fréquemment la route de Médenine-Ben Guerdane (Mekrazi, 2003). Dans la partie intermédiaire du bassin de Bouhamed des petites accumulations sableuses dispersées sont réparties sous forme de voiles éoliens et de micros nebkhas. Cependant, la partie amont qui est considérée comme une zone montagneuse est caractérisée par la présence de cuvettes et de vallées colmatées par des sables fins et des limons. Le lit d'oued Graguer est marqué par la présence d'accumulations sableuses, ce qui est le cas aussi pour le lit d'Oued Bir El Ouelja. Ces accumulations sont considérées comme des zones d'alimentation qui favorisent le déclenchement de l'ensablement.

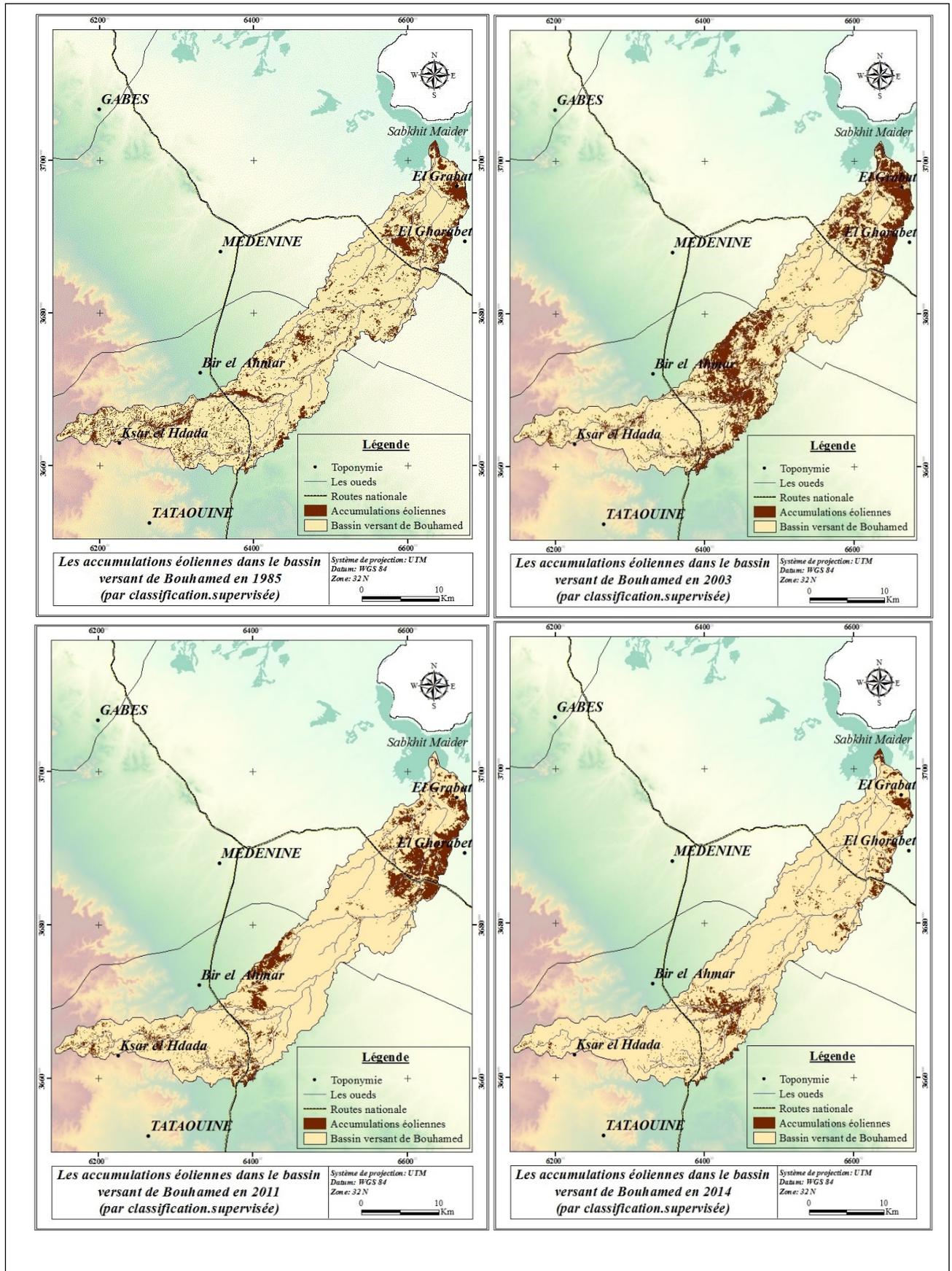


Figure 7 : répartition des accumulations sableuses pour les quatre dates (1985, 2003, 2011 et 2014)

