



HAL
open science

Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement.

Mickaël Le Vern

► To cite this version:

Mickaël Le Vern. Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement.. Génie civil. École centrale de Nantes, 2021. Français. NNT : 2021ECDN0037 . tel-03722286v2

HAL Id: tel-03722286

<https://theses.hal.science/tel-03722286v2>

Submitted on 13 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Génie Civil

Par

Mickaël LE VERN

Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 09 Novembre 2021

Unité de recherche : Département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS), Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes

Rapporteurs avant soutenance :

Evelyne GEHIN
Jean-Luc HARION

Professeure des universités
Professeur

Université Paris-Est Créteil
IMT Nord-Europe

Composition du Jury :

Président : Frédéric GRONDIN

Professeur des universités

École Centrale de Nantes

Examineurs : Antonio Gomes CORREIA
Gaëtan BLANCK

Professeur
Ingénieur géotechnicien

Université du Minho, Portugal
Bouygues Travaux Publics, Guyancourt

Dir. de thèse : Frédérique LARRARTE

Directrice de Recherche

Université Gustave Eiffel, Bouguenais

Co-encadrant : Andry RAZAKAMANANTSOA
Co-encadrant : Frédéric MURZYN

Chargé de Recherche
Enseignant-Chercheur HDR

Université Gustave Eiffel, Bouguenais
ESTACA, Laval

À la mémoire de ma mère et de mon grand-père

Remerciements

Cette thèse représente trois ans d'une vie et est l'aboutissement d'un cursus scolaire et universitaire. Elle est l'occasion pour moi de prendre du recul sur les connaissances acquises et de visualiser le chemin parcouru. À ce titre, mes premiers remerciements iront pour mes parents qui ont toujours été dévoués et qui nous ont prodigué, à ma sœur et à moi, une éducation de qualité. Merci aussi aux membres de ma famille qui ont toujours été des supports importants.

Les professeurs Evelyne Géhin de l'Université Paris-Est et Jean-Luc Harion de l'IMT Nord-Europe me font l'honneur de rapporter ces travaux de thèse, je les en remercie grandement. Je suis également reconnaissant envers Antonio Gomes Correia, professeur à l'Université du Minho, Frédéric Grondin, professeur à l'École Centrale de Nantes et Gaëtan Blanck, géotechnicien de l'entreprise Bouygues qui ont également accepté de faire partie du jury. C'est avec joie que je sou mets ce document à leur expertise et leur sagacité.

J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler sur ce sujet de thèse à la frontière entre la mécanique des sols, la mécanique des fluides et la science des aérosols. Les échanges avec mes encadrants ont toujours été très instructifs, notamment vis-à-vis de la pluralité des points de vue qui apportait une certaine complémentarité. Ma directrice de thèse, Frédérique Larrarte, s'est toujours montrée très soucieuse des détails et son regard critique m'a notamment permis de comprendre toute l'importance de la précision dans le discours, merci à elle. Je remercie également mon co-encadrant Andry Razakamanantsoa, qui a amené et porté cette thématique de l'envol des poussières depuis 2012 et développé un environnement de travail sur cette question dans lequel j'ai eu du bonheur à m'intégrer. Un grand merci aussi à Frédéric Murzyn, qui a également co-encadré cette thèse et fait preuve d'une grande implication dans l'élaboration des méthodologies ainsi que l'analyse des résultats et a toujours relu avec beaucoup de soin mes différentes productions. Je souhaite à tout doctorant d'avoir des encadrants aussi impliqués.

La communauté professionnelle du génie civil a apporté une grande contribution à cette thèse, à la fois technique et financière. Merci en particulier à Philippe Gotteland (FNTP), Pascal Insenga (Vinci Construction), Benjamin Daubilly (UMTM), Tangi Le Borgne (Bouygues) et Laurent Desmurs (Guintoli) qui ont permis à ces travaux de rester ancrés dans les réalités du « terrain ».

Je tiens également à remercier les membres de mon comité de suivi individuel, Irini Djeran Maigre, professeure à l'INSA de Lyon et Emilien Varea, maître de conférences au CORIA à Rouen, à qui j'ai eu la chance de pouvoir présenter l'avancement de mes travaux à deux reprises au cours de cette thèse. Les échanges avec eux ont été à chaque fois très constructifs.

Une thèse est un travail d'équipe. Je tiens donc à remercier tous les techniciens sans qui une bonne partie des résultats présentés dans ce document n'auraient pas pu être obtenus. Merci à Jean-Pierre David de la métrologie, Sophie Ricordel du laboratoire EE, Olivier Burban du laboratoire MIT ainsi qu'à Christophe Ropert et Sébastien Buisson du laboratoire EASE de l'Université Gustave Eiffel. Un merci particulier aux techniciens du laboratoire GIE, Erwann Rayssac, Daniel Bodenes et Louis Battist qui, en plus de m'avoir aidé pour les essais, ont dû me supporter au jour le jour. Ils ne semblent pas en porter trop de séquelles, ni non plus d'ailleurs ma voisine de bureau, Geetanjali Das, que je remercie pour toutes ces discussions et ces fous rires qui m'ont notamment permis de découvrir la culture indienne. Les très bons travaux de fin d'études de Master d'Etienne Pagès et d'Edwin Duran-Garcia sont une contribution importante à cette thèse, merci à eux deux. Ces travaux doivent également beaucoup à ceux

d'Ouardia Sediki, que je remercie également. J'ai de plus eu la chance d'échanger avec des chercheurs chevronnés qui ont amélioré ma vision scientifique. Je pense en particulier à Dimitri Deneele, Eric Gaume, Véronique Cerezo, Daniel Levacher, Luc Thorel et Thierry Dubreucq.

Merci finalement à tous les amis (doctorants et autres) pour toutes ces parties de billard endiablées, ces courses de kayak déchainées et ces apéritifs festifs qui ont accompagnés ces trois ans.

Table des matières

Remerciements	i
Table des Figures.....	vii
Table des Tableaux.....	xv
Nomenclature	xvii
Glossaire.....	xxv
Introduction	1
Partie I : État de l'art	7
Chapitre 1 : Problématiques liées aux envols de poussière	9
1.1 Poussière : définition et réglementation	9
1.2 Sources d'émissions	10
1.2.1 Origines des poussières	10
1.2.2 Impact des chantiers de terrassement sur les émissions	11
1.3 Nuisances liées aux particules fines solides en suspension dans l'air	15
1.3.1 Impacts sanitaires	15
1.3.2 Dommages environnementaux	17
1.3.3 Atténuation de la visibilité.....	18
1.4 Moyens de lutte contre la mise en suspension des poussières.....	21
1.5 Conclusion.....	22
Chapitre 2 : Conditions aérodynamiques d'envol des poussières	23
2.1 Couches limites laminaires et turbulentes	23
2.2 Erosion éolienne	26
2.2.1 Envol des poussières par saltation.....	28
2.2.2 Envol des poussières lors de phénomènes turbulents	29
2.2.3 Transport des poussières dans les structures turbulentes cohérentes.....	31
2.3 Effets de la rugosité de surface.....	33
2.4 Poussières générées par la circulation sur les pistes non revêtues.....	35
2.5 Ecoulements de sillage	37
2.5.1 Sillage des roues	37
2.5.2 Sillage des véhicules.....	39
2.6 Conclusion.....	40
Chapitre 3 : Propriétés, mise en œuvre et sollicitations des sols	41
3.1 Caractéristiques physiques et structure des sols	41
3.1.1 Phases et granulométrie des sols	41

3.1.2	Paramètres d'état	43
3.1.3	Classification des sols selon le Guide des Terrassements Routiers.....	44
3.2	Comportement des sols au compactage.....	46
3.2.1	Généralités sur le compactage	46
3.2.2	Modification de la microstructure du sol en lien avec le compactage.....	48
3.2.3	Comportement volumétrique des sols partiellement saturés lors du compactage	50
3.3	Dégradation des sols sous sollicitations de trafic	51
3.4	Interactions entre l'eau et les particules du sol.....	55
3.5	Conclusion.....	61
3.6	Bilan de l'état de l'art et intérêts des travaux	62
3.6.1	Verrous scientifiques	62
3.6.2	Objectifs de la thèse.....	63
Partie II : Dispositifs expérimentaux et méthodologie		65
Chapitre 4 : Dispositifs expérimentaux		67
4.1	Mise en œuvre et dégradation des sols	67
4.1.1	Compacteur roulant de laboratoire	67
4.1.2	Simulateur de trafic	68
4.2	Étude aérodynamique	70
4.2.1	Souffleries	70
4.2.2	Maquettes	71
4.2.3	Vélocimètres LASER	72
4.3	Mesures in-situ	75
4.3.1	Visibilimètre et station météo.....	75
4.3.2	Granulomètres optiques.....	76
4.3.3	Roue dynamométrique.....	77
4.4	Conclusion.....	78
Chapitre 5 : Méthodologie.....		79
5.1	Dégradabilité par le trafic des sols compactés.....	79
5.1.1	Sols d'étude	79
5.1.2	Mise en œuvre des sols.....	81
5.1.3	Dégradation de surface par roulement d'un pneu.....	82
5.1.4	Vernissage et mesure de rugosité de surface	83
5.2	Champs de vitesse en couche limite	85
5.2.1	Protocole.....	85
5.2.2	Campagne de mesures sur les sols compactés.....	86

5.2.3	Campagne de mesures sur les sols dégradés	87
5.3	Écoulements dans le sillage des maquettes	87
5.3.1	Mesures de sillage avec LDV	87
5.3.2	Mesures de sillage avec PIV	91
5.4	Envol de poussières par circulation de véhicules sur piste.....	94
5.4.1	Essais avec véhicule de tourisme et 4x4.....	94
5.4.2	Essais avec camion 8x4	103
5.4.3	Méthodes d'analyse des résultats des essais in-situ.....	107
5.5	Conclusion.....	113
Partie III : Résultats et discussions.....		115
Chapitre 6 : Mise en œuvre, dégradation des sols et interaction sol-atmosphère.....		117
6.1	Interaction sol-atmosphère sur les sols compactés	117
6.1.1	Propriétés des écoulements de couche limite	117
6.1.2	Initiation de l'envol des particules par saltation	123
6.1.3	Conclusion.....	124
6.2	Évaluation des émissions de poussières sur sols dégradés	125
6.2.1	Modèle d'envol des poussières.....	125
6.2.2	Dégradation des sols par le trafic	125
6.2.3	Caractérisation de couche limite sur les sols dégradés.....	132
6.2.4	Estimation des émissions et comparaison avec des données de terrain	135
6.2.5	Conclusion.....	138
6.3	Effet de la sculpture des pneus et évaluation du modèle de dégradation	138
6.3.1	Effet de la sculpture des pneus	140
6.3.2	Modèle unifié de dégradation des sols avec pneu sculpté	141
6.3.3	Comparaison entre le modèle développé et celui de l'USEPA	144
6.3.4	Conclusion.....	145
Chapitre 7 : Écoulements dans le sillage des engins de chantier.....		147
7.1	Champs des vitesses moyennes	147
7.2	Champs des grandeurs turbulentes	151
7.2.1	Cartographies des contraintes de Reynolds	151
7.2.2	Évaluation de l'anisotropie de la turbulence	154
7.2.3	Contraintes de Reynolds en proche paroi	156
7.3	Analyse par quadrants	157
7.4	Conclusion.....	158
Chapitre 8 : Envol des particules lors de la circulation d'un véhicule		159

8.1	Remise en suspension des particules directement derrière les pneus	159
8.1.1	Analyse de la répétabilité des résultats.....	159
8.1.2	Coefficients d'émission des véhicules légers	162
8.1.3	Coefficients d'émission du camion 8x4	166
8.1.4	Conclusion.....	167
8.2	Évaluation des émissions de poussières sur le bas-côté de la route	168
8.2.1	Facteurs d'émission.....	168
8.2.2	Atténuation de visibilité	172
8.2.3	Conclusion.....	173
	Conclusions et perspectives.....	175
	Références	179
	Annexe : Publications.....	201

Table des Figures

Figure 0-1 : Illustration de la taille des particules fines (adapté de Barnes et Connor, 2014).....	2
Figure 0-2 : Poussière générée par la circulation d'un tombereau articulé sur un chantier de terrassement (tiré de Walker, 2012)	3
Figure 0-3 : Organisation du manuscrit.....	6
Figure 1-1 : Répartition en France métropolitaine des émissions des secteurs de l'industrie manufacturière et de la construction concernant a) l'ensemble des particules en suspension et b) les PM ₁₀ (adapté de CITEPA, 2020-a)	11
Figure 1-2 : Émissions de poussières lors a) du décapage du sol, b) du chargement des camions, c) des activités de bulldozer et d) de la circulation des engins (crédits : Getty Images et Walker, 2012)	13
Figure 1-3 : Exemple d'évolution des quantités de poussières émises selon les facteurs de l'USEPA (1995)	13
Figure 1-4 : Pénétration et dépôt des particules dans l'appareil respiratoire, d'après l'Institut National de Recherche et de Sécurité (https://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/effets-sante.html).....	16
Figure 1-5 : Relation entre la visibilité et la concentration de poussière en suspension (TSD). Comparaison entre les études de Baddock et al. (V-TSD), Patterson et Gillette (1977) et Chepil et Woodruff (1957). (Tiré de Baddock et al., 2014).....	19
Figure 1-6 : Évolution, en fonction de la taille des particules, de la distribution massique (courbe bleue) et de la capacité de diffusion (courbe orange) d'un aérosol (adapté de Malm, 1999).....	20
Figure 1-7 : Arrosage d'une piste de circulation sur un chantier (photo : Ouardia Sediki).....	21
Figure 2-1 : Développement de la couche limite lors d'un écoulement au-dessus d'une surface plane (adapté de Crowe et al., 2009).....	24
Figure 2-2 : Profil de couche limite turbulente sur surface lisse en coordonnées adimensionnelles (adapté de Robinet, 2013)	26
Figure 2-3 : Les différents modes de l'érosion éolienne (adapté de Presley et Tatarko, 2009)	27
Figure 2-4 : Emissions de poussières dues aux flux de quantité de mouvement générés par a) un gradient vertical de vitesse du vent entraînant le phénomène de saltation et b) des tourbillons provoqués par des turbulences dans l'écoulement (adapté de Klose et Shao, 2013)	28
Figure 2-5 : Distributions log-normales des forces de cohésion f_i pour des particules de diamètre géométrique 1 μm , 2 μm , 3,5 μm , 7,5 μm et 20 μm , d'après l'Eq. (2.20)	31
Figure 2-6 : Simulation numérique de « vortex en épingle à cheveux » avec visualisation des champs de vecteurs vitesse dans les plans transversaux et longitudinal (Zhou et al., 1999).....	32

Figure 2-7 : Schématisation des quadrants et du critère des fortes fluctuations (adapté de Yue et al., 2007).....	33
Figure 2-8 : Profils de vitesses en coordonnées adimensionnelles au-dessus d'une surface lisse et de surfaces rugueuses (adapté de Bergtrom et al., 2002).....	34
Figure 2-9 : Sources des poussières générées par la circulation d'une roue sur un sol (adapté de Barnes et Connor, 2014).....	35
Figure 2-10 : Tours de mesures « Upwind/Downwind » pour quantification des émissions de poussières (unités en m) (adapté de Gillies et al., 2005).....	36
Figure 2-11 : a) Représentation des vortex générés par un pneu isolé en rotation (Mercker et Berneburg, 1992) et modèles d'écoulements dans le proche sillage d'après les mesures de b) Cogotti (1983), c) Mercker et Berneburg (1992) et d) Saddington et al. (2007)	38
Figure 2-12 : a) Volets défecteurs sur un prototype Truck Renault ; b) Maquette simplifiée en soufflerie pour l'étude du contrôle de sillage par volets et jet pulsé (Chaligné, 2013)	39
Figure 2-13 : Cartographie de la vitesse moyenne de l'écoulement dans le sillage d'une remorque de poids lourd à l'échelle 1/10 par simulation numérique (adapté de El-Alti et al., 2011).....	40
Figure 3-1 : Différentes phases des milieux granulaires (adapté de Gras, 2011).....	41
Figure 3-2 : Courbes granulométrique de trois sols présentant une granulométrie discontinue, uniforme et étalée. Les valeurs d_x en rouge correspondent aux ouvertures des tamis par lesquels passent X% des particules du sol (adapté de Langlois, 2014).....	42
Figure 3-3 : Limites d'Atterberg	44
Figure 3-4 : Classification des sols fins et grossiers (GTR, 2000).....	45
Figure 3-5 : Vue en coupe 2D d'une structure de chaussée (GTR, 2000).....	46
Figure 3-5 : Formation des agrégats lors de la mise en œuvre du sol par humidification et compactage (Sediki, 2018).....	47
Figure 3-6 : Rotation du tenseur des contraintes sur une particule d'un sol compacté par roulement, adapté de Lekarp et al. (2000)	47
Figure 3-7 : Courbe Proctor typique d'un sol. L'optimum Proctor est l'état de densité maximale, il correspond à la masse volumique sèche maximale obtenue après compactage à une teneur en eau dite « optimale ».....	48
Figure 3-8 : Observation au MEB de l'argile à silex de St-Calais (France) compactée in-situ par un engin à rouleaux lisses sans-vibrations (adapté de Sediki, 2018)	49
Figure 3-9 : Distribution porale d'un mélange sable/kaolinite compacté dans un moule Proctor en 1 couche (courbe rouge) et en 3 couches (courbe noire) à la teneur en eau optimale (Sediki, 2018)	50
Figure 3-10 : Courbes de compactage d'un sol dans l'espace $e-e_w-p$ (adapté de Kodikara, 2012)	51

Figure 3-11 : a) Principe de l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande et b) Exemple de courbe expérimentale obtenue pour un essai (adapté de Wong, 2001)	52
Figure 3-12 : a) Mécanisme de mobilisation des contraintes de cisaillement lors de la circulation d'un pneu sur un sol ; b) Agencement des contraintes dans la zone de rupture du sol ; c) Estimation de ces contraintes à partir des critères de Mohr-Coulomb (adapté de Karafiath et Nowatski, 1978)	53
Figure 3-13 : Mécanismes de déstructuration des agrégats sous sollicitations de trafic (Sediki, 2018)	53
Figure 3-14 : Configurations de compactage des éprouvettes sollicitées par Sediki (2018).....	54
Figure 3-15 : Contact entre deux grains sphériques humides. Présence d'eau sous forme d'un pont capillaire entre les deux grains et d'un fin film autour des surfaces correspondant à l'adsorption. Les forces de capillarité sont indépendantes de la gravité (adapté de Haines, 1925)	56
Figure 3-16 : Pont capillaire au point de contact entre deux particules anguleuses (adapté de McKenna-Neuman et Nickling, 1989)	57
Figure 3-17 : Forces de capillarité et angles de repos entre les grains d'un sol (adapté de McKenna-Neuman et Nickling, 1989)	58
Figure 3-18 : Interaction entre l'eau (en bleu) et les grains pour un sol dans le domaine a) hygroscopique (adsorption uniquement), b) pendulaire (adsorption et ponts capillaires) et c) funiculaire (adapté de Soulié, 2005)	58
Figure 3-19 : Vitesse seuil d'envol des particules d'un limon-argileux en fonction de l'humidité relative de l'air environnant (Ravi et al., 2006).....	59
Figure 3-20 : Efficacité du contrôle des émissions de poussières en fonction de la teneur en eau de surface pour des mesures sur chantiers de terrassement (carrés noirs). Comparaison avec le modèle de l'USEPA établi pour les routes non revêtues (Muleski et al., 2005).....	60
Figure 3-21 : Étapes du séchage d'un sol soumis à des sollicitations de trafic (d'après Struss et Mikucki, 1977).....	61
Figure 3-22 : Processus étudiés au cours de la thèse (adapté de Le Vern et al., 2021b)	64
Figure 4-1 : Compacteur roulant de laboratoire. a) Schéma de principe ; b) Vue de côté ; c) Vue de face (adapté de Sediki, 2018).....	67
Figure 4-2 : a) Vue de côté du simulateur de trafic ; b) Schéma de principe (vue de face) ; c) Pneu lisse utilisé dans l'étude de Sediki (2018) ; d) et e) Pneus sculptés utilisés dans la présente étude	69
Figure 4-3 : Soufflerie DeltaLab EA103 de l'ESTACA (Rodriguez, 2018)	70
Figure 4-4 : Soufflerie de l'Université Gustave Eiffel	71
Figure 4-5 : Maquette échelle 1/50 de tombereau articulé Caterpillar 725 (adapté de Duran-Garcia, 2020)	71
Figure 4-6 : Maquette échelle 1/50 de camion Mercedes 8x4 (adapté de Duran-Garcia, 2020).....	72

Figure 4-7 : Système de mesure LDV DANTEC installé sur la table de déplacement 3D	73
Figure 4-8 : Principe de mesure par PIV (Raffel et al., 2018).....	74
Figure 4-9 : Schéma de la mesure du rayonnement diffusé par le visibilimètre (adapté de Elias et al., 2015).....	75
Figure 4-10 : Visibilimètre équipé de la station météo et du pyranomètre	76
Figure 4-11 : Analyseurs de poussières en temps réel portatif a) Fidas Mobile et b) Fidas 200.....	77
Figure 4-12 : Schéma de principe de la roue dynamométrique Kistler RoadDyn S625 (tiré de Orfila, 2009).....	77
Figure 5-1 : Observations au MEB (a) des plaquettes d'argile kaolinite et (b) des grains de sable d'Hostun (tiré de Sediki, 2018)	79
Figure 5-2 : Granulométrie des quatre sols (diamètre de surface projetée).....	81
Figure 5-3 : Éprouvettes après application du vernis	83
Figure 5-4 : a) Profilomètre rotatif portable posé sur une surface avec sa ligne de mesure (cercle rouge) ; b) Configuration des mesures sur les sols et profils de rugosité mesurés avant et après application du vernis sur l'échantillon b) IV, c) VI, d) VII, e) VIII et f) IX.....	84
Figure 5-5 : Disposition de l'éprouvette dans la veine d'essai lors des mesures de champs de vitesses au-dessus des sols.....	85
Figure 5-6 : Schéma de principe de la soufflerie avec zoom sur l'échantillon de sol. Les croix vertes correspondent aux locations des mesures des gradients de vitesses verticaux avec leurs coordonnées cartésiennes (x;y;z). Les distances sont en mètres.	86
Figure 5-7 : Configuration « Benne pleine » du camion 8x4 (Duran-Garcia, 2020).....	88
Figure 5-6 : Illustration des plans de mesures d'écoulements dans le sillage de la maquette a) du camion 8x4 et b) du tombereau (adapté de Duran- Garcia, 2020)	89
Figure 5-7 : Maillage des mesures en LDV dans le sillage des maquettes (adapté de Duran-Garcia, 2020)	90
Figure 5-8 : Calibration des caméras à l'aide d'une mire tangentant la nappe LASER	92
Figure 5-9 : Schématisation de la synchronisation du LASER et des caméras	93
Figure 5-10 : Processus de détermination des vecteurs vitesse par PIV (adapté de Lavision, 2018)....	93
Figure 5-11 : Vue aérienne de la piste d'expérimentations de l'Université Gustave Eiffel	95
Figure 5-12 : Profil de rugosité de l'enrobé	95
Figure 5-13 : Dimensions des véhicules a) Renault Clio III et b) 4x4 Ford Ranger	96
Figure 5-14 : Granulométries des particules (diamètre de Stokes).....	97

