

## Caractérisation aérodynamique des unités géomorphologiques du sud tunisien à partir des mesures dérivées des produits de surface POLDER

### [ Aerodynamic characterization of geomorphic units in southern Tunisia from the derived measures of the POLDER surface products ]

*Mohamed Labiadh*

Institut des Régions Arides (IRA), Médenine, Tunisia

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The aerodynamic roughness height ( $z_0$ ) is one of the key parameters that control wind erosion. Several methods, based on satellite observations, have been proposed for performing mapping of this parameter. Among the empirical approaches that have been developed, Protrusion coefficient, PC, derived from measurement of the solar spectrum of Polarization and Directionality of the Earth Reflectances (POLDER) sensor offer the possibility of retrieving the aerodynamic roughness height. This approach was applied to Tunisian arid regions. The study area covers a grid ranging from 30.15 ° N 34.18 ° N, 7.26 ° E to 12 ° E with a resolution of 1/10 ° × 1/10 °, about 10 km x 10 km. The morphological landscape in this region is clearly distinguishable in three major areas which are Atlas (trays), Steppe (plain) and the Sahara. The results of this study showed that in our area of study, three main categories of surface area in terms of their aerodynamic roughness height can at least be defined from very smooth surface to less erodible and rough. Derived  $z_0$  values for all surface conditions vary from 1.7 10<sup>-3</sup> cm to 1.9 cm.

**KEYWORDS:** Southern Tunisia, geographic unit, surface roughness, POLDER.

**RÉSUMÉ:** La hauteur de rugosité aérodynamique ( $z_0$ ) est un des paramètres clés qui contrôlent l'érosion éolienne des sols. Plusieurs méthodes, basées sur des observations satellitaires, ont été proposées permettant de réaliser des cartographies de ce paramètre. Parmi les approches empiriques qui ont été développées, le Coefficient de Protrusion, PC, dérivé des produits du radiomètre Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances (POLDER) offrent la possibilité de restituer la hauteur de rugosité aérodynamique. Cette approche a été appliquée sur les zones arides et désertiques tunisiennes. Le domaine d'étude s'étend sur une grille allant de 30,15°N à 34,18°N et de 7,26°E à 12°E avec une résolution de 1/10° × 1/10°, soit environ 10 km × 10 km. Le paysage morphologique dans cette région se distingue nettement par trois grands domaines qui sont l'Atlas (plateaux), la Steppe (plaine) et le Sahara. Les résultats de cette étude ont montré que dans notre domaine d'étude, trois grandes catégories de surface au regard de leur hauteur de rugosité aérodynamique peuvent au minimum être définies en allant des états de surface très lisses à moins érodables et rugueux. Les valeurs de  $z_0$  dérivées pour l'ensemble des états de surface varient entre 1,7 10<sup>-3</sup> cm à 1,9 cm.

**MOTS-CLEFS:** Sud tunisien, unités géomorphologiques, rugosité de surface, POLDER.

## 1 INTRODUCTION

La hauteur de rugosité aérodynamique,  $z_0$ , est un des paramètres clés pour la modélisation physique de l'érosion éolienne puisqu'elle contrôle à la fois la friction du vent en surface et la vitesse-seuil d'érosion ([10], [17]). Elle est généralement

déterminée de façon expérimentale par des mesures de profil vertical de vitesse de vent [14]. Dans la littérature bien que les données disponibles permettent de fixer l'ordre de grandeur des hauteurs de rugosité aérodynamique pouvant être rencontrées en zones arides et désertiques, elles ne sont pas suffisantes pour établir des cartographies de ce paramètre, utilisables pour la modélisation de l'érosion éolienne (exemple [3], [6], [12]). En outre, l'application d'une telle approche pour dériver  $z_0$  à une échelle régionale ou continentale est bien évidemment impossible compte tenu de la variabilité naturelle des états de surfaces.

