



Etude Numérique du Transport Eolien

F.Z. BENARAB , A. MEDJELLED

LME, Laboratoire de Mécanique, Département de Mécanique, Université de Laghouat, BP.37G, Route de Ghardaïa, Laghouat 03000. Algérie.

Corresponding author: f.benarab@lagh-univ.dz

Résumé— ce travail présente, une étude sur le transport des grains de sable en saltation. La simulation numérique entreprise consiste à introduire une fonction de distribution de densité dont le but est de quantifier les flux de grains de sable transportés. Les résultats obtenus sont validés par comparaison avec les résultats d'un travail expérimental précédent. Les profils de la vitesse moyenne horizontal, ainsi que les courbes décrivant la variation du flux sont présentés et discutés. Il est à noter que le flux de sable peut être décrit comme une fonction Gaussienne. Ce qui est en bon accord avec l'expérimental. L'objectif principal est de modéliser le transport éolien de façon à améliorer sa prédiction.

Mots clés— Transport Eolien, Saltation, Flux de masse, Sable, Turbulence.

I. Introduction

Le transport éolien des grains de sable est l'un des causes principales de la désertification et de l'érosion des terres agricoles[1] et du déracinement des arbres, Il cause aussi la réduction de la visibilité engendrant des problèmes de trafic routier et aérien, ainsi que la dégradation des panneaux solaires. Le transport des grains par le vent est le résultat de l'interaction entre le vent et la surface du sol. La caractérisation de la surface du sol, le contrôle continu des mouvements du vent et des conditions atmosphériques, sont nécessaires pour une bonne compréhension du transport éolien [2]. Le transport se fait en trois modes, la suspension pour les grains les plus fins, la saltation pour les grains de taille moyenne, et la reptation pour les gros grains. La saltation est le mode dominant du transport éolien, dans lequel les grains de sable sont délogés de la surface du sol par la turbulence et conduit par le vent[3]. Le grain finit par tomber avec une grande énergie cinétique qui provoquera à son tour le déplacement d'autres grains. La vitesse et l'énergie de la chute du grain sont fonctions de sa masse. La saltation représente environ 75% du flux de sable totale. La taille des grains érodible par saltation varie de 0,0063 mm à 2 mm .

Dans les dernières années, la recherche sur le transport éolien a beaucoup progressée. L'étude en tunnel a vu un grand développement pour répondre aux besoins de plus en plus exigeants de la recherche. Cette dernière tourne principalement au tour de la Dynamique du transport et de l'érosion. Dans ce contexte on peut citer : [4-11]. La modélisation et le calcul numérique ont donné un bond à la recherche éolienne. La simulation permet la prédiction de tous les aspects de l'érosion, depuis l'entrainement des grains, au transport et jusqu'à la déposition[12-15]. L'approche Eulérienne été développée comme alternative et complémentaire à l'approche Lagrangienne dans de la particule et de la phase fluide sont couplés[16].L'approche Eulérienne est fondamentalement intéressée sur la description de la phase de particules comme une phase continuum caractérisé par une densité saturée et une vitesse moyenne de saltation [17]. Une proposition d'un modèle de continuum est présenté dans le présent travail . Une simulation numérique est élaboré avec l'introduction d'une fonction de distribution de densité. Qui vise la quantification des grains de sable transportés.

II. Modèle mathématique

Le modèle mathématique qui régit cet écoulement turbulent incompressible se compose de l'équation de continuité (1). Les équations de Navier-Stokes avec la moyenne de Reynolds (2).

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu S_{ij} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (2)$$

Les équations du modèle de turbulence ($k-\varepsilon$) ont été choisi pour la fermeture du système,(4-3)[18]:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho c_{\varepsilon 2} \quad (4)$$

Où, S_{ij}

est le tenseur moyen du taux de contrainte donné par :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \text{ et } \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Où, $k = \bar{u}_i \bar{u}_j$ est l'énergie cinétique turbulente. δ_{ij} est le symbole de Kronecker, ε est la dissipation de l'énergie cinétique turbulente, μ est la viscosité cinétique, et μ_t désigne la viscosité cinématique turbulent. P_k est la production nette par unité de la dissipation de l'énergie cinétique turbulent. Cependant:

