

ARTICLES

Influence d'une répartition granulométrique large de particules sur les sources d'émissions diffuses par érosion éolienne

Wide size particle distribution influence on fugitive dust emissions by wind erosion

Isabelle DESCAMPS*, Jean-Luc HARION** **, Bernard BAUDOUIN*

Résumé

Le but de ce travail est d'estimer plus précisément les émissions diffuses de poussière dues à l'érosion par le vent des tas de stockage de particules. Le modèle construit permet de quantifier l'évolution temporelle du flux massique quand un lit de matériaux est exposé à un écoulement turbulent. Il est basé sur l'interaction entre l'envol des particules et la turbulence proche de la surface. Le modèle permet de tenir compte des matériaux ayant une distribution granulométrique large, ce qui est typique des matériaux tels les charbons et minerais. Quelques études expérimentales ont mis en évidence la diminution temporelle du flux de masse quand le lit de particules contient une large répartition granulométrique. Cette diminution, due aux grosses particules, est prédite par le modèle. Le taux de décroissance dépend de la vitesse de l'écoulement et des caractéristiques des particules.

Abstract

The aim of this work is to estimate more accurately fugitive dust emissions due to wind erosion of exposed aggregate storage piles. The model constructed allows to quantify the temporal evolution in the mass flux when a bed of materials is exposed to a turbulent flow. It is based on the interaction between particles' take-off and wall turbulence. The model allows as well taking into account materials having a wide size distribution, which is typical of materials such as coal or ore. Some experimental studies have shown a temporal decrease in the mass flux as the bed contains a wide range of particle sizes. This decrease, due to large particles, is predicted by the model. The rate depends on the flow velocity and the characteristics of the particles.

Introduction et contexte

Les émissions diffuses de particules constituent une préoccupation environnementale importante des industries sidérurgiques, pétrolières ou chimiques. Une émission diffuse de particules est définie comme un flux de particules vers l'atmosphère qui s'étend sur une large surface ou qui n'est pas concentré en un endroit unique. Une émission fugitive de particules est définie quant à elle comme un flux de polluants vers l'atmosphère ayant échappé à une tentative de captage ou de confinement [1]. Ces définitions situent

la difficulté rencontrée par les industriels d'une part pour prévenir ces émissions, d'autre part pour les quantifier.

Les émissions diffuses et fugitives de particules constituent une proportion non négligeable du bilan global de la pollution atmosphérique particulaire émise par certains sites industriels. En effet, si d'importants efforts de réduction des émissions polluantes atmosphériques ont été réalisés, ils se sont prioritairement portés sur le cas des émissions canalisées, dont la mesure est plus simple à effectuer et pour lesquelles des techniques d'abattement effi-

* Département Énergétique Industrielle, École des Mines de Douai – 941, rue Charles Bourseul – BP 10838 – 59508 Douai Cedex.

** Correspondance : harion@ensm-douai.fr

caces existent. Ainsi, de nombreuses études sont désormais mises en place dans le but de réduire les émissions diffuses et fugitives de particules [1]. La première difficulté rencontrée est liée à la quantification de ce type d'émissions.

Le contexte de la présente étude est, plus particulièrement, celui des émissions diffuses sur les sites sidérurgiques. Pour ce type de site industriel, les émissions diffuses constituent une part importante des émissions globales de polluants particuliers.

Les sources d'émissions diffuses de particules proviennent principalement de trois types d'activités :

- les transports de matériaux sur le site ;
- la manutention de matériaux granulaires ;
- le stockage : érosion éolienne des tas stockés.

Parmi ces trois activités, la source principale d'émissions diffuses est celle liée à l'érosion éolienne des tas de stockage de matériaux granulaires en plein air.

L'une des solutions envisageables pour limiter les envois par érosion éolienne peut être de mettre en place des techniques de traitements des matériaux stockés. Cette solution est, par exemple, retenue et mise en œuvre par le groupe ARCELOR pour les parcs de stockage de minerais et de charbons. Deux types de traitements sont pratiqués :

- un traitement dans la masse : l'ensemble des matériaux est traité sur les bandes transporteuses au moment du déchargement des cargos par un mélange d'eau et de produit polymérisant visant à agglomérer les particules pour limiter les envois ;
- un traitement de surface constitué par un laquage des tas de stockage, notamment pour les matières les plus sensibles vis-à-vis de l'érosion éolienne.

Les travaux de recherche menés depuis quelques années visent deux principaux objectifs :

- quantifier l'incidence des traitements dans la masse appliqués sur les sites aux minerais et aux charbons ;
- comprendre finement les mécanismes de l'envol des particules afin de quantifier le plus précisément possible les quantités de matière envolées. La précision de la quantification est une nécessité pour évaluer les facteurs de progrès associés aux différents traitements réalisés sur les sites industriels.

Dans le but d'améliorer la quantification des émissions diffuses par érosion éolienne des tas de stockage de minerai ou de charbon, nous avons étudié l'influence d'une large répartition granulométrique sur les quantités de matière émises.

En effet, des matériaux tels que les minerais ou charbons sont caractérisés, comme le montrent les figures 1 et 2, par des granulométries très larges puisqu'elles regroupent des tranches allant de 0-200 μm à plus de 20 mm de diamètre équivalent. De plus, l'allure de la répartition granulométrique varie considérablement d'un matériau à l'autre (Figure 1).

La largeur de la répartition granulométrique et, par voie de conséquence, la présence de particules « non

érodibles » (particules ne s'envolant pas lors de l'exposition éolienne) vis-à-vis de conditions de vent données, entraînent, par un effet de *pavage*, une diminution temporelle du flux massique envolé. En effet, les plus grosses particules constituent progressivement une protection, un obstacle à l'envol des particules plus fines. Ainsi, ces dernières seront de plus en plus difficilement entraînées par le vent.

