Quantification théorique des transports éoliens en milieu littoral à court terme : les limites pour une intégration à moyen terme.

Patrice BRETEL* et Franck LEVOY

UMR – CNRS 6143 « *Morphodynamique Continentale et Côtière* »
24, rue des Tilleuls – F- 14 000 CAEN

* tél. : 00 (33) 2 31 56 57 22, bretel@geos.unicaen.fr

Résumé :

Deux séries de mesures de transport éolien sur la haute plage de Ouistreham (Calvados), dans des conditions environnementales peu complexes (plage horizontale de granulométrie et de teneur en eau superficielle homogènes) ont été réalisées en parallèle de mesures de vitesse du vent à différentes hauteurs. Les transports calculés, en utilisant différentes méthodes de détermination de U_* et deux formules de transport (Bagnold, 1941 et Kawamura, 1951), sont comparés aux mesures réalisées par quatre couples de pièges. Pour chacune des expériences, une forte sensibilité du calcul au pas de moyenne appliqué aux mesures de vitesses et à la méthode de détermination de U_* est mise en évidence. A partir des ces résultats à court terme, la validité des prédictions de transport à moyen terme par intégration dans le temps des résultats des formules est discutée.

Abstract :

Two eolian sand transport experiments have been carried out on the upper beach of Ouistreham (Calvados), for quite simple environmental conditions (flat zone with homogeneous sand water contents and granulometry), and with simultaneous vertical wind profile measurements. Sediment transport calculation, using different methods to determine U_* and two transport formulae (Bagnold, 1941 and Kawamura, 1951), are compared with sand traps measurements. From these short term results, prediction efficiency for longer time scales based on time integration of the formulae results are discussed.

1. Introduction :

La quantification des volumes de transport éolien de la plage vers la dune constitue une étape essentielle dans l'établissement des budgets sédimentaires sur les côtes sableuses (Levoy, 1994). De plus, elle permet de mieux caractériser le comportement morphodynamique de l'avant-dune, notamment en vue de travaux d'aménagement.

Les résultats de deux expériences réalisées sur des périodes courtes, de l'ordre de 15 mn, pour des conditions de transport homogènes dans un environnement peu complexe sur la plage de Ouistreham sont présentés. Deux formules faisant référence, Bagnold (1941) et Kawamura (1951), sont testées en vue d'appréhender

la qualité des prédictions sur de courtes périodes et préciser ainsi les ordres de grandeur pouvant être raisonnablement annoncés par intégration à moyen terme (quelques mois à quelques années). En effet, la quantification théorique de l'activité éolienne de la plage vers la dune aboutit généralement à une surestimation du volume de croissance des dunes et ceci, malgré l'introduction de coefficients empiriques dans les formules.

Les comparaisons à court terme entre les transports mesurés et calculés servent de base à l'analyse de la validité des méthodes utilisées pour déduire la vitesse de cisaillement, paramètre essentiel du calcul. Deux principes de déduction de U_* sont utilisés et l'influence du pas de temps de calcul des vitesses moyennes de cisaillement sur la période de mesure est testée.

2. Présentation du site et protocole de mesure

Les mesures ont été réalisées sur la berme de haute plage, à l'Ouest du chenal d'accès au port de Ouistreham (Calvados), site d'expérimentation choisi en raison de la relative simplicité de la configuration morphologique et sédimentaire pour les conditions de vent du moment. Le vent était de secteur nord-ouest (300°), sensiblement parallèle au trait de côte. Lors des expériences 1 et 2, il soufflait à des vitesses moyennes respectives de l'ordre de $9,60 \text{ m.s}^{-1}$ et $8,90 \text{ m.s}^{-1}$, à 0,5 m au-dessus de la surface sableuse horizontale, caractérisée par une granulométrie et une teneur en eau homogènes. La médiane est de 0,69 mm avec un indice de classement de Trask de 1,85, correspondant à un sable mal trié.