Figure 5-15 : Disposition expérimentale des essais avec les véhicules (le schéma n'est pas à l'échelle)	99
Figure 5-16 : Véhicules utilisés pour les essais : a) Renault Clio II et b) Ford Ranger ; Mesures embarquées avec c) installation du granulomètre dans le 4x4 et d) aspiration des particules directement derrière le pneu.....	100
Figure 5-17 : Étapes filmées, lors du test n°17, de la formation du nuage de poussière avec a) accumulation des particules soulevées au niveau du soubassement, b) transport des particules dans les tourbillons de sillage et c) extension du nuage par advection et diffusion turbulente.....	102
Figure 5-18 : Vue aérienne de la piste d'essais avec camion	103
Figure 5-19 : Caractéristiques techniques du camion.....	104
Figure 5-20 : Disposition expérimentale des essais avec le camion (le schéma n'est pas à l'échelle)	105
Figure 5-21 : a) Passage du camion sur les particules avec visualisation de l'emplacement du Fidas 200 et du tuyau d'aspiration des poussières ; b) Nuage généré après le passage	106
Figure 5-22 : Forces et moments tels que mesurés par le moyeu dynamométrique.....	108
Figure 5-23 : Valeur moyennes des efforts verticaux F_z mesurés pour chaque test avec la Clio III ...	108
Figure 5-24 : (a) Évolution temporelle, pour le test n°52, de la vitesse du véhicule (courbe verte), de la force longitudinale (courbe bleue) et du moment vertical (courbe rouge) s'appliquant sur la roue du véhicule. Les courbes (b) et (c) présentent respectivement un zoom sur les évolutions de la force longitudinale et du moment vertical lors du passage du véhicule sur les particules.	109
Figure 5-25 : a) Évolutions, pour le test n°45, des concentrations en particules mesurées derrière le pneu en fonction du temps par le granulomètre optique ; b) Mise en évidence, pour le même test et pour la courbe PM10, des paramètres déterminés pour décrire chaque courbe.....	111
Figure 6-1 : a) Profil de vitesse au-dessus de l'échantillon I (S0K100) au point de mesure n°4 ($x=0,27m$) pour une vitesse d'écoulement $U_\infty=16m.s^{-1}$. b) Même graphique mais tracé en coordonnées inversées et semi-logarithmique où les points verts correspondent aux mesures situées dans la zone définie par la « loi de paroi » (Eq. (2.3))	118
Figure 6-2 : Épaisseurs de couche limite de référence, prises sur le plancher en PVC de la soufflerie, pour les trois premiers échantillons. Les valeurs indiquées correspondent, pour une même vitesse d'écoulement, aux variations entre les trois échantillons	119
Figure 6-3 : Épaisseurs de couche limites adimensionnées pour les cinq vitesses d'écoulement générées sur l'échantillon a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25	120
Figure 6-4 : Facteurs de forme des écoulements au-dessus des sols en fonction de la position de mesure. Les trois sols sont distingués par différents symboles. Les cinq vitesses sont distinguées par différentes couleurs.	121
Figure 6-5 : Vitesses de cisaillement en fonction des vitesses d'écoulement d'air pour le sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25	122

Figure 6-6 : Profils de vitesse en coordonnées adimensionnelles au point de mesure n°4 ($x=0,27m$) pour a) $U_\infty=4m/s$, b) $U_\infty=8m/s$, c) $U_\infty=12m/s$, d) $U_\infty=16m/s$ et e) $U_\infty=20m/s$	123
Figure 6-7 : a) Vitesse de cisaillement en fonction du diamètre équivalent en surface des particules. La zone ombragée correspond au domaine de la présente étude. La zone hachurée correspond à la probabilité d'envol des particules selon le critère de Shao et Lu (Eq. 2.13) caractérisé par la courbe rouge. B) Même graphique mais avec différents cadres pour distinguer les trois sols. Les frontières verticales des cadres correspondent à $d_{min}=d_{10}$ et $d_{max}=d_{80}$ (voir Figure 5-2)	124
Figure 6-8 : Évolution de la dégradation des sols en fonction du nombre de passages de pneu	126
Figure 6-9 : Observation au MEB de la microstructure post-compactage du sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25. Micrographies de Sediki (non publiées).....	127
Figure 6-10 : Granulométries des sols (initiale) et des particules arrachées pour a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25 (diamètre équivalent en surface)	129
Figure 6-11 : Distributions granulométriques mesurées (lignes pleines) et modélisées (Eq. (6.3), lignes pointillées) pour le sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25 (diamètre équivalent en surface)	131
Figure 6-12 : Exemple, pour $U_\infty = 8 m/s$, du processus de détermination de $p(\tau_R)$. a) Valeurs moyennes des fluctuations de vitesse au-dessus de l'échantillon ; b) Distribution des fluctuations de vitesse instantanées au point de mesure désigné par une croix verte ; c) PDF de τ_R déterminée à l'aide de l'Eq. (6.6)	134
Figure 6-13 : Distributions $p(\tau_R)$ pour la position $x=0,27m$ et pour a) $U_\infty=8m/s$ et b) $U_\infty=16m/s$. Les courbes pointillées correspondent aux valeurs moyennes qui sont par la suite implémentées dans le modèle d'émission de poussières	135
Figure 6-14 : Estimations des émissions de PM_{10} des trois sols pour 100, 1000 et 10000 passages de pneu et pour les deux vitesses $U_\infty=8m/s$ et $U_\infty=16m/s$	136
Figure 6-15 : Cercles de Mohr et contraintes mobilisées aux interfaces sol / pneus (tracé à l'aide des données de Sediki, 2018).....	139
Figure 6-16 : Évolutions des dégradations de surface des sols en fonction du nombre de passages du pneu lisse « L » et du pneu sculpté « S1 ».....	140
Figure 6-17 : Évolutions des dégradations de surface des sols en fonction du nombre de passages du pneu sculpté « S1 ». Les courbes pointillées correspondent au modèle de l'Eq. (6.9).....	142
Figure 6-18 : a) Relation entre la fonction f et le produit du pourcentage d'argile (g_1) et du pourcentage de sable (g_2) des quatres sols ; b) Comparaison entre le modèle de l'Eq. (6.13) et les mesures expérimentales.....	143
Figure 6-19 : Facteurs d'émission de PM_{10} lors de la circulation d'un camion de 47 tonnes. Comparaison du modèle de l'Eq. (6.15) avec celui de l'USEPA pour le sol a) S0K100, b) S50K50, c) S75K25 et d) LVE	144
Figure 7-1 : Module de la vitesse adimensionné mesuré avec LDV dans le sillage du camion 8x4 avec benne pleine dans le plan a) central, b) latéral gauche, c) latéral droit et avec benne vide dans le plan d)	

central, e) latéral gauche et f) latéral droit. La vitesse de l'écoulement est $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$ (adapté de Duran-Garcia, 2020).....	147
Figure 7-2 : Module de la vitesse adimensionné mesuré avec PIV dans le sillage du camion 8x4 avec benne pleine dans le plan a) central, b) latéral gauche, c) latéral droit et avec benne vide dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit. La vitesse de l'écoulement est $U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$	148
Figure 7-3 : Module de la vitesse adimensionné mesuré avec PIV pour $U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$ dans le sillage du tombereau avec benne vide dans le plan a) central, b) latéral gauche et c) latéral droit ; Les mêmes cartographies ont été mesurées avec LDV pour $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit.....	149
Figure 7-4 : Vitesse verticale adimensionnée v_u dans le plan médian à 8 m.s^{-1} pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration c) correspond au tombereau benne vide à 16 m.s^{-1} (adapté de Duran-Garcia, 2020).....	150
Figure 7-5 : Contraintes de Reynolds liées aux fluctuations longitudinales et verticales de vitesse dans le plan médian du camion 8x4. Mesures réalisées à 3 m.s^{-1} avec PIV pour la configuration a) benne pleine et b) benne vide ainsi que celles réalisées à 8 m.s^{-1} avec LDV pour la configuration c) benne pleine et d) benne vide. L'échelle des Figures a) et b) est inférieure à celle des Figures c) et d).	152
Figure 7-6 : Contraintes de Reynolds liées aux fluctuations longitudinales et verticales de vitesse dans le sillage du Tombereau. Mesures réalisées à 3 m.s^{-1} avec PIV dans le plan a) central, b) latéral gauche et c) latéral droit. Mesures réalisées à 8 m.s^{-1} avec LDV dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit. L'échelle des Figures a), b) et c) est inférieure à celle des Figures d), e) et f).	153
Figure 7-7 : Contraintes de Reynolds $\rho u'v'$ mesurées avec PIV dans le plan médian pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. Contraintes de Reynolds $\rho v'w'$ mesurées avec PIV dans le plan médian pour d) le camion 8x4 benne pleine, e) le camion 8x4 benne vide et f) le tombereau benne vide.....	155
Figure 7-8 : Distributions $p(\tau_R)$ sur la ligne $y^*=0,22$ du plan $z^*=0$ pour la configuration Tombereau vide (courbe bleue), 8x4 vide (courbe orange) et 8x4 pleine (courbe verte) ainsi que pour le plan $z^*=0,33$ pour la configuration Tombereau vide (courbe rouge) mesurées avec PIV.	156
Figure 7-9 : Fréquences d'apparition des balayages de forte intensité dans le plan médian à 8 m.s^{-1} pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration c) correspond au tombereau benne vide à 16 m.s^{-1} (adapté de Duran-Garcia, 2020).	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7-10 : Fréquences d'apparition des éjections de forte intensité dans le plan médian à 8 m.s^{-1} pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration c) correspond au tombereau benne vide à 16 m.s^{-1} (adapté de Duran-Garcia, 2020).	Erreur ! Signet non défini.
Figure 8-1 : Écart moyen des essais de répétabilité	160
Figure 8-2 : Évolution pour les essais de répétabilité du coefficient d'émission ξ en fonction de l'humidité relative de l'air	161

Figure 8-3 : Coefficients d'émissions des essais avec la Clio III sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames	162
Figure 8-4 : Analyse en Composantes Principales des résultats des essais Clio embarqué. a) Cercle des corrélations des différentes variables et b) visualisation des essais dans l'espace des corrélations. Chaque essai est désigné par : Type de particules-vitesse véhicule-concentration	163
Figure 8-5 : Coefficients d'émissions des essais avec le 4x4 sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames.....	164
Figure 8-6 : Écarts des coefficients d'émissions entre les essais avec la Clio III et ceux avec le 4x4. Les écarts sont calculés à l'aide de l'Eq. (8.1).	165
Figure 8-7 : Coefficients d'émissions des essais avec le camion 8x4 sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames	166
Figure 8-8 : Facteurs d'émission en fonction de la vitesse du véhicule et de la masse de particules par unité de surface pour les essais avec Clio et 4x4 Ford Ranger. a) Données expérimentales comparées avec celles de Gillies et al. (2005) obtenues avec une Dodge Neon (ligne pleine), un Ford Taurus (line pointillée) et un Van GMC C20 (ligne en tirets) ; b) Même résultats tracés en échelle semi-logarithmique and comparés avec les modèles de l'USEPA (Eq. (1.8) : lignes pointillées, Eq. (1.9) : ligne pleine). 168	
Figure 8-9 : Facteurs d'émission en fonction de la vitesse du camion Volvo FMX et de la masse de particules par unité de surface pour les essais sur a) Argile Verte, b) Limon Val d'Europe, c) Limon de Strasbourg et d) Limon Marche les Dames. Les résultats expérimentaux sont comparés avec ceux de Gillies et al. (2005) obtenus avec un camion M977 HEMTT (ligne brisée) et avec le modèle USEPA pour les routes publiques (Eq. (1.9), ligne verte).	170
Figure 8-10 : Comparaison entre les données expérimentales et le modèle de l'Eq. (8.3). Les symboles sont les mêmes que sur les Figures 8-8 et 8-9.	171
Figure 8-11 : Relation entre la visibilité moyenne et la concentration moyenne en PM_{10} sur le bas-côté de la route. Les données expérimentales sont comparées avec les modèles D'Almeida (1986), Dayan et al. (2008), Jugder et al. (2014), Baddock et al. (2014) et Camino et al. (2015). Ces modèles sont détaillés au Tableau 1-5.	172

Table des Tableaux

Tableau 1-1 : Recommandations de l’OMS (OMS, 2006) et du Parlement Européen (Parlement Européen, 2008) sur les seuils admissibles de PM _{2,5} et PM ₁₀ dans l’atmosphère	9
Tableau 1-2 : Quelques facteurs d’émission recommandés par l’Agence Américaine pour la Protection de l’Environnement pour les activités des chantiers de terrassement (adapté de USEPA, 1995)	12
Tableau 1-3 : Principaux effets sanitaires de l’inhalation de particules solides (ADEME, 2017)	17
Tableau 1-4 : Principaux effets des particules fines atmosphériques sur l’environnement (ADEME, 2017).....	18
Tableau 1-5 : Equations empiriques établies lors de précédentes études pour relier la concentration moyenne en PM ₁₀ (en µg/m ³) à la visibilité (V _i en km).	19
Tableau 3-1 : Détail de la classification (GTR, 2000).....	45
Tableau 3-2 : Conditions de préparation et de sollicitation des éprouvettes de Sediki, 2018	54
Tableau 4-1 : Caractéristiques des deux paires de faisceaux LASER du système LDV DANTEC Dynamics (DANTEC Dynamics, 2012).....	73
Tableau 5-1 : Propriétés des sols d’étude	80
Tableau 5-2 : Conditions de compactage et de dégradation des sols d’étude	82
Tableau 5-3 : Maillage vertical des points de mesure de la campagne expérimentale sur sols compactés	86
Tableau 5-4 : Maillage vertical des points de mesure de la campagne expérimentale sur sols dégradés	87
Tableau 5-5 : Récapitulatif des configurations étudiées en soufflerie avec LDV	88
Tableau 5-6 : Maillage vertical des points de mesure LDV en couche limite en aval des maquettes... ..	90
Tableau 5-7 : Récapitulatif des configurations étudiées en soufflerie avec PIV	91
Tableau 5-8 : Propriétés géotechniques des particules	98
Tableau 5-9 : Planning des essais d’envol de poussières sur piste	101
Tableau 5-10 : Configurations des essais réalisés avec le camion	107
Tableau 6-1 : Valeur des hauteurs de rugosité y ₀ (en mètres)	121
Tableau 6-2 : Paramètres du modèle de dégradation des sols (Eq. 6.1)	126
Tableau 6-3 : Paramètres caractérisant les profils de vitesses mesurés en soufflerie.....	132

Tableau 6-4 : Caractéristiques des camions et facteurs d'émission de poussières pour l'étude de Gillies et al. (2005).....	137
Tableau 6-5 : Propriétés géotechniques et paramètres de cisaillement des sols.....	139
Tableau 6-6 : Paramètres du modèle de dégradation de surface des sols par le pneu sculpté (Eq. (6.9))	141
Tableau 7-1 : Valeur moyenne et écart type de la distribution des rapports v'/u' pour chaque plan mesuré avec LDV	154

Nomenclature

Acronymes

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CTDE	Convective Turbulent Dust Emission (émission de poussière par turbulence convective)
DRX	Diffraction aux Rayons X
ESTACA	Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile
FNTF	Fédération Nationale des Travaux Publics
GTR	Guide des Terrassements Routiers
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplification de la lumière par émission stimulée de radiation)
LDV	LASER Doppler Velocimetry (Vélocimétrie LASER par effet Doppler)
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MSCE	Mécanique des Structures Composites et Environnement
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OPN	Optimum Proctor Normal
PDF	Probability Density Function (fonction de densité de probabilité)
PIV	Particle Image Velocimetry (vélocimétrie par image de particules)
PIM	Porosimétrie par Intrusion de Mercure
QUAD	QUalité de l'Air et Dépollution
RSD	Règlement Sanitaire Départemental
SETRA	Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SPTF	Syndicat Professionnel des Terrassiers de France
TSD	Total Suspended Dust (concentration totale des poussières en suspension)
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agence Américaine de Protection de l'Environnement)
VKT	Vehicle Kilometer Travelled (kilomètres parcourus par le véhicule)

Symboles et unités

Les différentes variables utilisées dans ce document sont présentées ci-dessous avec leurs unités exprimées selon le Système International (longueurs en mètres, masses en kilogrammes, durées en secondes, angles en radians). Dans le corps du texte, certaines d'entre elles seront exprimées selon une unité plus appropriée aux ordres de grandeur étudiés. Par exemple, les concentrations massiques en particules dans l'air ambiant seront souvent exprimées en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et les vitesses des véhicules en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Notations latines

a	Teneur en argile du sol	(%)
A	Paramètre sans dimension du modèle de Bagnold	(-)
A_c	Surface totale du chantier	(m ²)
A_h	Aire de contact humide entre deux grains adjacents du sol	(m ²)
A_N	Constante du modèle de Shao et Lu ($\approx 0,0123$)	(-)
c	Cohésion du sol	(Pa)
c_a	Adhésion sol / matériau	(Pa)
d	Diamètre des particules	(m)
d_c	Durée totale du chantier	(s)
d_X	Ouverture du tamis par lequel passent X% des particules du sol	(m)
D	Dégradation de surface du sol	(kg.m ⁻²)
DPV	Distance parcourue par le véhicule	(m)
e	Indice des vides du sol ($\frac{V_v}{V_s}$)	(-)
e_v	Taux d'évaporation de l'eau	(m.s ⁻¹)
e_w	Ratio d'humidité du sol ($w \times G_s$)	(-)
E	Quantité totale de poussières émises	(kg)
EC	Coefficient d'extinction de la lumière	(m ⁻¹)
EF	Facteur d'émission de poussières du véhicule en circulation	(kg.m ⁻¹)
E_{ff}	Efficacité du contrôle des poussières par arrosage	(%)
f	Force de soulèvement qui s'exerce sur les particules	(N)
f_b	Facteur de pondération des émissions de poussière par les bavettes	(-)

f_c	Fréquence d'acquisition des caméras en PIV	(Hz)
f_i	Force de cohésion inter-particulaires	(N)
\bar{f}_l	Valeur médiane de la distribution des forces inter-particulaires	(N)
F_c	Force d'attraction capillaire	(N)
F_{V+H}	Forces de Van der Waals et électrostatiques	(N)
g	Accélération de la gravité	(m.s ⁻²)
G_s	Poids spécifique des grains du sol ($\frac{\rho_s}{\rho_{eau}}$)	(-)
h_m	Hauteur de la maquette	(m)
h_v	Hauteur de la veine d'essais	(m)
H	« Hole size » de la méthode des quadrants ($\frac{ uvv' }{ u'v' }$)	(-)
H_f	Facteur de forme	(-)
HR	Humidité relative de l'air	(%)
i	Débit surfacique d'arrosage	(m ³ .m ⁻²)
IP	Indice de Plasticité d'un sol	(%)
l_m	Largeur de la maquette	(m)
l_r	Largeur des roues du véhicule	(m)
l_v	Largeur de la veine d'essais	(m)
L_c	Longueur caractéristique	(m)
L_m	Longueur de la maquette	(m)
L_v	Longueur de la veine d'essais	(m)
m	Masse totale du sol	(kg)
m_a	Masse d'air dans le sol	(kg)
m_s	Masse des particules du sol	(kg)
m_w	Masse de l'eau du sol	(kg)
M	Masse du véhicule	(kg)
M_R	Module de rupture d'une croûte formée à la surface d'un sol	(Pa)
n	Porosité du sol ($\frac{V_v}{V_t}$)	(-)

N	Nombre de passages du pneu sur le sol	(-)
N_d	Nombre de particules par unité de volume	(m ⁻³)
p	Quantité de mouvement	(kg.m.s ⁻¹)
P_{re}	Nombre de jours avec précipitations supérieures à 0,254mm	(-)
P_{Hg}	Pression d'injection du mercure	(Pa)
PM_x	Concentration massique en particules de taille inférieure à X μm	(kg.m ⁻³)
PN	Concentration en nombre de particules solides	(m ⁻³)
R	Nombre de roues du véhicules	(-)
R₁	Rayon extérieur du ménisque d'eau	(m)
R₂	Rayon intérieur du ménisque d'eau	(m)
R_a	Rugosité moyenne arithmétique	(m)
Re_m	Nombre de Reynolds lié à la hauteur de maquette ($\frac{U_{\infty} \times h_m}{\nu}$)	(-)
Re_x	Nombre de Reynolds local ($\frac{U_{\infty} \times x}{\nu}$)	(-)
R_{f*}	Nombre de Reynolds lié à la vitesse seuil d'envol ($\frac{U_{*td} \times d}{\nu}$)	(-)
R_q	Rugosité moyenne quadratique	(m)
s	Teneur en limon du sol	(%)
S_m	Section frontale de la maquette ($h_m \times l_m$)	(m ²)
Sr	Degré de saturation du sol	(%)
S_{tk}	Nombre de Stokes de la particule ($\frac{1}{18} \frac{\rho_s d U_0}{\mu L_c}$)	(-)
t	Durée de l'activité	(s)
t_{hj}	Trafic horaire journalier	(véhicules.s ⁻¹)
T	Tension superficielle de l'eau	(N.m)
T_p	Temps de réponse des particules	(s)
u'	Fluctuation de la composante longitudinale de la vitesse	(m.s ⁻¹)
u[*]	Fluctuation longitudinale de la vitesse adimensionnée par U_{∞} ($\frac{u'}{U_{\infty}}$)	(m.s ⁻¹)
U	Composante longitudinale de la vitesse du fluide	(m.s ⁻¹)
U_s	Vitesse d'échantillonnage du granulomètre optique	(m.s ⁻¹)

U₀	Vitesse du vent	(m.s ⁻¹)
U₊	Vitesse longitudinale adimensionnée par $U_{\tau} (\frac{U}{U_{\tau}})$	(-)
U*	Vitesse longitudinale adimensionnée par $U_{\infty} (\frac{U}{U_{\infty}})$	(-)
U_τ	Vitesse de cisaillement du fluide en surface	(m.s ⁻¹)
U_{τtd}	Vitesse de cisaillement au seuil d'envol des particules d'un sol sec	(m.s ⁻¹)
U_{τtw}	Vitesse de cisaillement au seuil d'envol des particules d'un sol humide	(m.s ⁻¹)
U_∞	Vitesse uniforme de l'écoulement dans la direction longitudinale	(m.s ⁻¹)
v'	Fluctuation de la composante verticale de la vitesse	(m.s ⁻¹)
v'[*]	Fluctuation verticale de la vitesse adimensionnée par $U_{\infty} (\frac{v'}{U_{\infty}})$	(m.s ⁻¹)
V	Composante verticale de vitesse du fluide	(m.s ⁻¹)
V_{véhicule}	Vitesse du véhicule	(m.s ⁻¹)
V_a	Volume de l'air dans le sol	(m ³)
V_i	Visibilité	(m)
V_s	Volume des particules du sol	(m ³)
V_t	Volume total du sol	(m ³)
V_v	Volume des vides du sol	(m ³)
V_w	Volume de l'eau dans le sol	(m ³)
V*	Vitesse verticale adimensionnée par $U_{\infty} (\frac{V}{U_{\infty}})$	(-)
w	Teneur en eau massique du sol	(%)
w'	Fluctuation de la composante transversale de la vitesse	(m.s ⁻¹)
w'[*]	Fluctuation transversale de la vitesse adimensionnée par $U_{\infty} (\frac{w'}{U_{\infty}})$	(m.s ⁻¹)
w_L	Limite de liquidité du sol	(%)
w_{OPN}	Teneur en eau optimale de l'essai Proctor Normal	(%)
w_p	Limite de plasticité du sol	(%)
w_s	Limite de retrait du sol	(%)
W	Composante transversale de vitesse du fluide	(m.s ⁻¹)

W_*	Vitesse transversale adimensionnée par U_∞ ($\frac{W}{U_\infty}$)	(-)
y_+	Ordonnée adimensionnelle ($\frac{y \times U_\tau}{\nu}$)	(-)
y_0	Hauteur de rugosité	(m)

Notations grecques

α	Angle de rupture en cisaillement du sol	(rad)
β	Angle de repos des grains du sol	(rad)
γ_{SL}	Coefficient dimensionnel du modèle de Shao et Lu	(kg.s ⁻²)
δ	Épaisseur de couche limite	(m)
δ_a	Angle de frottement à l'interface sol / matériau	(rad)
δ_{PVC}	Épaisseur de couche limite sur le plancher de la soufflerie	(m)
δ_{vc}	Épaisseur de sous-couche visqueuse	(m)
Δ	Différence entre la granulométrie des particules et celle du sol initial	(-)
η_{asp}	Efficacité d'aspiration des poussières du granulomètre optique	(%)
η_{sample}	Efficacité d'échantillonnage du granulomètre optique ($\eta_{asp} \times \eta_{trans}$)	(%)
η_{trans}	Efficacité de transport des poussières dans le tuyau du granulomètre	(%)
θ	Angle entre la direction du vent et la direction d'échantillonnage	(rad)
θ_{Hg}	Angle de contact du mercure avec un matériau	(rad)
θ_w	Teneur en eau volumique du sol	(%)
κ	Constante de von Kármán ($\approx 0,41$)	(-)
μ	Viscosité dynamique de l'air	(kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
ν	Viscosité cinématique de l'air	(m ² .s ⁻¹)
ξ	Coefficient d'émission de poussières en embarqué	(kg.s.m ⁻³)
ρ_a	Masse volumique de l'air	(kg.m ⁻³)
ρ_d	Masse volumique sèche du sol	(kg.m ⁻³)
ρ_{dOPN}	Masse volumique sèche à l'optimum de l'essai Proctor Normal	(kg.m ⁻³)
ρ_{eau}	Masse volumique de l'eau	(kg.m ⁻³)

ρ_s	Masse volumique des grains solides	(kg.m ⁻³)
σ_{fi}	Écart type de la distribution des forces inter-particulaires	(N.m ⁻¹)
σ_{H2O}	Tension superficielle de l'eau	(N.m ⁻¹)
σ_{Hg}	Tension superficielle du mercure	(N.m ⁻¹)
τ_0	Contrainte de cisaillement à la paroi	(Pa)
τ_{max}	Résistance au cisaillement du sol	(Pa)
τ_{mob}	Contrainte de cisaillement mobilisée à l'interface pneu/sol	(Pa)
τ_R	Contrainte de Reynolds	(Pa)
Φ	Angle de frottement interne du sol	(°)
φ	Flux total d'émission de poussières	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
φ_d	Flux d'émission des particules de diamètre d	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
Φ	Diamètre des pores du sol	(m)
Ψ_m	Potentiel matriciel de l'eau du sol	(Pa)
ϵ	Coefficient de blocage de la maquette en soufflerie ($\frac{h_m \times l_m}{h_v \times l_v}$)	(-)

Glossaire

Agent tensioactif : Produit abaissant la tension superficielle de l'eau, lui permettant une meilleure liaison avec la surface des particules du sol.