En 2003 (fig. 7), les accumulations éoliennes ont marqué une évolution spatiale très importante. Les zones ensablées ont représenté 24% de la superficie totale. Les dépôts sableux sont souvent localisés dans la partie aval et intermédiaire du bassin versant de Bouhamed. Le secteur d'El Ghrabet est toujours ensablé, ainsi que la terrasse alluviale qui est située sur la rive droite d'Oued Bouhamed. Cependant, les quantités de sables qui sont localisées sur la zone d'interfluve d'Oued Bouhamed et Oued Es-sder connaissent une diminution par rapport à leur étendue en 1985. Dans la partie intermédiaire les accumulations de sable sont devenues plus volumineuses surtout dans la région de Charaf El Layha à la proximité de la route régionale qui est localisée entre oued Sidi Moussa-Essed et oued Bir El Ouelja. Le lit d'Oued Bir El Ouelja est toujours colmaté par des sables fins. En effet, les formations éoliennes dans la partie amont du bassin versant ont connu une régression, les quantités sableuses qui occupent le lit d'Oued Graguer sont devenues plus réduites.

La situation en 2011 (fig. 7) se caractérise par une diminution très remarquable des accumulations sableuses. Les zones ensablées sont estimées à 72 km² soit à 14 % de la superficie totale de la zone d'étude. Les accumulations de sable sont toujours localisées dans la partie aval dans le secteur d'El Ghrabet et presque dans les mêmes endroits mentionnés pour les deux périodes précédentes. Cependant, l'apparition d'une grande masse sableuse a été remarquée à la proximité de la route principale de Médenine-Ben Guerdane. Les accumulations des sables dans la zone intermédiaire sont toujours localisées dans les lits des Oueds. En effet, le lit de Oued Bir El Ouelja est toujours marqué par la présence des sables.

Finalement, pour l'année 2014 (fig. 7) l'observation de la carte nous mène à constater une diminution continue des accumulations-de sable par rapport à l'année 2003. Les zones ensablées ont connu une réduction et actuellement les accumulations éoliennes ne présentent que 7.9% de la superficie totale du bassin versant de Bouhamed. Toutefois, les accumulations de sable sont toujours concentrées dans la partie aval occupée par les oliviers d'El Grabat. Sur la rive droite d'Oued Bouhamed une réduction de la superficie des accumulations sableuses est notée. Dans la partie intermédiaire, des accumulations de sable sont localisées dans la zone d'interfluve de Bir El Ouelja-Ben Ebaira.

2. Schémas de l'évolution spatio-temporelle des accumulations éoliennes :

Afin de détecter la dynamique des accumulations éoliennes, les cartes issus de l'interprétation des quatre images ont été superposés deux à deux pour donner une couche résultante appelée carte des changements. Cette couche a permis d'identifier les tendances d'évolution et de calculer les superficies concernées. La cartographie des changements s'est fondée sur le principe du « profil temporel de changement » (Ghram-Messedi, 2007). Ce profil repose sur un schéma de classification qui comporte deux grandes classes de changements : régression et progression.

Selon les cartes de changements (fig.,8), les formations éoliennes dans le bassin versant de Bouhamed ont connu durant les trente dernières années différentes phases qui varient entre la régression et la progression des couvertures sableuses. La période entre 1985 et 2003 est considérée comme une phase de transgression, l'ensablement a évolué spatialement d'une superficie équivalente à 47 km², une phase de pic est enregistrée pendant l'année 2003. Par contre, la période entre 2003 et 2011 est considérée comme une phase de régression, l'ensablement a diminué d'une façon remarquable. Cette diminution se poursuit jusqu'à nos jours. Les accumulations des sables sont devenues d'une taille réduite mais l'ensablement reste toujours présent dans le bassin versant étudié et présente une grande menace surtout pour les oliviers et les terres cultivées qui sont localisées dans la partie aval