Récemment, des approches empiriques ont été développées visant à déterminer les hauteurs de rugosité aérodynamique en zones arides à partir d'observations spatiales. Cette technique de télédétection a ouvert des perspectives extrêmement intéressantes en matière d'érosion éolienne, en particulier, la possibilité d'établir des cartographies d'une très bonne résolution spatiale mais aussi de disposer d'une couverture quasi globale. Parmi les instruments embarqués sur des plateformes satellitaires, le radiomètre POLDER 1 (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) dont les mesures des réflectances bi-directionnelles de surface ont été utilisées pour estimer la hauteur de rugosité aérodynamique (exemple [11]).

L'objectif de ce travail est d'utiliser les mêmes démarches et approches développées par [11] pour dériver la hauteur de rugosité aérodynamique à partir des produits POLDER pour les différentes unités géomorphologiques typiques des zones arides et désertiques tunisiennes.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

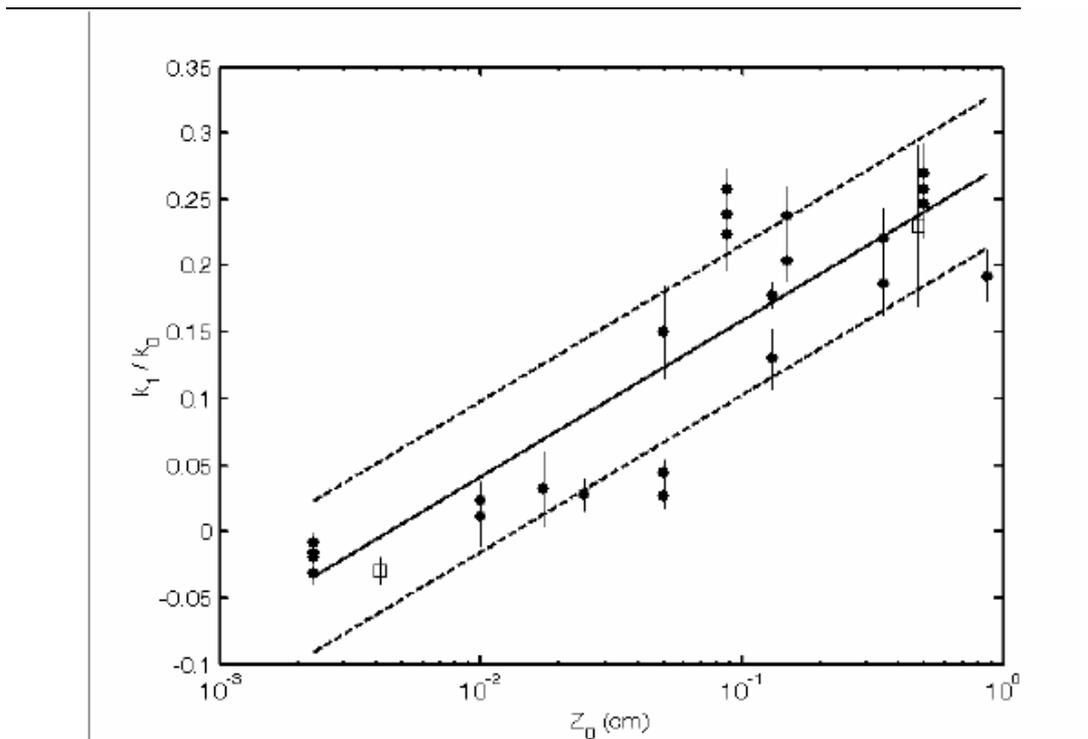
### 2.1 RADIOMÈTRE POLDER 1 (POLARIZATION AND DIRECTIONALITY OF THE EARTH'S REFLECTANCES)