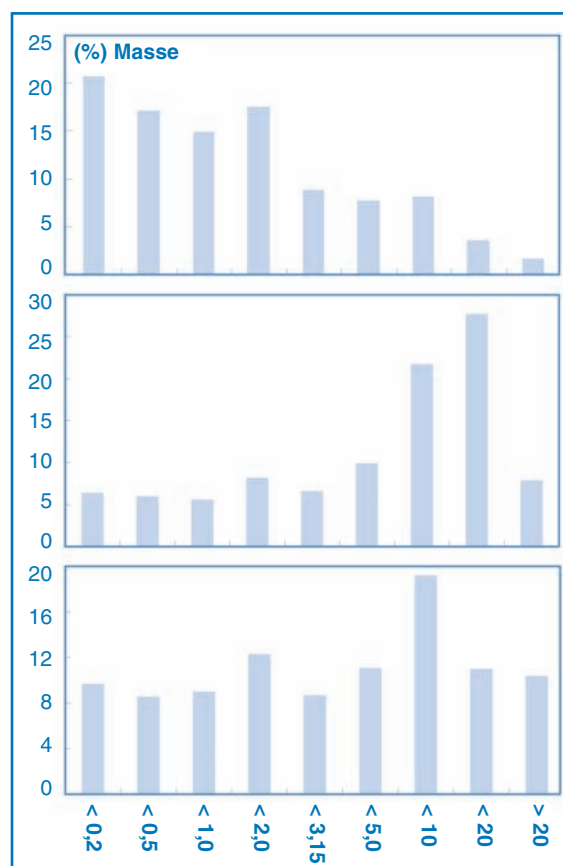


Figure 1.

Exemples de répartitions granulométriques de minerais et charbons (mesures ARCELOR par tamisage, mm)
Reproduit avec autorisation.

Examples of ores and coals size distributions
(measurements ARCELOR by sifting, mm).
Reproduced with permission.

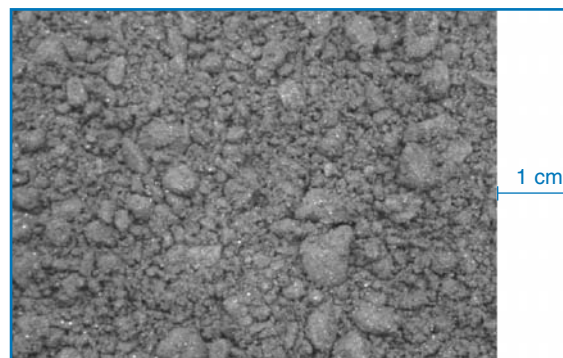


Figure 2.

Photographie d'un minerai utilisé par ARCELOR.
Photograph of an ore used by ARCELOR.
(Photo : Département Énergétique industrielle, EMD)

Ceci, comme l'illustre la figure 3, a une influence significative sur la précision de l'estimation de la quantité de matière émise par érosion éolienne. À partir du biais mis en évidence par cette figure, la décroissance temporelle du flux massique est une donnée nécessaire à une évaluation quantitative satisfaisante de la quantité de matière envolée.

L'effet de la présence de particules non érodibles sur l'érosion éolienne a déjà fait l'objet de travaux expérimentaux [2], mais uniquement, à notre connaissance, sur des mélanges binaires de deux diamètres de particules très différents. Cet effet a également été observé qualitativement à travers les mesures réalisées en soufflerie sur des minerais et charbons.

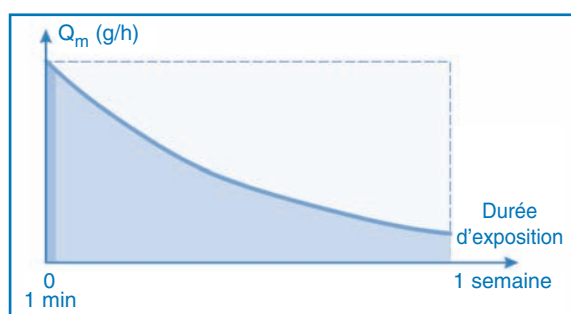


Figure 3.

Décroissance temporelle du flux massique émis Q_m .
Quantité réelle émise : intégration temporelle sous la courbe décroissante. Quantité prédite par l'extrapolation des mesures sur une durée courte : intégration temporelle sous la droite horizontale - - - - .
Biais d'estimation de quantité émise :

Temporal decay of emitted mass flux Q_m .
Real emitted quantity : temporal integration under the decreasing curve. Quantity predicted by extrapolation of measurements over a short duration : temporal integration under the horizontal dotted line - - - - .
Skew of emitted quantity estimation :

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004 [3]).

De plus, les outils de simulation de la dispersion et des retombées atmosphériques, utilisés notamment pour les études d'impact, nécessitent de connaître la granulométrie des particules émises. À notre connaissance, aucun modèle ne prédit la granulométrie des particules envolées pour les sources diffuses issues de l'érosion éolienne de matière particulaire à large répartition granulométrique. Le modèle développé et présenté ici donne accès à la granulométrie des particules envolées.

Après quelques éléments bibliographiques liés aux principales caractéristiques de l'envol de particules, les paragraphes suivants présentent un modèle numérique élaboré dans le but de prédire, à partir des caractéristiques d'un matériau (répartition granulométrique, masse volumique) et de la vitesse du vent, la rapidité de décroissance du flux massique envolé.

Principales caractéristiques de l'envol de particules

Courbe limite d'envol et comportement des particules

Bagnold [4] est le premier à caractériser la vitesse limite d'envol. Il s'intéresse à une particule située au sommet d'un lit de matière granulaire. Principalement deux forces s'exercent sur une particule :

- la force due aux actions fluides ;
- le poids apparent de la particule.

À la limite d'envol, la somme des moments en un point de contact de la particule avec une voisine doit être nulle. Il y a passage de l'état statique à l'état dynamique.

En plus de ce bilan simple, les forces de cohésion entre les particules sont à prendre en compte (notamment pour des particules d'un diamètre typiquement inférieur à 100 μm).

L'évolution de la vitesse limite d'envol (exprimée en vitesse de frottement u_τ) en fonction du diamètre D_p peut être décrite avec une adimensionnalisation particulière donnée par [5] :

$$\tilde{D}_p = \frac{D_p}{D_{p\text{ref}}} \quad \text{et} \quad \tilde{u}_\tau^* = \frac{u_\tau^*}{u_{\tau\text{ref}}} \quad (1)$$

avec :

$$D_{p\text{ref}} = \left(\frac{v^2}{\gamma_p} \right)^{1/3} \quad \text{et} \quad u_{\tau\text{ref}} = (\gamma_p v)^{1/3} \quad (2)$$

et

$$\gamma_p = \frac{(\rho_p - \rho)g}{\rho} \quad (3)$$

ρ et ρ_p sont les masses volumiques respectives de l'air et des particules, v est la viscosité cinématique de l'air, u_τ^* est la **vitesse de frottement limite d'envol** des particules.