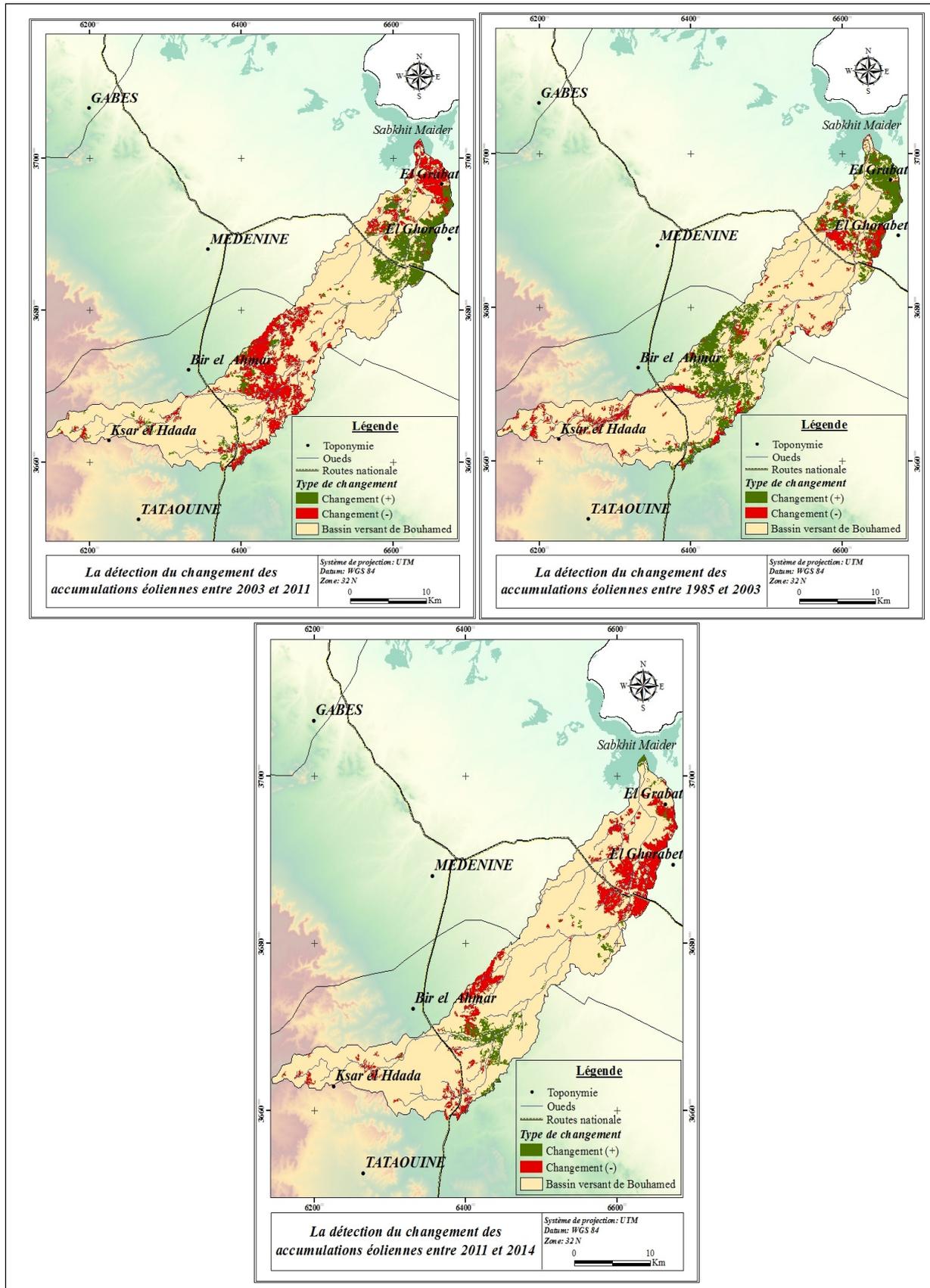


Figure 8 : la détection des changements des accumulations éoliennes

3. Les facteurs de la variation spatio-temporelle des accumulations éoliennes

L'analyse de ces différentes dynamiques montre le rôle important que joue le milieu physique (topographie, morpho-pédologie, hydrologie) et l'organisation spatiale des pratiques agro-pastorales sur la répartition spatio-temporelle de ces accumulations.

