

## **Quantification de l'érosion éolienne dans le sud tunisien**

**Christel BOUET<sup>1,2</sup>, Mohamed Taieb LABIADH<sup>3</sup>, Gilles BERGAMETTI<sup>2</sup>,  
Badie ATTOUF<sup>3</sup>, Benoit LAURENT<sup>2</sup>, Béatrice MARTICORENA<sup>2</sup>, Jean Louis  
RAJOT<sup>2,4</sup> et Houcine KHATTELI<sup>3</sup>**

<sup>(1)</sup> Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (iEES Paris),  
UMR IRD 242, Université Pierre et Marie Curie - CNRS - INRA - Université Paris  
Est Créteil - Université Paris Diderot, Tunis, Tunisie

<sup>(2)</sup> Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), UMR  
CNRS 7583, Université Paris Est Créteil - Université Paris Diderot, Institut Pierre  
Simon Laplace, Créteil, France

<sup>(3)</sup> Institut des Régions Arides (IRA), Médenine, Tunisie

<sup>(4)</sup> iEES Paris, UMR IRD 242, Université Pierre et Marie Curie - CNRS - INRA -  
Université Paris Est Créteil - Université Paris Diderot, Bondy, France

[christel.bouet@ird.fr](mailto:christel.bouet@ird.fr)

### **RÉSUMÉ**

Les régions arides du sud de la Tunisie sont des zones naturellement très sensibles à l'érosion éolienne. Non seulement les précipitations dans ces régions sont faibles (inférieures à 200 mm), mais les sols sont fins, sableux et peu profonds, c'est-à-dire facilement érodables par le vent. L'utilisation de nouvelles techniques agricoles à la place des techniques traditionnelles a conduit à une augmentation de l'érosion éolienne dans ces régions. Par exemple, l'augmentation croissante de l'utilisation de la déchaumeuse à disques a eu d'importantes conséquences sur la dégradation des champs en modifiant la structure des sols et les caractéristiques de leur surface.

Le présent travail de modélisation est centré sur la quantification de la déflation éolienne à l'échelle du sud tunisien en vue de déterminer en particulier les zones les plus sensibles à ce phénomène pour des objectifs de diagnostic et de stratégie de lutte efficace contre l'érosion éolienne. Les flux d'érosion éolienne sur le sud de la Tunisie ont été simulés pour l'année 2008 à une résolution de 10 km x 10 km en prenant en compte le type d'usage des sols et les pratiques agricoles associées à l'aide du modèle d'érosion éolienne Dust Production Model (DPM, Marticorena et Bergametti [1995] ; Alfaro et al. [1998]). Afin de prendre en compte les différents types d'outils agricoles utilisés sur le domaine étudié, les paramétrisations du seuil et du flux d'érosion éolienne en fonction des caractéristiques des billons de labour (hauteur et espacement) développées par Kardous et al. [2005a ; b] ont été intégrées au DPM.

Les résultats suggèrent que l'ensemble de la région étudiée subit le phénomène de l'érosion éolienne. La majorité de celle-ci est simulée sur les zones de parcours qui représentent également la majorité des types d'occupation du sol rencontrés. Cependant, dans la région nord-ouest de la zone d'étude, où est localisée la majorité des surfaces cultivées, la contribution de ces dernières au flux d'érosion éolienne simulé peut devenir majoritaire. Enfin, parmi les surfaces cultivées, les plus touchées par l'érosion éolienne sont les grandes cultures, puis les oliveraies bien que ces dernières représentent une surface cultivée plus importante.

Mots-clefs : érosion éolienne, sud tunisien, modélisation régionale

## **SYMMARY**

Arid regions of southern Tunisia are areas naturally susceptible to wind erosion. Not only precipitation in these areas are low (less than 200 mm), but soils are fine, sandy and shallow, that is to say easily eroded by wind. The use of new agricultural techniques instead of the traditional ones has led to an increase of the intensity of wind erosion in these areas. For instance, the increasing use of the one-way disc plough has had important consequences on field degradation by modifying the structure of the soils and their surface features.

This modelling work is focused on the quantification of wind erosion in southern Tunisia, in particular to determine the most susceptible areas for purposes of diagnosis and effective strategy against wind erosion. The wind erosion flux in the South of Tunisia was estimated for 2008 with a grid mesh size of 10 km x 10 km depending on the type of land use and agricultural practices with the wind erosion model "Dust Production Model" (DPM, Marticorena and Bergametti [1995]; Alfaro et al. [1998]). To account for the different types of agricultural tools used in this region, the parameterizations of the threshold wind friction velocity and of the wind erosion flux as a function of the characteristics of the tillage ridges (height and spacing) developed by Kardous *et al.* [2005a; b] were included in the DPM.

Our results suggest that the whole region undergoes the phenomenon of wind erosion. As a majority, wind erosion is simulated in rangelands, which also represent the dominant encountered land use class. However, in the north-eastern part of the studied domain, where the majority of cultivated lands are located, the contribution of these surfaces to the simulated wind erosion flux can become the most important. Finally, among the cultivated surfaces, the most affected by wind erosion are cereal fields, and then olive groves, even though this last category covers a greater cultivated surface.

Keywords: wind erosion, southern Tunisia, regional modelling

## **1. INTRODUCTION**

Les régions arides du sud de la Tunisie sont des zones très sensibles à l'érosion éolienne. Non seulement, les précipitations dans ces régions sont faibles (inférieures à 200 mm), mais les sols sont fins, sableux et peu profonds [Labiadh *et al.*, 2011], c'est-à-dire faciles à éroder par l'action mécanique du vent sur la surface [Chepil, 1951].

Bien que faibles, les précipitations sont néanmoins suffisantes pour permettre le développement d'une végétation naturelle et autoriser certaines activités agricoles (culture et élevage). En conditions naturelles, la couverture végétale pérenne (même si elle est faible) constitue une protection significative contre l'érosion éolienne en même temps que l'encroûtement des sols contribue à la stabilité des surfaces non végétalisées en augmentant la cohésion des particules du sol. L'utilisation de ces sols naturels à des fins agricoles va donc perturber cet équilibre, ce qui devrait renforcer l'érosion éolienne d'une part en réduisant le couvert végétal et d'autre part en détruisant les encroûtements que ce soit lors du défrichement et du labour avant la mise en culture ou par piétinement lors de la pâture par les animaux.

L'utilisation de nouvelles techniques agricoles qui ont peu à peu supplanté les techniques traditionnelles a conduit à une augmentation de l'érosion éolienne dans certaines régions de la Tunisie. Par exemple, l'augmentation croissante de l'utilisation de la déchaumeuse à disques

a eu d'importantes conséquences sur la dégradation des champs en modifiant la structure des sols et les caractéristiques de leur surface. Ainsi, dans la plaine de la Jeffara dans le sud-est Tunisien, les pertes en sol associées à l'utilisation de la déchaumeuse à disques ont été estimées à environ 180 tonnes/ha/an pour les années 1990 [Akrimi *et al.*, 1993]. Plus récemment, Labiadh [2011] a montré que, sur une même parcelle, les flux d'érosion les plus faibles sont mesurés lorsque le travail du sol est effectué avec une déchaumeuse à socs, 3 à 4 fois plus élevés lorsqu'un tiller est utilisé pour le labour et près de 8 fois plus forts lorsque le travail du sol est conduit à l'aide d'une déchaumeuse à disques.

Même si ce phénomène d'érosion éolienne est aujourd'hui reconnu comme un problème majeur dans le sud de la Tunisie, il n'existe à l'heure actuelle aucune quantification précise de celle-ci à l'échelle régionale. C'est pourquoi le présent travail de modélisation est centré sur une quantification de la déflation éolienne à l'échelle du sud tunisien en vue de déterminer en particulier les zones les plus sensibles à ce phénomène pour des objectifs de diagnostic et de stratégie de lutte efficace contre l'érosion éolienne.