Advection : Déplacement d'une masse d'air dans le sens horizontal.

Camion 8x4 : Engin de transport de matériaux à cabine avancée (moteur sous la cabine) possédant 8 roues dont 4 sont motrices.

Diamètre aérodynamique d'une particule : Diamètre d'une sphère de densité unitaire ayant la même vitesse de sédimentation que la particule.

Diffusion turbulente : Phénomène de transport de quantité de mouvement dû à l'aspect aléatoire et chaotique de l'écoulement du fluide.

Diffusomètre optique : Appareil émettant une onde LASER et mesurant la diffusion de l'onde réfléchi. Cette diffusion permet de quantifier l'obstruction de visibilité et de connaître la valeur de la portée optique météorologique.

Forces électrostatiques : Forces liées à l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement comme par exemple les ions ou les particules élémentaires (électron, proton...).

Forces de Van Der Waals : Forces d'attraction entre atomes et molécules. Leur formulation est complexe et rentre dans le cadre de l'électrodynamique quantique. Elles représentent la somme de l'énergie interne (forces de Keesom), des effets d'induction (forces de Debye) et des effets de dispersion (forces de London) lors de l'interaction interatomique.

Humidité Relative : Rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau de l'air et la pression de vapeur saturante. Autrement dit, il s'agit du contenu en vapeur d'eau de l'air par rapport à sa capacité maximale à en contenir pour des conditions de température et de pression données.

Limon : Formation sédimentaire caractérisée par des particules granulaires dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables, c'est-à-dire de diamètre compris entre 2 μm et 80 μm . La classification des limons vis-à-vis de la taille des particules n'est pas optimale car il peut exister des plaquettes d'argile de taille supérieure à 2 μm et des particules de limon de taille inférieure à 2 μm . Dans le présent document, on favorise la classification en taille car elle permet une meilleure caractérisation des aérosols. Il est à noter qu'un sol majoritairement limoneux peut-être qualifié de limon, même s'il contient de l'argile.

Optimum Protor : État de densité maximale d'un sol après compactage à une énergie fixée par la norme NF P 94-093. Caractérisé par la teneur en eau optimale w_{OPN} et la masse volumique sèche ρ_{dOPN} .

pH : Potentiel hydrogène qui caractérise l'acidité du sol.

Portée Optique Météorologique : Distance que doit effectuer dans l'atmosphère un faisceau de rayons lumineux parallèles pour que l'intensité du flux lumineux soit réduite à 5% de sa valeur originale.

Potentiel de succion matricielle : Dépression correspondant à la succion de l'eau exercée par la matrice granulaire. Caractérise la capacité du milieu à retenir l'eau à travers les forces de capillarité et les forces d'attraction électrostatique entre les charges négatives des colloïdes du sol et les charges positives de l'eau.

Route non revêtue : Chaussée ne possédant pas de couche d'enrobé en surface. La circulation des véhicules s'effectue donc directement sur le sol ou sur une couche de matériau granulaire, ce qui peut entraîner d'importantes émissions de poussières.

Sédimentométrie : Essai d'analyse granulométrique sur les particules de taille inférieure à 80 μm . La taille des particules est estimée en mesurant leur vitesse de sédimentation et en faisant l'hypothèse qu'elles sont sphériques.

Surface Spécifique : Correspond au rapport entre la surface et la masse d'une particule, communément exprimé en $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

Tombereau : Engin de génie civil permettant le transport de matériaux et caractérisé par une remorque qui peut basculer en arrière. Il y a deux principaux types de tombereaux : les tombereaux articulés, dont la cabine peut se mouvoir indépendamment de la remorque, et les tombereaux rigides. Ces derniers sont également connus sous le nom de *dumpers*.

Vortex : Région d'un fluide dans laquelle l'écoulement est principalement en mouvement de rotation autour d'un axe. Également nommé *tourbillon*.

Introduction

L'amélioration de la qualité de l'air est un sujet de préoccupation de plus en plus important à l'époque actuelle. Dans ce contexte, la limitation de l'envol des poussières générées par les activités humaines s'avère être un objectif primordial pour des questions environnementales et de santé publique. La dégradation des sols est un facteur majeur de mise en suspension de ces poussières dans l'atmosphère. Cette dégradation de surface est notamment causée par la circulation des véhicules sur des routes non revêtues. En effet, une étude basée sur des données d'émissions d'aérosols dans l'atmosphère au sud des États-Unis et au nord du Mexique a montré que la circulation des véhicules sur ce type de routes était responsable de 30% à 50% des émissions des particules fines solides dans cette région (Kuhns et al., 2003 ; Kuhns et al., 2005). A cause du contact sol/roue, un arrachement puis une déstructuration des agrégats de particules de sol peuvent se produire. Cette déstructuration entraîne la formation de particules fines en surface du sol qui sont alors sujettes à l'envol lors de passages des véhicules, à cause des turbulences qu'ils génèrent dans leur sillage et des processus aérodynamiques liés au vent (Gillies et al., 2005 ; Thenoux et al., 2007 ; Williams et al., 2008 ; Flores-Márques et al., 2014 ; Gérardin et Midoux, 2015).

Selon les propriétés minéralogiques du sol, les poussières qui en proviennent peuvent contenir une certaine quantité de $PM_{2,5}$ (particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $2,5 \mu m$). Par exemple, des mesures lors d'une tempête de poussières au Sahara en 2002 ont montré que les $PM_{2,5}$ représentaient environ 16% de la concentration massique de l'ensemble des particules en suspension (Alastuey et al., 2005). Lorsqu'elles sont inhalées par l'homme, elles peuvent pénétrer dans l'appareil respiratoire et entraîner une diminution des capacités pulmonaires. Durant l'année 2000, l'OMS a estimé que l'exposition aux $PM_{2,5}$ avait été à l'origine de plus de deux millions de décès prématurés dans le monde, dont 42 000 en France (Gentilini, 2009). L'évaluation plus récente de Santé Publique France est de 48 000 décès par an (Pascal et al., 2016). Sur la base de la valeur de vie statistique (somme d'argent qu'une société est prête à payer pour réduire l'exposition aux risques de chacun de ces membres), le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD, 2012) estime à environ 20 milliards d'euros par an le coût de cette mortalité. Le coût de la morbidité associée aux particules fines (13 000 hospitalisations par an en France) est quant à lui évalué à un peu moins de 10 milliards d'euros (CGDD, 2012). La Figure 0-1 présente une illustration de la taille de ces particules.

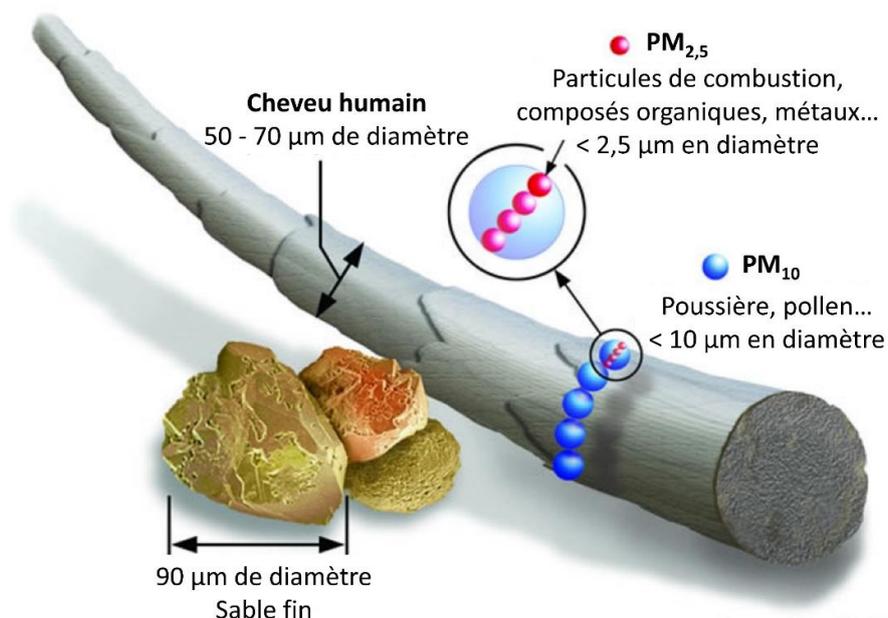


Figure 0-1 : Illustration de la taille des particules fines (adapté de Barnes et Connor, 2014)

La présence de poussières en suspension dans l'atmosphère entraîne également une réduction de la visibilité (Chepil et Woodruff, 1957 ; Patterson et Gillette, 1977 ; Baddock et al., 2014). Cela engendre d'importants risques au niveau de la sécurité, particulièrement dans les endroits où circulent des véhicules (Banque Mondiale, 2011 ; Lankarani et al., 2014 ; Ashley et al., 2015 ; Call et al., 2018 ; Bhattachan et al., 2019).

Sur les chantiers de terrassement, les activités sont fortement émettrices de poussières (Muleski et al., 2005 ; CITEPA, 2020-a ; CITEPA, 2020-b ; Noh et al., 2018). Il s'agit d'ailleurs du deuxième facteur de préoccupation des professionnels du secteur de la construction, juste derrière l'élimination des déchets (Serpell et al., 2013). L'une des principales origines des émissions est la circulation des engins sur les pistes (Figure 0-2). Pour limiter l'envol, la méthode la plus couramment employée est l'arrosage abondant du sol. Il représentait environ 12 litres d'eau par m³ de terrassements en France en 2010 (SPTF, 2011). Cela augmente le coût des chantiers et entraîne un gaspillage important d'eau. Les professionnels du secteur sont conscients de cette problématique. C'est la raison pour laquelle une convention a été signée en 2009 par la Fédération Nationale des Travaux Publics, le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France, l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française et la Fédération Syntec-Ingénierie (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 2009). Elle engageait les signataires à réduire de 50% la consommation d'eau sur les chantiers de terrassement à l'horizon 2020. Cette problématique est essentielle car les travaux de terrassement sont une activité majeure (310 000 emplois dans les travaux publics en France dont environ 45 000 dans les terrassements) et vont continuer à l'être dans le futur, notamment vis-à-vis des 25 millions de kilomètres de routes qu'il est prévu de construire d'ici 2050 dans le monde (Laurance et al., 2014).



Figure 0-2 : Poussière générée par la circulation d'un tombereau articulé sur un chantier de terrassement (Walker, 2012)

Objectifs de la thèse

La présente thèse est motivée par la nécessité de quantifier et de limiter l'envol des poussières dû à la circulation des engins sur les chantiers de terrassement. Par ailleurs, afin de préserver les ressources en eau, il est nécessaire de limiter au maximum l'arrosage des sols sur ces chantiers. Il est également question de réduire les vas-et-viens des engins nécessaires pour assurer cet arrosage afin de limiter les consommations de carburant, particulièrement pour les chantiers éloignés des points d'eau. Pour atteindre ces objectifs opérationnels, il est nécessaire d'étudier le problème à la source et donc de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des sols et d'envol des poussières. Le problème sera étudié à l'échelle de la structure du sol à l'aide de la mécanique des sols non saturés. Le mécanisme d'initiation de l'envol des particules sera également étudié en considérant les phénomènes aérodynamiques à l'interface sol-atmosphère et dans le sillage des engins circulants sur les pistes. Ainsi, ce projet de thèse a quatre objectifs majeurs :

1. Évaluer le mécanisme de dégradation et d'évolution de la rugosité de surface d'un sol en fonction de sa mise en œuvre et des sollicitations qu'il subit ;
2. Étudier l'influence de cette dégradation sur l'interaction sol/atmosphère et en particulier sur l'envol des particules présentes en surface ;
3. Caractériser le transport des poussières au cœur des écoulements générés dans le sillage des engins circulants sur les pistes ;
4. Mettre en évidence le mécanisme d'envol des poussières lié à la circulation d'un véhicule.

Intérêts de l'étude

Ces travaux doivent permettre une meilleure compréhension du mécanisme d'envol des poussières sur les chantiers afin d'optimiser la gestion de l'eau nécessaire à leur abattement. Il s'agit de mettre en évidence les processus qui conduisent à une augmentation de la concentration de poussières en suspension lors de la circulation des engins sur les pistes. A partir d'un certain seuil, qu'il s'agit de quantifier, cette concentration de poussières va significativement atténuer la visibilité, ce qui va entraîner la nécessité de déclencher l'arrosage des pistes. L'idée est ici de pouvoir proposer des solutions permettant de retarder le moment où il sera nécessaire d'arroser et donc d'envisager des économies d'eau.

Une meilleure connaissance des mécanismes d'émissions de poussières doit également permettre de prévoir à l'avance les quantités d'eau qui seront nécessaires durant le chantier.

Organisation du manuscrit

Ce document est composé de trois parties qui se divisent en huit chapitres :

La **partie I** contextualise les travaux de thèse en présentant une revue de la littérature. Elle se décompose en trois chapitres.

Le **chapitre 1** présente les problématiques liées aux envois de poussières sur les chantiers. Après quelques définitions et une présentation des réglementations en vigueur, ce chapitre identifie les sources d'émission. Une attention plus particulière est portée sur la problématique de la présente thèse, à savoir la circulation des engins sur les pistes des chantiers de terrassement. Les nuisances liées à la présence de particules fines en suspension dans l'atmosphère sont détaillées, ainsi que les moyens à disposition pour les atténuer.

Le **chapitre 2** s'intéresse aux conditions aérodynamiques d'envol des poussières, que ce soit par le vent ou par les turbulences générées par la circulation des engins sur les pistes. L'initiation de l'envol des particules à l'interface sol/atmosphère fait l'objet d'une description détaillée.

Le **chapitre 3** aborde la partie « géotechnique » de cette thèse. Les propriétés et la mise en œuvre du sol sont décrites. Ces paramètres déterminent la manière dont sa surface va se dégrader sous les sollicitations du trafic. Ce chapitre décrit le mécanisme de formation des poussières à travers cette dégradation. Finalement, un bilan de l'état de l'art est présenté afin de mettre en évidence les limites des connaissances à l'heure actuelle et l'intérêt des travaux de cette thèse.

La **partie II** présente les moyens à disposition et les méthodes adoptées pour réaliser ces travaux de recherche. Elle se décompose en deux chapitres.

Le **chapitre 4** détaille les dispositifs expérimentaux et le **chapitre 5** décrit la méthodologie.

La **partie III** présente les résultats obtenus. Cette partie se décompose en trois chapitres dans lesquels les résultats sont discutés vis-à-vis des objectifs de recherche listés précédemment.

Le **chapitre 6** traite de la mise en œuvre du sol, de l'évolution de sa dégradation par le trafic et de l'influence de ces deux mécanismes sur l'interaction sol/atmosphère. Il s'agit de quantifier l'apparition des particules lié à la déstructuration du sol et d'étudier l'initiation de l'envol de ces particules par les écoulements d'air en proche surface.

Le **chapitre 7** présente l'étude des écoulements d'air dans le sillage de maquettes d'engins de chantiers menée en soufflerie avec des techniques optiques non intrusives. Les discussions portent sur les turbulences générées par les camions et sur leur influence dans le maintien en suspension des particules.

Le **chapitre 8** analyse les mécanismes qui régissent la mise en suspension de particules par la circulation d'un véhicule. L'étude est menée en tenant compte des paramètres physiques (type et quantité de particules au sol, géométrie du véhicule), mécaniques (vitesse du véhicule, dynamique de contact pneu/surface) et environnementaux (vent, humidité relative et température de l'air).

Finalement, les conclusions générales tirées de ces travaux sont présentées et des perspectives sont proposées.

La Figure 0-3 schématise l'organisation du manuscrit décrite ci-dessus.

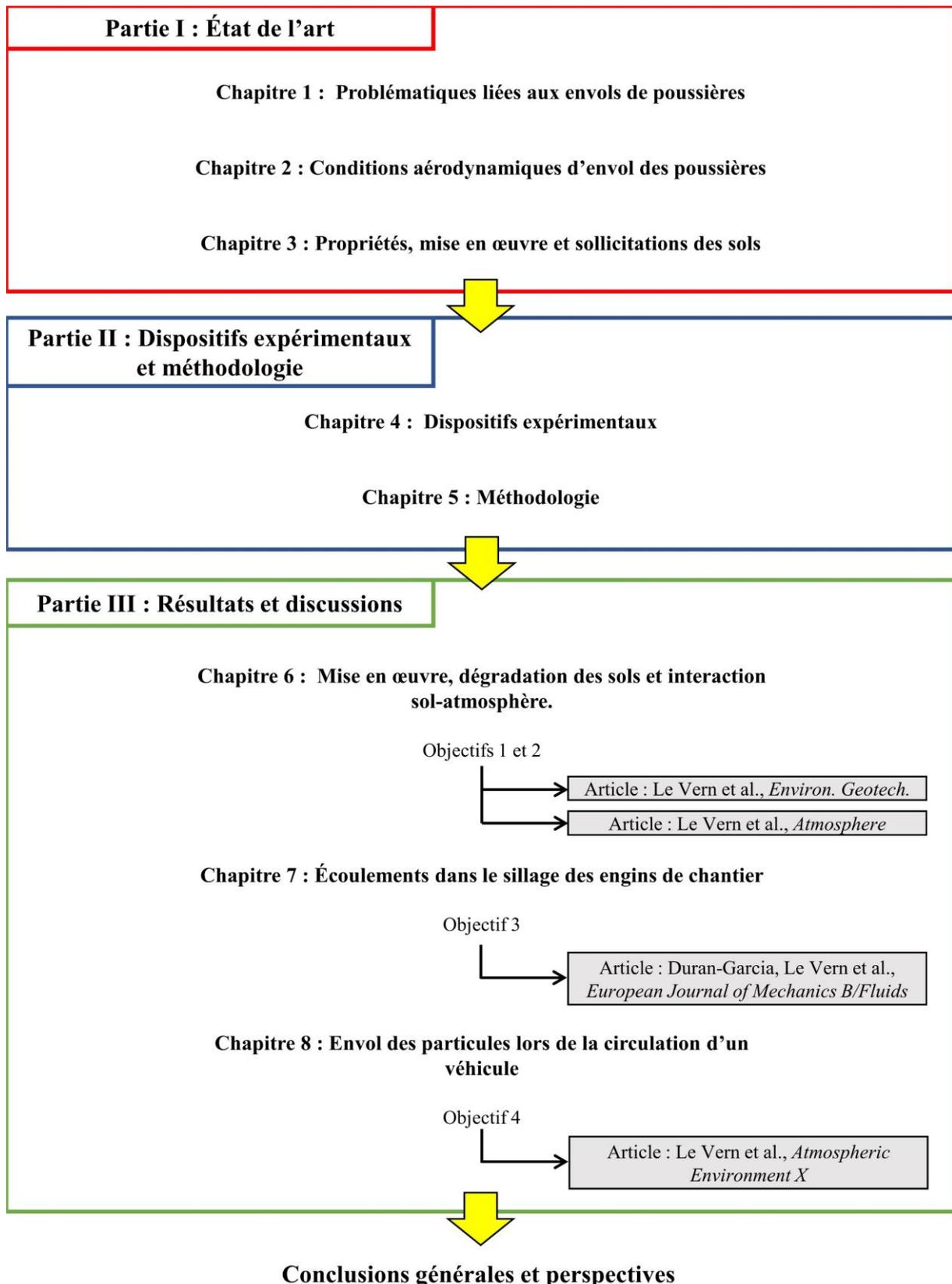


Figure 0-3 : Organisation du manuscrit

Partie I : État de l'art

Chapitre 1 : Problématiques liées aux envols de poussière

1.1 Poussière : définition et réglementation

Selon l'article R4222-3 du Code du Travail français, « les poussières sont des petites particules solides, dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 100 μm , qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps ». Les particules solides présentes dans l'atmosphère sont généralement désignées par le sigle PM (Particulate Matter) suivi du diamètre aérodynamique des particules¹. Ainsi, PM₁₀ correspond aux particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm et PM_{2,5} à celles de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm . Une poussière est ici caractérisée par son diamètre « aérodynamique » qui ne correspond pas au diamètre géométrique de la particule mais plutôt à celui d'une sphère de densité unitaire ayant la même vitesse de sédimentation que ladite particule. Cette notion permet de standardiser la forme et la densité des particules afin de comparer leur comportement aérodynamique (Kulkarni et al., 2011). Les poussières minérales ont une forte densité mais également une forme très irrégulière. Certains auteurs considèrent que leur diamètre aérodynamique est très proche de leur diamètre dit « géométrique » (Baron et Willeke, 2005). Il faut néanmoins manier avec prudence le concept de « diamètre géométrique » qui n'a pas véritablement de sens physique pour une particule non sphérique. D'une manière générale, les PM atmosphériques sont quantifiées par leur concentration massique par unité de volume d'air (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Il est également possible de mesurer les concentrations en nombre, notées PN, généralement exprimées en nombre de particules par centimètre cube. La présence de ces particules dans l'air génère des nuisances qui seront détaillées plus loin dans ce document. Pour ce qui est des enjeux sanitaires, des seuils de concentration massiques en PM₁₀ et en PM_{2,5} sont définis par l'Organisation Mondiale de la Santé et par le Parlement Européen (Tableau 1.1) pour les environnements extérieurs.

	OMS (OMS, 2006)		Directives européennes (Parlement Européen, 2008)	
	Moyenne annuelle ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Moyenne journalière ^a ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Moyenne annuelle ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Moyenne journalière ^b ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
PM _{2,5}	10	25	25	-
PM ₁₀	20	50	40	50

^a A ne pas dépasser plus de 3 jours par an
^b A ne pas dépasser plus de 35 jours par an

Tableau 1-1 : Recommandations de l'OMS (OMS, 2006) et du Parlement Européen (Parlement Européen, 2008) sur les seuils admissibles de PM_{2,5} et PM₁₀ dans l'atmosphère

En France, les directives européennes s'appliquent. Pour ce qui est du monde professionnel, l'article R4222-10 du Code du Travail impose de ne pas dépasser une concentration en PM₁₀ de 5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ inhalée par un travailleur sur une période de huit heures consécutives. Cette valeur est beaucoup plus élevée que les seuils établis par l'OMS. Il s'agit d'une législation pour des travaux dans des locaux à pollution spécifique, c'est-à-dire des lieux cloisonnés dans lesquels des polluants sont émis (gaz, poussières...). Elle ne s'applique pas pour des activités en plein air comme les chantiers de terrassement, même si ces

¹ Plus précisément, le terme PM_X désigne les particules passant un orifice qui présente un degré de 50% d'efficacité de séparation des particules d'un diamètre aérodynamique de X μm .

derniers sont une source importante d'émissions de particules fines solides. Ce dernier point sera analysé par la suite.