Avec sa forme allongée et son orientation Sud-Ouest–Nord-Est, le bassin versant de Bouhamed semble se comporter comme étant un couloir facilitant le transfert des sables. Ce transfert est conforme à une résultante dynamique des déplacements potentiels du sable (Raddadi *et al.*, 2015), fortement marquée par l'orientation Sud-Ouest–Nord-Est. On peut admettre à ce propos que le bassin versant d'oued Bouhamed représente un système morpho dynamique éolien où le processus d'accumulation des masses sableuses après vannage des limons arrachés du zone du piémont (zone d'alimentation) et déposés en terrasses dans les zones d'épandage (khatteli 81, 93, Talbi 93). Ses accumulations seront à leur tour remanié par le vent est déposé dans les embouchures des oueds et dans les champs mis en culture (Mekrazi, 2003). Ce qui peut démontrer l'origine locale du sable. Les apports éoliens lointains sont peut-être faibles et ne constituent qu'une infime fraction.

La variation spatiotemporelle des accumulations éoliennes est liée aussi aux facteurs climatiques et anthropiques. Comme toute la Tunisie méridionale, les conditions climatiques de la région de Bouhamed se caractérisent par une grande aridité et par une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, des températures et du vent. Sur une période de trente ans, nous avons essayé de montrer l'ampleur de l'effet du climat à travers les dynamiques spatio-temporelles des accumulations éoliennes.

La phase de sécheresse assez prononcée en 1985 (fig., 9) se conjugue avec une faible pluviométrie associée à un vent actif et fort du direction Sud-Ouest explique l'importance spatiale des accumulations sableuses dans le bassin versant de Bouhamed. Puis, une amélioration des conditions climatiques se produit avec l'année 2003. Cette année correspond à une pluviosité assez importante (fig., 9), mais les quantités de dépôt sableux semble avoir atteint l'apogée de son expansion. Cette expansion peut être expliquée soit par la succession d'un ensemble d'années sèches de la fin des années 1990 soit par l'intervention intense de l'homme. Il semble finalement, que l'on soit avec l'an 2011 et 2014, dans une période de stabilisation avec une atténuation continue des surfaces occupées par les accumulations éoliennes. Ces deux années sont marquées par des précipitations assez importantes (fig., 9) et les accumulations éoliennes décrites en maints endroits dans le bassin ont disparu, ou du moins se sont stabilisées et fixées. La présence de ces formes d'accumulation reste ponctuelle dans quelques champs d'oliviers répartis à différents endroits dans la plaine. Cette stabilisation est liée en partie dans une grande partie à l'amélioration de l'humidité du sol et à une certaine restauration de la végétation qui est censé être à l'apogée de son développement.