Les résultats expérimentaux peuvent être modélisés par un polynôme [6]. La forme de la courbe, tracée sur la figure 4, présente un diamètre critique de particules pour lequel la vitesse de frottement requise est la plus faible. L'augmentation de la vitesse seuil, lorsque la taille des particules diminue, est liée à la prédominance des forces de cohésion interparticulaires dans le bilan des forces [5]. De même, pour les particules dont le diamètre est important, le poids apparent augmente, ce qui augmente la vitesse limite d'envol. Ces considérations expliquent l'allure de la courbe présentée sur la figure 4.

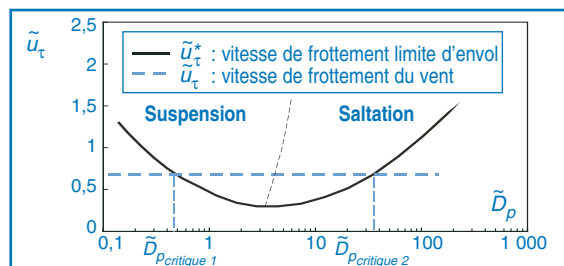


Figure 4.

Différents types de comportements des particules reportés sur la courbe de vitesse limite d'envol.

Various particles behaviors plotted on the take-off curve.

Différents modes de transport des particules

La figure 4 reprend également les principaux modes de transport cités dans la littérature. Lors de la mise en mouvement des particules par l'écoulement, celles-ci, suivant la taille, peuvent avoir différents types de comportement (Figure 5) :

- la **reptation** : la particule est trop lourde pour être soulevée par les actions fluides. Cependant ces dernières, appliquées à la particule, ont tout de même la possibilité de la faire glisser ou rouler le long de la paroi. En fait, la particule progresse le long de la surface, principalement du fait des impacts violents des grains en saltation [7] ;
- la **saltation** : après avoir été soulevée par la force de portance, la particule retombe à la paroi. **L'inertie de la particule est un facteur prédominant dans ce type de transport** (trajectoire typique en « saut de puce »). Ce mode de transport est important car l'impact des particules en saltation au moment où elles retombent sur le lit génère, en plus du rebond possible, des réenvols supplémentaires. En cela, bien que ce phénomène s'autorégule, la saltation tend à amplifier la quantité de matière mise en mouvement [8] ;
- la **suspension pure** : c'est le comportement prépondérant des particules légères. Si la vitesse de chute V_g de la particule est plus petite que la composante verticale de la turbulence, alors les tourbillons turbulents seront capables de transporter la particule plus loin [9].

Envol et structures cohérentes de l'écoulement

Un aspect important de l'envol de particules est lié à l'interaction étroite entre l'envol et les structures tourbillonnaires organisées proches de la paroi dans une couche limite turbulente développée. Ce lien a été mis en évidence par de nombreux auteurs [10, 11]. Le transport des particules est en grande partie contrôlé par les éjections, issues du soulèvement et de la cassure des bandes de faible vitesse de la zone pariétale.

Mazumder [12] a réalisé une revue des études les plus récentes permettant de comprendre les interactions entre particules et turbulence lors de l'érosion d'un lit de particules. Un tourbillon qui se forme au-dessus d'une particule immobile peut la soulever et l'entraîner dans l'écoulement. La particule est alors transportée dans la région externe de la couche limite turbulente jusqu'au moment où le tourbillon est dissipé. À ce moment, la particule peut, en fonction notamment de son diamètre, soit être entraînée en suspension, soit retomber sur la paroi du fait de son poids.

Description du modèle développé

Le modèle d'évolution du flux massique envolé, écrit en FORTRAN, est basé pour large part sur la relation étroite entre l'envol de particules et les structures tourbillonnaires de la couche limite turbulente évoquée au paragraphe précédent.

Ces structures tourbillonnaires ont des périodicités spatiales statistiques moyennes dans les deux directions longitudinale et transversale. À partir de ces périodicités, le lit de particules de longueur L et largeur l est décomposé en boîtes de dimensions transversale $\lambda_z^+ = 100$ et longitudinale $\lambda_x^+ = 250$. Ces valeurs sont issues de la bibliographie [13] : $\lambda_x^+ = \lambda_x u_\tau / \nu$, λ_x est la dimension physique des boîtes dans la direction x , u_τ est la vitesse de frottement (directement liée à la vitesse du vent), ν est la viscosité cinématique de l'air. Les valeurs adimensionnelles λ_z^+ et λ_x^+ ont été mesurées expérimentalement dans une configuration de couche limite turbulente développée sur une paroi plane et lisse. Aucune mesure de ces paramètres n'ayant à notre connaissance été réalisée sur paroi rugueuse, ces valeurs ont été conservées, en première approche, dans le cas d'une couche limite turbulente sur un lit de particules.

Ainsi, chaque boîte (Figure 6) inclut la possibilité d'une structure tourbillonnaire et donc d'une possibilité d'envol.

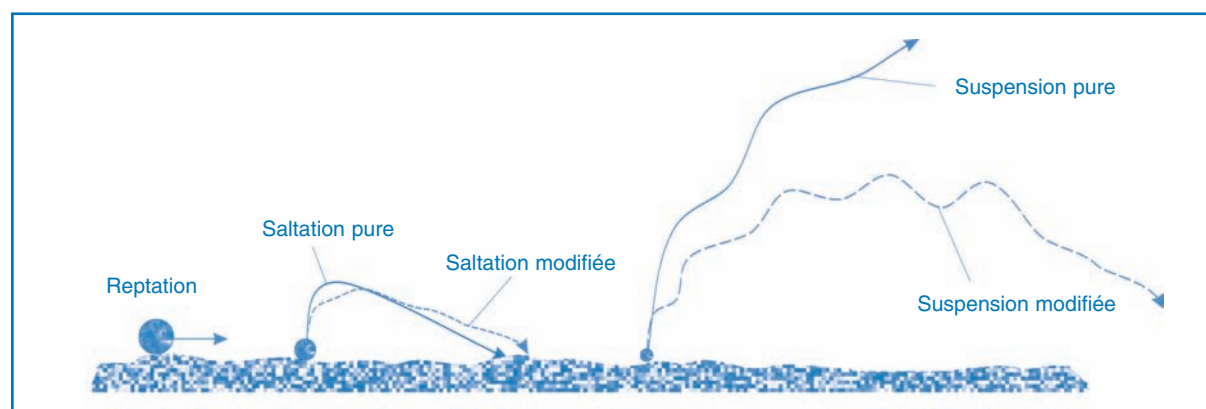


Figure 5.
Différents types de comportements des particules mises en mouvement.
Different behaviors of moving particles.