Les observations POLDER offrent la possibilité de mesurer, dans trois longueurs d'ondes différentes (443, 670 et 865 nm), les réflectances bi-directionnelles de surface sous 14 angles de visée différents durant le passage du satellite, ce qui permet de reconstituer avec précision la fonction de distribution de la réflectance bi-directionnelle de la surface (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF, en anglais). [15] ont proposé un modèle de BRDF où la réflectance est considérée comme la somme de deux composantes : l'une liée à l'effet de diffusion du rayonnement dû à la géométrie des obstacles en surface (effets d'ombrages, etc.), l'autre liée aux effets de volume du sol lui-même ou des obstacles présents. L'inversion de BRDF dans le modèle de [16] permet la détermination des coefficients empiriques exprimés de façon totalement explicite en fonction des paramètres structurels de la surface (dimensions des obstacles, indices de facettes, etc.). Par ailleurs, certains termes de cette BRDF ( $k_0$ ,  $k_1$ ) contiennent une information relative à la rugosité de la surface. Plus précisément, [16] utilisent une combinaison de deux de ces coefficients ( $k_0$ ,  $k_1$ ) pour définir un paramètre de "protrusion", le Coefficient de Protrusion,  $PC = k_1/k_0$ , directement relié à la densité de rugosité de la surface. Comme nous l'avons également évoqué, la densité de rugosité est classiquement utilisée pour estimer, à partir de relations empiriques, les hauteurs de rugosité aérodynamique de surface. Ainsi, l'inversion des réflectances bidirectionnelles mesurées par un instrument POLDER conduit à une estimation des hauteurs de rugosité pour des surfaces de densité de végétation variée, en accord avec les valeurs généralement mesurées sur ces types de surfaces (Fig. 1).

Les résultats de [11] indiquent que le Coefficient de Protrusion, PC, dérivé de la BRDF de POLDER représente bien les hauteurs de rugosité aérodynamique cartographiées sur des zones homogènes du Sahara. Par conséquent, une relation linéaire entre « PC » et «  $\ln(z_0)$  », a pu être établie :

$$PC = \frac{k_1}{k_2} = 0.052 \ln(Z_0) + 0.277 \quad (\text{III.5})$$

L'instrument POLDER, comme nous l'avons expliqué, offre l'opportunité d'établir une carte globale de Coefficients de Protrusion, PC, permettant ainsi de dériver les hauteurs de rugosité aérodynamique sur l'ensemble des zones arides et semi-arides avec une bonne résolution (la même que PC) de  $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ , soit presque  $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ , mais également pour une résolution spatiale de  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  plus adaptée pour les modèles d'émissions globaux puisque [11] et [8] ont montré que la diminution de la résolution spatiale jusqu'à  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  n'introduit pas de biais significatifs dans la distribution des fréquences de PC. A titre indicatif, un travail dans ce sens a été achevé par [7] pour l'ensemble des zones arides du nord-est de l'Asie et du nord de l'Afrique. Pour les zones arides et désertiques tunisiennes les mêmes démarches et approches ont été utilisées pour dériver la hauteur de rugosité aérodynamique à partir des produits POLDER. Nous avons opté pour une résolution de notre domaine d'étude de  $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ , soit environ  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ . Nous avons donc pu cartographier pour notre zone d'étude, à partir des produits standards de la chaîne de traitement de l'instrument POLDER, la hauteur de rugosité aérodynamique,  $z_0$ .



**Fig. 1.**  $z_0$  en fonction de  $PC = k_1/k_0$  pour les régions arides (points noirs :  $z_0$  estimés pour le Sahara; carrés blancs :  $z_0$  mesurés aux Etats-Unis et en Namibie). Les barres verticales représentent la déviation standard du coefficient de protrusion sur la zone pour laquelle  $z_0$  est estimée ou mesurée. La droite en trait plein représente le meilleur ajustement entre les données, et les lignes en pointillées représentent  $\pm\sigma$ ,  $\sigma$  étant la déviation standard associée à la régression [11]

## 2.2 ZONE D'ÉTUDE

Les zones arides et désertiques du sud tunisien se situent en dessous des isohyètes 200 mm/an où la déflation éolienne est la plus intense. Le domaine d'étude s'étend sur une grille allant de 30,15°N à 34,18°N et de 7,26°E à 12°E. Outre cette aridité climatique, cette région du sud tunisien est caractérisée par des milieux variés des points de vue de la lithologie, de la morphologie et de l'occupation du sol. En effet, le paysage morphologique est formé de trois grands ensemble ou domaines : celui de l'Atlas, celui de la Steppe et celui du Sahara (Fig. 2). Les deux premiers forment des paysages de plaines et de plateaux isolant tout un système d'anticlinaux, le dernier présente une morphologie propre aux régions désertiques [1]. Par ailleurs, 4 grandes régions naturelles se distinguent nettement dans notre zone d'étude :