Cette configuration est en opposition avec celle rencontrée en périodes de vent de mer durant lesquelles la surface est soumise à des écoulements perturbés, d'une part, par la morphologie de la plage, d'autre part, par les différences granulométriques essentiellement cross-shore, qui interviennent sur la rugosité. De plus, la teneur en eau du sable, facteur essentiel déterminant la vitesse seuil de transport, est très variable selon l'axe perpendiculaire au trait de côte. Les conditions de mesures rencontrées lors des expériences offrent donc la possibilité d'étudier le transport éolien dans un contexte simplifié en limitant le nombre de paramètres à intégrer dans le calcul.

La vitesse horizontale du vent a été mesurée au moyen de 3 anémomètres à coupelles placés respectivement à 0,50 m, 1,24 m et 3,02 m de hauteur (Figure 1 A). Des prélèvements de sable superficiels, réalisés au vent du mât météo, ont fait l'objet d'analyse granulométrique et de mesures de teneur en eau par différence pondérale. La médiane, utilisée dans la détermination de la vitesse seuil de transport et pour le calcul de la hauteur de rugosité équivalente a été calculée et rapportée en diamètre équivalent (Bagnold, 1941). Elle est aussi directement introduite dans la formule de transport de Bagnold (1941).

Figure 1 : A : Mise en oeuvre des mesures de vent. *Wind measurements deployment*
 B : Pièges spécifiques des transports en saltation (vertical) et en surface (horizontal). *Sediment traps specific of saltation (vertical) and of surface (horizontal) transports*

Quatre couples de pièges horizontaux – verticaux ont été mis en place lors des deux expériences. Les pièges verticaux utilisés sont de type Leatherman (1978) (Figure 1 B). Leur efficacité sédimentologique, établie en laboratoire, est de l'ordre de 0,7, en conditions de vitesse stabilisée. Les pièges horizontaux sont adaptés du piège de Kawamura (1951) leur efficacité est estimée à 1, en l'absence de mesure d'étalonnage. Une forte proportion du transport, de l'ordre de 80% variant en fonction des conditions de vent, s'effectue sur une hauteur de quelques centimètres. Le piège horizontal mesure le transit sur une hauteur de 2 cm au-dessus de la surface. Le piège vertical, mesure le transport en saltation à partir de 2 cm. Le transport total est calculé par cumul des masses sèches de sédiment dans chacun des pièges et rapporté à une unité de largeur par unité de temps.

3. Résultats des mesures de transport

Les caractéristiques des sables piégés et les résultats des deux séquences de mesures sont présentés ci-dessous. Un transport homogène est mis en évidence sur l'ensemble de la zone de mesure pour les deux expériences. Les écarts types représentent respectivement 7,4 % et 4,0 % des taux de transport moyens mesurés, pour les expériences 1 et 2.

L'évolution des caractéristiques granulométriques et de teneurs en eau du sédiment entre les 2 expériences confirment l'interaction entre l'action du vent générant le transport et les caractéristiques des sédiments (Lancaster *et al.*, 2002). La diminution du taux de transport lors de la seconde expérience révèle une diminution des capacités de transport due à la baisse de la vitesse du vent (réduction de la vitesse moyenne à 0,5 m de hauteur de l'ordre de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$).

Ainsi, les tailles médianes des particules transportées et leurs teneurs en eau sont plus faibles. Cet effet rétroactif du transport sur les caractéristiques du sédiment est susceptible d'influencer directement les vitesses seuils de mise en mouvement des sables en place qui sont prises en compte dans les calculs.