Les émissions de poussières des chantiers de terrassement doivent normalement être quantifiées au préalable dans une Evaluation des Risques Sanitaires (ERS). Celle-ci doit être réalisée dans le cadre d'une « étude d'impact d'un chantier de construction », comme stipulé par la directive 2011/92/UE du Parlement Européen. Dans les faits, ces émissions sont très difficiles à quantifier car elles proviennent de sources diffuses et ne sont donc généralement pas prises en compte dans l'étude d'impact (ADEME, 2017). On peut toutefois noter que l'article 96 du Règlement Sanitaire Départemental (RSD, 1978), intitulé *Protection des lieux publics contre la poussière*, stipule que « [...] les travaux de plein air s'effectuent de manière à ne pas disperser de poussière dans l'air, ni porter atteinte à la santé ou causer une gêne pour le voisinage. ». Cet article reste cependant très vague. Il ne quantifie pas ce qui constitue une « atteinte à la santé » ni ne décrit ce à quoi correspond une « gêne pour le voisinage ».

Un vide juridique subsiste en ce qui concerne les émissions de poussière sur les chantiers de terrassement. Il apparaît néanmoins primordial de limiter ces émissions pour au moins deux raisons. D'une part, ce vide juridique n'est peut-être que temporaire et, d'autre part, il est de la responsabilité sociétale des entreprises de réduire l'envol des poussières car elles sont garantes de la santé et de la sécurité de leurs salariés. Les sources d'émission de celles-ci sont détaillées dans la partie suivante.

1.2 Sources d'émissions

Dans cette partie, nous nous intéressons aux différentes origines possibles des poussières. Cela nous permettra dans un second temps de nous focaliser sur les émissions liées au secteur de la construction, et plus particulièrement sur les chantiers de terrassement qui font l'objet de la présente thèse.

1.2.1 Origines des poussières

Les poussières peuvent avoir différentes origines (CITEPA, 2020-a) :

- Biologique : pollens, bactéries, champignons ;
- Chimique : les particules se forment par réaction chimique. Cela entraîne généralement la formation de Particules Ultra-Fines (PUF, correspondant à $PM_{0,1}$) ;
- Mécanique : effritement, érosion, broyage, concassage, ...

Ici, on s'intéresse plus particulièrement aux origines mécaniques des poussières à travers l'effritement et l'érosion des sols. Elles peuvent être naturelles (érosion éolienne) ou résulter des activités humaines. D'après le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA, 2020-a), les activités humaines les plus émettrices de particules fines solides sont le labour, le domaine de la construction (chantiers et BTP), l'exploitation des carrières et la combustion (combustibles et biomasse). Le secteur de la construction, et plus particulièrement celui des chantiers de terrassement, va faire l'objet d'une attention plus particulière dans le paragraphe suivant.

1.2.2 Impact des chantiers de terrassement sur les émissions

Le dernier rapport d'analyse SECTEN (SECTeurs Economiques et éNergie) du CITEPA estime que pour l'année 2018 en France, le secteur de la construction était responsable de 18% (138 kt)² des émissions globales de poussières, de 13% (27 kt) des émissions de PM₁₀ et de 7% (10 kt) des émissions de PM_{2,5} (CITEPA, 2020-a). La Figure 1-1 montre que les émissions de poussières (TSP : Total Suspended Particles) d'une manière générale (Figure 1-1-a) et de PM₁₀ en particulier (Figure 1-1-b) ont été fortement réduites dans le secteur de la construction entre 2003 et 2009 (passage de 225,5 à 119,5 kt pour les TSP et de 47,3 à 23,7 kt pour les PM₁₀). Cette baisse est imputée avant tout à des raisons économiques ayant entraîné une diminution de l'activité dans ce secteur (CITEPA, 2020-a). Depuis 2009, les émissions oscillent entre 114 et 146 kt pour les TSP et entre 29 et 23 kt pour les PM₁₀. En ce qui concerne les PM₁₀, les émissions du secteur de la construction sont aujourd'hui équivalentes à celles de l'industrie manufacturière alors qu'en 1990 elles étaient 1,6 fois plus faibles.

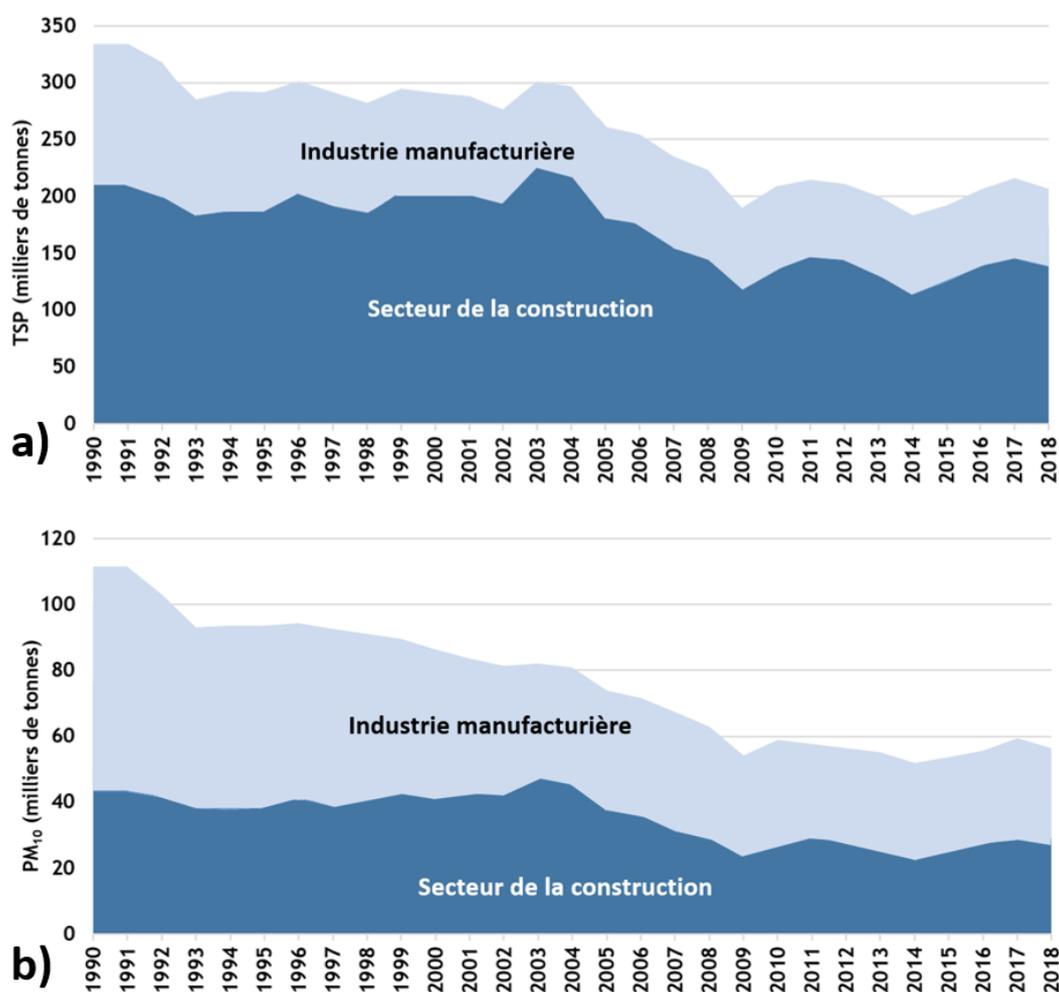


Figure 1-1 : Répartition en France métropolitaine des émissions des secteurs de l'industrie manufacturière et de la construction concernant a) l'ensemble des particules en suspension et b) les PM₁₀ (adapté de CITEPA, 2020-a)

² kt = kilotonne

La part des chantiers de terrassement n'est pas quantifiée, mais ces derniers sont généralement considérés comme étant les plus gros émetteurs du secteur de la construction (Muleski et al., 2005 ; Western Regional Air Partnership, 2006 ; Faber et al., 2015 ; Zuo et al., 2017). En effet, une étude sur des chantiers de construction de l'Ouest des États-Unis suggère que le terrassement était responsable d'une partie significative (estimée entre 70% et 90%) des émissions de PM₁₀ évaluées sur chaque site (Muleski et Garman, 1996, cité par Muleski et al., 2005). Les estimations ont été réalisées en calculant les facteurs d'émissions dérivés des campagnes de mesure de l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement (USEPA, 1995). Le Tableau 1-2 détaille les facteurs d'émission qui sont proposés pour les principales activités des chantiers de terrassement (Eq. (1.1) à (1.7)). La Figure 1-2 illustre les émissions de poussières relatives à certaines de ces activités. Il est à noter que les conditions présentées sur cette Figure sont relativement extrêmes.

Opération génératrice de poussière	Calcul du facteur d'émission de poussières PM ₃₀ ^{a,b}
Émissions totales du chantier ^c	$E = 2,69.10^3 \times A_c \times d_c$ (1.1)
Activité de bulldozer	$E = 2,60 \times \frac{(s)^{1,2}}{(w)^{1,3}} \times t$ (1.2)
Décapage du sol	$E = 5,70 \times DPV$ (1.3)
Chargement et déchargement de matériaux	$E = 1,18 \times \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{w}{2}\right)^{1,4}} \times m$ (1.4)
Compactage du sol	$E = 2,60 \times \frac{(s)^{1,2}}{(w)^{1,3}} \times t$ (1.5)
Nivellement du sol	$E = 3,40.10^{-3} \times (V_{véhicule})^{2,5} \times DPV$ (1.6)
Circulation des engins sur les pistes	$E = 1,38 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,7} \times \left(\frac{M}{3000}\right)^{0,45} \times \frac{365-p_{re}}{365} \times DPV$ (1.7)

^a Ici l'hypothèse est faite que l'ensemble des poussières en suspension sont de taille <30 µm (PM₃₀)

^b avec :

E = quantité de poussières émises (kg)

A_c = surface totale du chantier (hectares)

d_c = durée totale du chantier (mois)

s = teneur en limon du sol (%)

w = teneur en eau des matériaux (%)

t = durée de l'activité (h)

V_{véhicule} = vitesse du véhicule (km.h⁻¹)

DPV = distance parcourue par l'ensemble des véhicules (km)

U = vitesse moyenne du vent (m.s⁻¹)

m = masse des matériaux manipulés (kg)

M = masse moyenne des engins circulant sur pistes (kg)

p_{re} = nombre de jours de pluie annuels pour lesquels les précipitations ont excédé 0,254 mm

^c Si le détail des activités du chantier n'est pas connu, cette équation doit être utilisée

Tableau 1-2 : Quelques facteurs d'émission recommandés par l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement pour les activités des chantiers de terrassement (adapté de USEPA, 1995)



Figure 1-2 : Émissions de poussières lors a) du décapage du sol, b) du chargement des camions, c) des activités de bulldozer et d) de la circulation des engins (crédits : Getty Images et Walker, 2012)

Pour comparer ces différents facteurs d'émissions, prenons l'exemple suivant : considérons un chantier dont les matériaux ont une teneur en limon (particules de taille inférieure à $80 \mu\text{m}$) de 12 % et une teneur en eau de 4 %. La durée des activités est de 6 heures par jour et de 20 jours par mois. Les niveleuses circulent à 10 km.h^{-1} . La distance parcourue par l'ensemble des véhicules est en moyenne de 50 km/jour. Le vent souffle à une vitesse de 6 m.s^{-1} . La quantité de matériaux chargés et déchargés est de 1000 tonnes par jour. Les engins circulant sur les pistes ont une masse moyenne de 35 tonnes. Enfin, il y a eu 65 jours dans l'année où les précipitations ont excédé 0,254 mm (cette valeur correspond à la résolution des pluviomètres). Ces hypothèses très précises ne sont pas à prendre au pied de la lettre mais servent uniquement à estimer les ordres de grandeur des émissions de poussières. Elles permettent d'utiliser les équations du Tableau 1-2 pour calculer les facteurs d'émissions. La Figure 1-3 présente l'évolution des quantités de poussières émises par chacune des activités en fonction de la durée du chantier. Il apparaît que la circulation des engins sur les pistes est de loin la première source d'émissions. Cela est d'ailleurs confirmé par des études réalisées sur de véritables chantiers et sur des sites d'extractions de minerais (USEPA, 1974 ; Reed et Organiscak, 2005 ; Piras et al., 2014 ; Giunta et al., 2019).

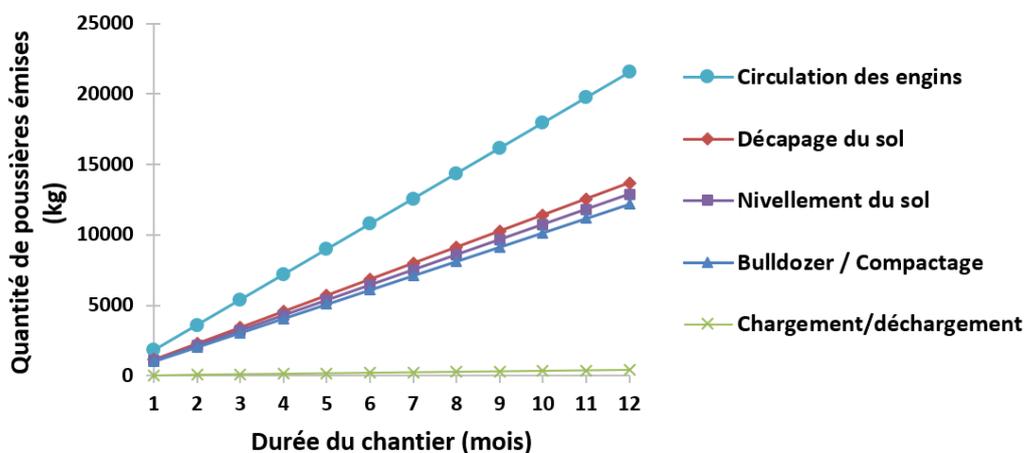


Figure 1-3 : Exemple d'évolution des quantités de poussières émises selon les facteurs de l'USEPA (1995)

Les facteurs d'émission présentés correspondent aux PM₃₀. Pour l'émission des PM₁₀ due à la circulation des engins sur les pistes, l'USEPA propose le facteur d'émission suivant pour les sites industriels (mines, carrières, ...) (Eq. (1.8)) :

$$EF_{USEPA_industriel} = 422,85 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,9} \times \left(\frac{M}{3000}\right)^{0,45} \quad (1.8)$$

et pour les routes non revêtues publiques (Eq. (1.9)) :

$$EF_{USEPA_public} = 507,42 \times \frac{\left(\frac{s}{12}\right) \times \left(\frac{V_{véhicule}}{48,3}\right)^{0,5}}{\left(\frac{w}{0,5}\right)^{0,2}} \quad (1.9)$$

où EF_{USEPA} est le facteur d'émission de PM₁₀ (en g.km⁻¹, grammes de poussières émises par kilomètre parcouru par le véhicule), s est la teneur en limon de la route (particules de tailles inférieures à 80µm, en %), M la masse du véhicule (kg), $V_{véhicule}$ la vitesse du véhicule (km.h⁻¹) et w la teneur en eau en surface de la route (%).

Les facteurs recommandés par l'USEPA sont issus de mesures sur des sites de construction avec des échantillonneurs d'air. D'importantes bases de données ont été établies afin de lier empiriquement les quantités de poussières émises aux différentes variables présentées dans le Tableau 1-2. Ces facteurs d'émissions sont mondialement utilisés, notamment en France pour estimer les émissions de certains chantiers (ADEME, 2017) et pour réaliser l'inventaire national des émissions atmosphériques (CITEPA, 2020-b). Or, en comparant les modèles de l'USEPA avec des mesures de terrain, il apparaît des différences qui peuvent atteindre plusieurs ordres de grandeur (Watson et al., 1996 ; Gillies et al., 2005 ; Muleski et al., 2005). En effet, ces modèles présentent plusieurs limitations (Watson et Chow, 2000) :

- Ils ont été obtenus de manière purement empirique sans prise en compte des mécanismes mis en jeu dans les émissions : ils peuvent s'appliquer sur les sites qui ont servi de référence mais peuvent difficilement être généralisés à l'ensemble des chantiers de terrassement, compte tenu de la diversité des terrains et des activités rencontrées ;
- Ils s'appuient sur l'hypothèse que les émissions mesurées seront les mêmes quelle que soit la période du projet de construction. Or, les émissions peuvent évoluer temporellement, notamment avec les conditions météorologiques ;
- La plupart des équations utilisées pour déterminer les émissions ont été obtenues lors de mesures dans des mines de charbon à ciel ouvert, c'est-à-dire dans des conditions qui peuvent être relativement éloignées de celles rencontrées sur les chantiers de terrassement ;
- Le calcul du facteur d'émission est le même pour les activités de bulldozer et celles de compactage. Or, il s'agit de deux activités très différentes ;
- Le facteur d'émission concernant la circulation des engins sur les pistes a été obtenu par des mesures d'émissions de véhicules circulant sur des routes non revêtues permanentes (chaussées ne possédant pas de couche d'enrobé en surface, la circulation s'effectuant directement sur des matériaux granulaires). Les pistes des chantiers sont généralement construites de façon temporaire et avec les matériaux disponibles sur place. Elles n'ont pas la même robustesse que les routes non revêtues permanentes et peuvent donc être sujettes à de plus importantes émissions de poussières. De plus, ce modèle 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 inter-particulaires (cohésion liée au compactage, ponts capillaires, forces électrostatiques et de Van der Waals). Une piste ne peut donc pas être décrite avec un seul paramètre, en l'occurrence la teneur en limon pour les modèles de l'USEPA. Ce modèle ne tient également pas compte des mécanismes mis en jeu dans les émissions de poussières, en particulier l'arrachement puis l'effritement des agrégats du sol par les pneus.

Les modèles de l'USEPA sont pertinents pour quantifier les émissions de poussières globales à des échelles régionales et nationales, c'est d'ailleurs pour cela qu'ils ont été établis. Cependant, pour avoir une connaissance plus précise des mécanismes d'émission, il est nécessaire d'étudier plus finement les processus à des échelles plus petites. Dans la suite de ce document, nous nous focaliserons sur les conditions de mise en suspension des poussières liées à la circulation des engins sur les pistes temporaires non revêtues. Elles représentent un facteur très important d'émission (UNICEM, 2011 ; Barnes et Connor, 2014). En effet, les travaux publics ont généralement tendance à travailler en flux tendu et donc à minimiser les stocks. Cela accroît la circulation des camions qui assurent la livraison des matériaux en permanence (ADEME, 2017). Cette circulation entraîne une dégradation du sol (dont le mécanisme sera détaillé plus loin dans ce document) et une remise en suspension des particules présentes en surface. Celles-ci génèrent des nuisances qui sont détaillées dans la section suivante.

1.3 Nuisances liées aux particules fines solides en suspension dans l'air

Dans cette section, les principales nuisances engendrées par les particules fines en suspension dans l'air sont détaillées. On s'intéresse en particulier à leurs impacts sur la santé humaine, sur l'environnement et sur l'atténuation de la visibilité.

1.3.1 Impacts sanitaires

Depuis une quarantaine d'années, il a été établi scientifiquement que l'inhalation de particules fines solides avait un effet néfaste sur la santé (Ware et al., 1986 ; Dockery et al., 1993 ; Krämer et al., 1999 ; OMS, 2006 ; Pope et Dockery, 2006 ; Autrup, 2010). Cela avait déjà été décrit bien avant, notamment par Moïse Maïmonide qui, dès le XII^{ème} siècle, avait établi un lien entre les crises d'asthme et la qualité de l'air. L'évènement qui a accéléré la prise de conscience de la communauté internationale est certainement le fameux « smog » de Londres qui fut particulièrement meurtrier en 1952. Les recherches entreprises depuis lors ont permis d'établir que les particules atmosphériques dans le domaine microscopique sont d'autant plus nocives qu'elles sont petites car elles sont alors susceptibles de pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire (Figure 1-4). Cette affirmation ne s'applique pas dans le domaine nanoscopique, mais ce dernier ne fait pas l'objet de la présente thèse.

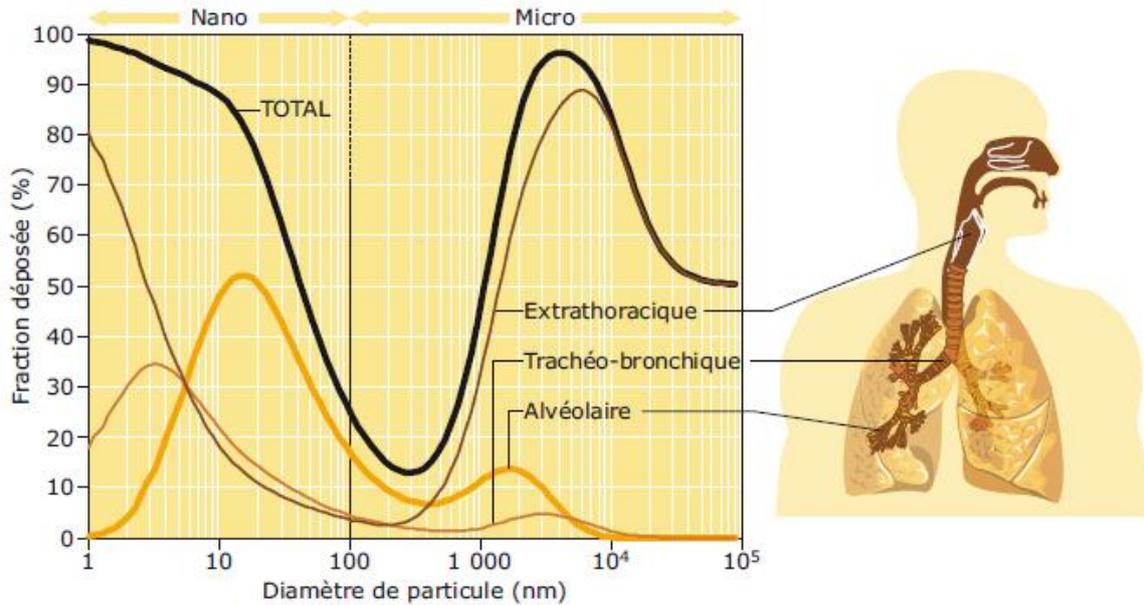


Figure 1-4 : Pénétration et dépôt des particules dans l'appareil respiratoire, d'après l'Institut National de Recherche et de Sécurité (<https://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/effets-sante.html>)

Cette pénétration est souvent irréversible et porte atteinte à la santé de la personne concernée. Le Tableau 1-3 présente la liste des principaux effets observés sur la santé dus aux poussières en général et aux PM₁₀ et PM_{2,5} en particulier (ADEME, 2017).

L'apparition et la gravité de l'un de ces effets sur l'homme vont dépendre de l'état de santé de la personne, de son âge et de sa durée d'exposition. Cela est très complexe à quantifier. Par ailleurs, l'OMS estime que la pollution aux particules fines a une incidence sanitaire même à faible concentration et il n'a pas été identifié de seuil au-dessous duquel cette pollution n'affecte pas la santé (OMS, 2006). Il est donc préconisé, toujours selon cet organisme, de mettre tout en œuvre pour limiter au maximum les niveaux de concentration des particules en suspension. Cette problématique est particulièrement présente dans le secteur de la construction (Bergdahl et al., 2004) qui fait l'objet de la présente thèse.