## **2. MÉTHODE ET OUTILS**

### **2.1 Méthode**

Cette étude propose de développer une méthode de quantification des flux érodés par le vent basée sur la modélisation numérique et d'en faire une première application au cas du sud tunisien. La

stratégie adoptée a consisté à adapter aux régions semi-arides un modèle d'érosion éolienne conçu à l'origine pour simuler les émissions d'aérosols terrigènes dans les régions arides et hyper-arides (§2.2.1). En parallèle de ces développements, une base de données décrivant les caractéristiques des états de la surface des sols, basée notamment sur l'occupation du sol dans le sud de la Tunisie, a été réalisée (§2.2.2.1). Les paramètres **météorologiques** de surface nécessaires au calcul des flux d'érosion éolienne ont été simulés en utilisant un modèle météorologique de méso-échelle (§2.2.2.2).

## 2.2 Description des outils et des bases de données

### 2.2.1 Le modèle d'érosion éolienne

Le modèle utilisé pour quantifier l'érosion éolienne dans cette étude est le DPM (Dust Production Model) développé par Marticorena et Bergametti [1995] et Alfaro et al. [1998] qui décrit de façon physiquement explicite les processus de l'érosion éolienne. A l'origine, ce modèle a été mis au point pour calculer les émissions d'aérosols terrigènes depuis les régions arides du Sahara [Marticorena *et al.*, 1997]. Récemment, ce modèle a été utilisé pour simuler les émissions sahariennes de 1996 à 2001 [Laurent *et al.*, 2008], ainsi que pour calculer les émissions depuis les principaux déserts asiatiques [Laurent *et al.*, 2005 ; 2006]. Une description complète de ce modèle peut être trouvée dans Marticorena et Bergametti [1995], Marticorena *et al.* [1997] et Laurent *et*

*al.* [2008].

Brièvement, le modèle utilise une version adaptée de l'équation d'Iversen et White [1982] pour décrire la dépendance de la vitesse de friction seuil au diamètre des agrégats du sol. Le modèle inclut également un schéma de partition de l'énergie, qui utilise la hauteur de rugosité aérodynamique ( $Z_0$ ) et la hauteur de rugosité de la surface supposée lisse ( $z_{0s}$ ), pour prendre en compte l'effet de la présence d'éléments de rugosité non érodables (cailloux, végétation pérenne...) à la surface du sol sur la vitesse de friction seuil.

Cependant, l'application de ce modèle dans les régions semi-arides nécessite des modifications : les précipitations plus abondantes dans ces régions comparées aux régions arides vont directement impacter les propriétés physiques de la surface du sol, mais également permettre le développement de la végétation et de l'agriculture. Ces différents processus/impacts n'étaient pas pris en compte dans la version originale du modèle présenté ci-dessus.

La première modification effectuée [Laurent *et al.*, 2005] a consisté à prendre en compte l'augmentation du seuil d'érosion **éolienne** résultant de l'augmentation de l'humidité du sol. Pour cela, la paramétrisation développée par Fécan *et al.* [1999] a été utilisée (Eqs. 1 à 3). Cette paramétrisation traduit la différence de comportement des sols face à une augmentation de leur humidité en fonction de leur texture. De manière générale, l'augmentation

de l'humidité d'un sol se traduit par l'apparition de forces de capillarité qui renforcent la cohésion des particules qui le constituent. Cependant, la cohésion du sol est d'autant plus rapidement renforcée que celui-ci présente une texture sableuse : pour une même augmentation de son humidité, un sol sableux subira une augmentation du seuil d'érosion éolienne bien plus rapide qu'un sol argileux.

$$\frac{U_{td}^*}{U_{td}^*} = 1 \quad \text{for } w < w'$$

$$\frac{U_{td}^*}{U_{td}^*} = [1 + 1,21(w - w')^{0,68}]^{0,5} \quad \text{for } w > w'$$

$$\text{with } w' = 0,0014(\% \text{clay})^2 + 0,17(\% \text{clay})$$

avec la vitesse de friction seuil dans le cas humide (en  $\text{cm s}^{-1}$ ), la vitesse de friction seuil dans le cas sec (en  $\text{cm s}^{-1}$ ),  $w$  l'humidité gravimétrique du sol et  $w'$  l'humidité résiduelle du sol.  $w$  et  $w'$  sont exprimées en % (masse d'eau/masse de sol sec).

La seconde modification, réalisée dans le cadre de cette étude, a été la prise en compte de l'impact de l'outil de labour sur le seuil et le flux d'érosion éolienne en utilisant les paramétrisations développées en soufflerie par Kardous *et al.* [2005a ; b] et validées in-situ par Labiadh *et al.* [2013]. Le labour va impacter l'érosion éolienne de deux façons. Il va tout d'abord modifier la rugosité de la surface, soit en la pulvérisant (cas de la déchaumeuse à disques), soit en créant des billons et des sillons (cas du tiller et de la déchaumeuse à socs). Cette modification de la rugosité de surface va entraîner une modification du seuil d'érosion. Dans le cas où la surface labourée

présente des billons et des sillons, l'effet de piégeage des grains en saltation va également impacter les flux d'érosion. Les paramétrisations proposées (Eqs. 4 à 6) essaient de prendre en compte ces différents effets au travers de relations qui ne nécessitent de connaître que les dimensions géométriques des billons (hauteur et espacement). L'avantage de telles paramétrisations est qu'elles sont facilement utilisables à grande échelle dès lors que l'on connaît le type d'outil utilisé pour le labour.

(1)

(2)

(3)

$$U_{td}^* = -207,1 \times \frac{RH}{RS} + \frac{0,81305}{RH} + 86,871 \quad (4)$$

avec la vitesse de friction seuil (en  $\text{cm s}^{-1}$ ),  $RH$  la hauteur des billons (en cm) et  $RS$  l'espacement des billons (en cm).

$$Q = a \times (U^* - U_{td}^*) \times U^{*2} \quad (5)$$

avec  $Q$  le flux horizontal (en  $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) et  $a$  un coefficient d'ajustement (en  $\text{g cm}^{-4} \text{s}^2$ ) tel que :

$$a = -3,10 \times 10^{-7} \times \frac{RH}{RS} + 1,39 \times 10^{-7} \quad (6)$$

Les équations (4), (5) et (6) sont utilisées uniquement dans le cas où l'outil de labour est le tiller ou le soc. En effet, l'utilisation de la déchaumeuse à disques pulvérise la surface du sol et on n'observe alors aucun billon. Les valeurs de  $RH$  et  $RS$  utilisées dans nos calculs sont présentées dans le Tableau 1.

**Tableau 1** : Caractéristiques géométriques des billons en fonction de l'outil de labour utilisé pour l'application des paramétrisations développées par Kardous *et al.* [2005a ;b].

Outil	RH (cm)	RS (cm)
Tiller	7,8	47,0
Soc	8,4	53,7

## 2.2.2 Les bases de données d'entrée du modèle d'érosion éolienne

La modélisation de l'érosion éolienne à l'échelle régionale repose sur la connaissance de deux jeux de données. Le premier doit permettre la caractérisation précise des états de surface ; le second doit fournir une estimation de l'élément moteur de l'érosion éolienne, le vent de surface, ainsi que de l'humidité du sol.

### 2.2.2.1 Les propriétés de surface des sols

La base de données des états de surface pour le sud tunisien a été élaborée par Labiadh [2011]. Elle renseigne les propriétés de surface des sols notamment en lien avec l'usage du sol et l'outil de labour utilisé dans le cas des cultures pour les quatre gouvernorats du sud tunisien (Kébili, Gabès, Médenine et Tataouine) avec une maille de 10 km×10 km.

