

Étude expérimentale des conditions et des mécanismes d'envol des poussières : application aux chantiers de terrassement

Mickaël Le Vern¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS/GIE, Allée des Ponts et Chaussées, 44344, Bouguenais, France

mickael.le-vern@univ-eiffel.fr

RÉSUMÉ : Lors de la phase des terrassements d'un chantier de construction, la circulation des camions sur les sols peut entraîner d'importantes émissions de poussières. Actuellement, ce phénomène est mal quantifié car les mécanismes de génération des particules à l'interface pneu/sol ont été peu étudiés. Dans cet article, on analyse les processus d'arrachement des agrégats liés à la circulation de pneus lisses et sculptés sur plusieurs sols compactés. L'étude met en évidence les différences de comportement entre les sols sableux et les sols cohésifs. Un modèle est établi pour quantifier l'évolution de leur dégradation de surface en fonction de leurs propriétés géotechniques. Il apporte une meilleure compréhension du mécanisme de génération des poussières sur les pistes non revêtues. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche visant à réduire l'utilisation de l'eau employée sur les chantiers afin de lutter contre ce phénomène.

Mots-clefs : émissions de poussières, pistes non revêtues, interaction pneu / sol, terrassements

I. INTRODUCTION

Les chantiers de construction sont fortement émetteurs de poussières. On estime qu'ils représentaient 18% des émissions globales en France pour l'année 2018, soit environ 138 000 tonnes de poussières émises (CITEPA, 2020). C'est la circulation des engins lors de la phase des terrassements qui est la principale cause des émissions (USEPA, 2006). Cette circulation a lieu sur des pistes non revêtues construites à partir de sols compactés dont la surface se dégrade progressivement. Cela génère des nuages de poussières qui atténuent la visibilité et peuvent entraîner des nuisances environnementales et sanitaires (Baddock et al., 2014). Pour limiter ces effets indésirables, les terrassiers arrosent abondamment les pistes de circulation, ce qui augmente le coût des chantiers et peut entraîner un gaspillage important d'eau. Une meilleure connaissance des mécanismes qui régissent l'envol de ces poussières permettrait de mettre en place des préconisations pour les limiter et d'envisager une optimisation de l'arrosage.

À ce jour, le modèle le plus utilisé pour estimer les émissions de PM₁₀ (poussières de tailles inférieures ou égales à 10µm) générées par des véhicules en circulation sur des pistes non revêtues est celui développé par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA, 2006). Il est notamment employé pour évaluer les émissions des chantiers en France et pour établir l'inventaire des émissions atmosphériques (CITEPA, 2020). Ce modèle empirique est représenté par l'équation (1) :

$$E_{USEPA} = 422,85 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,9} \times \left(\frac{W}{3}\right)^{0,45} \quad (1)$$

où E_{USEPA} est le facteur d'émission de PM_{10} (en g/km parcourus par le véhicule), s est la teneur en limon de la route (pourcentage massique de particules de tailles inférieures à $80\mu m$) et W le poids du véhicule (en tonnes).

Ce modèle a été développé à partir de mesures réalisées dans des mines et des carrières. Il ne décrit que grossièrement la piste sur laquelle circule les véhicules. Or, une piste non revêtue est un milieu complexe. Il s'agit d'un sol compacté qui se compose d'agrégats de particules liées entre elles à l'aide de forces interparticulaires (cohésion due au compactage, ponts capillaires, forces électrostatiques et de Van der Waals). Une piste nécessite donc un certain nombre de paramètres physiques et granulométriques pour être décrite. Or, le modèle de l'USEPA ne prend en considération que la teneur en limon. De plus, ce modèle ne tient pas compte des mécanismes de dégradation du sol, en particulier l'arrachement puis l'effritement des agrégats de particules par les pneus. Ce phénomène entraîne l'apparition des poussières en surface de la piste qui vont ensuite être mises en suspension par des processus aérodynamiques. Ces derniers ont été étudiés dans la plupart des travaux sur l'envol des poussières lié aux véhicules en circulation (p. ex., Edvarsson et Magnusson, 2009 ; Kavouras et al., 2016). Cependant, peu d'études se sont intéressées à la génération de ces poussières à travers la dégradation du sol par les pneus (Sediki, 2018 ; Le Vern et al., 2020). Le manque d'informations à l'heure actuelle sur le mécanisme d'arrachement des agrégats met en évidence la nécessité d'analyser plus en détail le cisaillement à l'interface entre le pneu et la surface du sol. C'est cette problématique que souhaite aborder la présente étude.