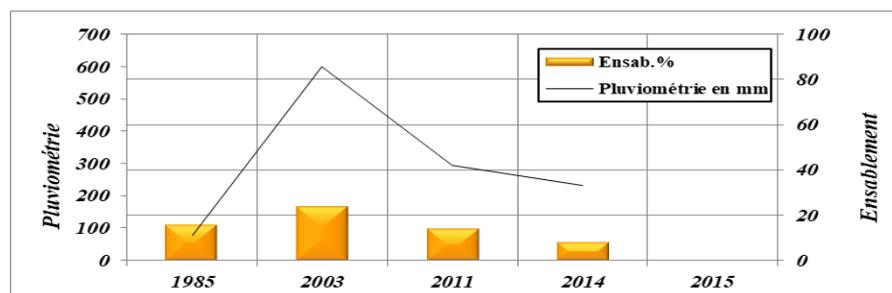


Figure 9 : correspondance entre pluviométrie et surface ensablée

Les conditions climatiques ne sont pas la seule cause qui favorise la présence ou l'absence des accumulations éoliennes. D'autres facteurs peuvent être responsables. En effet, la présence de l'Homme et les activités inappropriées exercées dans un écosystème fragile peuvent être considérées la cause principale qui provoque et facilite le déplacement du sable. Toutefois, le surpâturage intensif surtout pendant les années sèches provoque la réduction du couvert végétal et expose un sol nu au processus de l'érosion éolienne. Les terres de parcours sont considérées comme des zones de départ pour les particules sableuses qui seront accumulées par la suite dans les champs de culture ou sur les routes. En effet, la répartition spatiale de l'occupation des terres dans le bassin versant de Bouhamed se caractérise par la dominance des terres de parcours avec 77% des superficies (Arrak, 2016). Ces terres de parcours dominent la zone de plateau et piémont jusqu'à la haute plaine où les cultures sont limitées à cause des contraintes topographiques et édaphiques. Dans la basse plaine les cultures sont de plus en plus envahissantes. L'extension de ces zones de cultures est faite au détriment des parcours steppiques au niveau des plaines qu'elles soient limoneuses ou sableuses.

Dans cette étude, nous citons l'exemple de la zone d'El Ghrabet anciennement⁴ (début du 20^{ème} siècle) occupée par les premières parcelles d'arboriculture de la Jeffara. En effet, les différentes dates analysées dans cette étude ont montré que la partie ouest d'El Ghrabet inclus dans le bassin de Bouhamed est constamment ensablée. La cartographie de l'évolution de l'occupation des terres dans l'ensemble de cette zone depuis 1985 nous mène à déduire une évolution remarquable vers une plus grande anthropisation et artificialisation exprimée par une extension marquée des parcelles de cultures. La superficie totale occupée s'est multipliée par trois entre 1985 et 2014 en passant 74,5 km² à 214.6 km² (fig.,10). Dans le bassin versant de Bou Hamed l'extension s'est faite au détriment des parcours des plaines qu'elles soient limoneuses ou bien sableuses.

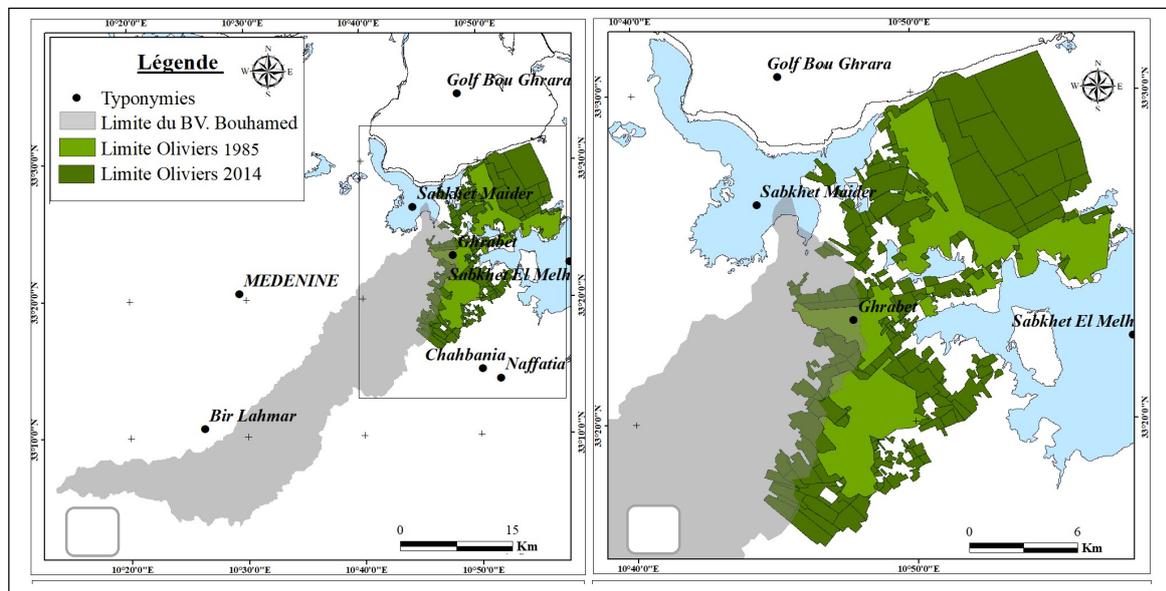


Figure 10 : Evolution des parcelles de culture à El Ghrabet

Dans ces parcelles le labour répétitif rend le sol plus meuble et plus léger surtout dans le cas d'un sol qui est de nature fragile et de faible profondeur (Khatteli, 1984, Fehri, 2003). Ce

⁴Henchir El Ghrabet est repéré sur la carte topographique 1/100000 de Médénine (Feuille N° XCII) datant du début du 20^{ème} siècle (1929). Les données de cette carte sont issues des travaux sur terrain datant de 1906 et 1907.

dernier devient plus exposé à l'érosion éolienne et plus facile à transporter par le vent. En effet, le matériel sableux enlevé sera accumulé par la suite dans des autres secteurs.