Pour chaque maille, on peut définir jusqu'à 11 états de surface du sol. Un état de surface du sol correspond à une combinaison donnée de la texture du sol, la distribution en taille des agrégats secs, la hauteur de rugosité lisse  $z_{0s}$ , la hauteur de rugosité aérodynamique  $Z_0$  et contient des informations sur l'usage du

sol et, dans le cas des surfaces cultivées, l'outil de labour.

La texture des sols et la distribution en taille des agrégats secs ont été cartographiées à partir de mesures in-situ effectuées par Labiadh *et al.* [2011].

La hauteur de rugosité aérodynamique  $Z_0$  (en cm) a été estimée à partir des observations satellitaires POLDER-1 (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) suivant la méthode mise au point par Marticorena *et al.* [2004 ; 2006] à l'exception des surfaces cultivées avec un tiller ou un soc pour lesquelles elle a été calculée à partir de la paramétrisation développée par Kardous *et al.* [2005a] :

$$Z_0 = 1,2736 \times \frac{RH^2}{RS} - 0.005 \quad (7)$$

avec  $RH$  la hauteur du billon (en cm) et  $RS$  l'espacement entre deux billons (en cm). Les valeurs de  $RH$  et  $RS$  utilisées dans nos calculs sont les mêmes que celles utilisées dans le calcul du seuil d'érosion et du flux, reportées dans le Tableau 1.

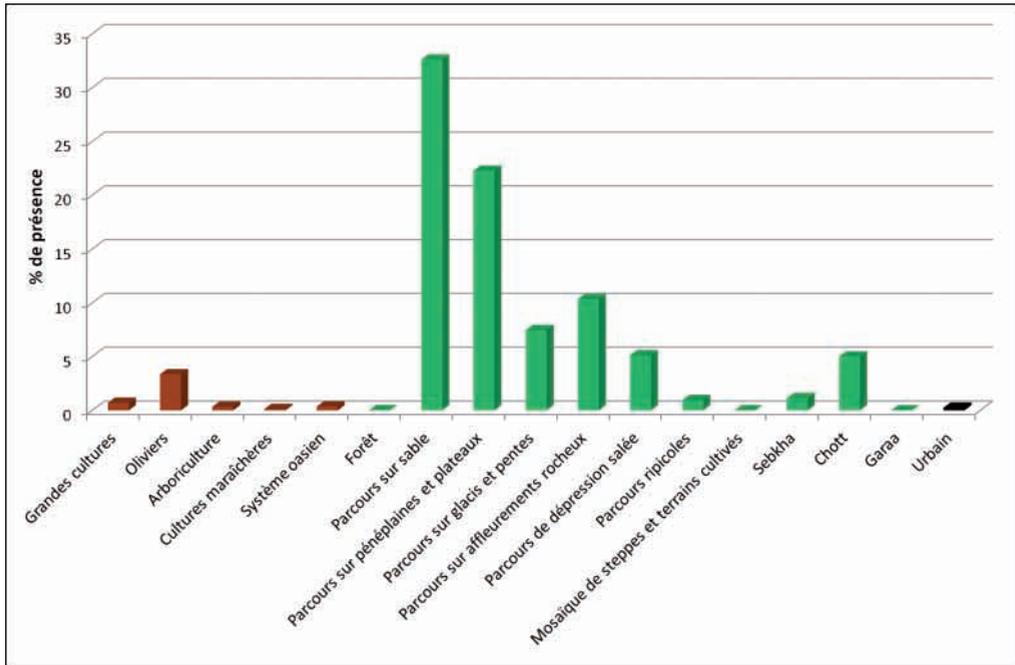
La hauteur de rugosité de la surface supposée lisse,  $z_{0s}$ , a été définie égale pour l'ensemble de la zone d'étude à la valeur du premier quartile de la hauteur de rugosité aérodynamique dérivée des mesures de POLDER pour l'ensemble des surfaces les plus lisses rencontrées dans la région étudiée (le parcours sur sable), soit  $z_{0s} = 4,810^{-3}$  cm.

La carte d'occupation des sols a été développée à partir de la base de données réalisée dans le cadre d'un projet national de mise au point d'une carte agricole pour l'ensemble du pays. Terminée en 2004, cette carte agricole est basée sur un Système d'Information Géographique (SIG) utilisé à l'échelle de chaque Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA). Cette carte est donc une compilation de documents regroupant toutes les cartes d'usage des sols disponibles pour chaque gouvernorat tunisien. Les cartes sont à une échelle de 1/100 000 pour le sud tunisien et fournissent pour chacun des quatre gouvernorats du sud une vision globale des terres agricoles, de leurs ressources, de leurs potentiels, de leurs atouts et des régions vulnérables. Compte tenu de ces informations,

environ 25 usages du sol différents sont initialement renseignés. Dans cette étude, centrée sur la quantification de l'érosion éolienne, nous avons simplifié l'information de base disponible en regroupant les zones cultivées en 5 types de cultures (cultures céréalières, oliveraies, cultures maraîchères, arboriculture et oasis), réduisant ainsi le nombre de classe d'usage du sol à 17. Ceci a été fait en conservant les distinctions utiles en termes de rugosité de surface ou de types de couvertures. A titre d'exemple, les palmeraies et étages associés ont été regroupés sous la classe « système oasien ».

Pour chaque type de cultures, un outil de labour a été défini en se basant sur des observations des pratiques locales. Ainsi, l'outil affecté aux cultures céréalières est le disque, celui affecté aux oliveraies, aux cultures maraîchères et à l'arboriculture le tiller, et celui affecté aux oasis le soc.

La Figure 1 présente la proportion de chaque type d'usage sur l'ensemble du domaine : la majorité du sud de la Tunisie (près de 85% de la zone d'étude) est constituée de zones de parcours, non cultivées.



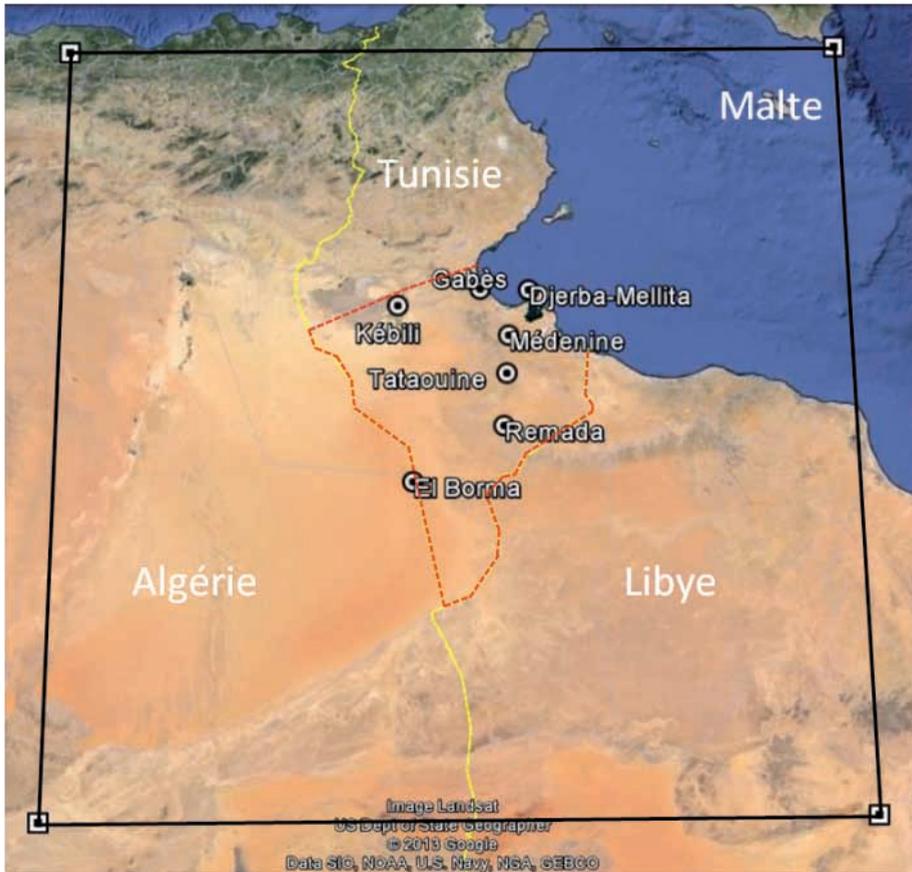
**Figure 1 :** Pourcentage que représente chaque classe d'occupation des sols sur le domaine d'étude. Le marron correspond aux classes d'occupation du sol de type « cultures », le vert à celles de type « sylvo-pastoral » et le noir à l'urbain.