Polluant	Type d'exposition	Effets observés sur la santé
Ensemble des poussières en suspension	Chronique	<ul style="list-style-type: none"> - Rhinite ou une inflammation de la muqueuse nasale, surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades) ; - Inflammation des muqueuses de la trachée (trachéite) ou des bronches (bronchite), surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades) ; - Perforations de la cloison nasale, cancer de l'éthmoïde, surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades).
	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"> - Atteintes cytotoxiques des cellules respiratoires ; - Asthme, bronchites, toux, altérations de la fonction pulmonaire, pathologies respiratoires obstructives, et infections respiratoires, surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades) ; - Augmentation du risque d'attaque cérébrale ; - Augmentation du risque d'ischémie, de troubles cardiovasculaires et de risques cardiaques (infarctus du myocarde).
PM₁₀ et PM_{2,5}	Chronique	<ul style="list-style-type: none"> - Asthme, bronchites, toux, altérations de la fonction pulmonaire, pathologies respiratoires obstructives et infections respiratoires, surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades) ; - Potentiel génotoxique et neurotoxique ; - Augmentation des cancers broncho-pulmonaires ; - Augmentation du risque d'ischémie, de troubles cardiovasculaires et de risques cardiaques (infarctus du myocarde) ; - Atteintes à l'appareil reproducteur et gestatif ; - Carcinogène/cancérogène
	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"> - Atteintes cytotoxiques des cellules respiratoires ; - Asthme, bronchites, toux, altérations de la fonction pulmonaire, pathologies respiratoires obstructives, et infections respiratoires, surtout chez les enfants et les personnes sensibles (âgées ou malades) ; - Augmentation du risque d'attaque cérébrale ; - Augmentation du risque d'ischémie, de troubles cardiovasculaires et de risques cardiaques (infarctus du myocarde).

Tableau 1-3 : Principaux effets sanitaires de l'inhalation de particules solides (ADEME, 2017)

1.3.2 Dommages environnementaux

Les impacts environnementaux des poussières ont également fait l'objet de recherches (Vardaka, 1995, Mohapatra et Biswal, 2014). Les particules fines étant extrêmement volatiles, elles affectent leur environnement sur des distances qui peuvent être considérables. Ainsi, il a été observé la présence de dépôts de poussières sahariennes en Amérique du Sud (Yu et al., 2015). Si ces poussières peuvent avoir un certain impact positif, notamment en transportant du phosphore qui contribue à fertiliser la forêt amazonienne, elles ont majoritairement des conséquences négatives sur l'environnement. Le Tableau 1-4 présente les principaux effets néfastes qui ont été mis en évidence dans la littérature (ADEME, 2017).

Polluant	Effets observés sur l'environnement			
	Sol	Eau	Flore	Faune
Poussières	<ul style="list-style-type: none"> - Acidification du pH du sol par déposition de poussières et des substances adsorbées ; - Pollution du sol par dépôt atmosphérique ou écoulement pluvial ; - Impact sur les communautés microbiennes et fongiques du sol et altération du cycle des nutriments 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la matière en suspension et de la matière dissoute dans les eaux de surface ; - Acidification du pH due à la dilution dans l'eau des SO_x et NO_x adsorbés sur les poussières (exposition chronique) ; - Apport de métaux qui étaient absorbés sur les poussières (exposition chronique) ; - Création d'un film sur les eaux stagnantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de l'évapotranspiration (exposition aiguë) ; - Réduction de la photosynthèse. (exposition aiguë) ; - Augmentation de la fréquence des maladies des plantes et d'infection par des espèces nuisibles ; - Réduction de l'efficacité des pesticides ; - Atteinte aux feuilles par déposition de substances adsorbées (soufre acide, métaux) (exposition aiguë) ; - Réduction de la croissance, floraison et reproduction des plantes (exposition chronique). 	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation de l'écosystème aquatique
PM₁₀ et PM_{2,5}	<ul style="list-style-type: none"> - Acidification du pH du sol par déposition de poussières et des substances adsorbées ; - Pollution du sol par dépôt atmosphérique ou écoulement pluvial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la matière en suspension et de la matière dissoute dans les eaux de surface ; - Acidification du pH due aux SO_x et NO_x adsorbés (exposition chronique) ; - Apport de métaux absorbés (exposition chronique). 	<ul style="list-style-type: none"> - Atteinte aux feuilles par déposition de substances adsorbées (soufre acide, métaux) (exposition aiguë) 	<ul style="list-style-type: none"> - Effets oxydatifs sur les mammifères et les poissons (exposition chronique)

Tableau 1-4 : Principaux effets des particules fines atmosphériques sur l'environnement (ADEME, 2017)

1.3.3 Atténuation de la visibilité

L'atténuation de visibilité est reconnue comme étant l'effet le plus représentatif d'un air chargé en polluants (Watson, 2002 ; Zuo et al., 2017). En effet, lorsqu'elles sont en suspension dans l'air, les particules fines entraînent une discontinuité de l'indice de réfraction de la lumière dans le milieu environnant. Cela engendre une diminution de la portée optique météorologique qui est d'autant plus importante que la concentration en particules est élevée (Chepil et Woodruff, 1957, Patterson et Gillette, 1977, Baddock et al., 2014). Baddock et al. (2014) ont analysé des données de visibilité obtenues avec le diffusomètre optique d'une station météorologique d'une petite ville d'Australie. Ils les ont corrélées

avec des mesures de concentrations de particules en suspension effectuées à une dizaine de kilomètres de cette station avec un échantillonneur d'air et un photomètre LASER (Figure 1-5). Ils ont montré en particulier que l'augmentation de la concentration en particules fines était corrélée à une baisse de la visibilité selon une loi puissance (modèle V-TSD, « Visibility – Total Suspended Dust »).

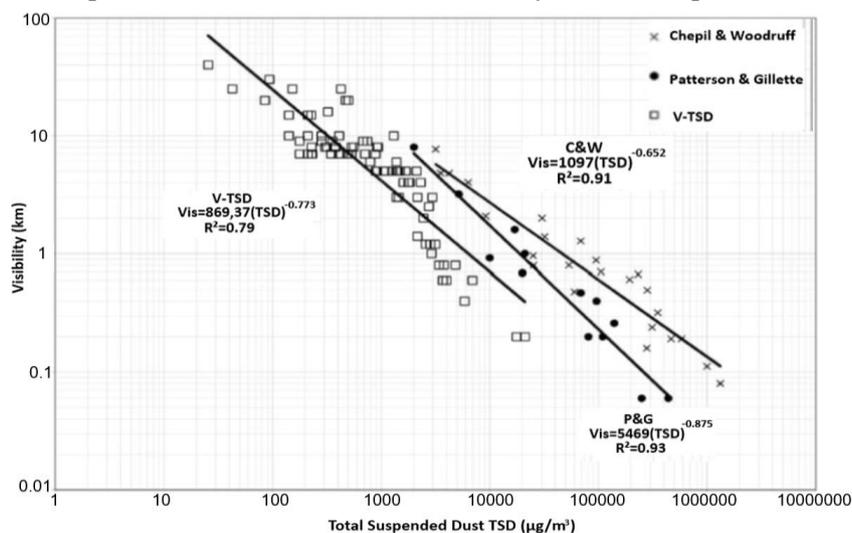


Figure 1-5 : Relation entre la visibilité et la concentration de poussière en suspension (TSD). Comparaison entre les études de Baddock et al. (V-TSD), Patterson et Gillette (1977) et Chepil et Woodruff (1957). (Tiré de Baddock et al., 2014)

D'autres études ont également été menées afin de lier la concentration en PM_{10} à la visibilité (D'Almeida, 1986 ; Dayan et al., 2008 ; Jugder et al., 2014 ; Camino et al., 2015). Le Tableau 1-5 présente les équations empiriques qui sont issues de ces travaux ainsi que la localisation des mesures qui ont permis de les obtenir.

Auteurs	Equation empirique	Localisation des mesures
D'Almeida (1986)	$\overline{PM}_{10} = 914 \times V_i^{-0,73} + 19$	Mesures de visibilité et de concentration en PM_{10} à Agadez (Niger). Source d'émission de poussières (désert) située à plusieurs centaines de km des mesures.
Dayan et al. (2008)	$\overline{PM}_{10} = -505 \cdot \ln(V_i) + 2264$	Mesure de concentration en PM_{10} dans le désert Negev. Mesure de visibilité à l'aéroport Hazerim (Israël) situé à 50 km.
Jugder et al. (2014)	$\overline{PM}_{10} = 486 \times V_i^{-0,78}$	Mesures de visibilité et de PM_{10} à Zamyn-Uud dans le désert du Gobi, à proximité de la source d'émission des poussières.
Baddock et al. (2014)	$\overline{PM}_{10} = 556 \times V_i^{-1,03}$	Mesure de concentration en PM_{10} à Buronga (Australie). Mesure de visibilité dans la ville d'à côté (Mildura) située à 12 km. Les sources d'émissions de poussières sont situées entre 10 et 100 km de ces stations.
Camino et al. (2015)	$\overline{PM}_{10} = 1772 \times V_i^{-1,10}$	Mesures de visibilité et de concentration en PM_{10} à Izaña (Espagne). Source d'émission de poussières (désert) située à plusieurs centaines de km des mesures.

Tableau 1-5 : Equations empiriques établies lors de précédentes études pour relier la concentration moyenne en PM_{10} (en $\mu g \cdot m^{-3}$) à la visibilité (V_i en km).

Les mesures de visibilité des modèles du Tableau 1-5 sont réalisées avec des appareils émettant des longueurs d'onde comprises entre 500 et 600 nm, soit environ au milieu du spectre de lumière visible. Il apparaît une disparité importante entre les différents modèles établis, certainement due à la variabilité des conditions expérimentales. Cela peut également s'expliquer par le fait que ces relations s'appuient uniquement sur la concentration massique en particules. Or, ce n'est pas la masse mais la capacité de diffusion de la lumière qui prédomine dans le processus d'atténuation de la visibilité (Moosmüller et al., 2005). Cette capacité de diffusion évolue en fonction de la taille des particules, les plus fines étant celles qui diffusent le plus la lumière (Figure 1-6). Il apparaît donc important de connaître à la fois la concentration mais également la granulométrie des poussières en suspension afin d'évaluer la dégradation de visibilité. En particulier, il convient de distinguer les particules de diamètre aérodynamique supérieur et inférieur à 2,5 μm . Ces dernières ont une capacité de diffusion par unité de masse environ cinq fois plus importante que celles de diamètre aérodynamique environ égal à 10 μm (Malm, 1999) mais ont généralement une concentration massique une dizaine de fois inférieure dans un nuage de poussière (Pinnick et al., 1985 ; Malm, 1999, Neff et al., 2013).

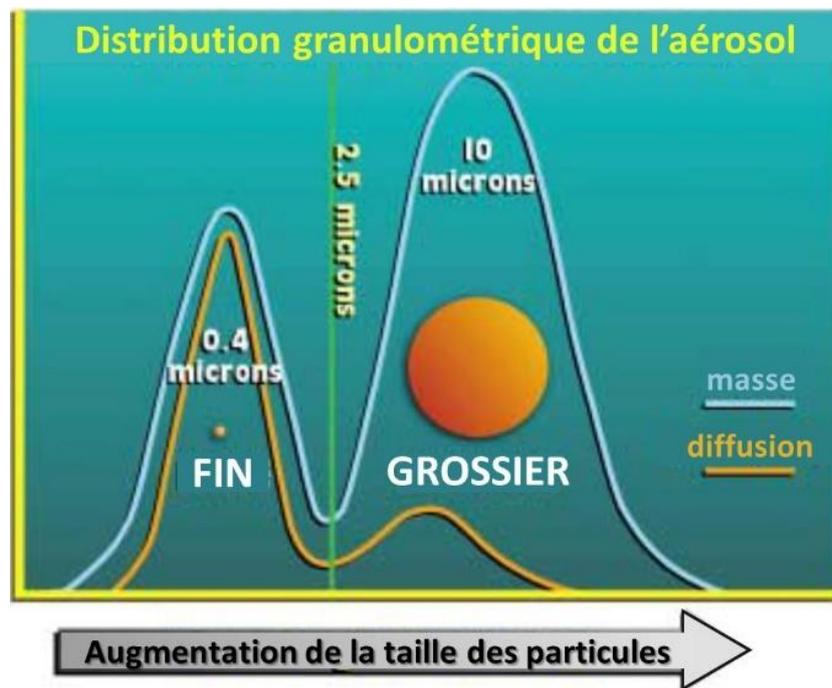


Figure 1-6 : Évolution, en fonction de la taille des particules, de la distribution massique (courbe bleue) et de la capacité de diffusion (courbe orange) d'un aérosol (adapté de Malm, 1999).

Sediki et al. (2018a) ont développé un appareil de mesure simultanée d'atténuation de visibilité et de concentration en particules. Il permet d'effectuer ces deux mesures au même endroit alors que les modèles présentés au Tableau 1-5 sont basés sur des mesures réalisées à deux endroits différents. Cette réduction de visibilité est particulièrement problématique d'un point de vue sécuritaire, principalement dans les endroits où circulent des véhicules (Banque Mondiale, 2011, Lankarani et al., 2014 ; Bhattachan et al., 2019).

La nocivité des poussières en suspension dans l'atmosphère étant élevée, il apparaît important de mettre en place des moyens de prévention limitant leur envol. Ils sont détaillés dans la section suivante.

1.4 Moyens de lutte contre la mise en suspension des poussières

Actuellement, sur les chantiers de terrassement, la limitation de l'envol des poussières est principalement assurée par arrosage (Cowherd et Kinsey, 1986 ; USEPA, 1988 ; ADEME, 2017 ; Zuo et al., 2017). En effet, l'envol des particules est fortement atténué lorsque celles-ci sont agglomérées par les gouttelettes d'eau (Hagen et al., 1988 ; McKenna-Neuman et Nickling, 1988 ; Fécan et al., 1999 ; Ishizuka et al., 2005 ; Gras, 2011 ; Li et Zhang, 2014). L'arrosage est efficace mais son usage doit être optimisé car il requiert de grandes quantités d'eau et peut entraîner une surconsommation de cette ressource si on arrose arbitrairement et de façon non maîtrisée. En France, la consommation d'eau sur les chantiers de terrassement était estimée à environ 12 litres d'eau par m³ de matériaux déplacés (déblais et remblais) en 2010 (SPTF, 2011). Il a été établi, lors de la signature d'une convention d'engagement volontaire des professionnels des terrassements, de diviser par deux l'utilisation de l'eau sur les chantiers (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 2009). A titre informatif, le chantier de la ligne TGV Paris-Nancy a représenté 49 millions de m³ de terrassements, soit une estimation de 588 000 m³ d'eau utilisés pour arroser les sols sur ce chantier. Ce sujet est d'autant plus important que les problèmes liés aux ressources en eau risquent d'être accrus dans les décennies à venir à cause du changement climatique, de l'urbanisation et de l'augmentation de la population (Bates et al., 2008, Flörke et al., 2018).

L'utilisation de stabilisants chimiques (agents tensioactifs, émulsions, résines, polymères...) sur le sol permet de diminuer les émissions de poussières tout en utilisant moins d'eau (Gillies et al., 1999 ; Skorseth et Selim, 2000). Toutefois, l'usage de ces produits onéreux peut entraîner un surcoût financier. De plus, une fois déversés sur le sol, ils peuvent se répandre dans la nature du fait des conditions climatiques. Cela est préjudiciable pour l'environnement car ces produits sont toxiques (Gucinski et al., 2001 ; Peichota et al., 2002 ; Poulin, 2010). Il est rare de voir les professionnels en faire usage sur les pistes temporaires des chantiers de terrassement. Ceux-ci doivent généralement se contenter d'utiliser uniquement de l'eau (Western Regional Air Partnership, 2006, ADEME, 2017).

Foley et al. (1996) ainsi que Gambatese et James (2001) préconisent des applications d'eau fréquentes et en petites quantités plutôt que des arrosages importants qui entraînent un gaspillage et dégradent la surface du sol en transportant les particules fines par ruissellement. Cependant, de telles préconisations sont difficiles à mettre en place sur les chantiers avec les moyens à dispositions qui sont en général des tracteurs équipés de citernes à eau (Figure 1-7). En effet, ces équipements circulent lentement et mettent du temps à s'approvisionner. Ils déversent donc généralement de grandes quantités d'eau afin d'éviter une évaporation trop rapide des pistes sur lesquelles ils ne peuvent pas passer régulièrement.



Figure 1-7 : Arrosage d'une piste de circulation sur un chantier (photo : Ouardia Sediki)

Les autres préconisations pour la lutte contre la remise en suspension des poussières sont surtout associées à des mesures de « bon sens » : réduire la vitesse des véhicules, limiter les déplacements ou bien encore mettre en place des barrières éoliennes (CHEMINFO, 2005, Wang et Ye, 2015, Noh et al., 2018). Il est également recommandé d'arroser les pistes en fin de journée afin que l'interaction entre l'eau et les particules du sol entraîne la formation d'une croûte stabilisatrice en surface qui a le temps de se former durant la nuit (CHEMINFO, 2005). Il convient de noter qu'il n'existe à l'heure actuelle aucun document pouvant servir de guide sur les quantités d'eau à appliquer ni sur les intervalles de temps nécessaires entre deux arrosages (NIOSH, 2012).

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les problématiques liées aux poussières en suspension. Après une présentation de la réglementation en vigueur vis-à-vis de ces polluants, nous avons énuméré les différentes sources d'émissions. Notre intérêt s'est porté sur les chantiers de construction qui représentent le deuxième secteur le plus émetteur de poussières en France derrière l'agriculture. La phase des terrassements est responsable de la majeure partie des émissions, en particulier à cause de la circulation des engins sur les pistes. Les sollicitations de ce trafic entraînent une dégradation des sols. Cela amène des particules, initialement liées entre elles au sein d'une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques. Ceux-ci génèrent des nuisances importantes, à la fois sanitaires et environnementales. Ils entraînent également une forte atténuation de la visibilité, ce qui porte atteinte à la sécurité des agents sur les chantiers en augmentant le risque d'accidents. L'empoussièrement est réduit par un arrosage abondant. Cette solution est efficace mais peut amener à d'importants gaspillages d'eau. Pour une meilleure gestion de cette ressource, il s'agirait de mieux comprendre les mécanismes d'envol des poussières. Celles-ci sont mises en suspension par des processus aérodynamiques liés au vent et/ou aux passages des engins. Dans la partie suivante de ce document, nous nous intéresserons plus précisément à ces processus aérodynamiques.

Chapitre 2 : Conditions aérodynamiques d'envol des poussières

Ce travail repose sur une double approche « mécanique des sols » / « mécanique des fluides ». Ce sont deux branches de la Mécanique qui sont relativement éloignées au niveau de la sémantique. Il s'agit donc de définir soigneusement les concepts qui seront abordés dans ce document. Dans cette partie, on s'intéresse aux conditions qui régissent l'envol des poussières du point de vue de la mécanique des fluides.

Les particules générées par la dégradation du sol peuvent être soumises à l'envol à cause de processus aérodynamiques liés au vent ou aux passages d'engins sur les pistes des chantiers. Pour aborder ces phénomènes, on s'intéresse dans un premier temps à la couche limite. C'est une région située juste au-dessus de la surface où s'initie l'envol. Elle est en particulier caractérisée par un gradient vertical de la vitesse du fluide qui s'écoule au-dessus de cette surface. Dans un second temps, le processus d'envol sera décrit au travers de l'abondante littérature existante sur l'érosion éolienne. L'effet de la rugosité de surface du sol sera ensuite mis en évidence. L'impact des véhicules sera examiné en considérant la circulation sur les routes non revêtues. Finalement, les écoulements dans le sillage des véhicules circulant sur les pistes seront analysés. Un intérêt particulier sera porté sur la génération de structures turbulentes dans le sillage proche de ces véhicules susceptibles d'intensifier la remise en suspension des poussières.

2.1 Couches limites laminaires et turbulentes

Lorsqu'un fluide s'écoule au-dessus d'une surface immobile (un sol par exemple), il est ralenti dans une zone proche de cette surface jusqu'à atteindre une vitesse nulle au niveau de l'interface (condition de continuité). Cela se traduit par l'apparition d'un gradient de vitesse dans une zone appelée la « couche limite ». Elle est caractérisée par son épaisseur δ qui correspond à la hauteur nécessaire depuis la surface pour que la vitesse de l'écoulement atteigne 99% de sa vitesse uniforme U_∞ . Ce paramètre est illustré à la Figure 2-1 qui présente un profil de vitesse au-dessus d'une surface plane. La couche limite y est mise en évidence de même que la sous-couche visqueuse. Cette dernière correspond à la zone très proche de la paroi où la vitesse longitudinale évolue linéairement avec l'altitude. Dans cette zone, le gradient de vitesse permet de calculer la contrainte de cisaillement pariétale selon l'Eq. (2.1) :

$$\tau_0 = \mu \frac{dU}{dy} \quad (2.1)$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$), U est la valeur de vitesse longitudinale de l'écoulement (m.s^{-1}) et y est la distance sur l'axe vertical (m).

Il est alors possible d'en déduire la vitesse de cisaillement d'après von Kármán (1934), selon l'Eq. (2.2) :

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_a}} \quad (2.2)$$

où ρ_a est la masse volumique du fluide (kg.m^{-3}).

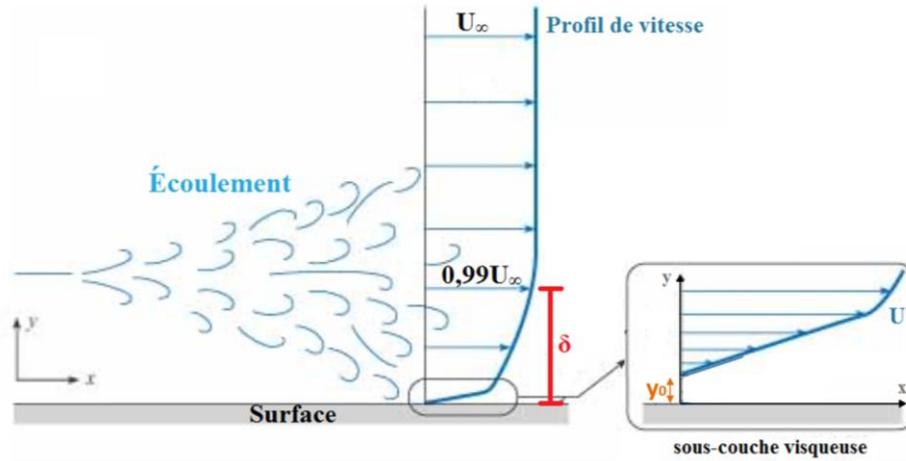


Figure 2-1 : Développement de la couche limite lors d'un écoulement au-dessus d'une surface plane (adapté de Crowe et al., 2009)

La sous-couche visqueuse est une zone très fine. En fonction de la technique de mesure à disposition, il n'est pas toujours possible d'y mesurer le gradient de vitesse. La détermination de la vitesse de cisaillement peut alors s'effectuer en utilisant une loi dite de paroi (Eq. (2.3)) :

$$U = \frac{U_\tau}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad (2.3)$$

où κ est la constante de von Kármán (≈ 0.41) et y_0 est la hauteur de rugosité (m) qui correspond à la hauteur pour laquelle la vitesse de l'écoulement devient nulle.