Dans ce document, on présente dans un premier temps la méthodologie adoptée pour examiner les mécanismes mis en jeu lorsque qu'un pneu circule sur un sol. Ensuite, les résultats sont présentés et analysés. Finalement, la discussion porte sur leur application à la problématique plus globale des émissions de poussières sur les chantiers de terrassement.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Le phénomène d'arrachement des agrégats de particules par un pneu en circulation sur un sol est ici étudié à l'aide du simulateur de trafic VECTRA de l'Université Gustave Eiffel à Nantes (Figures 1-a et 1-b). Cet appareil permet de simuler la circulation à 4 km/h (valeur maximale de l'appareil) d'un pneu remorqué (sans couple moteur) de 400 mm de diamètre. L'étude a été réalisée à l'aide d'un pneu sculpté « S » (Figure 1-d) et les résultats sont comparés à ceux d'une précédente étude réalisée par Sediki (2018) avec un pneu lisse « L » (Figure 1-c). Les pneus ont été gonflés à 600 kPa selon les préconisations du constructeur et l'effort vertical appliqué par le vérin était de 3,16 kN (valeur minimale de l'appareil). Cela correspond à une contrainte verticale appliquée en surface de 509 kPa pour le pneu lisse et de 898 kPa pour le pneu sculpté. Ces valeurs ne tiennent pas compte de la pénétration du pneu dans le sol. En effet, ce dernier ayant été compacté au préalable, on peut le considérer comme une surface rigide et négliger l'enfoncement du pneu (Wong, 2001). Les observations visuelles réalisées durant les essais valident ce postulat.

Quatre sols ont été étudiés : de l'argile kaolinite (désigné S0K100), deux mélanges d'argile kaolinite et de sable d'Hostun (50% d'argile et 50% de sable : S50K50 ; 25% d'argile et 75% de sable : S75K25) et un limon prélevé dans le secteur Val d'Europe en région parisienne (LVE). Leurs propriétés géotechniques sont présentées dans le Tableau 1. Pour les propriétés granulométriques, on présente les teneurs en argile ($\% < 2\mu m$) et en limon ($\% < 80\mu m$) mais également le pourcentage de particules comprises entre 20 et $2000\mu m$. En effet, lors d'une précédente étude (Le Vern et al., 2020), ce dernier paramètre a été identifié comme décisif pour caractériser la taille des agrégats arrachés par le pneu.

Dans l'ancienne nomenclature de l'USDA (USDA, 2017), ce pourcentage était désigné comme étant la teneur en sable. On utilisera la même désignation dans la présente étude.