#### 2.2.2.2 Données météorologiques de surface

Les données météorologiques ont été calculées en utilisant le modèle de méso-échelle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Cotton *et al.* [2003]). La simulation couvre l'ensemble de l'année 2008. Elle débute le 21 décembre 2007 à 0000TU, afin de permettre la mise à l'équilibre du modèle, et se termine le 1<sup>er</sup> janvier 2009 à 0000TU.

Le domaine modélisé (Fig. 2) est composé d'une grille centrée sur (32,2°N ; 9,75°E) qui s'étend environ de 27,6°N à 36,6°N et de 4,2°E à 15,3°E. La

résolution horizontale est 10 km×10 km. Le modèle compte 30 niveaux verticaux dont l'espacement entre deux niveaux augmente géométriquement depuis le sol jusqu'à 22 km au-dessus du sol. 10 niveaux verticaux sont utilisés entre 0 et environ 1 km au-dessus du sol afin de représenter au mieux la couche limite de surface, le premier niveau étant centré sur 23,9 m. Le vent à 10 m, nécessaire au calcul du flux d'érosion éolienne, est donc interpolé à partir de ce premier niveau en utilisant un profil logarithmique [Priestley, 1959]. Le modèle compte également 10 niveaux dans le sol répartis de -1 m à -1 cm.



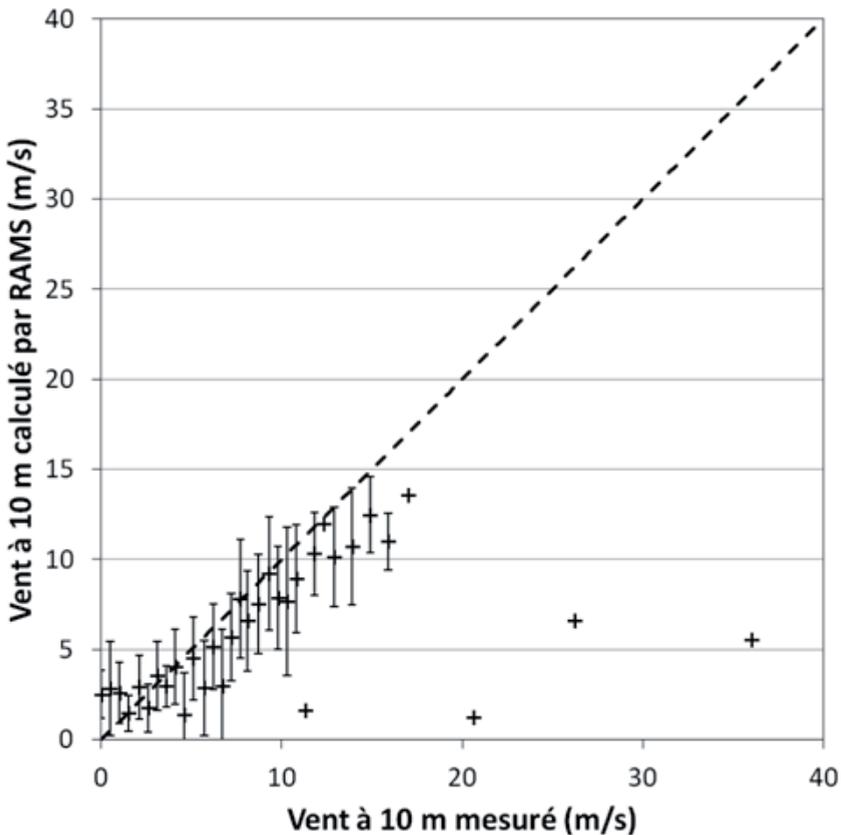
**Figure 2 :** Image Google Earth de la zone étudiée. Le cadre noir délimite le domaine sur lequel a été calculée la météorologie de surface. La ligne en pointillés délimite les gouvernorats étudiés. Les ronds localisent les stations météorologiques de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) utilisées pour la comparaison des vents à 10 m simulés et mesurés.

La Figure 3 présente une comparaison entre la vitesse du vent à 10 m mesurée aux stations météorologiques de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) qui se trouvent dans les gouvernorats étudiés et la vitesse du vent à 10 m simulée par RAMS. Le modèle reproduit dans l'ensemble de façon satisfaisante le vent à 10 m : la

grande majorité des valeurs simulées est dans la gamme des valeurs mesurées aux stations météorologiques. On peut cependant noter une tendance du modèle à sous-estimer les valeurs les plus fortes : les médianes de la vitesse du vent à 10 m simulée par RAMS sont systématiquement en dessous de la droite de pente 1 pour les valeurs

mesurées correspondantes à partir de  $8 \text{ m s}^{-1}$ . Les flux d'érosion éolienne étant proportionnels à la vitesse du vent à 10 m au cube dans le modèle DPM, cela suggère que les estimations réalisées dans ce travail seront sous-estimées. En particulier, le modèle météorologique

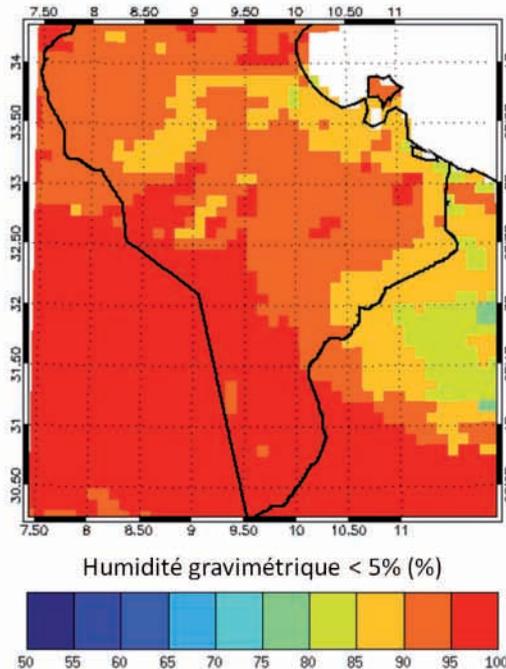
semble ne pas être capable de reproduire les vitesses de vent à 10 m supérieures à  $20 \text{ m s}^{-1}$ . Cette dernière observation reste cependant à confirmer, le nombre de cas concernés n'étant statistiquement pas représentatif (3 cas sur l'ensemble du jeu de données).



**Figure 3 :** Médiane des vents à 10 m (en  $\text{m s}^{-1}$ ) simulés par RAMS aux stations de l'OMM localisées sur la Fig. 2 en fonction des vents à 10 m (en  $\text{m s}^{-1}$ ) mesurés. Les barres d'erreur représentent l'écart-type de chaque série. La droite en pointillés est la droite de pente 1.