1. la Djeffara, ou plaine côtière, située entre le Djebel et la mer. Le réseau orographique est peu développé et l'endoréisme est dominant. Les écoulements sont peu importants sauf dans les piedmonts du Djebel où les oueds coulent une à deux fois par an pour aller se perdre dans les sebkhas.
2. Les massifs montagneux constituent la zone frontale des cuestas qui limitent la plateforme saharienne et comprennent les Matamats et la falaise du Dahar. Les Matmatas et le Djebel constituent donc une série de cuestas successives en fonction de l'alternance lithologique calcaire-marne de la série jurassique et crétacée. Ces cuestas dont le front est tourné vers la mer, dominant la plaine de la Djeffara d'une hauteur pouvant varier de 100 à 600 m. Le relief est parfois ennoyé par un loess quaternaire profondément raviné. Les Dahars sont constitués par des revers de cuestas au contact de l'Erg. C'est le domaine de l'érosion éolienne. On peut y distinguer : (i) les Dahars septentrionaux, présentant l'aspect d'un reg de dissociation sur les croûtes et d'ablation dans les parties basses où les oueds y ont entaillé de profondes vallées dans le substrat crétacé et marqués par un cordon de dunes à végétation relativement dense à nanophanérophites et (ii) les Dahars méridionaux présentent un aspect nettement différent ; la région est plus sèche ; les reliefs et les plateaux des Dahars du sud sont recouverts par des regs.

3. La région des Chotts est une vaste dépression qui comprend les Chotts Djerid et Fedjij. Les régions avoisinantes (le Nefzaoua et le Gherib) présentent un caractère nettement désertique. Elles sont caractérisées également par la présence d'une nappe phréatique ; le Nefzaoua, en particulier est parsemé d'une série de petites oasis naturelles constituées par des faibles jaillissements artésiens naturels à partir de la nappe campanienne.
4. L'Erg, situé de part et d'autre de la frontière algéro-tunisienne, est une vaste dépression où sont accumulés et repris par le vent des alluvions en provenance du Sahara central et septentrional. Il est généralement constitué de longs cordons dunaires sensiblement alignés nord-sud et séparés par des Gassi (fond rocheux) ou des Feidj (fond sableux) ; leurs interférences donnent naissance à d'importants Ghourds qui peuvent atteindre 50 à 100 m de haut. Le grand Erg semble avoir son origine dans les alluvions des oueds sahariens. Les oueds issus des Matmatas et du Djebel tuniso-libyen ont également contribué à la formation de cet immense zone d'épandage. L'Erg oriental, au moins dans sa partie nord, est un « erg humide ». Outre une pluviosité de 50 à 70 mm, ce caractère est dû au fait que les crues de nombreux oueds issus des Matmatas viennent se perdre sous ses dunes. Il existe presque partout dans la partie septentrionale de l'Erg une nappe phréatique située entre 5 et 40 m de la surface. Dans l'amas dunaire de l'Erg, la végétation est en rapport avec la morphologie des dunes, la proximité du squelette rocheux et la granulométrie du sable.