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} S_{ij}$$

Selon la littérature, les constantes empiriques du modèle de turbulence utilisé ($k-\varepsilon$) sont données par[19]:

$$c_\mu = 0.09, c_{\varepsilon 1} = 1.44, c_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1.0$$

III. Conditions de simulation et méthode numérique

Afin de valider les résultats avec ceux de Tong [9] certaines conditions et hypothèses ont été prises:

Le domaine de calcul du champ d'écoulement est d'environ 12 m de long, 1.3 m de large et 1.45 m de haut. Le diamètre de grain est de 0.295mm. La vitesse du vent varient entre 8 et 14 m / s. L'air peut être considéré comme incompressible car le nombre de Mach est inférieur à 0.05 .

Les conditions aux limites peuvent être décrites de la manière suivante:

Selon des études expérimentales, la longueur de rugosité aérodynamique peut être calculée à partir de l'équation suivante, où d est le diamètre du grain:

$$z_0 = \frac{d}{30}$$

En se servant des résultats des travaux expérimentaux[5], [7], [20]. On remarque que la concentration des grains de sable dans un mélange air-sable peut être décrite par une fonction exponentielle.

$$C = a e^{-zb} \quad (6)$$

Où a et b sont des paramètres qui changent régulièrement avec la vitesse et le diamètre des grains ainsi qu'avec la hauteur. On note bien que le paramètre b est aussi fonction de la distance parcouru :

$$a(z, d, u_*) = \frac{z_{0s} \sqrt{gd}}{\beta U(z)}$$

$$b(x, z, d, u_*) = \left(\frac{U(z)}{x \sqrt{gd}} \right)$$

D'où la quantité de sable transporté peut être exprimée par :

$$\rho_s = \rho_{sable} C \quad (7)$$

La densité du mélange prendra la forme suivante :

$$\rho = \rho_{sable} C + \rho_{air} \quad (8)$$

Avec z_{0s} est la longueur de rugosité saltation:

$$z_{0s} = 0.02 \frac{u_*^2}{g}$$

Avec un coefficient α est trouvé par Owen [21], $\alpha = 0.02$. $\rho_{air} = 1.25 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{sable} = 2650 \text{ kg/m}^3$ et $\beta=0.06\text{m}$, qui correspond à la longueur de glissement établi par Andreotti [20].

Limite inférieure :

$$u = u_*, v = 0, w = 0$$

A la sortie :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Limite supérieure :

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, v = 0, w = 0$$

A l'entrée, le profil de la vitesse du vent prends l'allure d'une fonction logarithmique[3]:

$$U(z) = \frac{u_*}{K} \log \frac{z}{z_0} \quad (5) \quad z \geq z_0$$

Où $U(z)$ représente la vitesse à la hauteur z , u_* est la vitesse de friction, K est la constante de Karman (0,41) et z_0 est la hauteur de rugosité aérodynamique de la surface [1]

Les équations (1-4) sont résolus par la méthode des volumes finis .le schéma Centré a été utilisé. Le couplage vitesse pression est résolu en utilisant l'Algorithme du 2emme order . La validité du code de calcul a montré un bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature.

IV. Résultats et discussion

Les résultats de la simulation sont comparés avec les résultats expérimentaux de Tong [9]pour la validation du modèle présenté. A cet effet, les valeurs calculées des vitesses et des flux de sable sont prises à 8,5 m de l'entrée de la section d'essai. La figure 1 montre les profils de vitesse du vent à l'entrée de la section d'essai calculée par Eq.5 comparés à la vitesse mesurée par Tong [9].

Les vitesses de fruction correspondant aux quatre vitesses (8, 10, 12 et 14 m / s) sont respectivement : 0,34, 0,415, 0,488 et 0,553 m / s.

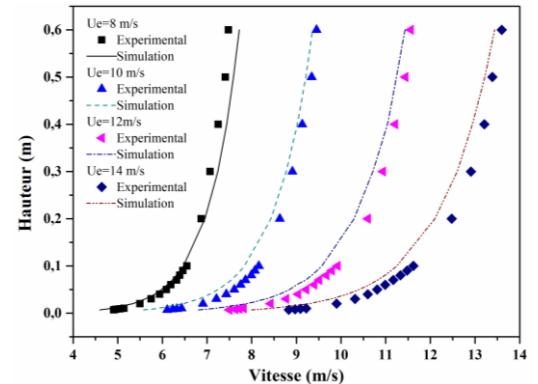


Fig. 1. Profils de la vitesse du vent à l'enter du tunnel.