Expérience 1 : durée 15 mn (900 sec.) Vitesse moyenne (h : 0,5 m) : 9,60 m.s ⁻¹ Ecart type : 1,70 m.s ⁻¹			
Pièges	humidité (en %)	médiane (en mm)	taux de transport (kg.m ⁻¹ .mn ⁻¹)
H10 / V6	2,0 / 1,7	0,71 / 0,50	1,603
H9 / V5	1,9 / 1,7	0,66 / 0,50	1,612
H8 / V8	2,0 / 1,9	0,59 / 0,49	1,785
H7 / V7	2,1 / 1,7	0,58 / 0,49	1,494
Taux moyen			1,623
Écart type			0,120

Expérience 2 : durée 15 mn 40 s (940 sec.) Vitesse moyenne (h : 0,5 m) : 8,90 m.s ⁻¹ Ecart type : 1,70 m.s ⁻¹			
Pièges	humidité (en %)	médiane (en mm)	taux de transport (kg.m ⁻¹ .mn ⁻¹)
H10 / V6	1,4 / 1,2	0,61 / 0,47	1,052
H9 / V5	1,2 / 1,1	0,61 / 0,46	1,002
H8 / V8	1,3 / 1,2	0,62 / 0,46	1,086
H7 / V7	1,2 / 1,2	0,51 / 0,47	1,004
Taux moyen			1,036
Écart type			0,041

4. Calcul du transport éolien

4.1. Formules de transport et vitesse seuil

Les deux formules testées sont celles de Bagnold (1941) et Kawamura (1951). Ce sont les plus couramment utilisées pour le calcul du taux de transport éolien.

La vitesse seuil de transport prenant en compte la teneur en eau du sédiment est calculée à partir de la formule de Bagnold (1941), modifiée par Tanaka et al. (1954) :

$$U_{*tw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} + 7.5 w$$

A : constante de Bagnold = 0,1 ; ρ_s : densité du sable (quartz : $2,65.10^{-3}$ kg.cm⁻³) ;
w : teneur en eau en % inférieure à 8%

4.2. Détermination de la vitesse de cisaillement (U_*)

Une première méthode peut être appliquée en connaissant la hauteur de rugosité équivalente (Z_0) calculée à partir de la granulométrie superficielle du sable en

place. En mesurant la vitesse à une hauteur fixe proche de la surface, la valeur de U_* est déduite de la représentation logarithmique du profil vertical de vitesses fournie par l'expression (Prandtl – von Kármán) :

$$U_z = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad Z_0 = 0.081 \ln \frac{d}{0.18} \text{ (Zingg, 1952)}$$

κ : constante de von Kármán = 0,4 ; U_z : vitesse à la hauteur Z ; U_* : vitesse de cisaillement ; d : diamètre du sable (en mm).

Mais en période de transport, selon la théorie du point focal de Bagnold (1941) qui considère l'interaction entre le nuage de saltation et le profil de vitesse, la valeur de U_* est déterminée à partir de l'expression :

$$U_z = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z'} + U'$$

avec selon Zingg (1952) :

$$U' = 894 d \quad Z' = 10 d$$

Z' : ordonnée du point focal (en mm), U' : abscisse du point focal (en cm.s^{-1}),
 d : diamètre moyen du sédiment (en mm)

Une seconde méthode de détermination de U_* est basée sur la mesure du gradient de vitesse. En effet, la rugosité du substrat ou du nuage en saltation génère une traînée qui est indicatrice de la vitesse de cisaillement et peut être déduite du gradient de vitesse vertical. Sur une représentation semi-logarithmique vitesse-hauteur, la pente de la droite correspond au rapport κ/U_* .

Les deux méthodes de détermination de U_* sont comparées. Étant donné que le transport varie en fonction du cube de U_* , il apparaît essentiel de tenter de déterminer sa valeur à une fréquence élevée, fixée en fonction des caractéristiques des capteurs et de leur mise œuvre, surtout lorsqu'elle est déduite du gradient de vitesse vertical.

5. Détermination d'une fréquence optimale de calcul du transport

Le gradient de vitesse est déduit de la droite de régression établie entre les mesures de vitesses à différentes hauteurs. La qualité de l'ajustement linéaire est évaluée en calculant l'erreur type, écart entre la valeur prédite et la valeur mesurée, pour différents pas de moyenne. Dans un second temps, l'erreur relative sur la détermination de U_* , consécutive à l'erreur type, est calculée. Une forte réduction de cette erreur relative est observée avec une augmentation du pas de

moyenne. Ainsi pour un pas de moyenne de 30 sec., dans 90 % des cas, les erreurs relatives sur U_* sont inférieures à 20 % (figure 2).