Face aux phénomènes d'ensablement des aménagements de lutte contre la désertification (les tabias, les brise-vents, les reboisements) ont été mises en place. Ces derniers ont joué un rôle important dans la fixation des dunes et la protection des champs et des routes contre ce phénomène. Ces aménagements ont eu de l'influence sur la dynamique spatiotemporelle de l'ensablement ce qui a contribué à une régression ou à une transgression des accumulations sableuses dans plusieurs endroits.

Les tentatives de lutte contre l'ensablement dans la Jeffara en général, ont débuté juste après l'indépendance. En effet, les premières interventions forestières, ayant comme objectif la stabilisation des dunes, remontent au début des années soixante et plus précisément en 1962 lors de la mise en œuvre du premier plan national du développement économique et social. Ce plan a donné une importance particulière à la lutte contre l'ensablement (Khatteli, 1996, Ouessar et al, 2006). Dans cette étude nous avons répertorié quelques aménagements qui ont été exécutés dans le bassin versant de Bouhamed pour lutter contre l'ensablement. Parmi les aménagements les plus remarquables le périmètre de Bouhamed. Ce dernier est un périmètre d'intervention qui a été créé en 1962 pour protéger la route de Médenine-Ben Guerdane contre l'envahissement des sables. Ce périmètre qui est situé sur la rive droite d'oued Bouhamed s'étend sur une superficie de 30 ha. Les moyens utilisés pour la lutte contre l'ensablement sont des moyens mécaniques des Tabias surmontées par des plaques en fibrociment. Le schéma de stabilisation choisi est celui de la contre dune (Mekrazi, 2003). Depuis l'année 1980, les travaux de suivi et de maintenance pour ce site ont été arrêtés, une reprise des travaux a été notée pendant les années 1990. En effet, après la consultation des cartes de l'ensablement pour les quatre périodes étudiées nous avons constaté que pour les années 1985, 2003 et 2014 les accumulations sableuses qui envahissent cette route sont sous forme de petites accumulations sableuses dispersées. Cependant, pour l'année 2011 la route a été colmatée par des grandes accumulations sableuses surtout dans la partie qui est à la proximité du périmètre d'intervention de Bouhamed.

Conclusion :

Ce travail de recherche, a contribué, dans le cadre de la surveillance des paysages des milieux arides, à emboîter les échelles d'observations depuis les informations issues de la télédétection (images satellite) jusqu'à la validation sur le terrain. Il a contribué aussi à appréhender les dynamiques spatio-temporelles des accumulations sableuses sur une étendue de 567 km². Ces informations pourraient fournir des éléments de référence pour les décideurs, surtout que cette étude a fourni un nombre important de données spatialisées et de représentations synthétiques sur la région pouvant alimenter une éventuelle base de données sur la région et aider les aménageurs à mieux intervenir pour une gestion optimale et une préservation des ressources naturelles.

L'approche adoptée le long de cet article vise à détecter les différentes formes d'accumulations éoliennes et de suivre leur dynamique spatio-temporelle. Une telle méthode sert dans un premier temps à la production des cartes instantanées à partir de la classification radiométrique afin d'évaluer le risque potentiel de l'ensablement à partir de la détection des surfaces sableuses, surtout que les processus éoliens dans les zones arides et semi-arides nécessitent une surveillance constante, tant qu'ils se manifestent par des formes d'érosion ou d'accumulation éolienne. Dans un deuxième temps, la méthode a mis en évidence un schéma spatio-temporel de la dynamique des accumulations éoliennes et les tendances d'évolution. Ces tendances dépendent d'une combinaison de changements climatiques et d'activités humaines

intensives ou non durables dans des environnements écologiquement fragiles (Ren et al, 2016, Mihi, et al, 2017).