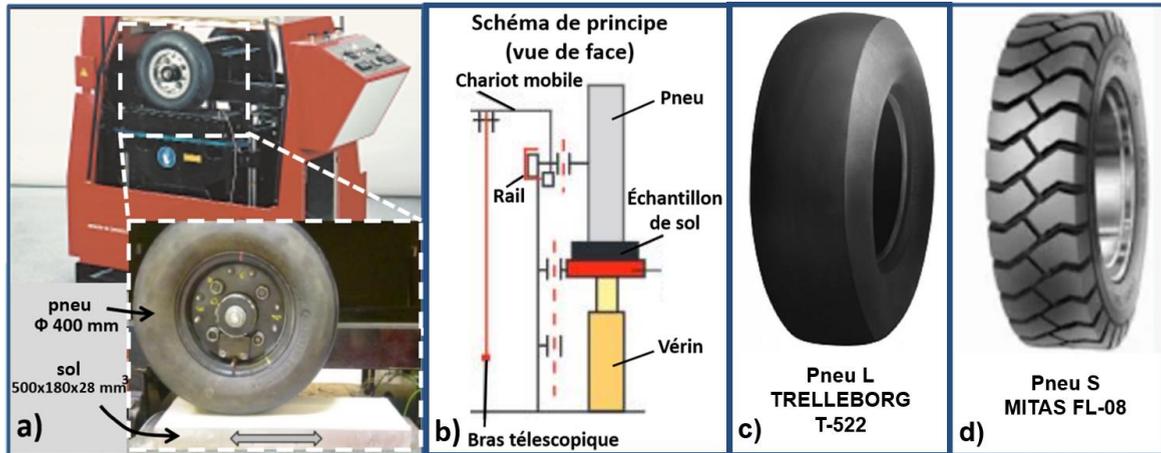


FIGURE 1. a) Vue de côté du simulateur de trafic ; b) Schéma de principe ; c) et d) Pneus utilisés

TABLEAU 1. Propriétés géotechniques des sols

Sol	S0K100	S50K50	S75K25	LVE
<i>Propriétés granulométriques</i>				
% < 2 μm	76,6	42,8	22,7	25,6
% < 80 μm	100	58,8	36,8	94,4
20 < % < 2000 μm	4	48	71	48,3
<i>Propriétés physiques</i>				
Limite de Liquidité (%)	55,0	29,9	23,1	36,5
Indice de Plasticité (%)	25,0	12,6	7,6	15,7
Valeur au bleu de Méthylène (g/100g)	1,56	0,74	0,43	3,87
<i>Paramètres de compactage Proctor Normal</i>				
w _{OPN} (%)	28,2	16,0	12,4	15,6
$\gamma_{d\text{ OPN}}$ (kN/m ³)	14,7	18,0	18,7	18,1

Pour les essais en simulateur de trafic, les conditions de circulation sur une piste non revêtue ont été reproduites en compactant les sols à l'Optimum Proctor (teneur en eau w_{OPN} et masse volumique sèche $\gamma_{d\text{ OPN}}$, voir Tableau 1) dans des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 500x180x28mm³. Le compactage a été réalisé à l'aide d'un compacteur roulant de laboratoire permettant de reproduire des états de surface proches des conditions sur chantiers (Le Vern et al., 2020). Après compactage, les sols ont été laissés à l'air libre jusqu'à perdre 25 % de leur teneur en eau afin de simuler l'évaporation qui se produit sur les pistes non revêtues en conditions estivales. Cette évaporation a été mesurée en pesant les éprouvettes. Chaque sol a ensuite été soumis à 10 000 passages de pneu dans le simulateur, ce qui correspond à la sollicitation d'une piste d'un chantier de terrassement sur une période d'environ un mois (Le Vern et al., 2020). Deux essais ont été réalisés avec le pneu S sur le sol S75K25 pour vérifier la répétabilité des résultats. Lors de chaque essai, l'appareil était stoppé à 13 reprises (c'est-à-dire après 20, 60, 120, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 2000, 4000 et 10000 passages) pour récolter les particules de sol arrachées par le pneu. Celles-ci

étaient pesées afin de quantifier la dégradation du sol D , exprimée en grammes de particules arrachées par unité de surface (g/m^2). La section suivante présente et analyse les résultats obtenus.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Effet de la sculpture des pneus

La Figure 2 présente les mesures de dégradation de surface des différents sols avec les deux pneus.