Même s'il s'agit d'une méthode largement utilisée (Williams et al., 1994 ; Weill et al., 2010 ; Rasmussen et al., 2011 ; Rieux et al., 2018 ; Liu et al., 2019), la loi de paroi peut être une source d'erreur non négligeable dans l'estimation de la vitesse de cisaillement (Wilkinson, 1984). Notamment, il peut être relativement ardu de déterminer l'origine fictive du profil y_0 sur une surface rugueuse. Certains auteurs (Krogstad et al., 1992 ; Djenedi, 2019) proposent d'utiliser une loi empirique dite « déficitaire » afin de s'affranchir de cette difficulté. L'Eq. (2.4) présente le modèle de profil proposé par Djenedi et al. (2019):

$$\frac{U_\infty - U}{U_\tau} = h\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (2.4)$$

où h est une fonction universelle qui s'applique pour toutes les couches limites turbulentes indépendamment de leur rugosité. Elle est définie par l'Eq. (2.5) :

$$h\left(\frac{y}{\delta}\right) = \frac{p_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^5 + p_2 \left(\frac{y}{\delta}\right)^4 + p_3 \left(\frac{y}{\delta}\right)^3 + p_4 \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + p_5 \left(\frac{y}{\delta}\right) + p_6}{\left(\frac{y}{\delta}\right)^5 + q_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^4 + q_2 \left(\frac{y}{\delta}\right)^3 + q_3 \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + q_4 \left(\frac{y}{\delta}\right) + q_5} \quad (2.5)$$

où les coefficients p_i ($i=1,2,\dots,6$) et q_j ($j=1,2,\dots,5$) sont sans unité et sont définis par :

$$p_1 = 110.50, p_2 = -230.50, p_3 = 114.50, p_4 = 7.24, p_5 = -6.38 \times 10^{-3}, p_6 = -4.60 \times 10^{-5};$$

$$q_1 = -10.07, q_2 = 15.56, q_3 = 4.47 \times 10^{-1}, q_4 = -8.20 \times 10^{-4} \text{ et } q_5 = -1.79 \times 10^{-6}.$$

Les propriétés de la couche limite vont dépendre de la nature de l'écoulement. Celui-ci peut être laminaire ou turbulent. Dans le premier cas de figure, les lignes de courant forment des « lamelles de fluide glissant les unes sur les autres » (Robinet, 2013). Dans le second cas, les lignes de courant se répartissent de manière chaotique et l'instabilité de l'écoulement entraîne la formation de tourbillons. Sur une plaque plane, la transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent peut se caractériser à l'aide du nombre de Reynolds local (Eq. (2.6)) :

$$Re_x = \frac{U_\infty \cdot x}{\nu} \quad (2.6)$$

où x est la distance par rapport au bord d'attaque de la plaque (m) et ν est la viscosité cinématique du fluide ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Cette transition laminaire / turbulent se produit généralement pour des nombres de Reynolds compris entre $3 \cdot 10^5$ et $3 \cdot 10^6$ (Robinet, 2013).

Une autre manière de déterminer le régime de l'écoulement consiste à calculer le facteur de forme H_f (Eq. (2.7)). Schlichting (1979) a établi que le régime est turbulent pour $H_f < 1,4$, laminaire pour $H_f > 2,6$ et transitoire entre ces deux valeurs (Eq. (2.7)) :

$$H_f = \frac{\delta_*}{\theta} \quad (2.7)$$

où δ_* correspond à l'épaisseur de déplacement (m) et θ à l'épaisseur de quantité de mouvement (m), définies selon les Eq. (2.8) et (2.9) :

$$\delta_* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad (2.8)$$

$$\theta = \int_0^\infty \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad (2.9)$$

En mécanique des fluides, il est commun de travailler avec des nombres sans dimension. Il s'agit notamment de représenter le profil de l'écoulement au-dessus de la surface en coordonnées adimensionnelles. Précisément, on trace $U_+ = \frac{U}{U_\tau}$ en fonction de $y_+ = \frac{y \cdot U_\tau}{\nu}$. La Figure 2-2 représente un profil de couche limite pour un écoulement d'air turbulent au-dessus d'une surface lisse (Robinet, 2013). Cette méthode présente l'avantage de comparer les profils de vitesse de plusieurs écoulements pour mettre en évidence par exemple l'effet de la rugosité de surface (voir section [2.3](#)).

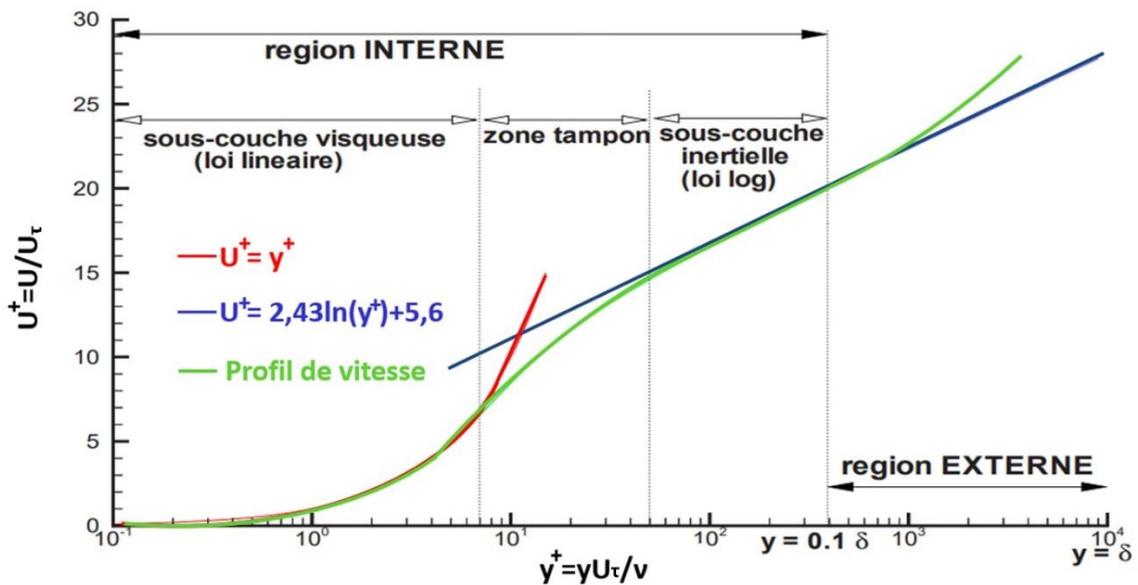


Figure 2-2 : Profil de couche limite turbulente sur surface lisse en coordonnées adimensionnelles (adapté de Robinet, 2013)

L'étude de la couche limite permet la détermination de la vitesse de cisaillement. Celle-ci s'applique aux particules situées dans la partie supérieure du sol en contact avec l'air. Lorsque cette vitesse dépasse un certain seuil, les particules à l'interface sol/air peuvent être entraînées et remises en suspension. La détermination de ce seuil d'envol constitue une part importante des études sur l'érosion éolienne.

2.2 Erosion éolienne

Bagnold (1937) fut le premier à véritablement s'intéresser aux processus éoliens de transport des particules granulaires. Il s'est focalisé sur la formation des dunes de sable dans le désert libyen. Par la suite, de nombreuses études sur l'érosion éolienne ont été entreprises. Différents auteurs se sont notamment intéressés à la détermination du seuil d'envol des particules du sol (e.g. Chepil, 1959, Chepil et Woodruff, 1963, Bisal, 1973, Williams, 1986, Foucaut, 1994, Shao et Lu, 2000). De même, trois modes (saltation, reptation et suspension) ont été mis en évidence pour le déplacement des particules dans le cadre de l'érosion éolienne (Figure 2-3). Il est généralement admis dans la littérature que ces trois modes vont surtout dépendre de la taille des particules (Bagnold, 1937 ; Presley et Tatarko, 2009 ; Ravi et al., 2011), même s'il est évident que leur densité ainsi que la vitesse du vent vont également jouer un rôle. Ils peuvent se définir de la façon suivante :

- La « saltation » : c'est un mécanisme caractérisé par des particules de taille comprise entre 100 et 1000 μm qui effectuent des bonds successifs sur la surface. Le soulèvement de ces particules est causé par le gradient de vitesse de l'écoulement dans la couche limite. Ce gradient entraîne une répartition dissymétrique des vitesses sur les particules, ce qui engendre la création d'une force verticale de portance favorisant leur envol (Saffman, 1965). Cependant, les effets de la gravité prennent progressivement l'ascendant sur l'effort de portance, faisant rapidement retomber puis rebondir les particules sur la surface. A chaque impact, elles entraînent dans leur mouvement d'autres particules en transférant leur énergie cinétique ;

- La « reptation » : ce mode consiste pour les particules à rouler le long de la surface lorsqu'elles subissent une collision. Cela concerne généralement les particules de taille supérieure à $1000\ \mu\text{m}$, qui sont suffisamment petites pour être mues par le vent mais trop massives pour décoller de la surface. Lorsque des particules roulent et glissent sur la surface sans collision préalable, on parle alors de « charriage » (Bonelli, 2012) ;
- La « suspension » : c'est un processus par lequel les particules les plus petites (de taille inférieure à $100\ \mu\text{m}$) s'envolent sur de grandes distances. Des particules de tailles plus importantes peuvent également être mises en suspension à condition que les vents soient particulièrement intenses. Ce processus est rarement initié directement par l'effet du vent. En effet, les particules les plus fines sont généralement protégées de ses effets car elles sont situées dans les creux de la rugosité du sol. Dans le cadre de l'érosion éolienne, les principales causes de la mise en suspension des particules fines sont les chocs générés en surface par les particules en saltation. Les particules en suspension sont ensuite transportées dans l'atmosphère par advection et diffusion turbulente.

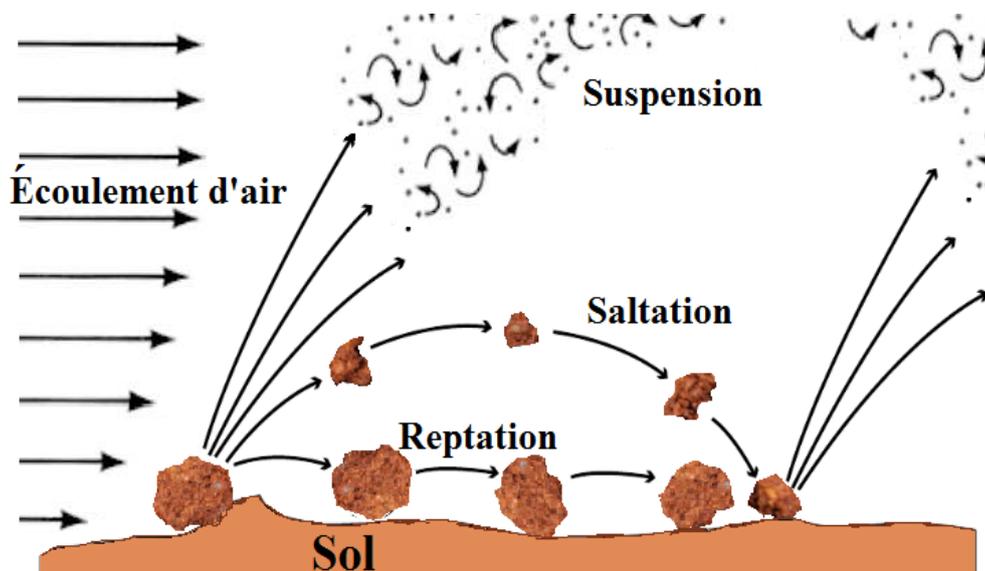


Figure 2-3 : Les différents modes de l'érosion éolienne (adapté de Presley et Tatarko, 2009)

Les vitesses de cisaillement auxquelles les particules en surface des sols sont soumises proviennent des flux de quantité de mouvement dans l'écoulement. Ils sont orientés vers le bas à cause du gradient vertical de vitesse en couche limite et entraînent le phénomène de saltation (Figure 2-4-a). Dans le cas d'écoulements turbulents, les instabilités du fluide engendrent la création de tourbillons. Ceux-ci produisent des fluctuations importantes de la vitesse et génèrent des flux de quantité de mouvement horizontaux (Figure 2-4-b) qui font subir à la surface d'importantes contraintes de cisaillement par intermittence (Klose et Shao, 2013). Les modèles d'envol des particules par saltation et par turbulence sont détaillés ci-après.

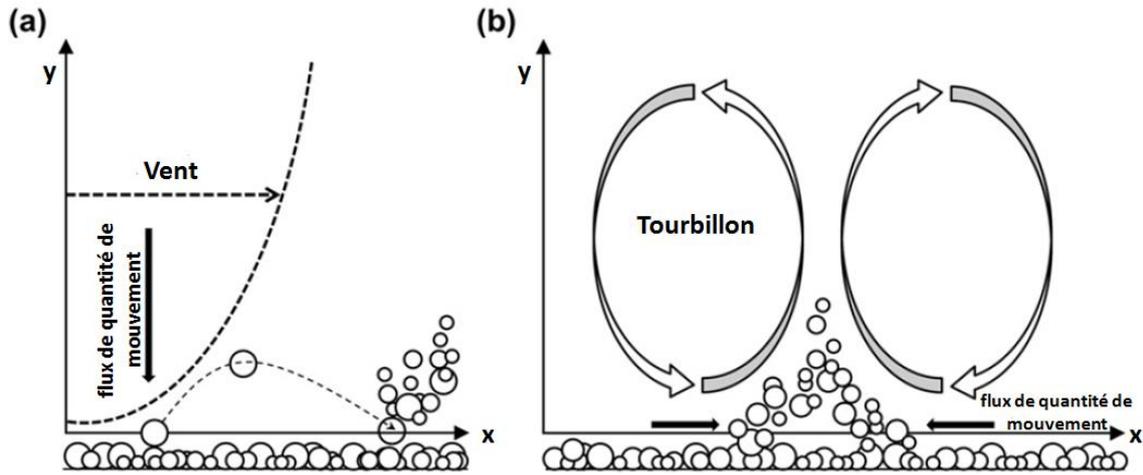


Figure 2-4 : Emissions de poussières dues aux flux de quantité de mouvement générés par a) un gradient vertical de vitesse du vent entraînant le phénomène de saltation et b) des tourbillons provoqués par des turbulences dans l'écoulement (adapté de Klose et Shao, 2013)

2.2.1 Envol des poussières par saltation

Dans le cadre de la saltation, l'envol d'une particule va s'initier lorsque la vitesse de cisaillement qu'elle subit atteint un seuil U_{τ} . Cela se produit lors de phénomènes de vents violents. La détermination de cette vitesse seuil a fait l'objet de nombreux modèles, aussi bien empiriques que semi-analytiques. Le premier modèle a été proposé par Bagnold (1937) en considérant un sol sec. Pour des grains sphériques, la vitesse de cisaillement seuil est alors définie selon l'Eq. (2.10) :

$$U_{\tau d} = A \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} g d} \quad (2.10)$$

où A est un paramètre sans dimensions, ρ_s est la masse volumique des grains ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), g est l'accélération de la gravité ($\approx 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) et d est le diamètre des particules (m).

En suivant ce modèle, il apparaît que la vitesse de cisaillement seuil s'abaisse lorsque le diamètre des grains diminue (pour des grains de même densité). Des études en soufflerie (Chepil, 1945, Iversen et al., 1976, Greeley et al., 2003) ont montré que cette relation n'est valide que pour des particules de diamètre supérieur à environ $100 \mu\text{m}$. Cela a pu être en partie corrigé, notamment par White (1979), en considérant que le paramètre A dépend du nombre de Reynolds de frottement R_{f*} défini par l'Eq. (2.11) :

$$R_{f*} = \frac{U_{\tau d} \cdot d}{\nu} \quad (2.11)$$

A partir des résultats de White (1979), Foucaut (1994) a pu déterminer la relation entre A et R_{f*} (Eq. (2.12)) :

$$A = 0,02 R_{f*}^{-2,8} + 0,116 \quad (2.12)$$

Cette relation permet de considérer qu'à partir d'un certain seuil ($R_{f*} \approx 1$), une diminution du diamètre d entraîne une augmentation de $U_{\tau d}$. Il s'agit en fait d'une prise en compte indirecte de l'effet des forces

de cohésion inter-particulaires (forces électrostatiques et de Van Der Waals). Celles-ci deviennent prépondérantes pour les particules les plus fines. Ces forces de cohésion sont d'ailleurs prises en compte directement dans les modèles théoriques plus récents comme celui de Shao et Lu (2000). Selon eux, la vitesse de cisaillement seuil est donnée par l'Eq. (2.13) :

$$U_{\tau d} = \sqrt{A_N \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} g d_p + \frac{\gamma_{SL}}{\rho_a d_p} \right)} \quad (2.13)$$

où A_N est une constante qui représente la cohésion entre les particules et qui vaut environ 0,0123 et γ_{SL} est un coefficient dimensionnel de l'ordre de $10^{-4} \text{ kg.s}^{-2}$.

Cette relation s'applique aux grains de sable mais également aux agrégats de poussières qui se comportent comme des particules de sable de faible densité. Ces agrégats ont des forces de cohésion plus faibles qu'un grain de sable de même taille. Ils s'envolent donc plus facilement (Neakrase et al., 2016).

2.2.2 Envol des poussières lors de phénomènes turbulents

Les poussières peuvent aussi s'envoler dans des conditions de vent faible, par le biais d'un phénomène d'émission lié à la turbulence convective. Ce phénomène est un processus stochastique dans lequel la turbulence génère de manière intermittente des forces de cisaillement qui surpassent momentanément les forces de cohésion des particules. Klose (2014) et Klose et Shao (2012) ont étudié ce phénomène. Leurs travaux ont notamment permis de modéliser le caractère stochastique de l'envol des poussières lors d'évènement turbulents à travers le modèle CTDE (« Convective Turbulent Dust Emission »). À l'aide d'un bilan d'efforts, ce modèle établit que le flux d'émission φ_d ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) des particules de diamètre d peut s'exprimer selon l'Eq. (2.14) :

$$\varphi_d = \begin{cases} N_d \frac{T_p}{2} \left(f - f_i \frac{d}{\delta_{vc}} \right) & \text{si } f > f_i \text{ et } \delta_{vc} > d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.14)$$

où N_d correspond au nombre de particules par unité de volume (m^{-3}), T_p est le temps de réponse des particules (s), f est la force de soulèvement (N), f_i est la force de cohésion inter-particulaires (N) et δ_{vc} est l'épaisseur de la sous-couche visqueuse (m) qui correspond à la zone où les particules subissent le cisaillement. δ_{vc} est donné par l'Eq. (2.15) :

$$\delta_{vc} = \frac{5\nu}{U_\tau} \quad (2.15)$$

Selon Shao (2008), le temps de réponse des particules est défini par l'Eq. (2.16) :

$$T_p = \frac{1}{18} \frac{d^2 \rho_s}{\nu \rho} \quad (2.16)$$

La force f qui s'exerce sur les particules, considérées comme sphériques, s'exprime à l'aide de l'Eq. (2.17) :

$$f = \tau_R \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.17)$$

où τ_R est la contrainte de Reynolds instantanée associée au flux vertical de quantité de mouvement, définie par l'Eq. (2.18) :

$$\tau_R = \rho \sqrt{(u'v')^2 + (v'w')^2} \quad (2.18)$$

où u' , v' et w' sont les fluctuations instantanées de la vitesse de l'écoulement dans les sens longitudinal, vertical et transversal, respectivement. Ces fluctuations varient au cours du temps. Ainsi, la contrainte de Reynolds obéit à une loi probabiliste $p(\tau_R)$ qui dépend des fonctions de distributions de probabilités (PDF, « Probability Density Function ») de u' , v' et w' .

Les forces de cohésion f_i dépendent principalement des interactions de Van der Waals, des forces électrostatiques, des forces de capillarité et des forces de liaison chimiques (Shao, 2008). Elles sont difficiles à estimer car fonction d'un grand nombre de paramètres (taille, forme, rugosité et minéralogie des particules, entre autres). Par conséquent, il est plus approprié de considérer les forces de cohésion comme des variables stochastiques suivant une loi de probabilité $p(f_i)$. Finalement, d'après Klose et Shao (2012), le flux total d'émission de poussières est donné par l'Eq. (2.19) :

$$\varphi = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \left[\int_0^{\infty} \left(\int_0^f \varphi_a \cdot p(f_i) df_i \right) p(f) df \right] p(d) \delta d \quad (2.19)$$

avec $p(d)$ la distribution granulométrique des particules et $p(f)$ la distribution probabiliste de f .

Le caractère stochastique des forces de cohésion inter-particulaires a été étudié par Zimon (1982) à l'aide d'essais d'envol de particules de verre en centrifugeuse. En augmentant progressivement la force centrifuge et en mesurant la proportion de particules envolées, il a estimé la distribution statistique des forces de cohésion. D'après ses résultats, il apparaît que la force de cohésion peut être décrite à l'aide d'une distribution log-normale (Eq. (2.20)) :

$$p(f_i) = \frac{1}{f_i \sqrt{2\pi} \sigma_{f_i}} \exp \left(-\frac{(\ln f_i - \ln \bar{f}_i)^2}{2\sigma_{f_i}^2} \right) \quad (2.20)$$

où \bar{f}_i et σ_{f_i} sont respectivement la valeur médiane et l'écart type de la distribution des forces de cohésion, exprimés en newtons.

Une distribution log-normale pour les efforts de cohésion est également proposée pour d'autres types de particules (Corn, 1961 ; Braaten et al., 1990 ; Biasi et al., 2001). A partir des résultats de Zimon (1982), Shao (2008) propose une loi empirique pour exprimer \bar{f}_i et σ_{f_i} en fonction de la taille des particules d exprimée en μm (Eq. (2.21) et (2.22)) :

$$\bar{f}_i(d) = 10^{-8} (10 \times e^{4.3569 - 0.2183d + 0.0018d^2})^{-1} \quad (2.21)$$

$$\sigma_{f_i} = 10^{-8} (4,1095 - 0,0476d) \quad (2.22)$$

La Figure 2-5 présente les distributions de f_i pour des particules de diamètre 1 μm , 2 μm , 3,5 μm , 7,5 μm et 20 μm .

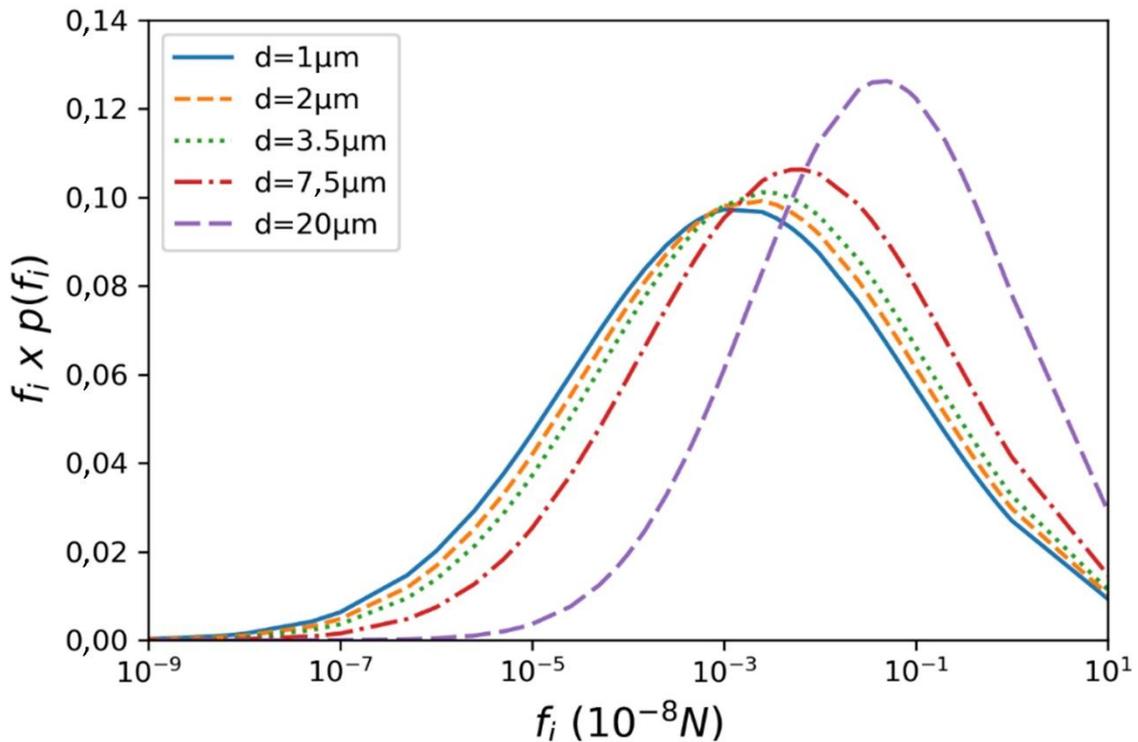


Figure 2-5 : Distributions log-normales des forces de cohésion f_i pour des particules de diamètre géométrique 1 μm , 2 μm , 3,5 μm , 7,5 μm et 20 μm , d'après l'Eq. (2.20)

Ces distributions de probabilités sont utilisées dans le modèle CTDE en complément d'une estimation de la distribution des forces $p(f)$ à l'aide de modèles atmosphériques. Les principales incertitudes sont liées aux distributions des forces de cohésion $p(f_i)$ qui ne sont en réalité pas uniquement dépendantes du diamètre des particules mais également des conditions environnementales. Néanmoins, une variation de $\pm 20\%$ des valeurs de \bar{f}_i ne modifie que de 5% le flux d'émission de poussières (Klose et Shao, 2012). L'impact d'une modification des valeurs de σ_{f_i} est encore moins significatif. Le modèle CTDE a montré une bonne capacité pour prédire les émissions de poussières lors de phénomènes de turbulence atmosphérique, que ce soit dans le désert Taklimakan (Chine), la lande sableuse d'Horqin (Chine) ou encore le bassin fluvial Murray-Darling (Australie) par comparaison avec des mesures in-situ (Klose et al., 2014 ; Li et al., 2014 ; Klose, 2014).