L'augmentation du pas de moyenne améliore la qualité de la corrélation mais réduit la définition du signal. Un compromis s'impose et un pas de moyenne minimum de 30 sec. est retenu pour le calcul des transports.

Figure 2 : Évolutions de la fréquence cumulée des erreurs type pour différents pas de moyenne lors de chaque expérience. *Cumulated frequency evolutions of type errors for different average steps.*

6. Résultats des calculs et comparaison avec les mesures

Le rapport entre le taux de transport calculé et mesuré est compris entre 0 et 2,65 en fonction du pas de calcul fixé et de la méthode de détermination de U_* . Respectant le compromis «définition du signal – qualité de corrélation», les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous pour des pas de moyennes de 30 s et environ 15 mn.

Moy.	Expérience 1 : 1,623 kg.m ⁻¹ .mn ⁻¹ (mesuré)				Expérience 2 : 1,036 kg.m ⁻¹ .mn ⁻¹ (mesuré)			
	B. (grad.) kg/m.mn	K. (grad.) kg/m.mn	B. (Zing.) kg/m.mn	K. (Zing.) kg/m.mn	B. (grad.) kg/m.mn	K. (grad.) kg/m.mn	B. (Zing.) kg/m.mn	K. (Zing.) kg/m.mn
30 s	3,428	1,404	2,400	0,523	2,552	0,842	1,618	0,464
	2,11	0,87	1,48	0,32	2,46	0,81	1,56	0,45
durée totale (#15 mn)	3,891	0,239	-	-	-	-	-	-
	2,40	0,15	-	-	-	-	-	-

les chiffres en gras-italique correspondent au rapport transport calculé / mesuré - B. : Bagnold (1941) ; K. : Kawamura (1951) ; (grad.) : U_* déduit du gradient de vitesse ; (Zing.) : U_* déduit des expressions empiriques de Zingg (1952).

En fonction de la méthode de détermination de U_* , d'importantes différences de résultats sont observées. En respectant un pas de moyenne de 30 s, meilleur compromis entre une définition suffisamment fine du signal et la validité de la détermination de U_* à partir du gradient de vitesse, les meilleures estimations du transport sont obtenues par la formule de Kawamura. Les rapports transport

calculé/mesuré sont respectivement de 0,87 et 0,81, pour les expériences 1 et 2. En revanche, l'application de la méthode de Zingg (1952) associée à la formule de Bagnold aboutit à une surestimation de l'ordre de 1,5. L'utilisation de la formule de Kawamura, dans ce cas, induit une sous-estimation avec des rapports inférieurs à 0,5.

7. Discussion

Dans le principe, les profils de vitesse verticaux ne peuvent fournir qu'une appréciation du facteur de rugosité qui est fortement influencé par les caractéristiques du nuage de saltation. En effet, les contraintes pratiques ne permettent pas de réaliser des mesures à moins de 20 à 30 cm de la surface. Par contre, la méthode de Zingg (1952) n'intègre que la granulométrie et ne prend pas en compte les autres facteurs de rugosité (rides, nuage de saltation). Enfin, un dernier point critique concerne la connaissance de l'évolution de la vitesse seuil dans le temps. Elle n'est pas stable à l'échelle des expériences réalisées.

Malgré la faible complexité du site de mesure, ces points critiques limitent la capacité à prédire l'intensité du transport éolien à court terme. Pour des périodes prolongées et des conditions de vent variables en direction, l'application de formules ne peut fournir que des ordres de grandeur. Ainsi, par vent de mer, la complexité de la morphologie de la plage, l'hétérogénéité granulométrique superficielle et les multiples facteurs influençant la teneur en eau du sédiment modifient fortement le transport. De plus, les séries temporelles de données nécessaires aux calculs sont généralement disponibles à basses fréquences (données de vent tri-horaire, précipitations bi-journalières). Le pouvoir prédictif de l'approche analytique est en décalage avec la forte variabilité du transport déjà importante à court terme. Ainsi, dans une configuration favorable, sur la plage de Barneville à proximité du sémaphore de Carteret, dont les données de vent et de pluie sont bien corrélées avec le site expérimental, les transports potentiels en provenance de la plage ont été comparés à l'évolution volumique de la dune qui n'a pas subi d'érosion. Pour une période de 3 ans et 4 mois, le rapport entre les apports calculés et l'augmentation en volume de la dune était de l'ordre de 3 (Bretel *et al.*, 1999).