Dans ces régions, l'humidité du sol est généralement très faible. Il n'existe à l'heure actuelle aucune donnée d'humidité du sol dont la précision soit suffisante à l'échelle considérée sur la région étudiée pour permettre la validation des humidités du sol simulées par le modèle. Le produit le plus précis disponible pour 2008 a une incertitude d'environ 5% (produit de niveau 2 humidité du sol d'ASCAT (Advanced SCATterometer) embarqué sur le satellite METOP (METeorological OPERational satellite) [e.g. Naeimi *et al.*, 2009]). Or, les humidités du sol que nous avons pu mesurer dans le sud de la Tunisie sont très souvent inférieures

à 5%. La validation du paramètre « humidité du sol » a donc consisté à s'assurer que le modèle RAMS est capable de simuler (i) une humidité gravimétrique de la surface du sol inférieure à 5% et (ii) à une fréquence raisonnable (plus de 50% de l'année). C'est ce que confirment les résultats présentés sur la Figure 4. Cette figure illustre également la capacité du modèle à reproduire de façon satisfaisante un gradient nord/sud marqué avec des fréquences où l'humidité gravimétrique de la surface du sol est inférieure à 5% les plus élevées (plus de 90% de l'année) sur le Grand Erg Oriental.



**Figure 4** : Fréquence annuelle (en %) pour laquelle l'humidité gravimétrique de la surface du sol est inférieure à 5% pour l'année 2008.

## 2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le flux d'érosion éolienne simulé sur la zone étudiée est de  $6,78 \cdot 10^4$  Mt pour l'année 2008. Il n'existe à l'heure actuelle aucune mesure permettant de valider directement ce résultat. Même si les mesures réalisées à l'échelle de parcelles expérimentales par Labiadh *et al.* [2013] ne sont pas directement comparables aux flux calculés avec le modèle, elles peuvent néanmoins permettre d'estimer si l'ordre de grandeur des flux simulés pour les surfaces labourées est réaliste.

Les Tableaux 2 et 3 présentent respectivement les flux mesurés par Labiadh *et al.* [2013] entre mars et mai 2008 sur une parcelle expérimentale

(localisée à Dar Dahoui) labourée avec un tiller et les résultats obtenus avec le modèle sur un pixel correspondant à l'utilisation du tiller dans cette zone. Durant cette période, 5 événements ont été mesurés par Labiadh *et al.* [2013] et 5 ont été simulés. Cependant, seul l'événement du 8 avril est reproduit à la bonne date. En terme d'intensité, la comparaison des résultats présentés dans les Tableaux 2 et 3 permet de conclure que, compte tenu des incertitudes de mesures, le modèle reproduit dans l'ensemble l'ordre de grandeur des flux mesurés de façon satisfaisante, excepté pour l'événement simulé le 8 avril dont l'intensité est sous-estimée comparativement à l'ensemble des événements observés.

**Tableau 2 :** Flux d'érosion éolienne (en  $\text{g cm}^{-1}$  événement<sup>-1</sup>) mesurés par Labiadh *et al.* [2013] sur une parcelle expérimentale labourée avec un tiller.

Date (2008)	23-24 mars	27-28 mars	7-8 avril	20 avril	17-19 mai
Flux d'érosion ( $\text{g cm}^{-1}$ événement <sup>-1</sup> )	62,9 (± 37)	91,3 (± 55)	446 (± 213)	103 (± 80)	55,3 (± 10)

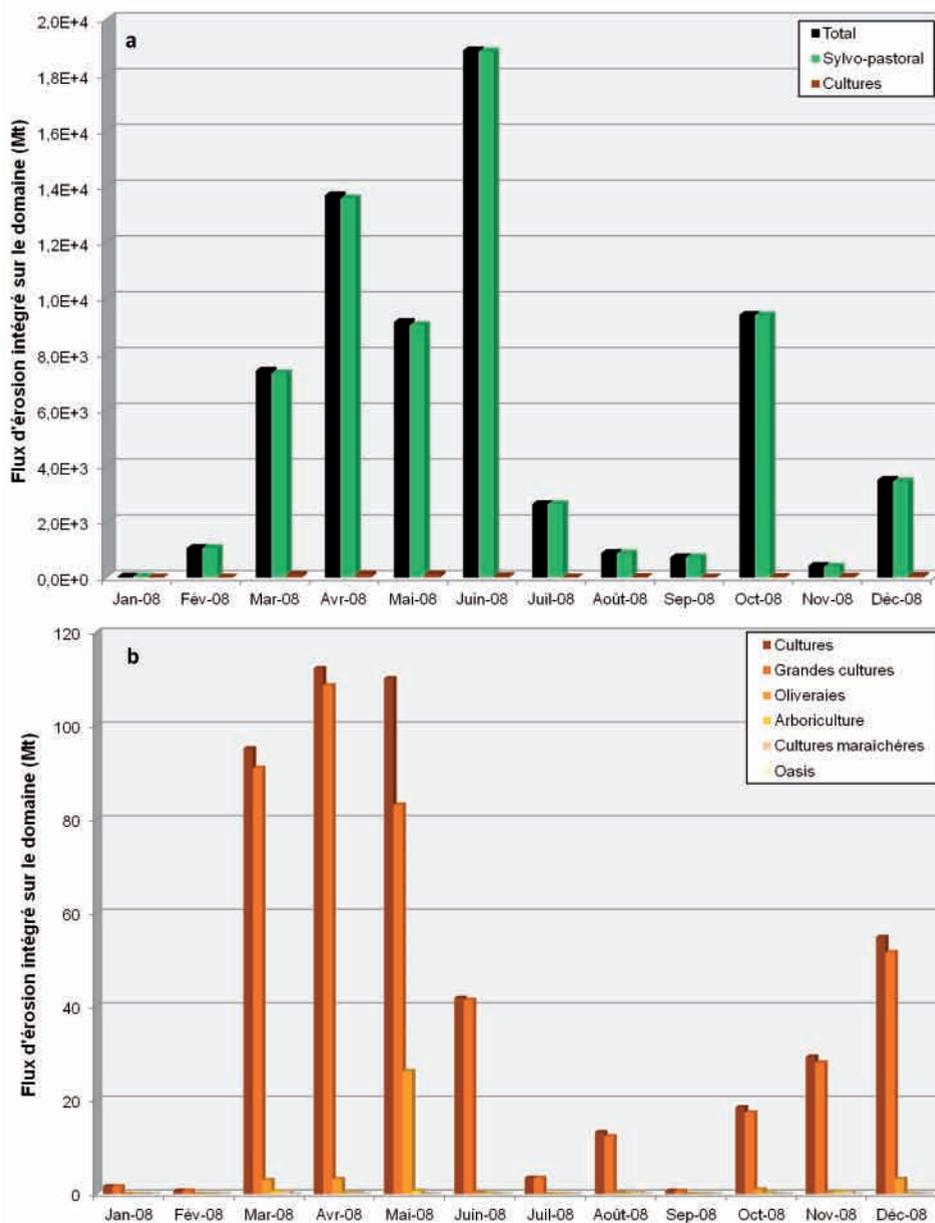
**Tableau 3 :** Flux d'érosion éolienne (en  $\text{g cm}^{-1}$  événement<sup>-1</sup>) calculés dans cette étude sur un pixel correspondant à l'utilisation du tiller dans la région de Dar Dahoui.