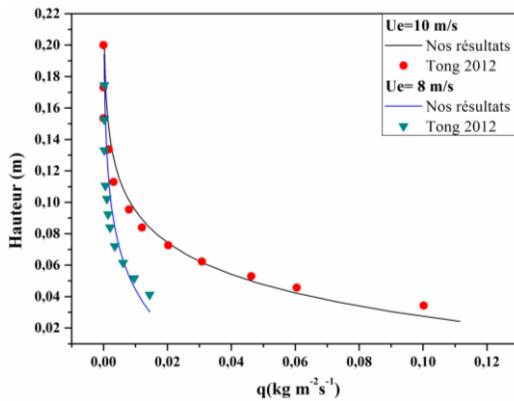


Fig. 2. Variation du flux de sable en hauteur.

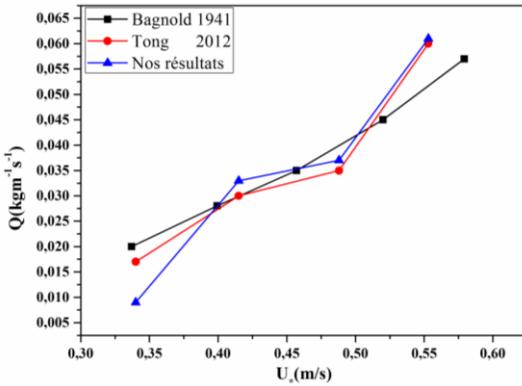


Fig. 3. Comparaison du flux de masse avec les résultats de Bagnold [3] et de Tong [9].

Fig.2 et Fig.3 représentent respectivement le flux de sable à différentes hauteurs et du flux de masse pour les vitesses de friction déférents. La comparaison avec les résultats de Bagnold [3] et Tong [9] montre que les résultats de simulation sont en bonne conformité avec celles des études expérimentales.