Il faudrait maintenant pouvoir mettre en place des dispositifs d'observations plus précis (quantification des effets des processus), qui tiennent compte des différents types de paysages de cette région. Pour cela, il est important de tester l'utilisation des images à très haute résolution spatiale (Ikonos, Quickbird, GeoEye, Pléiades) ou d'autres à hautes résolution spectrale (Hyperion, ...), afin de définir dans le temps et dans l'espace, et d'une façon plus précise, la dégradation des paysages dans ces manifestations éoliennes.

Bibliographie :

ABAAB A., 1986. Mutations socio-économiques de la Jeffara orientale (Sud tunisien). In : *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, n°41-42, 1986. *Désert et montagne au Maghreb*. pp. 327-338 ; <https://doi.org/10.3406/remmm.1986.2465>

ARRAK N, 2016. La télédétection spatiale et le SIG pour le suivi du risque de la désertification dans les régions arides : étude de cas du bassin versant de Bouhamed (Sud-Est de la Tunisie), *Mémoire de master en géomorphologie et environnement, Université de Tunis*, 132p.

AUCLAIR L., CHAIZE-AUCLAIR M., DELATRE E. ET SANDRON F., 1997. Dynamique sociale et désertification : le cas de Memel Habib dans le sud tunisien", *Revue des régions arides, numéro spécial, Institut des régions arides, Médenine*, p. 481-487.

BEN FRAJ T., 2012, La Jeffara septentrionale étude de l'évolution géomorphologique au cours du quaternaire, *thèse de doctorat, université de Tunis*, 333p.

CISSOKHO R., 2011. Développement d'un indice de vulnérabilité à l'érosion éolienne à partir d'images satellitales, dans le bassin arachidier du Sénégal : cas de la région de Thiès. *Thèse soutenue à l'Université de Montréal*. 251 p (18) (PDF)

CHAVEZ, P.S., 1975. Atmospheric, solar, and M.T.F. corrections for ERTS digital imagery, *Proc. American Society of Photogrammetry Fall Conference, Phoenix, Arizona*, p. 69.

CHAVEZ P.S., 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of Environment*, N°24 pp459-479. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3).

CHAVEZ P.S., 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, N°55 (9): 1285-1294. Doi: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70016102/>

FEHRI N., 2003. Les rapports entre les processus morphogéniques et les pratiques agropastorales dans la plaine oléicole de Sfax : exemple du bassin versant de l'oued Chaal-Tarfaoui (Plaine de Sfax, Tunisie centro-orientale), *thèse de doctorat Aix Marseille 1*. 368p. publiée en 2007 par la faculté des lettres des arts et des humanités à la Manouba.

FLORET CH et PONTANIER R., 1982. L'aridité en Tunisie présaharienne : climat, sol, végétation et aménagement, *O.R.S.T.O.M-Paris-1982*, 544p.

GENIN D, GUILLAUME H., OUESSAR M., OULED BELGACEM A., ROMAGNY B., SGHAIER M., TAAMALLAH H. 2006 : Entre désertification et développement La Jeffara tunisienne, *Ed. Cérès, IRA, IRD, Tunis*, 351 p.

GHRAM-MESSEDI A. & ERIC DELAITRE., 2007. Les états de surface en zone aride à partir d'indices radiométriques et de classifications multitemporelles d'images Landsat TM prises sur la région

de Menzel Habib (Tunisie méridionale). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, John Libbey Eurotext, 2007.

GILMORE, S., SALEEM, A., DEWAN, A., 2015. Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data. *Research@Locate '15*, 1323, 100-108. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-1323/paper41.pdf>.