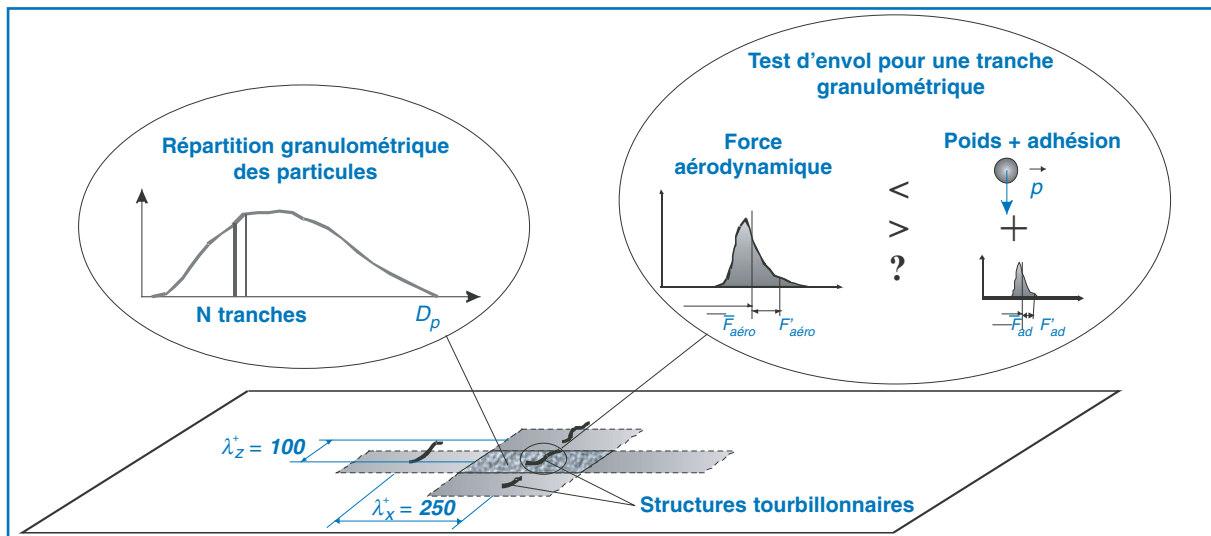


Figure 6.

Principe du modèle de simulation du flux massique envolé.

Principle of the mass flux simulation model.

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004 [3])

Par ailleurs, les structures tourbillonnaires présentent également une périodicité moyenne temporelle d'occurrence donnée par [14] :

$$T_b^+ = \frac{\bar{T}_b u_\tau^2}{\nu} \approx 250 \quad (4)$$

Cette valeur fixe alors le pas de temps du modèle.

Par exemple, pour une vitesse de vent de 10 m/s, soit 36 km/h, le lit de particules testé sera découpé en boîtes de dimensions $\lambda_x = 8,3$ mm et $\lambda_z = 3,3$ mm dans les directions x et z. Le pas de temps du modèle sera de 0,018 s.

À chaque pas de temps et pour chaque boîte, un critère d'envol est appliqué.

Le critère d'envol considère que la particule est entraînée par l'écoulement, lors du processus d'éjection, à condition que la force de portance générée par l'écoulement (moyenne + fluctuation) soit supérieure à la somme de son poids et de la force d'adhésion (moyenne + fluctuation). Il est défini par la relation (Figure 6) :

$$\bar{F}_{aéro} + F'_{aéro} \geq \bar{F}_{ad} + F'_{ad} + F_g \Rightarrow \text{Envol de particule} \quad (5)$$

La particularité du modèle développé est de se baser sur la comparaison des distributions statistiques des forces de portance et d'adhésion de chaque tranche granulométrique de la répartition. Ces distributions sont basées sur des données expérimentales issues de la bibliographie [10,15] et modélisées par des fonctions densités de probabilité généralisées. Ce critère d'envol permet de tenir compte des aspects statistiques de l'entraînement aérodynamique des particules [3].

La force aérodynamique $\bar{F}_{aéro}$, la force d'adhésion $\bar{F}_{ad}$ et le poids F_g sont directement liés au diamètre de la particule choisie. Ainsi, la répartition granulométrique

initiale (voir, par exemple, Figure 1, p. 364) est recalculée en tranches plus précises d'une largeur de 25 μ m. À partir de cette répartition granulométrique recalculée, un tirage aléatoire fixe le diamètre D_p de la particule faisant l'objet de l'application du critère d'envol.

Avant le calcul du critère d'envol, un test préliminaire est réalisé pour optimiser le temps de calcul. En effet, comme l'illustre la figure 4, pour une vitesse de vent donnée, la vitesse de frottement adimensionnelle $\bar{u}_\tau$ correspondante permet de définir deux diamètres critiques pour lesquels on a :

$$[\tilde{D}_{p_{critique\ 1}}, \tilde{D}_{p_{critique\ 2}}] : \text{envol possible}$$

$$[0, \tilde{D}_{p_{critique\ 1}}] \text{ ou } [\tilde{D}_{p_{critique\ 2}}, \tilde{D}_{p_{max}}] : \text{envol impossible}$$

Le test d'envol ne sera alors appliqué que si :

$$\tilde{D}_p \in [\tilde{D}_{p_{critique\ 1}}, \tilde{D}_{p_{critique\ 2}}]$$

Pour être pertinent vis-à-vis du problème posé, le modèle développé doit intégrer notamment deux phénomènes importants :

- l'effet de *pavage* ;
- la saltation et plus particulièrement l'influence des particules qui retombent sur le lit.