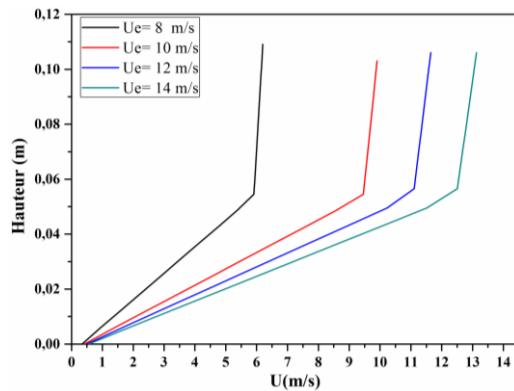


Fig. 4. Variation de la vitesse horizontale moyenne avec la hauteur

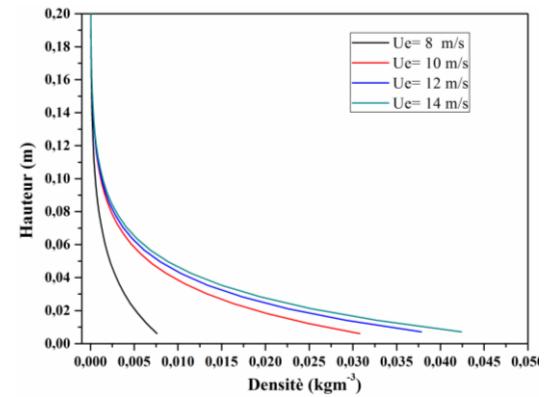


Fig. 5. Variation de la densité du sable avec la hauteur

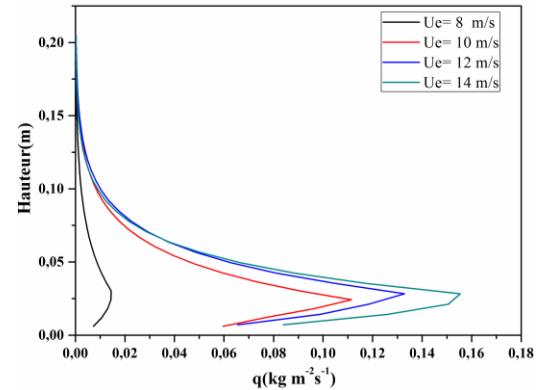


Fig. 6. Variation du flux du sable avec la hauteur

Le profile de la vitesse du vent pour les différentes valeurs de la vitesse d'entrée est représenté sur la fig.4. On remarque que le profile subi un effet de freinage causé par l'inertie de la masse de sable transportée. L'allure de toutes les courbes peut être divisée en deux parties. La première pour les hauteurs $z > 0.06$ m où le profil du vent continu à suivre la fonction logarithmique. La deuxième Pour $z < 0.06$ m, ou le profil de la vitesse peut être décrite par une fonction linéaire [16]. Fig.5 représente la variation de la densité en fonction de la hauteur pour les différentes vitesses. On remarque que la densité accroît avec l'accroissement de la vitesse près du sol. Tandis qu'elle tend vers zéros pour les hauteurs de plus de 0.14 m. Il a été noté précédemment apartir du travail expérimental que le profil de la vitesse du vent ne suit pas parfaitement la loi logarithmique dans la couche de saltation [22]. Ce resultat a également été observée dans certains modèles numériques [23], [24].

Le flux est calculé avec une relation entre la densité du sable transporté (7), et la vitesse du mélange représenté sur la fig.4:

$$q = \rho_s U(z) \quad (9)$$

Sur la fig.6 on représente l'évolution du profile du flux avec le changement de la vitesse du vent. Dans le travail expérimental de Tong [9] du flux de sable a été mesurée à partir de la hauteur de 3 cm. Dans le présent travail le profil sable de flux peut être calculée à partir de la hauteur de rugosité . Les profiles suivent deux allures : la première représente le profile près de la surface dans laquelle les flux de saltation augmentent avec la hauteur; on remarque l'existence d'un point d'inflexion où le flux maximale se produit, a une hauteur au tour de 0.045 m. après le point d'inflexion le flux se réduit allant vers le zéro suivent une forme de fonction exponentielle. Au final le flux est exprimé par une distribution Gaussienne. Tan [11] a donné une appellation à ce type de densité de flux : the peak-flux-profile pattern.

Nomenclature

| | |
|----------------------|---|
| k | : Energie cinétique |
| ε | : Dissipation de l'énergie cinétique |
| u_i | : Fluctuation de la vitesse |
| δ_{ij} | : Symbole de Kronecker |
| S_{ij} | : Tenseur moyen du taux de contrainte |
| μ_t | : Viscosité cinématique turbulent |
| σ_k | : Coefficient de l'énergie cinétique |
| σ_ε | : Coefficient de la dissipation de l'énergie cinétique. |
| u_* | : Vitesse de friction. |
| U_e | : Vitesse à l'entrée. |
| z_0 | : Hauteur de rugosité aérodynamique de la surface. |
| K | : Constante de Karman. |
| d | : Diamètre du grain de sable. |
| C | : Concentration des grains de sable dans un mélange. |
| a, b | : Paramètre de la densité du mélange. |
| ρ | : Densité du mélange. |
| ρ_s | : Quantité de sable transporté. |
| ρ_{sable} | : Densité du sable. |
| ρ_{aire} | : Densité de l'aire. |
| z_{0s} | : Hauteur de rugosité en saltation. |
| α | : Coefficient d'Owen. |
| β | : Hauteur caractéristique de saltation. |
| q, Q | : Flux de sable, flux de masse. |