GUILLAUME HENRI, GENIN DIDIER, NOURI H., 2005 : Mutations agro-pastorales et recompositions socioterritoriales sur un transect montagne/paline en Tunisie aride In : *Georgoudis A. (ed.), Rosati A. (ed.), Mosconi C. (ed.) Animal production and natural resources: utilisation in the Mediterranean mountain areas Wageningen: Wageningen Academic Publ., (115), 39-44. (Publication - EAAP; 115)*

GUILLAUME HENRI, ROMAGNY BRUNO, FETOUI M., NOURI H., PALLUAULT S., HAJJIJ A. 2003. Sociétés, dynamiques territoriales et compétitions sur les ressources naturelles dans la Jeffara tunisienne : *rapport scientifique final du thème 2 du programme "la désertification dans la Jeffara, sud-est tunisien"*. Tunis ; Tunis : IRA ; IRD, 248 p. Identifiant IRD : fdi:010047301

KHATTELI H., 1981. Recherche stationnelles sur la désertification. Dynamique de l'érosion éolienne dans la Jeffara Tunisienne. *Thèse de 3ème cycle. Paris 1. 218p.*

KHATTELI H., 1996. Erosion éolienne en Tunisie aride et désertique- Analyse des processus et recherches des moyens de lutte. Thèse de doctorat Ph.D, Univ. De Gent Belgique. 180p.

KHATTELI H. & BELHAJ N., 1993. Contribution à l'étude du vent en rapport avec l'érosion éolienne dans le Nefzaoua (Sud-Ouest tunisien), *Sécheresse n°2, vol. 4, juin 93, p117-121. 5p.*

LANDIS J. R. AND GARY G. K., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics, International Biometric Society, Vol. 33, No. 1, pp. 159-174.* <https://doi.org/10.2307/2529310>

LOUNIS, B., & BELHADJ-AISSA, A., 2005. Processus de correction radiométrique relative "PCRR" appliqué aux images Landsat TM multi-dates. *International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunication (SETIT), Sousse, Tunisie.*

MEER VAN DER F., 1999. Physical principles of optical remote sensing, *Spatial statistics for remote sensing, Springer, Dordrecht , pp. 27-40.*

MEKRAZI N., 2003, Les moyens de la lutte contre l'ensablement dans la Jeffara, évaluation et impact sur l'évolution du milieu (exemple la région de Médenine), *Mémoire de Master, Université de Tunis, 121p.*

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?. *Ecol. Indic. 105, 365–375.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027>.

OUESSAR M., OULED BELGACEM A., BOUFELGHA M. ET YAHYAOUI H., 2006 : Aménagement et techniques de lutte contre la désertification : inventaire et bilan. In *GENIN D, GUILLAUME H., OUESSAR M., OULED BELGACEM A., ROMAGNY B., SGHAIER M., TAAMALLAH H. 2006 : Entre désertification et développement La Jeffara tunisienne, Ed. Cérès, IRA, IRD, Tunis, pp131-145.*

OUERCHEFANI D, 2012, Caractérisation et suivi des états de surfaces éolisés en Tunisie présaharienne : approches stationnelles et spatiales, *thèse de doctorat, Univ. Lyon II, France, 450p.*

RADDADI A., FEHRI N. & GAMMAR A.M., 2015 - Relation entre le régime des vents et le modelé des champs dunaire dans la région de Tataouine (Tunisie du Sud). In *Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte, 36. Actes du colloque international. Revue des Régions Arides, 95-105.*

REN, X., DONG, Z., HU, G., ZHANG, D., & LI, Q.,2016. A GIS-based assessment of vulnerability to aeolian desertification in the source areas of the Yangtze and yellow rivers. *Remote Sensing, MDPI*, 8, 626.

ROMAGNY B., GUILLAUME H., BEN OUEZDOU H., PALLUAULT S. 2004. Ressources en eau, usages et concurrences dans la Jeffara tunisienne. *Marseille : LPED, 38 p. (Série Usages, Appropriation, Gestion des Ecosystèmes. Documents de Recherche - LPED ; 1).*

SONG C. WOODCOCK C., SETO K., LENNEY M. ET MACOMBE S. A., 2000. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment, Vol. 75, No. 2, 2001, pp. 230-244. doi:10.1016/S0034-4257(00)00169-3*

TALBI M., 1993, Contribution à l'étude de la désertification par télédétection dans la Jeffara (Tunisie du sud-est), *Thèse doctorat, FSHS de Tunis, 2 tomes, 305 p.*

VINCENT R.K., 1972. An ERTS multispectral scanner experiment for mapping iron compounds. Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, *Ann Arbor, Michigan, II: 1239-1247. DOI:http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730001633.pdf/*