8. Conclusions :

Les mesures in situ à court terme montrent que plusieurs éléments interviennent dans le choix d'une formule de transport adaptée :

- la méthode de détermination de U^* , soit par application des expressions empiriques de Zingg (1952), soit par mesure du gradient vertical de vitesse ;
- le pas de moyenne des calculs réalisés. La prise en compte de la vitesse moyenne sur une période de 15 mn, correspondant à la durée des expériences, n'est pas adaptée et un pas de moyenne minimum, de l'ordre de 30 s, fournit un

bon compromis entre la définition du signal et la qualité des corrélations entre les capteurs permettant de déduire U_* ;

- *la précision et la fréquence à laquelle la vitesse seuil de transport peut être connue au cours de l'expérience.* En effet, la teneur en eau et les caractéristiques granulométriques des sédiments superficiels varient en fonction du transport.

A partir des deux expériences réalisées à Ouistreham, une prédiction correcte du transport peut être obtenue par :

- une estimation de U_* par la méthode de Zingg (1952) et l'utilisation de la formule de Bagnold (1941) ;

- une estimation de U_* par mesure du gradient de vitesse et l'application de la formule de Kawamura (1951).

Dans l'absolu, il est difficile de pouvoir juger de la qualité intrinsèque de ces deux formules de transport sachant que la principale difficulté réside dans la validité des mesures des paramètres utilisés pour le calcul (caractéristiques granulométriques, connaissance de la vitesse seuil, détermination de U_*). Plus généralement, l'intégration de formules sur des périodes prolongées repose nécessairement sur l'utilisation de séries de données (vitesses, granulométrie superficielles) ne fournissant pas d'informations suffisamment précises des conditions de surfaces et de vent pour une prédiction correcte du transport. L'utilisation des méthodes analytiques de prédiction sur des périodes prolongées, pluri-mensuelles à pluri-annuelles, est très approximative. Elle doit être remise en cause lorsqu'une précision supérieure à de simples ordres de grandeur est requise.

Bibliographie :

BAGNOLD, R.A., 1941, The physics of blown sand and desert dunes, Chapman & Hall, London, pp. 265.

BRETEL, P., LEVOY, F., ROUSSET, H. et LARSONNEUR, C., 1999. Critical Approach of Dune Eolian Deposits Quantification. ASCE Coastal Sediment's 99. pp. 1207-1220.

KAWAMURA, R., 1951, Study on sand movement by wind, Reports of Physical Sciences Research Institute of Tokyo University, Vol. 5, N° 3-4, Oct. 51, pp. 95-112, (Translated from Japanese by National Aeronautic and Space Administration (NASA), Washington D.C. 1972).

LANCASTER, N., NICKLING, W.G. et McKENNA NEUMAN, C., 2002, Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune, Geomorphology 43, pp. 233-242.

LEATHERMAN, S.P., 1978, A new aeolian sand trap design, Sedimentology 25, pp. 303-306.

LEVOY F. (1994) – Evolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales : l'exemple de la côte ouest du Cotentin, thèse de doctorat, Université de Caen, 423 pp. + annexes.

TANAKA, T., SANO, H. et KAKINUMA, S., 1954, Study on the control of wind erosion, Agricultural Meteorology, vol. 10, pp. 24-30.

ZINGG, A.W., 1952, Wind tunnel of the movement of sedimentary material, Proc.5th Hydraul. Conf. Iowa University, 34, 111-135.