Pour chaque unité géomorphologiques décrites ci-dessus, nous avons pu distinguer (i) les états de surface labourés, en grande partie dans la Djeffara, composés des matériaux meubles sableux et sablo-limoneux, pauvres en éléments grossiers. Ils présentent un microrelief important dû aux labours et se distinguent des autres états de surface par une forte rugosité et une végétation relativement plus dense, (ii) les états de surface salins rencontrés dans les dépressions salées sont caractérisés, à l'état sec, par la présence d'efflorescences salines de couleur claire. Une végétation halophyte verte entretenue par ces nappes peut souvent se maintenir toute l'année avec un taux de recouvrement de l'ordre de 20% à 40%. Ce type d'état de surface est donc caractérisé par une végétation pérenne assez dense, mais aussi une humidité variable, (iii) les états de surface à blocs qui correspondent à des affleurements de roche dure en blocs et cailloux, très étendus dans notre zone et caractérisent tous les reliefs. Suivant la nature et le faciès des roches, la taille et la forme des blocs varient dans tous les cas, le microrelief ou la rugosité sont très marqués. En dehors de ces limites, la surface des sols de la zone d'étude présente toute une gamme d'états de surface, allant de sols nus affleurant, de sables fins et grossiers, à des surfaces de graviers et de cailloux et de végétation pérenne, en diverses proportions.

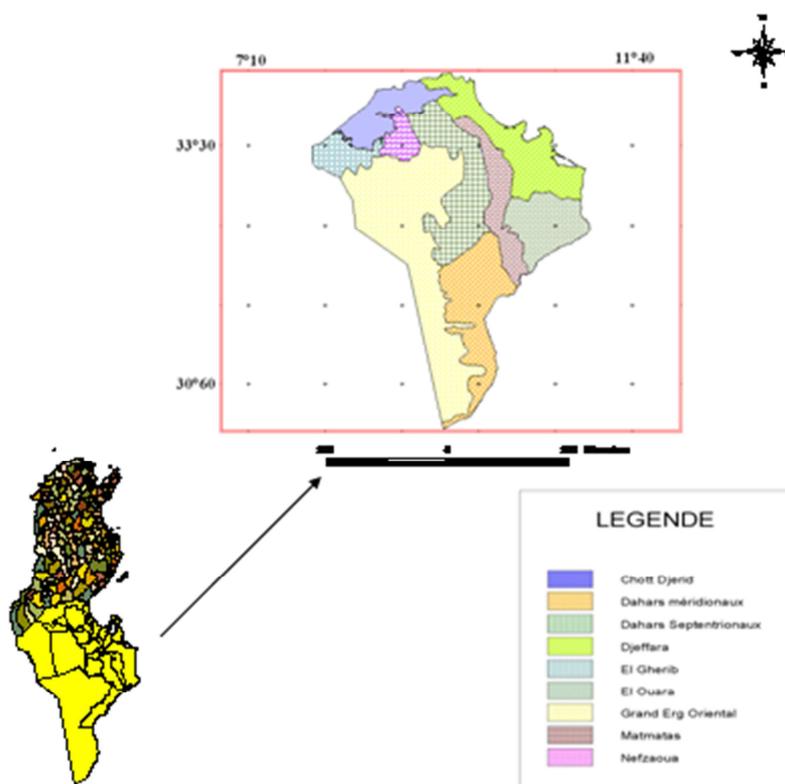


Fig. 2. Carte des régions naturelles de la Tunisie méridionale

### 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les valeurs de  $z_0$  dérivées pour l'ensemble des états de surface des zones arides et désertiques tunisiennes, varient entre  $1,7 \cdot 10^{-3}$  cm à 1,9 cm. Ces hauteurs de rugosité dérivées de POLDER sont comparables aux valeurs de  $z_0$  mesurées avec une soufflerie portable sur des états de surface naturels et érodables [2]. En outre, en se référant à certaines données de  $z_0$  de la littérature, plusieurs catégories de zones arides et désertiques tunisiennes peuvent être identifiées, selon la géomorphologie des régions naturelles, en allant des états de surface très lisses à moins érodables et rugueux. En effet, environ 66% des valeurs de  $z_0$  établies à partir de l'instrument POLDER, pour l'ensemble du sud tunisien, sont comprises entre  $10^{-3}$  cm et  $10^{-2}$  cm. Ces valeurs concernent, en grande partie, le grand Erg oriental et les principales structures sableuses de l'Ouara. Ces ordres de grandeur sont similaires à ceux trouvés dans le désert sableux de Namibie [5] ou mesurés expérimentalement en soufflerie sur des lits de sable homogène ([59], [13]). Dans la plaine de Djefara, pour des états de surface partiellement végétalisés et en présence de voiles éoliens, les hauteurs de rugosité aérodynamique dérivées de POLDER varient entre  $10^{-2}$  cm à  $10^{-1}$  cm. Ce domaine de valeurs de  $z_0$  est consistant avec celles trouvées dans le désert de Gobi (nord-est de l'Asie) par [7] ou déterminées expérimentalement dans la Vallée de la Mort (Californie) par [5]. En outre, la hauteur de rugosité aérodynamique dérivée de POLDER pour les états de surface salins rencontrés dans notre zone d'étude ( $z_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  cm) est du même ordre de grandeur que celle mesurée par [12] dans la région de Chott El-Jerid en Tunisie et par [4] et [5] dans le Confidence Mill Playa et le Lunar Lake aux Etats-Unis. Les massifs montagneux (les Matmatas et le Dahar) et les autres types de paysages couverts de cailloux et de galets (par exemple Hamada ou Reg) sont clairement identifiables par leurs hauteurs de rugosités plus fortes (supérieure à 1 cm) (Fig. 3).