Références

- [1] Y. Shao, "Physics and Modelling of Wind Erosion," *Atmos. Oceanogr. Sci. Libr.*, vol. 37, p. 452, 2008.
- [2] N. Lancaster, *Geomorphology of Desert Dunes*. 1995.
- [3] R. A. Bagnold, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen. London, 1941.
- [4] T. D. Ho, a. Valance, P. Dupont, and a. Ould El Moctar, "Aeolian sand transport: Length and height distributions of saltation trajectories," *Aeolian Res.*, vol. 12, pp. 65–74, 2014.
- [5] Z. Gu and L. Guo, "Experimental investigation on trap stagnant effect and sand flux in aeolian sand transport," *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 368, no. 6, pp. 435–441, 2007.
- [6] Z. Dong, H. Wang, X. Liu, and X. Wang, "The blown sand flux over a sandy surface: A wind tunnel investigation on the fetch effect," *Geomorphology*, vol. 57, no. 1–2, pp. 117–127, 2004.
- [7] Z. Dong, X. Liu, H. Wang, and X. Wang, "Aeolian sand transport: a wind tunnel model," *Sediment. Geol.*, vol. 161, pp. 71–83, 2003.
- [8] X. Liu, Z. Dong, and X. Wang, "Wind tunnel modeling and measurements of the flux of wind-blown sand," *J. Arid Environ.*, vol. 66, no. 4, pp. 657–672, 2006.
- [9] D. Tong and N. Huang, "Numerical simulation of saltating particles in atmospheric boundary layer over flat bed and sand ripples," *J. Geophys. Res.*, vol. 117, no. D16, p. D16205, 2012.
- [10] Z. S. Li, D. J. Feng, S. L. Wu, a. G. L. Borthwick, and J. R. Ni, "Grain size and transport characteristics of non-uniform sand in aeolian saltation," *Geomorphology*, vol. 100, no. 3–4, pp. 484–493, 2008.

V. Conclusion

Nos résultats ont montré que la concentration des grains dans le mélange air-sable peut être décrite par une fonction exponentielle. On a trouvé que la concentration dépend de : la vitesse, la hauteur, la distance parcourue et du diamètre du grain. La fonction de concentration proposée donne de bons résultats validés par ceux mesurés expérimentalement. Pour le diamètre du grain choisi dans l'étude, le flux peut être exprimé par une fonction de distribution Gaussienne avec un point d'inflexion où le flux est maximal. En plain saltation le profil de la vitesse du vent est devisé en deux parti : profile logarithmique et le profile linéaire près du sol.

- [11] L. Tan, W. Zhang, J. Qu, J. Du, D. Yin, and Z. An, "Variation with height of aeolian mass flux density and grain size distribution over natural surface covered with coarse grains: A mobile wind tunnel study," *Aeolian Res.*, vol. 15, pp. 345–352, 2014.
- [12] L. Kang, L. Guo, Z. Gu, and D. Liu, "Wind tunnel experimental investigation of sand velocity in aeolian sand transport," *Geomorphology*, vol. 97, no. 3–4, pp. 438–450, 2008.
- [13] L. Kang and D. Liu, "Numerical investigation of particle velocity distributions in aeolian sand transport," *Geomorphology*, vol. 115, no. 1–2, pp. 156–171, 2010.
- [14] L. Kang, "Discrete particle model of aeolian sand transport: Comparison of 2D and 2.5D simulations," *Geomorphology*, vol. 139–140, pp. 536–544, 2012.
- [15] T. L. Bo, X. J. Zheng, S. Z. Duan, and Y. R. Liang, "The influence of wind velocity and sand grain diameter on the falling velocities of sand particles," *Powder Technol.*, vol. 241, pp. 158–165, 2013.
- [16] A. Valance, K. R. Rasmussen, A. Ould El Moctar, and P. Dupont, "The physics of Aeolian sand transport," *Comptes Rendus Phys.*, vol. 1, pp. 1–13, 2015.
- [17] H. J. Sauermann, G., Kroy, K., Herrmann, "Continuum saltation model for sand dunes," *Phys. Rev. E* 64, p. 031305, 2001.
- [18] David C. Wilcox, "Turbulence-Modeling-for-CFD," p. 477, 1993.
- [19] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974.
- [20] B. Andreotti, P. Claudin, and O. Pouliquen, "Measurements of the aeolian sand transport saturation length," *Geomorphology*, vol. 123, no. 3–4, pp. 343–348, 2010.
- [21] R. P. Owen, "Saltation of uniform grains in air," *J. Fluid Mech.*, vol. 20, pp. 225–242, 1964.
- [22] J. . Ni, Z. . Li, and C. Mendoza, "Vertical profiles of aeolian sand mass flux," *Geomorphology*, vol. 49, no. 3–4, pp. 205–218, 2003.
- [23] P. K. Anderson, R. S., Haff, "Wind modification and bed response during saltation of sand in air," *Acta Mech.*, vol. Suppl., 1, pp. 21–52, 1991.
- [24] A. Shao, Y., Li, "Numerical modelling of saltation in the atmospheric surface layer," *Bound. Layer Meteorol.*, vol. 91(2), 199, pp. 199–225, 1999.