Ces deux aspects sont développés dans les deux paragraphes suivants.

Prise en compte de l'influence des très grosses particules

L'influence majeure de la présence de très grosses particules est de faire décroître le flux massique dans le temps [2]. Cette partie est le cœur du développement du modèle.

À partir d'une répartition spatiale supposée uniforme de chaque tranche granulométrique, une *épaisseur d'érosion* est calculée en considérant qu'au-delà de $\tilde{D}_{p_{critique\ 2}}$ (Figure 4), les particules qui ne s'envolent pas, s'accumulent sur le lit. Ainsi, l'*épaisseur d'érosion* est obtenue quand les particules de plus grande taille que $\tilde{D}_{p_{critique\ 2}}$ couvrent entièrement la surface exposée du lit. Dans ces conditions, les structures tourbillonnaires ne rencontrent que des particules qu'elles ne sont pas capables de mettre en mouvement : le flux massique envolé s'annule.

L'intégration de cette phénoménologie dans le modèle est illustrée sur la figure 7. Connaissant l'*épaisseur d'érosion*, le nombre de couches incluses à cette épaisseur est connu pour chaque tranche granulométrique (et sous l'hypothèse de répartition spatiale uniforme). Le nombre de particules est quant à lui issu de la répartition granulométrique.

Quand une couche est intégralement envolée, une incrémentation de la force aérodynamique est réalisée (Figure 7). L'incrément est donné par :

$$\Delta \bar{F}_{aéro}(D_p) = \frac{\text{Max}(F_{aéro\text{initiale}}) - \text{Min}(P + F_{ad})}{N_c(D_p)} \quad (6)$$

où $N_c(D_p)$ est le nombre de couches de particules de diamètre D_p contenu dans l'*épaisseur d'érosion*.

Cette formulation permet d'intégrer dans le modèle que la force aérodynamique aura progressivement une influence moindre sur les particules situées en

profondeur. La figure 7 montre que, lorsque l'épaisseur d'érosion est atteinte, les fonctions densité de probabilité de la force de portance et de la somme du poids et de la force d'adhésion sont telles que le critère d'envol ne peut plus être respecté. En effet, le maximum de la fonction densité de probabilité de la force de portance aérodynamique est inférieur au minimum de la somme de la fonction densité de probabilité de la force d'adhésion et du poids.

Prise en compte de la saltation

La prise en compte de la saltation est importante dans le processus d'envol du fait des retombées de particules sur le lit. Comme l'illustre la figure 8, lors de l'impact d'une particule en saltation, il peut se produire des réenvols et/ou le rebond de la particule.

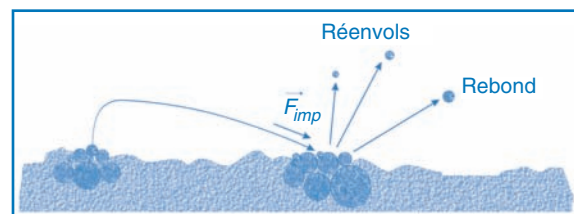


Figure 8.
Envol supplémentaire
liés à l'impact d'une particule en saltation.
Additional take-off
related to the impact of a particle in saltation.

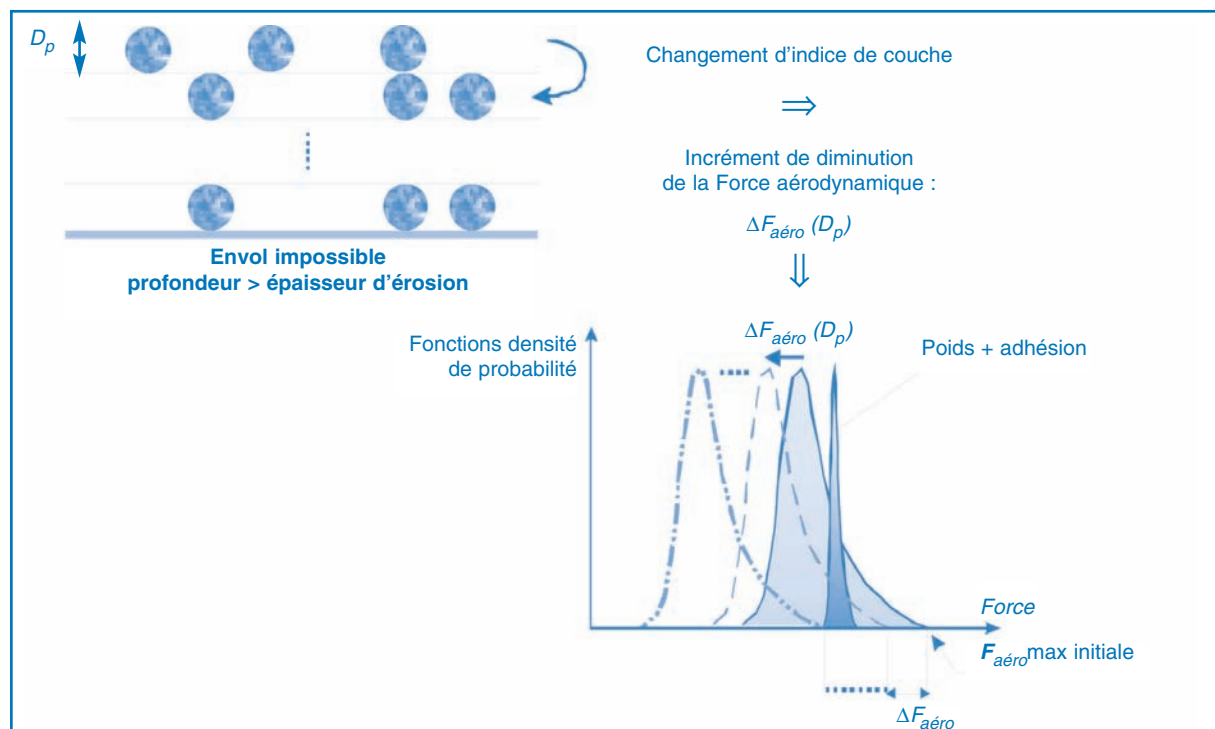


Figure 7.
Intégration de l'effet de pavage par diminution incrémentale de la force aérodynamique imposée à une particule.
Integration of the effect of bed pavement in stepped decreases of the lift force.