Date (2008)	27 mars	31 mars	8 avril	8-9 mai	25 mai
Flux d'érosion ( $\text{g cm}^{-1}$ événement <sup>-1</sup> )	29,3	45,1	6,1	157	61,8

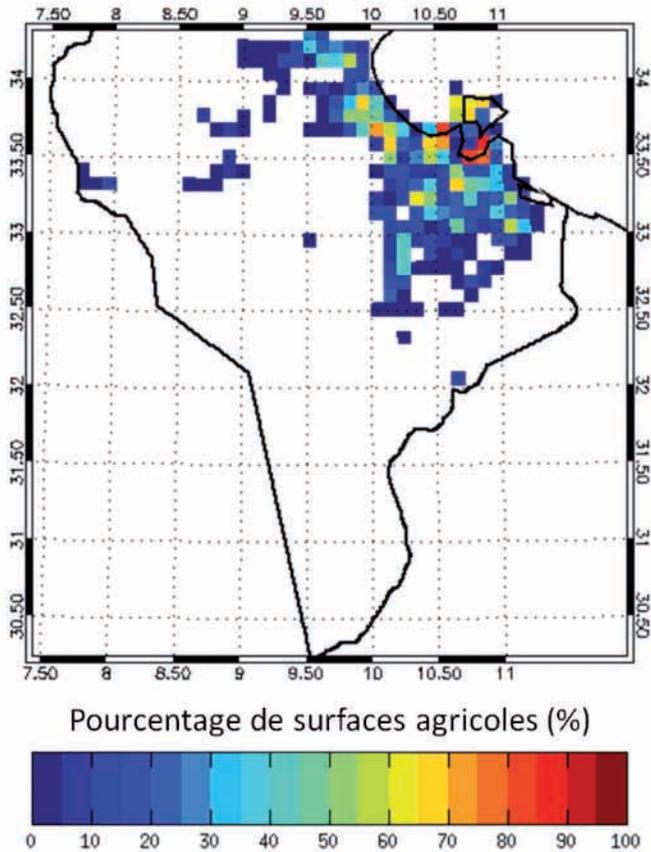
La Figure 5 présente les flux d'érosion éolienne mensuels intégrés sur l'ensemble des quatre gouvernorats étudiés en fonction de l'usage des sols. Cette figure met en évidence l'existence d'un cycle saisonnier marqué de l'érosion éolienne avec un maximum au printemps, en accord avec le cycle généralement observé dans cette région [e.g. Prospero *et al.*, 2002]. On peut également noter qu'il existe un décalage d'environ 2 mois du maximum simulé au printemps : ce maximum est simulé en avril pour les surfaces cultivées et en juin pour les surfaces sylvo-pastorales. Les surfaces cultivées se trouvent principalement dans la partie nord-ouest de la zone d'étude et près de la côte (Fig. 6). Venard [2012] a réalisé une étude climatologique (1979-2008) de la dynamique des vents et des modelés éoliens associés sur 4 stations du sud de la Tunisie (Gafsa, Kébili, Gabès et Médenine). Les résultats de cette étude ont montré que les régions côtières avaient une dynamique saisonnière du vent de surface et des déplacements potentiels sableux différente des régions situées plus à l'intérieur des terres : le

maximum est observé au mois d'avril pour les stations côtières (Médenine, Gabès) alors qu'il est observé aux mois de mai/juin pour les stations à l'intérieur des terres (Kébili, Gafsa). Nos résultats sont en accord avec ces observations.

La Figure 5 montre également que la très grande majorité (~ 99%) de l'érosion éolienne simulée se produit depuis les zones sylvo-pastorales, qui représentent près de 85% de la zone étudiée. Du point de vue des zones cultivées, l'érosion éolienne se produit principalement dans les champs de céréales (~ 91%), puis dans les oliveraies (~ 8%) bien que les oliveraies représentent une surface cultivée bien plus importante (respectivement 3,73% et 0,77% pour les oliveraies et les champs de céréales, Fig. 1). Ceci s'explique très probablement par l'outil de labour utilisé : dans les champs de céréales, il s'agit de la déchaumeuse à disques qui pulvérise la surface du sol, ce qui augmente l'érodabilité de la surface, alors que dans les oliveraies, on utilise le tiller qui crée des sillons, ce qui augmente la rugosité de la surface du sol et diminue son érodabilité.



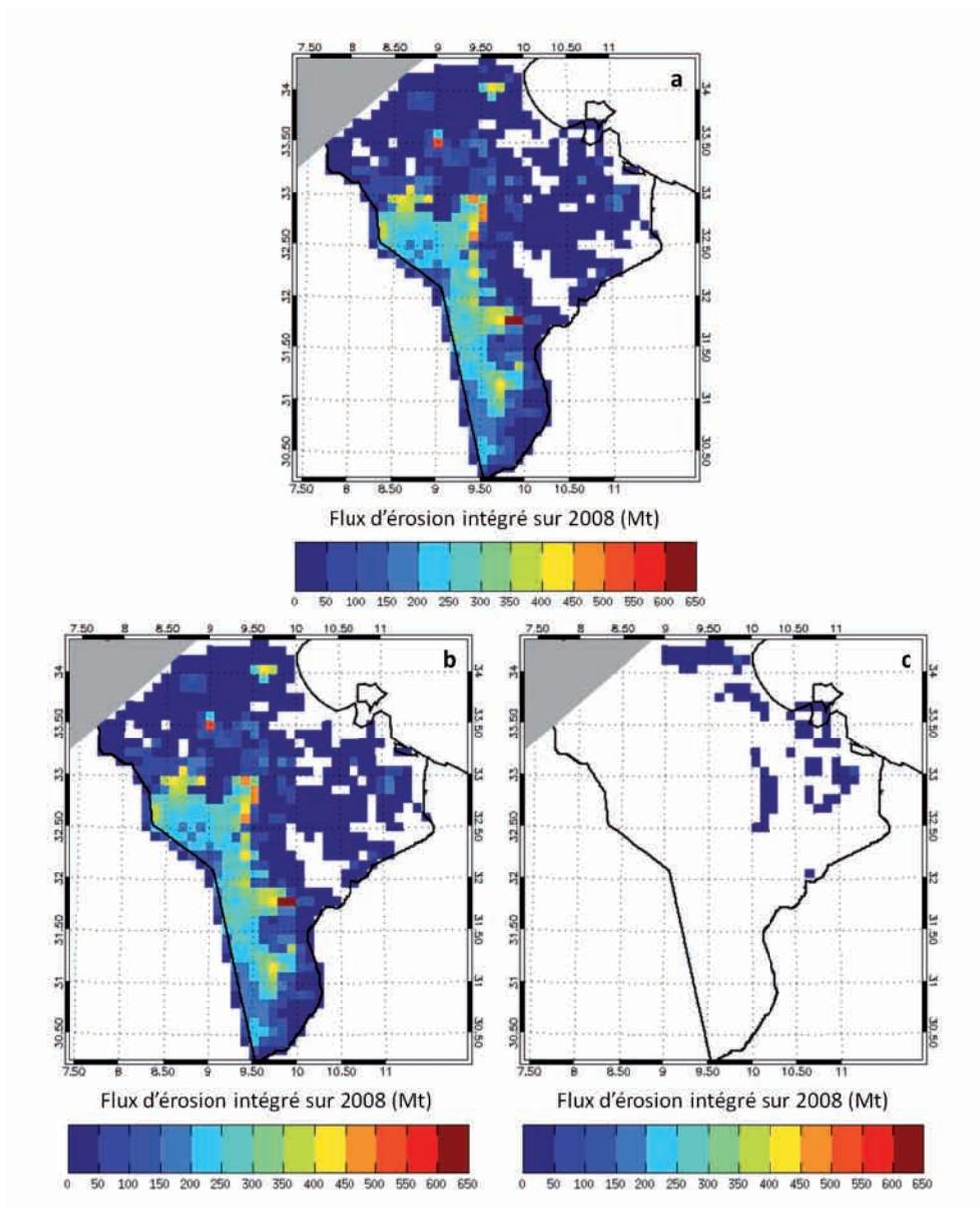
**Figure 5** : Flux d'érosion éolienne intégrée sur les 4 gouvernorats du sud de la Tunisie (en Mt) par mois sur l'année 2008 en fonction de l'usage des sols.