Cette discussion renforce l'idée d'un lien étroit entre la géomorphologie et la hauteur de rugosité. En effet, au fur et à mesure que nous éloignons du massif montagneux, selon un transect nord-sud ou/et est-ouest, les hauteurs de rugosité aérodynamique deviennent progressivement de plus en plus faibles (Fig. 3 et 4). Dans notre domaine d'étude, trois grandes catégories de surface au regard de leur hauteur de rugosité aérodynamique peuvent au minimum être définies en allant des états de surface très lisses à moins érodables et rugueux.

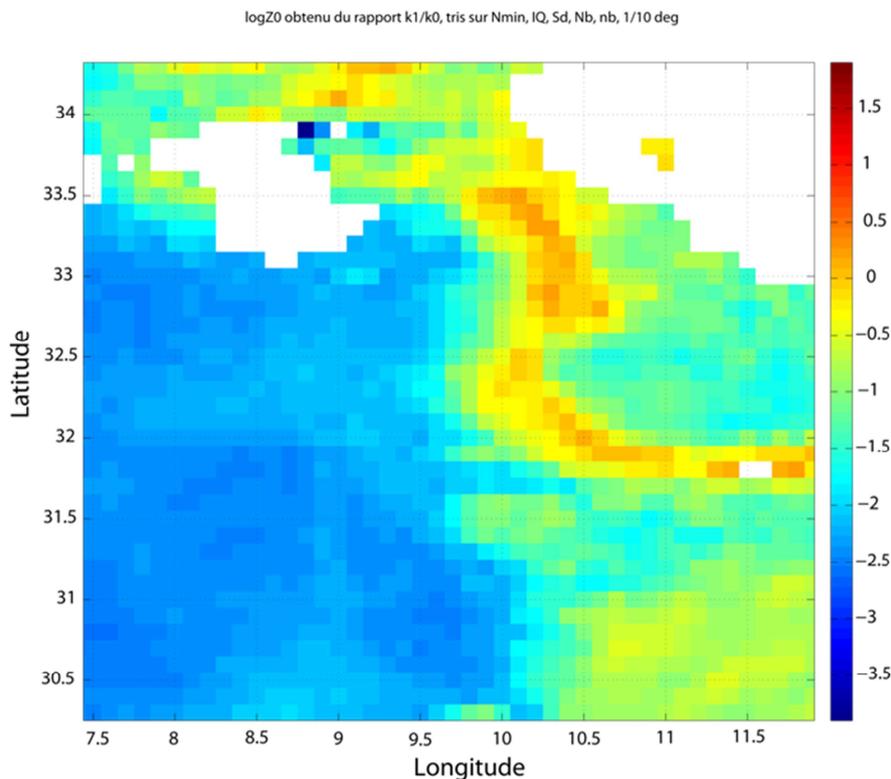


Fig. 3. Carte de logarithme décimal de la hauteur de rugosité aérodynamique,  $\log(z_0)$ , avec une résolution spatiale de  $1/10^\circ \times 1/10^\circ$  pour les zones arides et désertiques tunisiennes