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique.
Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle,
École des mines de Douai 2004 [3])

Des travaux antérieurs, issus de la bibliographie, quantifient en terme de densité de probabilité des grandeurs telles que la vitesse d'impact, l'angle d'impact et le nombre de particules réenvoïées, ainsi que la probabilité de rebond [16].

Concernant le nombre de particules réenvoïées, les résultats bibliographiques ne sont pas transposables directement à la présente situation. En effet, les études sont menées pour des répartitions granulométriques très étroites où tous les grains sont supposés sphériques et identiques. Ainsi, pour rendre compatibles ces résultats avec une situation de large répartition granulométrique, le modèle considère une masse envolée équivalente calculée à partir du nombre moyen de particules réémises issu de la bibliographie [17].

À partir de la masse réenvoïée équivalente, des tirages aléatoires successifs de diamètres sont réalisés, avec pour chaque particule choisie un test d'envol incluant la force aérodynamique et la force d'impact : $F_{aéro} + F_{impact}$. Ce schéma est itéré jusqu'à ce que la masse envolée cumulée atteigne la masse réenvoïée équivalente. Dans le cas où le premier diamètre choisi conduit à une masse supérieure à la masse envolée équivalente, on considère que l'impact s'est produit sur une particule de diamètre trop important ; celle-ci n'est alors pas affectée par l'impact.

Associé aux réenvols liés à l'impact, le modèle intègre également la longueur du saut de la particule en saltation, ainsi que sa durée. Une particule émise dans une boîte et considérée en saltation sera réintégré au calcul en terme d'impact après un nombre de pas de temps correspondant à sa durée de vol et

dans la boîte située à une distance relative en aval donnée par la longueur du saut (Figure 9). La durée du saut et sa longueur, notées respectivement D_{saut} et L_{saut} , sont issues des résultats expérimentaux de Foucaut [6]. La position d'impact de la particule se définit en divisant la longueur du saut par la longueur d'une boîte, $\bar{\lambda}_x$. L'instant de prise en compte de l'impact de la particule est défini en divisant la durée du saut par le pas de temps du modèle, $\bar{T}_b$. L'hypothèse est faite que la particule ne subit aucune déviation latérale.

Résultats

En premier lieu, une étude expérimentale a été menée en vue d'établir des données de comparaison avec le modèle. Au cours de l'étude expérimentale [3], un lit de particules de sable ayant une répartition granulométrique bimodale est soumis, en soufflerie, à un écoulement turbulent pendant 60 secondes. L'évolution de la masse de particules envolées est mesurée, à différents intervalles de temps, pour des vitesses de l'écoulement égales à 7, 8, 9 et 10 m/s. Le bac de particules est constitué de deux types de particules de sable : des particules fines de diamètre moyen égal à 113 μm et des particules grosses de diamètre moyen égal à 1 074 μm , non érodibles pour les vitesses de l'écoulement testées. En effet, le diamètre de 1 074 μm correspond à un diamètre adimensionnel $\bar{D}_p$ supérieur à $\bar{D}_{p,critique 2}$ pour les quatre vitesses d'écoulement considérées.

Pour chacune des vitesses, différentes proportions massiques de particules non érodibles (ou taux de couverture) sont utilisées : 0, 10 et 20 %.

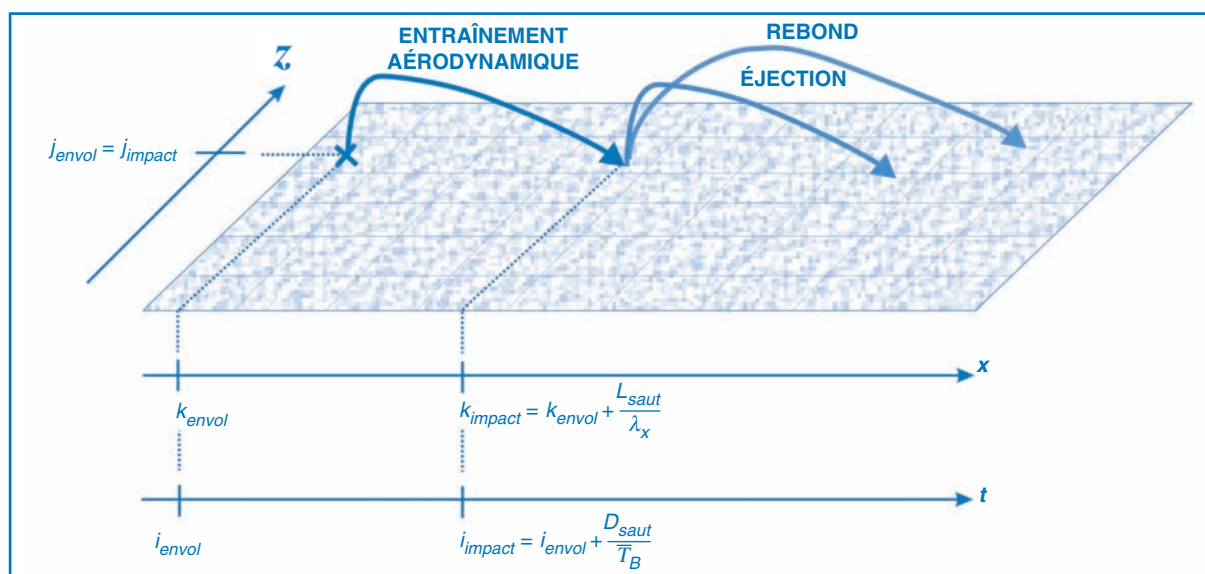


Figure 9.
Insertion dans le modèle des impacts de particules en saltation.

Impact modelling of the saltating particles.

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004 [3])

Les évolutions de flux massique de particules envolées sont mesurées en exposant un bac de particules à une couche limite turbulente en soufflerie [3]. Les mesures sont réalisées par pesée continue de la masse apparente du bac exposé à l'écoulement. Cette méthode a été testée et validée par comparaison des mesures par pesée continue à des mesures par pesée différentielle sur des intervalles de temps différents.