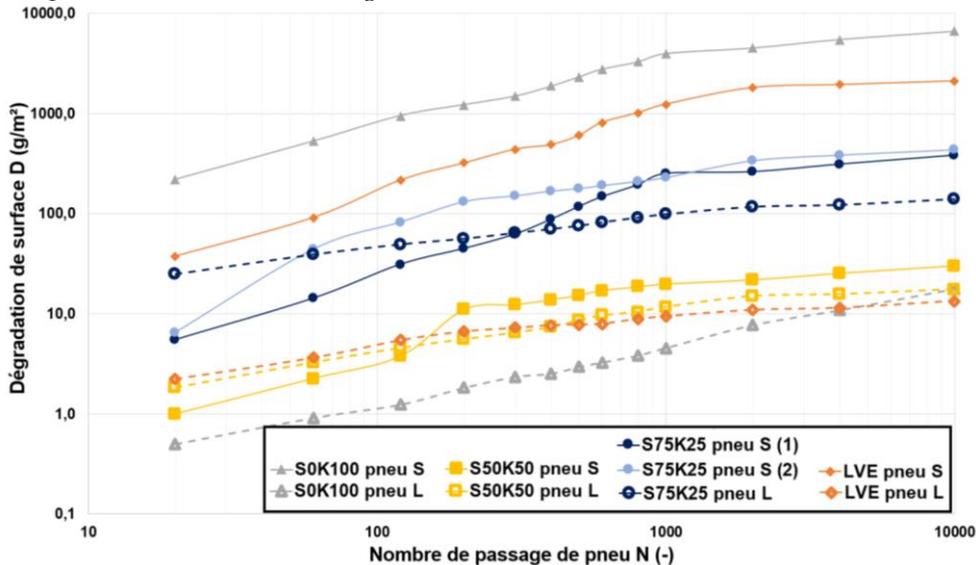


FIGURE 2. Évolutions des dégradations de surface des sols en fonction du nombre de passages du pneu lisse « L » (courbes pointillées) et du pneu sculpté « S » (courbes pleines)

D'une manière générale, il apparaît que les dégradations sont plus faibles avec le pneu lisse car les contraintes de cisaillement mobilisées à l'interface sont moins importantes. On remarque cependant que pour les sols à forte teneur en sable (S50K50 et S75K25) il y a plus de dégradation avec le pneu L pour les premières dizaines de passages qu'avec le pneu S. Cela est sans doute dû au fait que la surface de contact avec le sol est plus importante pour le pneu L, ce qui génère plus d'effritement à cause du frottement avec les grains de sable. Après une centaine de passages, le cisaillement supplémentaire généré par les sculptures du pneu S entraîne un arrachement d'agrégats plus importants, ce qui fait que la dégradation de surface devient supérieure à celle générée par le pneu L. Cet effet des sculptures est particulièrement marqué avec les sols S0K100 et LVE pour lesquels les dégradations sont de 1 à 2 ordres de grandeurs plus élevés avec le pneu S qu'avec le pneu L. Ces sols ont un fort indice de plasticité (supérieur à 15) et donc ont une capacité importante à se déformer sous les sculptures du pneu. Lorsque leur surface sèche, les ponts capillaires ne peuvent plus maintenir la cohésion des particules du sol lors de la déformation et donc des agrégats sont arrachés. Karafiath et Nowatzki (1978) ont également identifié que les sols à faible indice de plasticité (inférieur à 6) ont une surface friable lorsqu'ils sèchent et sont donc susceptibles de subir de nombreux arrachements d'agrégat sous sollicitation de pneus. La présente étude montre donc que l'indice de plasticité idéal d'un sol compacté devant subir du trafic ne doit être ni trop élevé ni trop faible. Une valeur d'environ 13, correspondant au sol S50K50, semble idéale pour limiter la génération de poussières.

Les engins qui circulent sur les pistes des chantiers de terrassement étant équipés de pneus sculptés, on se focalise dans la section suivante sur les résultats expérimentaux obtenus avec le pneu S.

B. Modèle de dégradation des sols avec pneu sculpté

Sur la Figure 2, l'évolution de la dégradation D des sols en fonction du nombre de passages N du pneu sculpté apparaît comme pouvant être modélisée suivant une loi définie par l'équation (2) :

$$D(N) = a \left(1 - e^{-\frac{N}{b}} \right) \quad (2)$$

où a et b sont deux coefficients empiriques qui dépendent du type de sol.