**Figure 6 :** Localisation des surfaces agricoles (en pourcentage d’occupation par pixel) sur la zone d’étude.

La Figure 7 présente la répartition spatiale des flux d’érosion éolienne intégrée sur l’année 2008 et en fonction de l’usage des sols (sylvo-pastoral/cultivé). Elle montre que l’ensemble du sud tunisien est touché par le phénomène de l’érosion éolienne à l’exception des points culminants du massif du Dahar, les régions côtières de la plaine de la Jeffara, le sud de la plaine de l’Ouara. Cette figure confirme par ailleurs que la

majorité de l’érosion éolienne se produit sur les surfaces sylvo-pastorales (Fig. 7a) et plus particulièrement sur le Grand Erg Oriental. Cependant, si on regarde la contribution des surfaces cultivées au flux d’érosion éolienne total (Fig. 8), on s’aperçoit que, dans la région nord-est de la zone étudiée, celle-ci est loin d’être négligeable puisqu’elle peut dépasser 90% dans certains pixels.



**Figure 7** : Flux d'érosion (en Mt) intégré sur l'année 2008 (a) quel que soit l'usage du sol, (b) pour les surfaces sylvo-pastorales et (c) pour les surfaces cultivées.

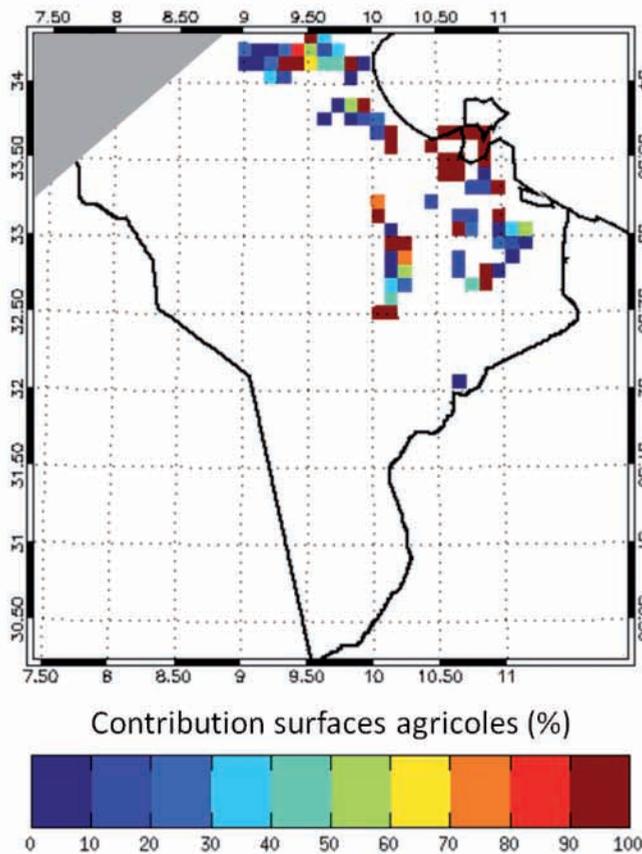


Figure 8 : Contribution (en %) des surfaces agricoles au flux total d'érosion éolienne pour l'année 2008.

### 3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude présente une quantification de l'érosion éolienne à l'échelle du sud de la Tunisie. Elle suggère que ce phénomène touche l'ensemble de cette région et que la majorité de l'érosion éolienne se produit sur les zones de parcours qui représentent également la majorité du territoire étudié. Même si à l'échelle globale de la zone d'étude, la contribution des surfaces cultivées

au flux d'érosion éolienne semble négligeable, cette contribution peut devenir majoritaire dans la région nord-est de la zone d'étude, région où se trouve la majorité des surfaces cultivées. Parmi ces surfaces, les plus touchées par l'érosion éolienne sont les grandes cultures, puis les oliveraies bien que ces dernières représentent une surface cultivée plus importante.

Les estimations des flux d'érosion éolienne obtenues doivent cependant être nuancées pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les vents très forts semblent difficilement reproduits par le modèle, ce qui peut conduire à une sous-estimation des flux calculés. Ensuite, l'encroûtement du sol n'a pas été pris en compte dans le calcul des flux d'érosion éolienne, ce qui peut conduire à une surestimation des flux calculés. En effet, sur des sols dont la texture est majoritairement sableuse, la prise en compte de l'humidité du sol peut diminuer de façon drastique l'érosion éolienne [e.g. Pierre *et al.*, 2012]. Enfin, la saisonnalité de la végétation, notamment pour les cultures céréalières et vivrières, n'est pas prise en compte, ce qui peut également conduire à une légère surestimation des flux calculés. En effet, les surfaces cultivées présentent un taux de couverture maximal de la surface du sol au printemps, période pendant laquelle sont observés les vents de surface les plus forts.

Les prochaines étapes de ce travail consistent d'une part à ajouter au modèle de nouvelles paramétrisations permettant de corriger ces limitations et d'autre part d'acquies des données de validation des flux d'érosion éolienne simulés à

l'échelle régionale afin de vérifier le degré de pertinence des simulations réalisées. Concernant ce dernier point, un certain nombre de stations de mesure des flux d'érosion éolienne sont en cours d'installation sur différents états de surface dans les gouvernorats étudiés.

### **Remerciements**

Ce travail fait partie du projet PEDO-COTESOF (Particle Emission and Deposition Over COMplex TERRain for SOil Fixation) financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) au travers d'un programme de recherche intitulé "Blanc International". Ce travail a également bénéficié d'un soutien du programme de coopération bilatérale France-Tunisie PHC (Partenariat Hubert Curien) UTIQUE. Ces travaux ont enfin bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES (Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur) au travers de l'allocation de ressources c2013016365 attribuée par GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif). Les auteurs souhaitent également remercier C. Schmechtig et C. Pennanech pour leur soutien informatique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akrimi, N., M. Kardous, et H. Taamallah (1993), Mouvements de sable en relation avec la nature et la vitesse de certains outils de travail du sol en zones arides (étude d'un cas pratique), *Revue des Régions Arides*, 5, 35-57.
- Alfaro, S. C., A. Gaudichet, L. Gomes, and M. Maillé (1998), Mineral aerosol production by wind erosion: aerosol particle size and binding energies, *Geophysical Research Letters*, 25, 991-994.
- Cotton, W. R., R. A. Pielke Sr., R. L. Walko, G. E. Liston, C. J. Tremback, H. Jiang, R. L. McAnally, J. Y. Harrington, M. E. Nicholls, G. G. Cario, and J. P. McFadden (2003), RAMS 2001: Current status and future directions, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 5-29.
- Chepil, W. S. (1951), Properties of soil which influence wind erosion: IV. State or dry aggregate structure, *Soil Science*, 72, 387-401.
- Fécan, F., B. Marticorena, and G. Bergametti (1999), Parameterization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas, *Annales Geophysicae*, 17, 149-157.
- Iversen, J. D., and B. R. White (1982), Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, *Sedimentology*, 29, 111-119.
- Kardous, M., G. Bergametti, and B. Marticorena (2005a), Aerodynamic roughness length related to non-aggregated tillage ridges, *Annales Geophysicae*, 23, 3,187-3,193.
- Kardous, M., G. Bergametti, and B. Marticorena (2005b), Wind tunnel experiments on the effects of tillage ridge features on wind erosion horizontal fluxes, *Annales Geophysicae*, 23, 3,195-3,206.
- Labiadh, M. T. (2011), *Quantification de l'érosion éolienne sur des surfaces anthropisées: simulation des flux en masse à l'échelle des zones arides tunisiennes*, thèse de l'Université Paris Diderot, Paris, France.
- Labiadh, M., G. Bergametti, B. Attoui, and S. Sekrafi (2011), Particle size distributions of South Tunisian soils erodible by wind, *Geodinamica Acta*, 24, 37-47.
- Labiadh, M., G. Bergametti, M. Kardous, S. Perrier, N. Grand, B. Attoui, S. Sekrafi, and B. Marticorena (2013), Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia, *Geoderma*, 202-203, 8-17.
- Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, P. Chazette, F. Maignan, and C. Schmechtig (2005), Simulation of the mineral dust emission frequencies from desert areas of China and Mongolia using an aerodynamic roughness length map derived from the POLDER/ADEOS 1 surface products, *Journal of Geophysical Research*,

110, D18S04, doi:10.1029/2004JD005013.

- Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, and F. Mei (2006), Modeling mineral dust emissions from Chinese and Mongolian deserts, *Global and Planetary Change*, 52, 121-141.

- Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, J. F. Léon, and N. M. Mahowald (2008), Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface properties and soil database, *Journal of Geophysical Research*, 113, D14218, doi:10.1029/2007JD009484.

- Marticorena, B., and G. Bergametti (1995), Modeling the atmospheric dust cycle: 1-Design of a soil-derived dust emission scheme, *Journal of Geophysical Research*, 100(D8), 16,415-16,430.

- Marticorena, B., G. Bergametti, B. Aumont, Y. Callot, C. N'Doumé, and M. Legrand (1997), Modeling the atmospheric dust cycle: 2- Simulation of Saharan dust sources, *Journal of Geophysical Research*, 102(D4), 4,387-4,404.

- Marticorena, B., P. Chazette, G. Bergametti, F. Dulac and M. Legrand (2004), Mapping the aerodynamic roughness length of desert surfaces from the POLDER/ADEOS bi-directional reflectance product, *International Journal of Remote Sensing*, 25, 603-626.

- Marticorena, B., M. Kardous, G. Bergametti, Y. Callot, P. Chazette, H. Khatteli, S. Le Hégarat-Masclé, M. Maillé, J. L. Rajot, D. Vidal-Madjar, and M. Zribi (2006), Surface and aerodynamic roughness in arid and semiarid areas and their relation to radar backscatter coefficient, *Journal of Geophysical Research*, 111, F03017, doi:10.1029/2006JF000462.

- Naeimi, V., K. Scipal, Z. Bartalis, S. Hasenauer, and W. Wagner (2009), An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 1999-2013.

- Pierre, C., G. Bergametti, B. Marticorena, E. Mougin, C. Bouet, and C. Schmechtig (2012), Impact of vegetation and soil moisture seasonal dynamics on dust emissions over the Sahel, *Journal of Geophysical Research*, 117, D06114, doi:10.1029/2011JD016950.

- Priestley, C. H. B. (1959), Turbulent transfer in the lower atmosphere, University of Chicago Press, 130 pp.

- Prospero, J. M., P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, and T. E. Gill (2002), Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics*, 40(1), 1002, doi:10.1029/2000RG000095.

*Christel BOUET, Mohamed Taieb LABIADH, Gilles BERGAMETTI, Badie ATTOUI,  
Benoit LAURENT, Béatrice MARTICORENA, Jean Louis RAJOT et Houcine KHATTELI*

---

- Venard, C. (2012), *La morphodynamique éolienne en régions sèches - Des échelles spatiales et temporelles aux outils*, thèse de l'Université Lumière Lyon 2, Lyon, France.

ISSN 0330 - 7956



# REVUE DES RÉGIONS ARIDES

Editée par l'Institut des Régions Arides - Médenine - TUNISIE

Numéro Spécial

## Actes du colloque international

« Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines :  
processus physiques, métrologie et techniques de lutte »

Djerba (Tunisie),  
12 - 14 novembre 2013

36 (1/2015)

Mars 2015

Actes du colloque international Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte

Djerba, 12 - 14 novembre 2013

Editeurs scientifiques :

Adamou ABDOURHAMANE TOURE,

Gilles BERGAMETTI,

Charles BIELDERS,

Christel BOUET,

Yann CALLOT,

Sylvain DUPONT,

Houcine KHATTELI,

Mohamed Taieb LABIADH,

Béatrice MARTICORENA,

Jean Louis RAJOT,

Christian VALENTIN

Ce colloque a été soutenu par :

l'Institut des Régions Arides de Médenine, l'Institut de Recherche pour le Développement, l'Université Paris Est Créteil, l'Institut Français de Tunisie et l'Agence Universitaire de la Francophonie



# SOMMAIRE

**INTRODUCTION.....7**

## **SESSION 1 : Mesure et suivi de l'activité éolienne**

Genèse et dynamique sédimentaire des dépôts désertiques de la région de Nefzaoua (sud-ouest de la Tunisie); *Mohamed OUAJA, Nahed SLIMANE et Amna KHILA.....13*

Quantification de la dynamique éolienne des dépôts de la laverie minière de Hammam Zriba (Zaghouan, Tunisie); *Oula AMROUNI, Thouraya BEN MOUSSA et Sâadi ADBDELJAOUAD.....24*

Érosion éolienne et risques morphogéniques dans le Sahel sénégalais; *Boubou Aldiouma SY.....45*

Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Egypte); *Maël CRÉPY et Yann CALLOT.....71*

Les vents dans le sud tunisien : analyse fréquentielle et déplacements potentiels du sable; *Afef RADDADI, Noomene FEHRI et Amor Mokhtar GAMMAR.....95*

## **SESSION 2 : Simulations expérimentale et numérique pour la quantification de l'érosion éolienne à l'échelle régionale pour le contexte actuel et des scénarii futurs**

Limitation de l'érosion éolienne dans le cas de mélanges de grains du sol de tailles érodable et non érodable; *Mouldi KARDOUS, Gilles BERGAMETTI et Béatrice MARTICORENA.....109*

Vers une quantification de l'érosion éolienne des sols labourés dans le sud tunisien; *Mohamed Taieb LABIADH, Gilles BERGAMETTI, Christel BOUET, Houcine KHATTELI et Mounir ABICHOU.....129*

Quantification de l'érosion éolienne dans le sud tunisien; *Christel BOUET, Mohamed Taieb LABIADH Gilles BERGAMETTI, Badie ATTOUI, Benoit LAURENT, Béatrice MARTICORENA, Jean Louis RAJOT et Houcine KHATTELI.....151*

Modélisation pluriannuelle des émissions éoliennes de particules terrigènes en région semi-aride sahélienne, *Caroline PIERRE, Gilles BERGAMETTI, Béatrice MARTICORENA, Christel BOUET, Catherine SCHMECHTIG et Eric MOUGIN*.....173

### **SESSION 3 : Techniques de lutte contre l'érosion éolienne**

Impacts des extensions oléicoles sur l'amplification de l'érosion éolienne dans le sud tunisien et certaines mesures de lutte préventive; *Mounir ABICHOU et Mohamed LABIADH*.....193

Lutte biologique contre les accumulations sableuses dans la Tunisie Aride; *Taher ABDELKEBIR et Ali FERCHICHI*.....209

Évaluation d'un projet de fixation de dunes dans une steppe sud-algéroise : Moyen de lutte contre l'ensablement et amélioration de la productivité pastorale; *Ala-Eddine ADAMOUC, Mohamed KOUIDRI, Ahmed BOUTMEDJET, Zohra HOUYOU et Mohamed Laid OUAKID*.....221

Étude des effets de l'application de boues d'épuration urbaines sur un sol érodé cultivé dans la région de Laghouat; *Ahmed BOUTMEDJET, Nacira BOUKAYA, Zohra HOUYOU, Mohamed Laid OUAKID et Charles BIELDERS*.....235

Techniques to Control Wind Erosion in Libya; *Bashir NWER*.....247