Au cours des expériences, des photographies de la surface du lit ont été réalisées avant et après exposition à l'écoulement, afin de visualiser les changements d'état de surface du lit et, plus particulièrement, lorsque le lit contient des particules non érodibles. La figure 10 représente des photographies de la surface

du lit avant et après une exposition de 60 s à l'écoulement de 9 m/s pour l'échantillon incluant 10 % de particules non érodibles. Le changement d'état de la surface du lit est flagrant. Avant l'exposition à l'écoulement, la surface du lit est approximativement lisse et, après exposition, les particules non érodibles ressortent de la surface du lit.

Au fur et à mesure de l'érosion éolienne des particules fines, les particules non érodibles sont découvertes et apparaissent très distinctement à la surface. Dans le même temps, la rugosité à la surface du lit augmente, ce qui entraîne un ralentissement de l'écoulement. La force de portance moyenne est alors diminuée. Ceci entraîne la diminution temporelle progressive du flux massique de particules envolées. La

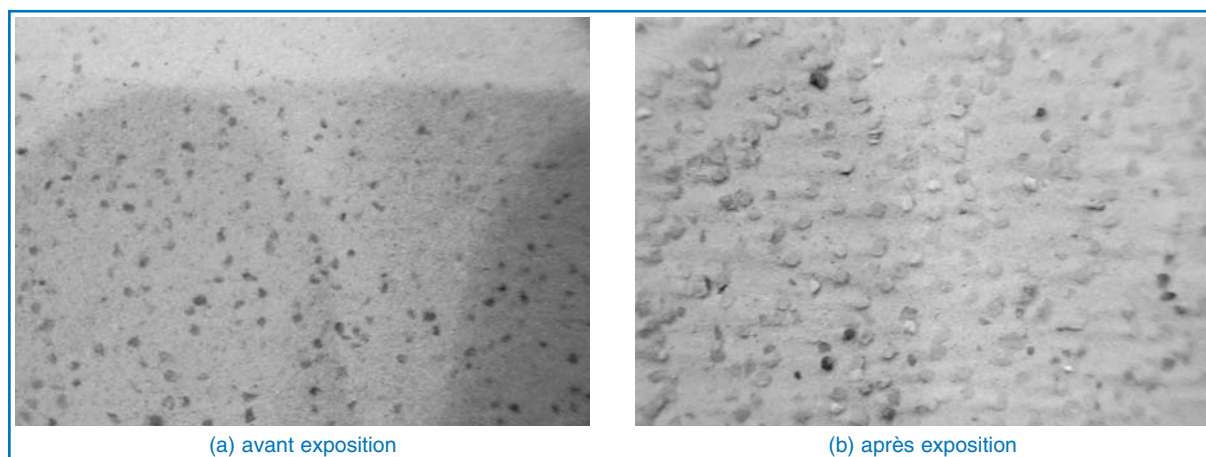


Figure 10.

Photographies d'un lit de sable (10 % de particules non érodibles) avant et après 60 secondes d'exposition à un écoulement de 9 m/s ; l'écoulement est dirigé de la droite vers la gauche.

Photographs of a sand bed (10% of nonerodibles particles) before and after 60 seconds of exposure to a flow of 9 m/s; the direction of the flow is from right to left.

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique.

Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004 [3])

(Photos : I. Descamps, Département Énergétique industrielle, EMD)

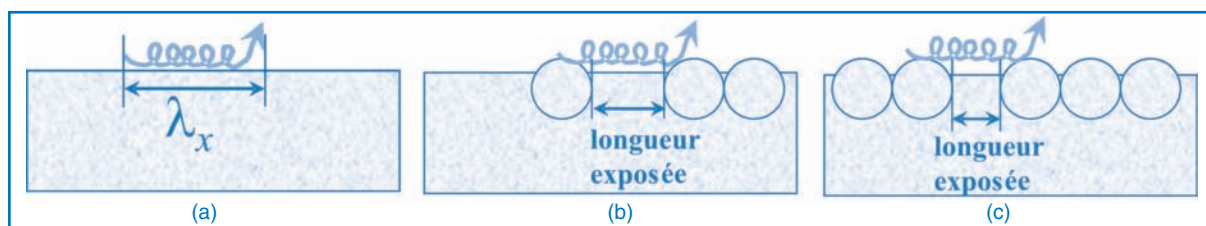


Figure 11.

Illustration schématique de la diminution du nombre d'envols possibles par structure tourbillonnaire lorsque le taux de couverture (tdc) augmente ((a) → (c) : tdc ↑).

Illustration of the reduction in the number of possible takes-off per coherent structure when the cover rate (tdc) increases ((a) → (c) : tdc ↑).

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique.

Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004 [3])

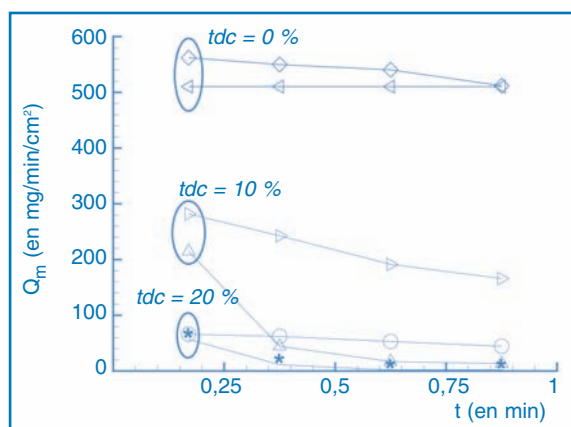


Figure 12.

Évolutions temporelles du flux massique émis à partir d'un lit de particules soumis à un écoulement turbulent de 10 m/s.

Proportions de particules non érodibles : 0, 10 et 20 %.

Résultats expérimentaux : ◇, Δ et *.

Résultats numériques : <, >, et ○.

Temporal variation of the emitted mass flux from a bed exposed to a turbulent flow at 10 m/s.

Nonerodibles particles ratio : 0, 10 et 20%.

Experimental results : ◇, Δ et *.

Numerical results : <, >, ○.