On souhaite établir un unique modèle théorique qui puisse décrire le comportement global des différents sols. Le modèle envisagé est de la forme suivante :

$$D(N, g_i) = D_{ref}(N) \cdot f(g_i) \quad (3)$$

où D_{ref} correspond à une fonction de dégradation de référence, g_i désigne un ensemble de i propriétés géotechniques du sol et f est une fonction de ces propriétés.

Pour la fonction D_{ref} , on choisit arbitrairement le modèle correspondant à la dégradation la plus faible. Elle est ici obtenue avec le sol S50K50. En ajustant à l'aide de la méthode des moindres carrés le modèle de l'équation (2) avec les données expérimentales, on obtient pour ce sol : $a=27$ et $b=600$.

On calcule ensuite pour chaque mesure expérimentale le rapport entre la dégradation mesurée et la dégradation de référence. En moyennant sur l'ensemble des mesures pour chacun des sols, on obtient la valeur de la fonction f correspondant à ce sol :

$$f = \frac{\sum_{k=1}^M \frac{D_k}{D_{ref}}}{M} \quad (4)$$

où k désigne l'indice de la mesure expérimentale et M le nombre total de mesures réalisées sur chaque sol ($M=13$).

Pour déterminer les propriétés géotechniques g_i pertinentes à implémenter dans la fonction f , on se base sur l'étude de Le Vern et al. (2020). Dans ce travail, les auteurs ont identifié le paramètre qui permet de décrire au mieux la granulométrie des particules arrachées par le pneu. Il s'agit du produit du pourcentage d'argile ($\% < 2\mu m$) et du pourcentage de sable ($20\mu m < \% < 2000\mu m$). On prend donc $g_1 = \% \text{argile}$ et $g_2 = \% \text{sable}$ et on trace sur la Figure 3-a l'évolution de f en fonction de $g_1 \times g_2$.

La fonction permettant le meilleur ajustement des données ($R^2=0,98$) est définie par :

$$f(\% \text{argile}, \% \text{sable}) = -99,6 \cdot \ln(\% \text{argile} \times \% \text{sable}) + 761 \quad (5)$$

A partir des équations (3) et (5), on peut définir le modèle empirique de dégradation :

$$D_{théorique}(g/m^2) = 27 \left(1 - e^{-\frac{N}{600}} \right) \times [-99,6 \cdot \ln(\% \text{argile} \times \% \text{sable}) + 761] \quad (6)$$

A travers la comparaison entre les données expérimentales et le modèle proposé, la Figure 3-b montre que ce dernier permet une bonne approximation de la dégradation subie par la plupart des sols étudiés ici. Cependant, les mesures réalisées lors du premier essai avec le sol S75K25 sont de 2 à 4 fois inférieures aux valeurs théoriques. Cela laisse envisager que ce modèle n'est pas totalement applicable aux sols à très forte teneur en sable.

L'équation (6) donne la masse de particules arrachées par unité de surface d'un pneu. Pour avoir la masse de poussières par kilomètre parcouru par un véhicule ayant un nombre P de pneus de largeur L , on utilise l'équation (7) :

$$D_{théorique}(g/km) = D_{théorique}(g/m^2) \times L \times R \times 1000 \quad (7)$$

Dans la section suivante, le modèle développé est comparé à celui de l'USEPA dans le cadre de la circulation des camions sur les chantiers de terrassement.