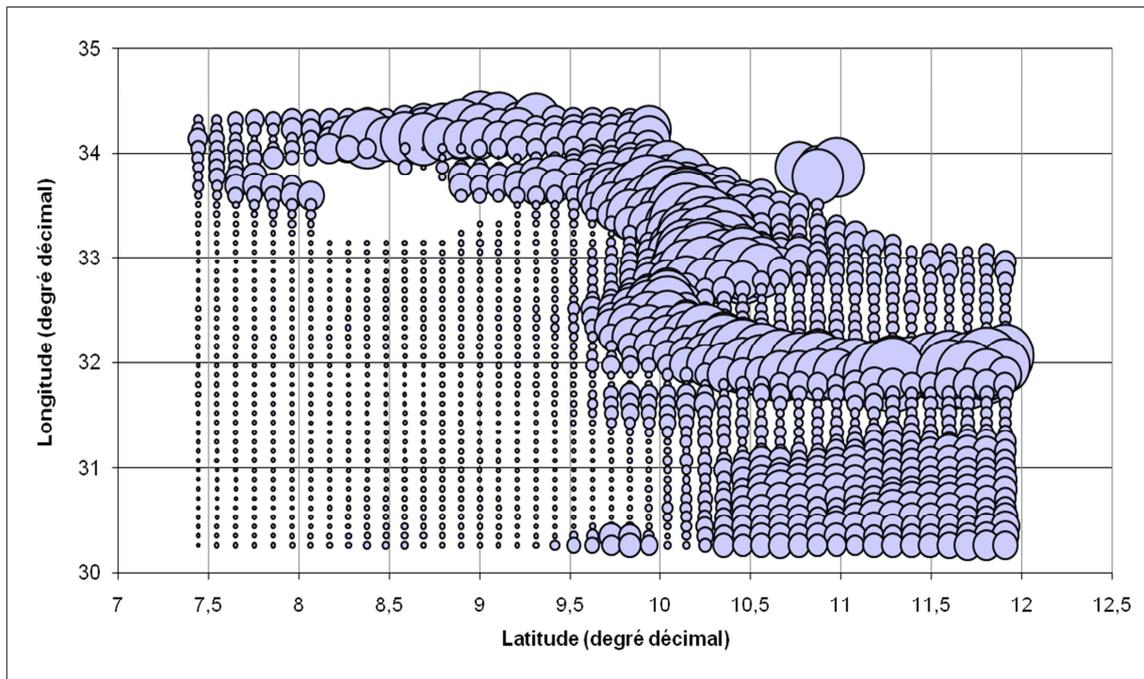


Fig. 4. Variation de la hauteur de rugosité aérodynamique dérivée de POLDER en fonction de la latitude et la longitude (en degré décimal).

#### 4 CONCLUSIONS

Ce travail décrit la mise au point d'une carte de rugosité aérodynamique des zones arides et désertiques tunisiennes dérivée du radiomètre POLDER à la résolution spatiale de  $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ . Selon la géomorphologie des régions naturelles, en particulier suivant la position par rapport au massif montagneux des Matmatas et du Dahar, ce domaine d'étude présente un gradient de rugosité de surface allant des états de surface très lisses à moins érodables et rugueux.