(Source : Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique.

Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, Ecole des mines de Douai 2004 [3])

décroissance du flux peut donc être en grande partie attribuée au changement d'état de la surface du lit.

Le modèle est ensuite testé en utilisant les conditions expérimentales comme paramètres d'entrée. La répartition granulométrique des particules est découpée en 80 tranches toutes de largeur égale à 25 µm, comprises entre 0 et 2 000 µm.

Suite aux premières comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques, un paramètre supplémentaire a été introduit dans le modèle et consiste à considérer un nombre d'envols possibles pour chaque structure tourbillonnaire plus important quand le lit n'est constitué que de particules érodibles. En effet, cette configuration permet le développement complet des structures tourbillonnaires de paroi alors qu'en présence de grosses particules, on peut supposer que le développement, ainsi que le mécanisme de régénération sont en partie contrecarrés (Figure 11). L'introduction de ce paramètre nécessitera cependant de plus amples comparaisons avant une validation définitive de sa pertinence.

En intégrant cette modification, les résultats obtenus pour une vitesse de 10 m/s sont représentés sur la figure 12.

Cette figure met en évidence plusieurs points. Tout d'abord, concernant les résultats expérimentaux issus des mesures en soufflerie, les courbes montrent une évolution très sensiblement différente du flux massique envolé dès qu'une proportion de particules non érodibles est présente. En effet, pour les particules

exclusivement érodibles (◇), le flux est quasi constant, alors que pour les proportions de 10 et 20 % de particules non érodibles (respectivement Δ et *), le flux massique envolé décroît très rapidement. La décroissance est d'autant plus rapide que le taux de couverture (proportion de particules non érodibles) est élevé.

Concernant les résultats numériques, le modèle développé prédit avec une relative bonne précision l'évolution du flux massique en fonction du taux de couverture. En effet, en examinant par exemple les résultats sur les 15 premières secondes, le modèle numérique suit avec un relatif bon accord les mesures expérimentales lorsque le taux de couverture passe de 0 à 10 % puis de 10 à 20 %. En revanche, pour un taux de couverture donné, la rapidité de décroissance temporelle du flux massique est sous-estimée par les calculs. Différents tests ont permis de mettre en évidence que le paramètre principal fixant la rapidité de décroissance est l'épaisseur d'érosion. Actuellement, une modélisation plus fine de ce paramètre conduisant à une diminution temporelle du flux massique plus proche de la réalité expérimentale est en cours d'évaluation.

Conclusion

Les émissions diffuses de particules peuvent représenter une part significative de la pollution particulaire globale émise par un site industriel. La problématique majeure liée aux émissions diffuses porte sur l'évaluation précise des quantités émises. Cette évaluation étant issue d'un modèle global, la précision dépend étroitement de la qualité et de la fiabilité du modèle.

Les études et premiers résultats obtenus et présentés dans cet article montrent que la prise en compte de la répartition granulométrique très large des matériaux est une nécessité pour améliorer la précision de la quantification des émissions diffuses de particules par érosion éolienne. Le modèle local développé permet de prédire avec une relative précision l'évolution temporelle du flux massique envolé, ce qui constitue un premier pas important vers une évaluation plus fiable de la quantité de matière émise. Cependant, ces premiers résultats montrent également que le modèle développé nécessite encore des ajustements de façon à mieux reproduire la rapidité de décroissance temporelle du flux massique envolé. Par ailleurs, ce modèle donne une évaluation de la répartition granulométrique des particules envolées. Cette répartition constitue une donnée d'entrée des modèles de transport atmosphérique de particules. Elle est ainsi nécessaire à une étude d'impact environnemental de la pollution particulaire diffuse émise par les sites industriels.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec les aides financières de l'ADEME et du groupe ARCELOR.

Mots clés

Émissions diffuses de poussières. Érosion éolienne. Envol de particules. Flux massif.

Keywords

Fugitive dust emissions. Wind erosion. Particle take-off. Mass flux.

Références

1. Bouscaren R. Émissions diffuses et fugitives : la fin d'un mystère, les débuts d'une norme. Journée d'études du CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique) 2002.
2. Gillette DA, Stockton PA. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. *J Geophysical Res* 1989 ; 94 : 12885-93.
3. Descamps I. Érosion éolienne d'un lit de particules à large spectre granulométrique. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 2004.
4. Bagnold RA. The physics of blown sand and desert dunes. Chapman and Hall, London 1941.
5. Iversen JD, White BR. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus. *Sedimentology* 1982 ; 29 : 111-9.
6. Foucaut JM. Étude théorique et expérimentale des phénomènes d'envol et de saltation de particules dans une couche limite turbulente. Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 1994.
7. Greeley R, Iversen J D. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge University Press, Cambridge 1985.
8. Carbonneau PE, Bergeron NE. The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties. *Geomorphology* 2000 ; 35 : 267-78.
9. Tanière A. Étude du comportement de particules solides au sein d'une couche limite turbulente. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Département Énergétique industrielle, École des mines de Douai 1996.
10. Mollinger AM, Nieuwstadt FTM. Measurement of the lift force on a particle fixed to the wall in the sublayer of a fully developed turbulent boundary layer. *J Fluid Mech* 1996 ; 316 : 285-306.
11. Rashidi M, Hetsroni G, Banerjee S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. *Int Journal of Multiphase Flow* 1990 ; 16 (6) : 935-49.
12. Mazumder R. Turbulence-particle interactions and their implications for sediment transport and bedformmechanics under unidirectional current : some recent developments. *Earth-Science Reviews* 1999 ; 50 : 113-24.
13. Robinson SK. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *J Fluid Mech* 1991 ; 23 : 601-39.
14. Blackwelder RF, Haritonidis JH. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J Fluid Mech* 1983 ; 132 : 87-103.
15. Zimon A. Adhesion of dust and powder, 2nd ed. Plenum Pub Corp 1982.
16. McEwan IK, Willets BB. Sand transport by wind : a review of the current conceptual model. *The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems* 1993 ; 72 : 7-16.
17. Mitha S, Tran MQ, Werner BT, Haff PK. The grain-bed impact process in aeolian saltation. *Acta Mechanica* 1986 ; 63 : 267-78.