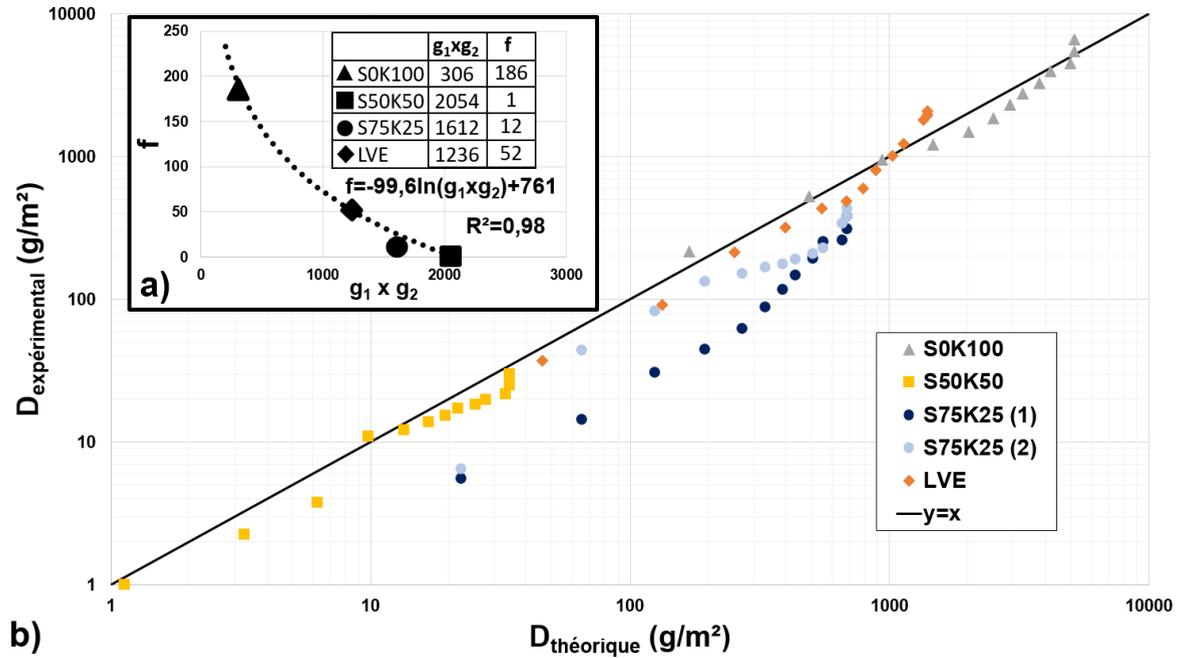


FIGURE 3. a) Relation entre f et le produit du pourcentage d'argile (g_1) et du pourcentage de sable (g_2) des quatre sols ; b) Comparaison entre le modèle de l'équation (8) et les mesures expérimentales

C. Comparaison entre le modèle développé et celui de l'USEPA

Pour quantifier la capacité d'un sol à générer des poussières sous sollicitation de trafic, il faut connaître son état de dégradation mais également la granulométrie des particules arrachées par le pneu. Sur ce second point, on se base sur le modèle développé par Le Vern et al. (2020) :

$$\Delta(d) = \frac{0,111 \times e^{[0,004(\%argile \times \%sable)]}}{0,49} \times (9,72 \cdot 10^{-10} N^2 - 4,92 \cdot 10^{-5} N + 1,09) \times \ln\left(\frac{d}{d_{min}}\right) \times \sin\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right)} \times \ln\left(\frac{d}{d_{min}}\right) + \pi\right] \quad (8)$$

où $\Delta(d)$ correspond à la différence entre la distribution granulométrique des particules arrachées ($p(d)_{particules}$) et celle du sol initial ($p(d)_{sol\ initial}$). d correspond au diamètre des particules du sol dont les valeurs sont comprises entre d_{min} et d_{max} . N correspond au nombre de passages du pneu.

Ainsi, à partir de la distribution granulométrique du sol initial, on calcule celle des particules arrachées. On peut ensuite déterminer le facteur d'émission de PM₁₀ à l'aide de l'équation (9) :

$$E_{théorique}(g_{PM_{10}}/km) = D_{théorique}(g/km) \times p(d \leq 10\mu m)_{particules} \quad (9)$$

La Figure 4 présente la comparaison entre ce modèle et celui de l'USEPA (équation (1)) pour les quatre sols étudiés en considérant la circulation d'un tombereau Caterpillar 725. Ce camion, très utilisé sur les chantiers de terrassement, a un poids en charge de 47 tonnes et possède 6 pneus de largeur 600 mm (CATERPILLAR, 2014).