2.2.3 Transport des poussières dans les structures turbulentes cohérentes

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des mouvements complexes et chaotiques, aléatoires dans l'espace et dans le temps. Il est donc souvent nécessaire pour les étudier de les décomposer en de multiples structures turbulentes cohérentes (Adrian et al., 2000). Ces structures gardent une même forme pendant une période de temps relativement longue. C'est notamment le cas pour les « vortex en épingle à cheveux » qui se forment dans les couches limites turbulentes (Figure 2-6).

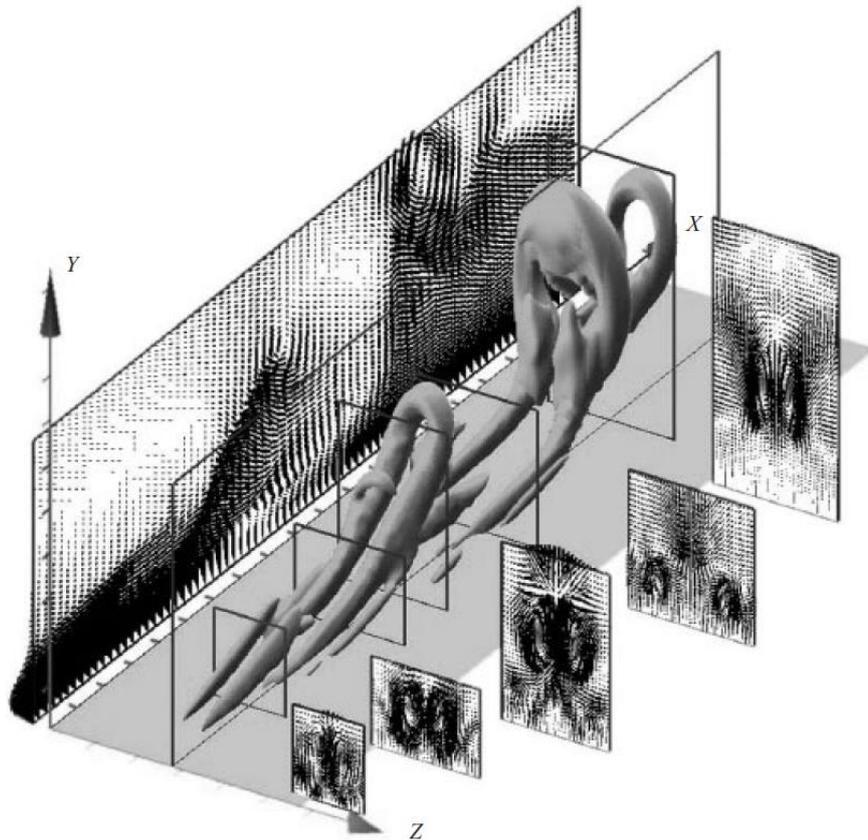


Figure 2-6 : Simulation numérique de « vortex en épingles à cheveux » avec visualisation des champs de vecteurs vitesse dans les plans transversaux et longitudinal (Zhou et al., 1999)

Pour analyser les structures turbulentes, Lu et Willmarth (1973) ont mis en place une méthode dite « des quadrants ». Elle consiste à décomposer les fluctuations de vitesse u' , v' et w' en quatre quadrants qui correspondent à quatre types d'événements :

- Q1 (interactions extérieures) : $u' > 0$ et $v' > 0$;
- Q2 (éjections) : $u' < 0$ et $v' > 0$;
- Q3 (interactions intérieures) : $u' < 0$ et $v' < 0$;
- Q4 (balayages) : $u' > 0$ et $v' < 0$

La mise en suspension des particules a lieu au cours d'événements turbulents à forte énergie (Lelouvetel et al., 2009). Pour identifier ces événements, seules les fortes fluctuations de vitesse sont prises en compte à l'aide d'un critère défini par le paramètre H (« hole size », Eq. (2.23)) :

$$H = \frac{|u'v'|}{|\overline{u'v'}|} \quad (2.23)$$

où $|u'v'|$ et $|\overline{u'v'}|$ désignent la norme du produit des fluctuations de vitesse instantanées et du produit des fluctuations de vitesse moyenné dans le temps, respectivement.

La Figure 2-7 illustre les quatre quadrants ainsi que la zone des faibles fluctuations de vitesse qui ne sont pas prises en compte lors de l'analyse.

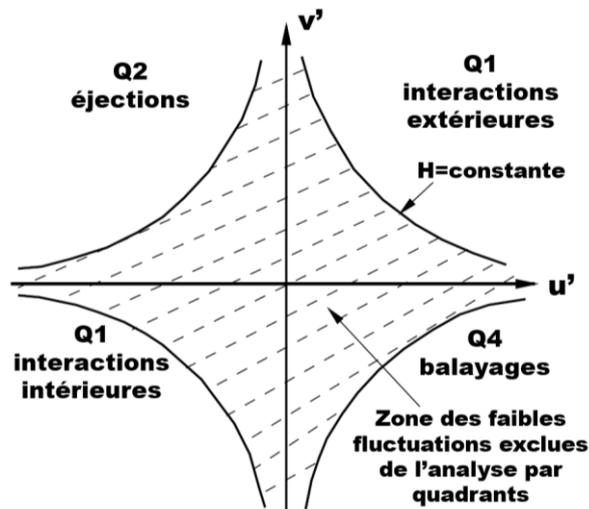


Figure 2-7 : Schématisation des quadrants et du critère des fortes fluctuations (adapté de Yue et al., 2007)

A l'aide d'une étude en canal hydraulique, Lelouvetel et al. (2009) ont montré que la mise en suspension de billes en verre avait lieu lors d'événements d'éjections et de balayages. C'est également ce qu'ont observé Hurther et Lemmin (2003) avec des particules de quartz qui étaient transportées lorsque ces événements correspondaient à $H > 4$. Des travaux sur l'érosion éolienne ont montré que ces deux types d'événements étaient prépondérants dans le proche sillage de dunes (Wiggs et Weaver, 2012) et d'arbustes (Mayaud et al., 2016) et qu'ils contribuaient majoritairement à la génération des contraintes de cisaillement dans cette zone. Il n'existe pas à notre connaissance à l'heure actuelle d'étude ayant analysé la contribution des quadrants dans le sillage de véhicules en circulation.

À ce stade, un certain nombre de modèles d'érosion éolienne des sols ont été présentés. Il est cependant extrêmement complexe d'établir un modèle robuste de détermination de l'envol des poussières car de nombreux facteurs rentrent en jeu dans ce processus (Ravi et al., 2011) : le climat (rayonnement solaire, humidité relative, température, précipitations, vitesse du vent), l'utilisation des terres par les hommes, la végétation, l'humidité du sol, la rugosité de surface ou bien encore les propriétés du sol (granulométrie, affinité avec l'eau, matière organique...). L'effet de la rugosité fait l'objet d'une attention plus particulière dans la section suivante.

2.3 Effets de la rugosité de surface

La surface d'un sol n'est pas lisse. Elle est constituée d'une succession de creux et de bosses, de quelques millimètres de profondeur et de hauteur dus à la présence de particules et d'agrégats de différentes tailles. Cette rugosité peut servir de « protection » contre l'envol pour les particules les plus fines qui s'accumulent dans les creux entre les fractions non érodables du sol (Chepil, 1950a). De plus, d'après Raupach et al. (1993), cette rugosité peut limiter la vitesse de cisaillement en surface en absorbant une partie de la quantité de mouvement de l'écoulement. Cependant, elle peut également générer de la turbulence dans le fluide qui s'écoule au-dessus (Shojaeizadeh et al., 2018). Cette turbulence génère la formation de tourbillons et de contraintes de Reynolds qui peuvent augmenter par intermittence le cisaillement sur les particules présentes en surface du sol.

L'effet de la rugosité de surface sur le profil de vitesse de l'écoulement d'air est bien établi. En effet, la présence de grains de sables (Nikuradse, 1933) ou d'autres aspérités (Bergstrom et al., 2002) entraîne un décalage du profil de vitesse dans la zone logarithmique (voir Figure 2-2) suivant l'Eq. (2.23) :

$$U_{+(rugueux)} = U_{+(lisse)} - \Delta U_+ \quad (2.23)$$

où ΔU_+ traduit ce décalage. Il est d'autant plus grand que la hauteur de rugosité moyenne est importante (Foucaut, 1994).

La Figure 2-8 illustre cet effet. Elle présente les décalages de profils d'écoulement au-dessus de surfaces rugueuses (plaques perforées, lit de grains de sable et grille métallique) par rapport à celui au-dessus d'une surface lisse (Bergstrom et al., 2002).

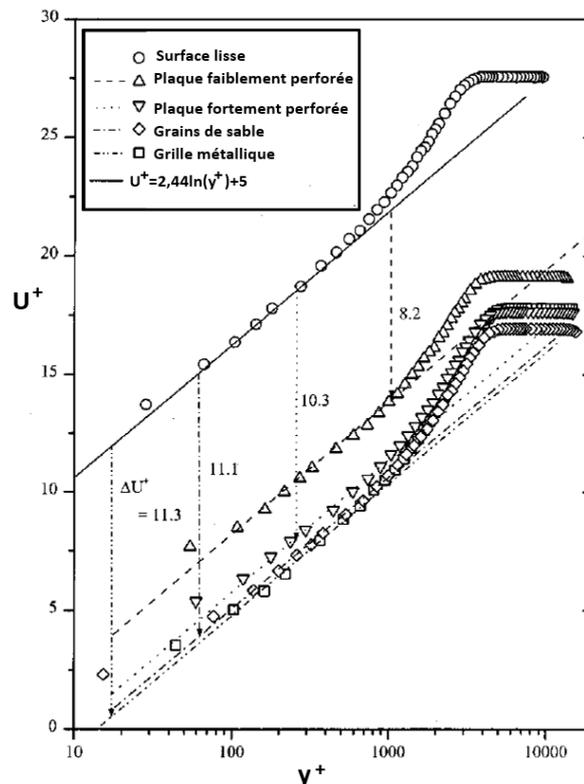


Figure 2-8 : Profils de vitesses en coordonnées adimensionnelles au-dessus d'une surface lisse et de surfaces rugueuses (adapté de Bergstrom et al., 2002)

Sur les chantiers de terrassement, la prévention de l'envol des poussières est réalisée par arrosage du sol. La rugosité de surface va affecter le stockage de l'eau dans les dépressions, son infiltration ainsi que son ruissellement le long du terrain. En effet, plus un sol est rugueux et plus il peut stocker d'eau dans ses rugosités. Ainsi, le ruissellement est limité et l'infiltration de l'eau est plus importante. Cela s'explique par le fait que la rugosité augmente la surface de contact entre le sol et l'eau. Cette infiltration permet d'éviter une évaporation trop rapide de l'eau qui resterait stagner en surface (Govers et al., 2000).

La rugosité de surface évolue si des véhicules circulent sur le sol. Les efforts de cisaillement provoqués par les roues peuvent arracher des agrégats et les déstructurer. Cela entraîne la formation de particules fines en surface pouvant être mises en suspension. Dans la section suivante, nous nous intéresserons aux poussières générées par les passages des véhicules.

2.4 Poussières générées par la circulation sur les pistes non revêtues

La circulation des véhicules sur les sols entraîne une dégradation de la surface par effritement (voir section 3.3). Ce dernier est la source d'une accumulation de particules fines qui se désolidarisent du sol. Une fois soumises aux écoulements sous et dans le sillage des véhicules (voir section 2.5), ces dernières se mettent en suspension et deviennent des poussières atmosphériques. Ces sources de poussières générées par la circulation d'une roue sur un sol sont présentées à la Figure 2-9.

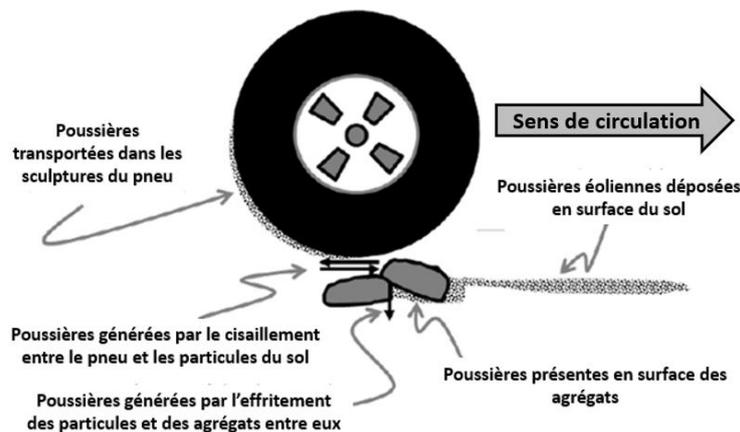


Figure 2-9 : Sources des poussières générées par la circulation d'une roue sur un sol (adapté de Barnes et Connor, 2014)

La mise en suspension des poussières du sol à cause des pneus est entre un et quatre ordres de grandeurs plus grande que celle associée aux autres sources de particules émises par le véhicule (usure des pneus, friction des freins, échappement...) (Abu-Allaban et al., 2003 ; Huertas Cardozo et Prato Sanchez, 2017).

Ce phénomène a été étudié et quantifié dans les pays possédant un grand nombre de chaussées non revêtues (Etats-Unis, Canada, ...) où il serait trop coûteux de mettre une couche d'enrobé en surface de toutes les routes (Le Vern, 2016 ; Le Vern et al., 2016). En 2017, les routes non revêtues représentaient environ 35% du réseau routier des Etats-Unis, 39% du réseau indien, 60% du réseau canadien et presque 90% du réseau brésilien (Ngezahayo et al., 2019). À l'échelle mondiale, on estime que les routes non revêtues représentent 80% du réseau routier (Banque Mondiale, 2008). Les pistes provisoires des chantiers de terrassement font également partie de cette catégorie. La circulation des véhicules y est une source importante d'émission de particules fines dans l'atmosphère. En regroupant diverses bases de données de mesures dans 24 états du sud des États-Unis et du nord du Mexique, Kuhns et al. (2003) ont évalué que la circulation sur les routes non revêtues était responsable d'environ 50% des émissions de PM_{10} et d'environ 30% des émissions de $PM_{2,5}$ dans cette région du globe. Cette problématique a encouragé des chercheurs aux États-Unis à développer des outils de mesure de poussières embarqués sur véhicules (Kuhns, 2003 ; Etyemezian et al., 2003a, b, c ; Etyemezian et al., 2006 ; Kuhns et al., 2010 ; Kavouras et al., 2016). Des tours instrumentées ont également été développées pour quantifier les panaches de poussières « *Upwind/Downwind* » (Gillies et al., 1999 ; Etyemezian et al., 2004 ; Gillies et al., 2005 ; Kuhns et al., 2010). La Figure 2-10 montre un exemple où trois tours placées dans le sens du vent sont instrumentées avec des échantillonneurs d'air pour mesurer les concentrations massiques des poussières émises par des véhicules sur une route non-revêtue. Les mesures à différents endroits permettent de quantifier la dispersion du panache en fonction de la direction et de la vitesse du vent.

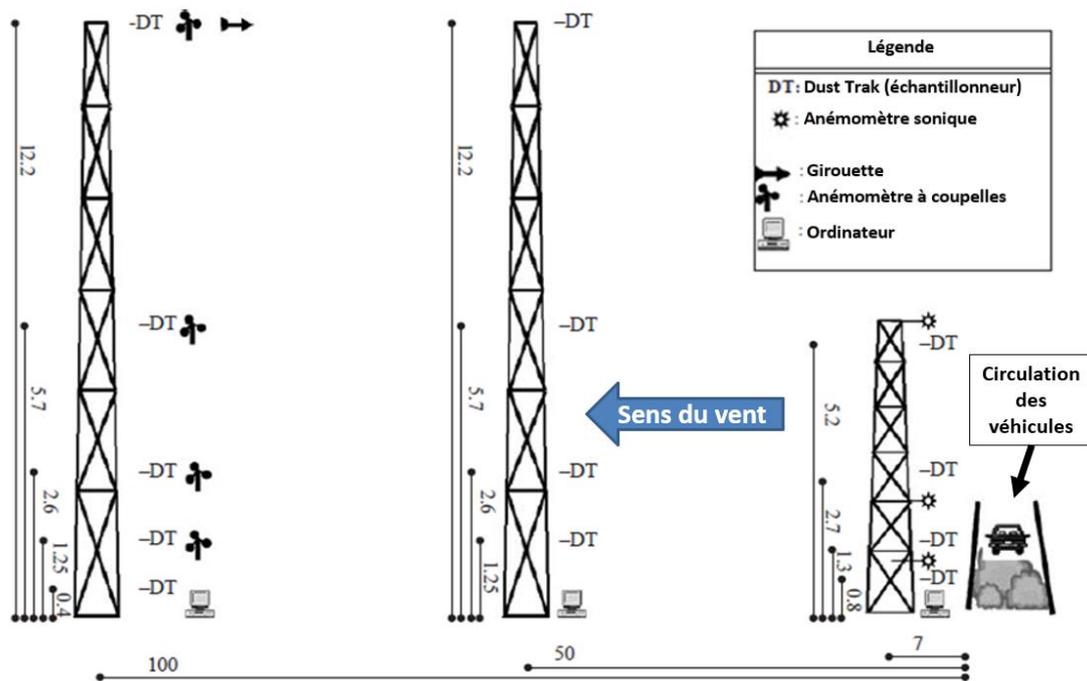


Figure 2-10 : Tours de mesures « Upwind/Downwind » pour quantification des émissions de poussières (unités en m) (adapté de Gillies et al., 2005)

Les travaux de Gillies et al. (2005) ont permis de montrer que les concentrations de poussières générées par les véhicules augmentent linéairement avec leur quantité de mouvement (action combinée de la masse et de la vitesse). Kavouras et al. (2016) ont montré que le type de sol avait une importance et que l'effet de la vitesse était perceptible surtout sur des sols très dégradés contenant beaucoup de particules fines effritées en surface. En effet, la quantité de particules arrachées à la matrice granulaire par le pneu et potentiellement sujettes à l'envol dépend de la granulométrie du sol (Kuhns et al., 2010) et du nombre de passages de véhicules (Meeks et al., 2013).

Moosmüller et al. (2005) ont montré que l'atténuation de visibilité due aux panaches de poussières générés par la circulation des véhicules n'évolue pas linéairement en fonction de leur masse. En effet, un véhicule lourd soulèvera plus de poussières qu'un véhicule léger mais aura également tendance à arracher des particules plus grossières, qui ont une capacité d'atténuation de la visibilité plus faible que les particules fines (voir section 1.2.3). Cela démontre l'importance de connaître la granulométrie des poussières arrachées par le pneu lors de son interaction avec la surface du sol. À l'heure actuelle, ce point n'a pas fait l'objet d'une étude détaillée.

Les particules les plus fines ($PM_{2.5}$) des nuages de poussières générés par les passages des véhicules peuvent être transportées sur des distances importantes, souvent supérieures à 100 mètres (Padgett et al., 2008). Ce n'est pas le cas des particules plus grossières qui vont majoritairement se déposer à quelques dizaines de mètres de leur source d'émission (Watson et Chow, 2000 ; Veranth et al., 2003 ; Petroff et Zhang, 2010). Il a été montré que la taille des nuages de poussière augmentait suivant la hauteur (Gillies et al., 2005) et la vitesse (Williams et al., 2008) des véhicules. Ce phénomène est directement lié aux écoulements qui sont générés dans le sillage de ces derniers. Ces sillages vont être différents en fonction de la géométrie des véhicules et cela va affecter grandement le mécanisme de dispersion des poussières (Reed, 2003). Ce point est l'objet d'une attention plus particulière dans la section suivante.

2.5 Écoulements de sillage

Lors de la circulation d'un véhicule sur un sol, les frottements générés par la rotation des pneus sont le principal facteur de l'initiation du décollement des particules (USEPA, 1995). Les poussières sont alors mises et maintenues en suspension par les tourbillons qui se forment dans le sillage des roues puis sont entraînées par des turbulences plus importantes dans le sillage du véhicule. L'écoulement de sillage joue donc un rôle prépondérant dans la dynamique des particules remises en suspension par les véhicules.

2.5.1 Sillage des roues

Les écoulements dans le sillage des roues ont surtout été étudiés dans un contexte d'amélioration de l'aérodynamisme des véhicules. En effet, les roues sont à l'origine d'environ 35% de la traînée aérodynamique (Saddington et al., 2007). L'étude des sillages générés par les roues est complexe car ils sont très dépendants de la géométrie des pneumatiques, du sous-bassement du véhicule ou bien encore des propriétés de l'écoulement d'air incident. Il est donc difficile de simuler des conditions réelles. C'est la raison pour laquelle la plupart des études se sont contentées d'étudier des cas simples de sillage en aval d'une roue isolée (Gérardin, 2009). L'étude des écoulements autour d'une roue isolée en rotation sur un support a permis de mettre en évidence la formation de vortex contrarotatifs dans le sillage (Figure 2-11-a). Trois paires de vortex ont été identifiées dans de nombreuses études : les vortex supérieurs, dus au décollement de la couche limite en haut de la roue, les vortex de moyeu qui apparaissent à mi-hauteur, et les vortex inférieurs (« jetting vortices ») générés par les actions visqueuses du contact roue/sol (Axon, 1999). Suivant les études, ces derniers peuvent tourner dans des sens différents (Figures 2-11-b et 2-11-c). Saddington et al. (2007) n'ont pas observé de vortex de moyeu. Ils semblent avoir été balayés par les vortex inférieurs, plus volumineux (Figure 2-11-d). De plus, ils ont observé qu'en s'éloignant de la roue dans le sillage, les vortex supérieurs disparaissaient pour fusionner avec les deux vortex inférieurs. Ces derniers augmentent alors de diamètre et génèrent des turbulences plus importantes au niveau du sol. Dans un contexte d'émissions de poussières générées par la roue en rotation, ce sont les vortex inférieurs qui sont particulièrement problématiques. En effet, ils font subir par intermittences de fortes contraintes de cisaillement aux particules en surface du sol (Figure 2-4-b).