Par ailleurs, la mesure réalisée par POLDER est une valeur intégrant l'ensemble des rugosités de ces différentes surfaces sans qu'il soit possible de déterminer la contribution respective de chacune au signal obtenu. En effet, la valeur de hauteur de rugosité restituée à partir des mesures POLDER ne traduit une vraie rugosité de la surface que dans le cas de surfaces homogènes (ou très majoritairement dominées par un état de surface). Il est important, par conséquent, dans le cas où plusieurs types d'état de surface sont significativement présents dans le pixel de déterminer la contribution respective de chacune au signal obtenu.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Floret, C. et R. Pontannier, "L'aridité en Tunisie présaharienne", *Trav. Et doc. ORSTOM*, 150, 544 pp, 1982.
- [2] Gillette D.A., J. Adams, A. Endo, D. Smith and R. Khil, "Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils", *J. Geophys. Res.*, 85, 5621-5630, 1982.
- [3] Gillies, J. A., N. Lancaster W. G. Nickling, and D. M. Crawley, "Field determination of drag forces and shear stress partitioning effects for a desert shrub (*Sarcobatus vermiculatus*, Greasewood)", *J. Geophys. Res.*, 105, 24,871– 24,880, 2000.
- [4] Greeley, R., N. Lancaster, R. J. Sullivan, R. S. Saunders, E. Theilig, S. Wall, A. Dobrovolski, B. R. White, and J. D. Iversen, "A relationship between radar backscatter and aerodynamic roughness: Preliminary results", *Geophys. Res. Lett.*, 15, 565–568, 1988.
- [5] Greeley, R., Blumberg, D.G, McHone, J.F., Dobrovolski, A., Iversen, J., Lancaster, N., Rasmussen, K.R., Wall, S., White, B., "Applications of spaceborne radar laboratory data to the study of aeolian processes", *J. Geophys. Res.*, 102, 10,971-10,983, 1997.
- [6] King, J., W. G. Nickling, and J. A. Gillies, "Representation of vegetation and other nonerodible elements in aeolian shear stress partitioning models for predicting transport threshold", *J. Geophys. Res.*, 110, F04015, doi:10.1029/2004JF000281, 2005.

- [7] Laurent, B., "Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle continentale : Analyse climatologique des émissions du nord-est de l'Asie et du nord de l'Afrique", *Thèse de Doctorat en Chimie de la pollution Atmosphérique et Physique de l'Environnement*, Université Paris 12 – Val de Marne, 222 pp, 2005.
- [8] Laurent, B., Marticorena, B., Bergametti, G., Chazette, P., Maignan, F., Schmechtig, C., "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", *J. Geophys. Res.*, 110, D18S04, doi: 10.1029/2004JD005013, 2005.
- [9] Li, L., Martz, L.W., "System of numeric models for sand particle transport by wind", *J. Geophys. Res.*, 99, 12,999-13,012, 1994.
- [10] Marticorena, B. and G. Bergametti, "Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission Scheme", *J. Geophys. Res.*, 100, 16415-16430, 1995.
- [11] Marticorena, B., Chazette, P., Bergametti, G., Dulac, F., Legrand, M., "Mapping the aerodynamic roughness length of desert surfaces from the POLDER/ADEOS bi-directional reflectance product", *Int. J. Remote Sensing*, 25, 3, 603-626, 2004.
- [12] Marticorena, B., M. Kardous, G. Bergametti, Y. Callot, P. Chazette, H. Khatelli, S. Le Hégarat-Masclé, M. Maillé, J.L. Rajot, D. Vidal-Madjar and M. Zribi, "Surface and aerodynamic roughness in arid and semiarid areas and their relation to radar backscatter coefficient", *J. Geophys. Res.*, 111, F03017, doi:10.1029/2006JF000462, 2006.
- [13] McKenna-Neuman, C., Nickling, W.G., "Momentum extraction with saltation: Implications for experimental evaluation of wind profile parameters", *Boundary-Layer Meteorol.*, 68, 35-50, 1994.
- [14] Priestley, C. H. B., "Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere", *University of Chicago Press*, Chicago, 130 pp, 1959.
- [15] Roujean, J.L., Leroy, M., Deschamps, P.Y., "A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data", *J. Geophys. Res.*, 97, 20,455-20,468, 1992.
- [16] Roujean, J.L., Tanré, D., Bréon, F.M., Deuzé, J.L., "Retrieval of land surface parameters from airborne POLDER bidirectional reflectance distribution function during HAPEX-Sahel", *J. Geophys. Res.*, 102, 11,201-11,218, 1997.
- [17] Shao, Y., Raupach, M.R., Leys, J.F., "A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region", *Aust. J. Soil Res.*, 34, 309-342, 1996.