Dans le modèle de l'USEPA, le facteur d'émission de PM₁₀ est considéré comme constant quel que soit le nombre de passages du camion. Les valeurs qu'il permet d'obtenir sont du même ordre de

grandeur pour les quatre sols (entre 4000 g/km pour S75K25 et 10000 g/km pour S0K100) alors que ceux-ci ont des comportements au cisaillement très différents. De son côté, le modèle développé dans la présente étude montre l'évolution progressive des émissions de poussières à mesure que le sol se dégrade. Il prévoit que les émissions pour chacun des sols seront augmentées d'un ordre de grandeur entre 10 et 100 passages du camion, puis à nouveau d'un ordre de grandeur entre 100 et 1000 passages. Au-delà, les émissions se stabilisent. Ce modèle permet donc d'identifier, en établissant un seuil d'émission de poussières à ne pas dépasser, à quel moment il serait nécessaire d'arroser le sol sur un chantier.

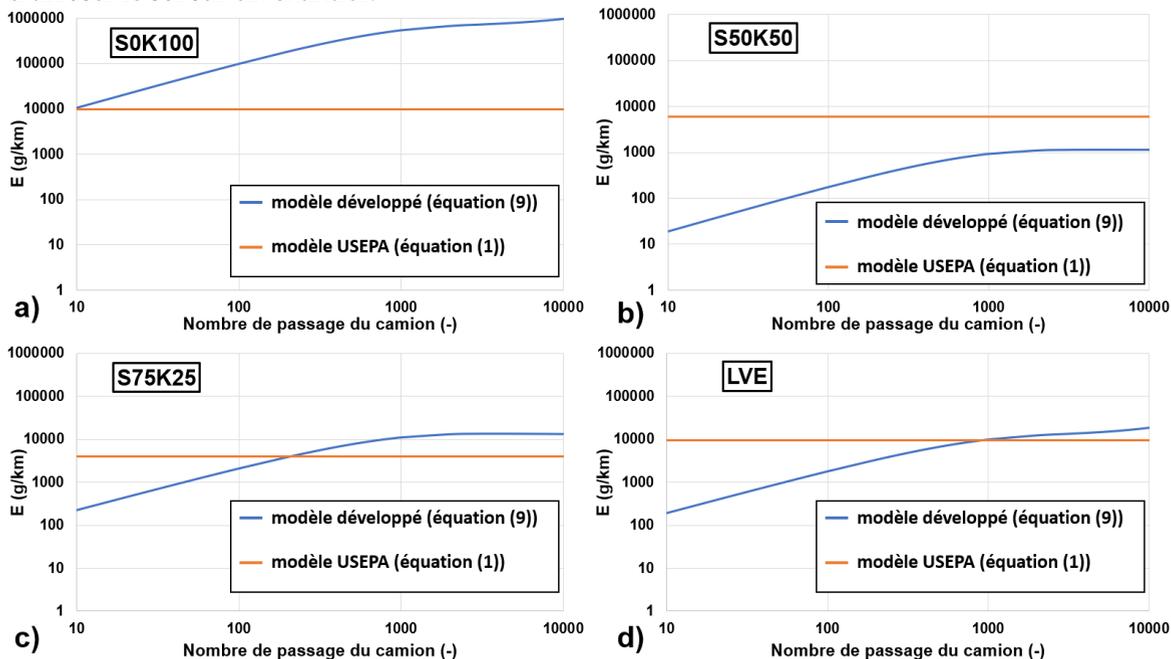


FIGURE 4. Facteurs d'émission de PM_{10} lors de la circulation d'un camion de 47 tonnes. Comparaison du modèle de l'équation (11) avec celui de l'USEPA pour le sol a) S0K100, b) S50K50, c) S75K25 et d) LVE

Le présent modèle a été établi à partir d'essais à l'échelle du laboratoire, réalisés à faible vitesse (4 km/h) et sans couple moteur sur le pneu. Il constitue néanmoins une première étape du processus permettant de quantifier l'évolution des émissions de poussières sur un chantier de construction en s'appuyant sur les mécanismes mis en jeu.

IV. CONCLUSION

Ces travaux ont été menés afin d'avoir une meilleure connaissance des mécanismes d'émission de poussières liés à la circulation des camions sur les chantiers. Il a été pour cela nécessaire d'analyser les processus qui amènent des particules de sol, initialement liées entre elles au sein d'une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques. Pour ce faire, une étude de la dégradation de sols soumis à des passages de pneus a été entreprise. À l'aide d'essais en simulateur de trafic avec un pneu lisse et un pneu sculpté, il a été montré que lors des premières dizaines de passages du pneu, les sols sableux résistent plutôt bien au cisaillement généré par les sculptures et se dégradent surtout sous l'effet du frottement avec le pneumatique. Les sols plus cohésifs vont quant à eux subir d'importantes dégradations liées à l'arrachement des agrégats par les sculptures. Il a été mis en évidence que les deux paramètres les plus pertinents pour caractériser la propension d'un sol à se

dégrader sous sollicitations de trafic sont l'Indice de Plasticité et le produit du pourcentage d'argile et du pourcentage de sable. Ce dernier paramètre est à la base de l'élaboration d'un modèle de dégradation qui a été décrit dans un second temps. Le modèle développé permet de prendre en compte l'évolution des émissions de poussières au cours d'un chantier, ce que ne permet pas le modèle de référence qui est largement utilisé à l'heure actuelle. Une prochaine étape serait de le tester à l'échelle 1 afin de l'améliorer et de le valider. Cela pourrait servir ensuite à une meilleure gestion de l'arrosage durant la phase des terrassements.

REMERCIEMENTS : L'auteur tient à remercier tout particulièrement la Fédération Nationale des Travaux Publics pour le financement et l'expertise technique apportée à ces travaux.

REFERENCES

- Baddock, M.C., Strong, C.L., Leys, J.F., Heidenreich, S.K., Tews, E.K., McTainsh, G.H. (2014). A visibility and total suspended dust relationship. *Atmospheric Environment* **48**:329-336, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.02.038
- CATERPILLAR (2014). Caterpillar Performance Handbook Edition 44: ARTICULATED TRUCK, *Technical Paper* https://www.hawthornecat.com/sites/default/files/content/download/pdfs/Articulated_Trucks_CPH_v1.1_03.13.14.pdf (consulté le 23 Mars 2020).
- CITEPA (2020) Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques – Bilan des émissions en France de 1990 à 2018. *Rapport National d'Inventaire / Format SECTEN, Édition juin 2020, CITEPA*, 459 p.
- Edvarsson, K., Magnusson, R. (2009) Monitoring of dust emission on gravel roads: Development of a mobile methodology and examination of horizontal diffusion. *Atmospheric Environment* **43**:889-896, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.10.052
- Karafiath, L.L., Nowatzki, E.A. (1978) *Soil mechanics for off-road vehicle engineering*. Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech Publications, First Edition
- Kavouras, I.G., DuBois, D.W., Nikolich, G., Corral Avittia, A.Y., Etyemezian, V. (2016) Particulate dust emission factors from unpaved roads in the U.S.-Mexico border semi arid-region. *Journal of Arid Environments* **124**():189-192, doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.07.015
- Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F. (2020) Experimental assessment of dust emissions on compacted soils degraded by traffic. *Atmosphere* **11**, 369, doi:10.3390/atmos11040369
- Sediki, O. (2018) Étude des mécanismes d'instabilité et d'envol des particules en lien avec l'hydratation des sols fins. *Thèse de doctorat, Université de Lorraine*. 282 p.
- U.S. Department of Agriculture. (2017) Soil Survey Manual. *Soil Science Division Staff, Agricultural Handbook No. 18, Issued March 2017*
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous Sources, 13.2.2 Unpaved Roads. *Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park*. Disponible : https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-10/documents/13.2.2_unpaved_roads.pdf
- Wong, J.Y. (2001) *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, Toronto, Canada, Third Edition