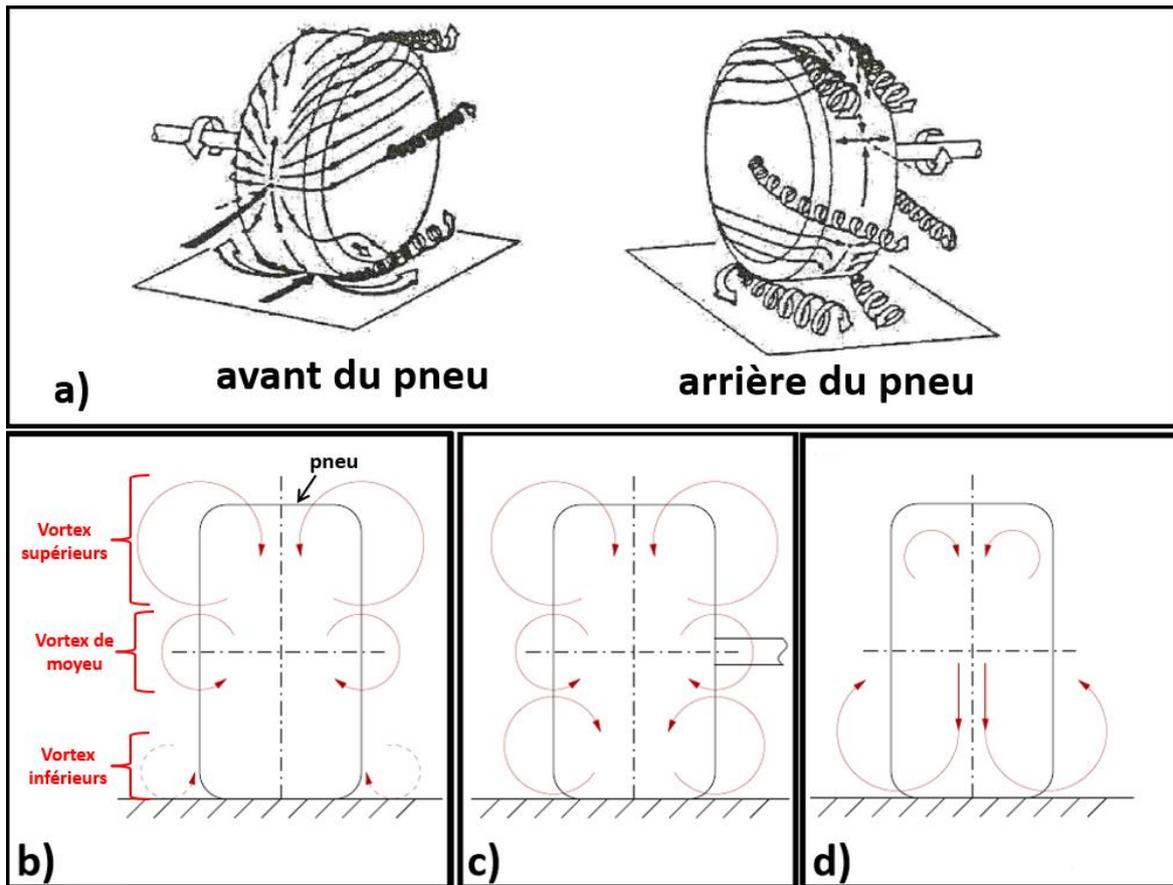


Figure 2-11 : a) Représentation des vortex générés par un pneu isolé en rotation (Mercker et Berneburg, 1992) et modèles d'écoulements dans le proche sillage d'après les mesures de b) Cogotti (1983), c) Mercker et Berneburg (1992) et d) Saddington et al. (2007)

La Figure 2-11 ne présente qu'une description succincte des nombreuses études sur l'aérodynamique au voisinage des roues. Cependant, à l'exception des travaux de Gérardin (Gérardin, 2009, Gérardin et al., 2014, Gérardin et Midoux, 2015), la dynamique du transport des particules dans le sillage des pneus n'a pas fait l'objet d'une attention particulière dans la littérature. Gérardin (2009) a montré que la présence de motifs dans un pneu sculpté permettait à l'air de circuler au niveau de la zone de contact roue/sol. Cela tend à accélérer la vitesse de l'écoulement dans le sillage au niveau du sol. Ainsi, par rapport à une roue lisse, une roue sculptée engendre plus de poussières car la vitesse des vortex inférieurs augmente, générant plus de cisaillement en surface et augmentant donc la concentration des particules mises en suspensions (Gérardin et al., 2014). Pour atténuer leur intensité, Gérardin (2009) propose de placer un flasque sur la jante latérale de la roue. Cela permet de resserrer le flux à l'arrière de celle-ci et de diminuer les concentrations de poussières mises en suspension. Il propose également de collecter les particules émises en les aspirant directement derrière le pneu (Gérardin et Midoux, 2015). Ce dispositif permet de réduire les émissions de poussières de 45 à 90%. Cependant, il n'apparaît pas réaliste d'équiper des véhicules industriels avec des systèmes d'aspiration pour des raisons pratiques et financières.

Les poussières soulevées par les roues sont transportées dans un premier temps dans leur sillage puis sont entraînées dans l'écoulement turbulent plus important généré par l'ensemble du véhicule.

2.5.2 Sillage des véhicules

De nombreuses études ont été réalisées pour caractériser le sillage de véhicules automobiles en utilisant, par exemple, des maquettes simplifiées appelées « corps d’Ahmed » (Gilliéron et Kourta, 2013). Leur utilisation permet de maîtriser les paramètres géométriques du véhicule afin de mettre en évidence leur influence sur l’écoulement de sillage. Pour les corps d’Ahmed, on s’affranchit de divers éléments tels que les rétroviseurs, les antennes, la jonction capot/parebrise... Les travaux de Rodriguez (2018) ont permis de quantifier l’effet de l’angle de la lunette arrière sur la dispersion des polluants particulaires en aval des voitures. Des maquettes simplifiées ont également été utilisées pour étudier les écoulements dans le sillage des semi-remorques (Chaligné, 2013 ; Choi et al., 2014). Ces derniers sont des corps non profilés à l’origine de nombreuses turbulences lorsqu’ils circulent. En effet, la préoccupation majeure lors de la conception de véhicules lourds n’est pas la performance aérodynamique mais plutôt la maximisation de la capacité de chargement (Lo et Kontis, 2016). Chaligné (2013) propose d’améliorer l’aérodynamisme soit par un contrôle actif à l’aide de jets pulsés, soit par un contrôle passif en utilisant des volets déflecteurs permettant de retarder le décollement de la couche limite (Figure 2-12). L’objectif final est de réduire la traînée et donc la consommation de carburant. Cependant, une diminution de la traînée peut générer un allongement du flux tourbillonnaire à l’arrière du camion, ce qui exacerbe la dispersion des particules (Paschkewitz, 2006).

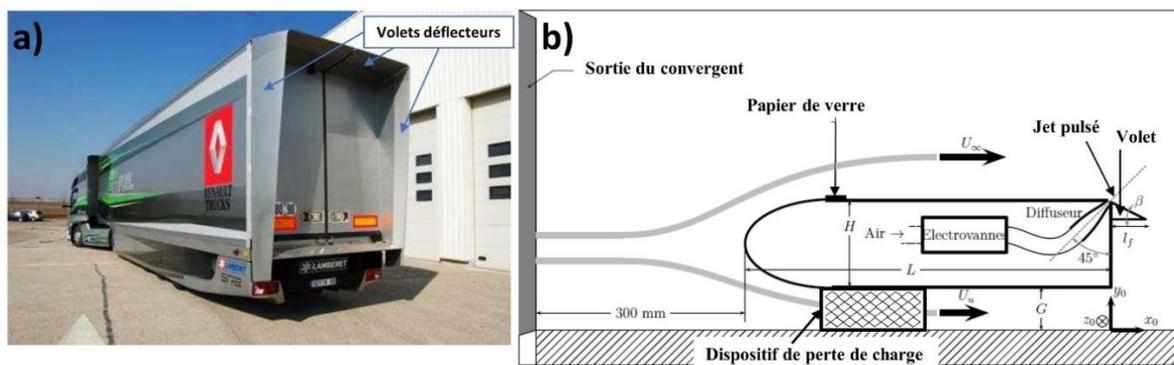


Figure 2-12 : a) Volets déflecteurs sur un prototype Truck Renault ; b) Maquette simplifiée en soufflerie pour l’étude du contrôle de sillage par volets et jet pulsé (Chaligné, 2013)

Le soubassement et les roues des véhicules sont extrêmement simplifiés dans les « corps d’Ahmed ». Cela limite donc la pertinence de leur utilisation pour l’étude des écoulements générés proches du sol. Pour remédier en partie à ce problème, Chaligné (2013) a simulé la diminution de vitesse d’écoulement au niveau de la garde au sol de sa maquette en y plaçant un dispositif de perte de charge constitué de billes dans une cage (voir Figure 2-12-b). Cette diminution de vitesse au niveau du soubassement entraîne la formation d’un vortex au niveau du sol (Figure 2-13). Il peut être potentiellement supprimé en plaçant une bavette semi-rigide sur la partie inférieure de l’arrière de la remorque. Celle-ci vient presque en contact avec le sol afin de bloquer le passage de l’écoulement à cet endroit. Cette solution peut être envisageable pour limiter les émissions de poussières générées par les passages des engins sur les chantiers de terrassement. Cependant, à l’heure actuelle, s’il existe quelques études sur les sillages des dumpers utilisés dans les mines (Wei et al., 2008 ; Sexton et al., 2014), il n’en existe pas à notre connaissance sur ceux générés par les engins de chantier, notamment les tombereaux qui sont souvent utilisés pour les terrassements (voir Figure 0-2).

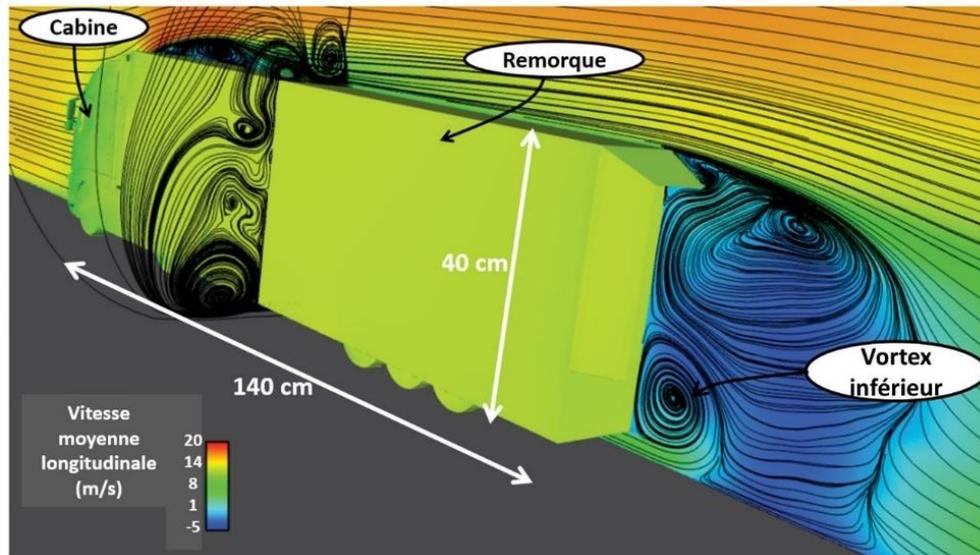


Figure 2-13 : Cartographie de la vitesse moyenne de l'écoulement dans le sillage d'une remorque de poids lourd à l'échelle 1/10 par simulation numérique (adapté de El-Alti et al., 2011)

2.6 Conclusion

Dans cette section, la partie aérodynamique de la problématique de l'envol des poussières a été abordée. Après une description de la couche limite, les études sur l'envol « naturel » des poussières (par érosion éolienne) ont été présentées. Nous nous sommes ensuite focalisés sur les poussières générées par le trafic sur les pistes non revêtues. Leur envol est exacerbé par les structures turbulentes qui se développent au sein des écoulements générés dans le sillage des véhicules. Cette section nous a permis de mettre en évidence l'importance de l'étude des phénomènes aérodynamiques pour comprendre d'une part les processus qui initient le mouvement des particules solides et d'autre part ceux qui entraînent leur transport sur des distances pouvant être très grandes. Cette étude est essentielle pour pouvoir proposer des moyens de lutte contre l'envol des poussières. Il a également été mis en évidence le manque de connaissance sur les écoulements dans le sillage des engins de chantier, notamment les tombereaux. Or, ce point est fondamental dans le cadre de ce travail pour mieux appréhender les mécanismes de mise en suspension des poussières sur les chantiers de terrassement.

Dans la partie suivante, nous aborderons l'aspect « géotechnique » de cette thèse en nous intéressant à l'origine de ces particules, à savoir le sol.

Chapitre 3 : Propriétés, mise en œuvre et sollicitations des sols

Dans cette partie, nous allons décrire dans un premier temps le concept de « sol » du point de vue du géotechnicien. Puis, nous discuterons précisément des sols des chantiers de terrassement en analysant leur compactage et leur dégradation sous sollicitations de trafic. Enfin, sera décrit le processus fondamental dans la limitation de l'envol des poussières, à savoir l'interaction entre l'eau et les particules du sol.

3.1 Caractéristiques physiques et structure des sols

3.1.1 Phases et granulométrie des sols

Un sol est un milieu granulaire constitué de trois phases (Figure 3-1) :

- Une phase solide, notée « s », formée par les grains du sol qui sont de tailles, de formes, de densités et de minéralogies variables ;
- Une phase liquide, notée « w³ », qui correspond à l'eau sous 3 formes (De Marsily, 1981 ; Lan Hoang, 2017) :
 - eau libre qui se déplace par gravité ;
 - eau capillaire retenue dans les interstices par les forces de capillarité ;
 - eau adsorbée qui entoure les grains ;
- Une phase gazeuse, notée « a⁴ », constituée le plus souvent d'air et de vapeur d'eau⁵.

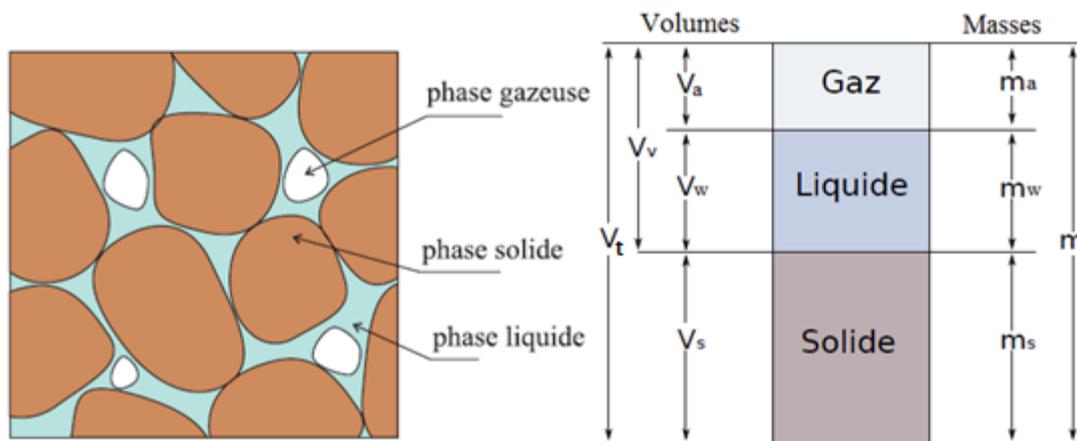


Figure 3-1 : Différentes phases des milieux granulaires (adapté de Gras, 2011)

³ water

⁴ air

⁵ D'autres gaz peuvent être présents dans les sols à haute activité biologique ou contaminés, mais ils ne feront pas l'objet de la présente étude.

Le squelette solide d'un sol est formé de particules de dimensions très variables avec des diamètres pouvant aller de la dizaine de centimètres au micron. La classification des sols en géotechnique se fait en fonction des tailles des particules qui le constituent. Il est donc nécessaire de tracer leurs courbes granulométriques obtenues généralement par tamisage. Ces courbes donnent la distribution des tailles des grains en pourcentage par rapport à la masse totale des particules du sol. La Figure 3-2 présente trois exemples de courbes granulométriques.

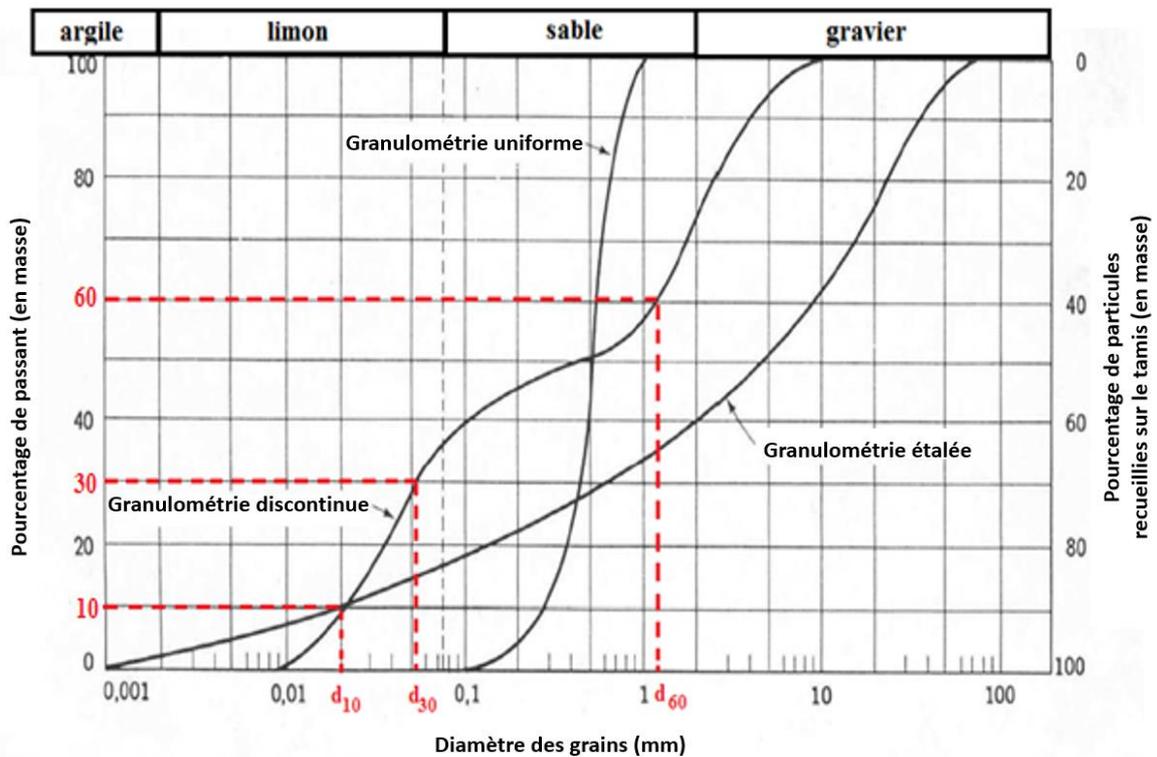


Figure 3-2 : Courbes granulométriques de trois sols présentant une granulométrie discontinue, uniforme et étalée. Les valeurs d_x en rouge correspondent aux ouvertures des tamis par lesquels passent X% des particules du sol (adapté de Langlois, 2014)

Il existe de nombreux systèmes de classification pour nommer les différentes tailles des particules des sols (Soil Survey Staff, 1951 ; AASHTO, 1997 ; ASTM, 2011 ; USDA, 2017). La Figure 3-2 présente le système international (Soil Survey Staff, 1951) qui classe les particules en 4 catégories :

- Particules argileuses : $d < 2 \mu\text{m}$;
- Particules limoneuses : $2 \mu\text{m} < d < 80 \mu\text{m}$;
- Grains de sable : $80 \mu\text{m} < d < 2\,000 \mu\text{m}$;
- Gravier : $d > 2\,000 \mu\text{m}$

Les classifications dépendent du domaine d'étude. Par exemple, dans la science des argiles, ces dernières ne correspondent pas à une coupure granulométrique mais à des minéraux à base de silicates de structure lamellaire. D'après Skorseth et Selim (2000), un sol utilisé en tant que piste de circulation doit contenir du gravier afin d'avoir une résistance suffisante pour soutenir les passages des véhicules. Le sable doit permettre de combler les vides entre les cailloux et apporter de la stabilité. Des particules limoneuses et argileuses sont nécessaires pour créer la matrice de cohésion du matériau mais elles engendreront de la poussière sous l'action du trafic. La granulométrie doit être étalée afin de limiter l'ornièrage.

3.1.2 Paramètres d'état

Les sols sont des milieux poreux. Par conséquent, les paramètres de porosité n et d'indice des vides e sont particulièrement pertinents pour décrire leur comportement (Eq. (3.1) et (3.2)) :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.1)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.2)$$

où V_v , V_s et V_t sont respectivement les volumes des vides, des grains et le volume total du sol (m^3).

La porosité caractérise les vides dans la matrice granulaire et ne doit pas être confondue avec la rugosité du sol qui désigne l'état de surface (voir section 2.3). Si l'indice des vides est trop important il y aura de fortes déformations de la matrice granulaire sous l'effet de la circulation des véhicules. Cela entraînera une désolidarisation des grains du sol et donc une génération potentiellement importante de poussières. Si l'indice des vides est trop faible, l'eau s'infiltré difficilement dans le sol. Or, c'est elle qui permet de solidifier la matrice granulaire en liant les grains entre eux.

Les sols sur les chantiers de terrassement ne sont pas saturés : l'eau ne remplit pas entièrement les pores. Il s'agit donc de tenir compte du degré de saturation S_r (Eq. (3.3)) :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (3.3)$$

V_w étant le volume d'eau du sol (m^3).

Il est très important de prendre en compte la teneur en eau des sols. Cela peut se faire de manière différente suivant les pratiques. Ainsi, les chimistes utilisent généralement la notion de teneur en eau volumétrique θ_w (Eq. (3.4)), tandis que les variations de volumes des infrastructures imposent aux mécaniciens des sols de travailler plutôt avec la teneur en eau massique w (Eq. (3.5)) :

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_t} \times 100\% \quad (3.4)$$

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (3.5)$$

avec m_w et m_s les masses d'eau et des grains du sol (kg).

L'état hydrique d'un sol va particulièrement influencer son comportement. Pour quantifier cette influence, on utilise notamment les « limites d'Atterberg » (GTR, 2000) (Figure 3-3). Ces limites sont les suivantes :

- La limite de liquidité (w_L) : elle correspond à la teneur en eau à partir de laquelle la cohésion disparaît dans le sol qui se comporte alors plutôt comme un liquide ;
- La limite de plasticité (w_p) : elle correspond à la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état semi-solide⁶ à l'état plastique. Dans cet état, le sol commence alors à se comporter comme un solide plastique en se déformant de façon irréversible sous chargement ;
- La limite de retrait (w_s) : lorsque le sol est en phase de déshydratation, il va subir une déformation volumique jusqu'à atteindre la limite de retrait. Entre cette limite de retrait et le séchage total ($w=0$), le volume du sol restera constant.

La différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité s'appelle l'Indice de Plasticité ($IP = w_L - w_p$). Les sols à faible IP ($IP < 6$) sont friables lorsqu'ils sont secs. Ils ont tendance à présenter des craquelures et subissent de l'abrasion sous sollicitations de trafic, générant ainsi beaucoup de poussières (Karafiath et Nowatzki, 1978). Le critère d'empoussiérement retenu par Struss et Mikucki (1977) est la limite de plasticité w_p : plus elle est élevée et plus un sol générera de la poussière.

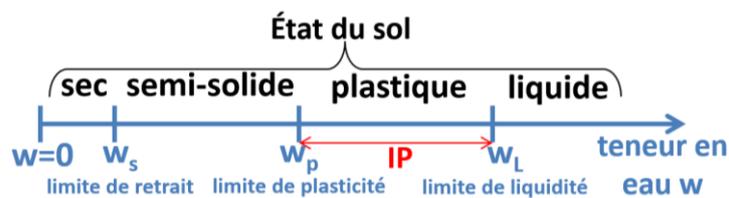


Figure 3-3 : Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent de juger de la propension d'un sol à générer de la poussière en caractérisant notamment son argilosité. Les argiles sont constituées de successions de couches de minéraux formant des plaquettes de faibles dimensions. Leur structure en feuillet leur confère une surface spécifique très importante. Cette dernière correspond à la surface en contact avec le milieu environnant pour une quantité de matériau donnée (exprimée en $m^2.g^{-1}$). Ce paramètre a une importance dans l'affinité à l'eau du sol mais aussi dans la capacité des particules d'argile à rester longtemps en suspension une fois qu'elles se sont envolées.

3.1.3 Classification des sols selon le Guide des Terrassements Routiers

Le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000) est un document technique qui fait référence sur les chantiers de terrassement en France. Il établit une classification des matériaux granulaires et des conditions de leur utilisation sur chantier. Les sols sont classés en 4 catégories (A, B, C ou D) selon leur granulométrie et leurs paramètres d'état (Figure 3-4 et Tableau 3-1). On notera dans la classification que le paramètre d'état retenu peut être l'Indice de Plasticité (IP) ou la valeur au bleu de méthylène du sol (VBS). Cette dernière correspond à la quantité de bleu de méthylène fixée par 100 g de sol et caractérise la « propreté » de ce sol. Plus la valeur VBS est élevée, plus le sol contient de l'argile gonflante. Ce type d'argile a la propriété d'augmenter de volume lorsqu'elle est humidifiée. C'est en particulier le cas des argiles montmorillonites.

⁶ « L'état semi-solide (ou solide avec retrait) correspond à des teneurs en eau suffisamment faibles pour que les grains aient des contacts entre les particules solides même si le milieu est encore saturé ou quasi. » (Mbuyi, 2012)

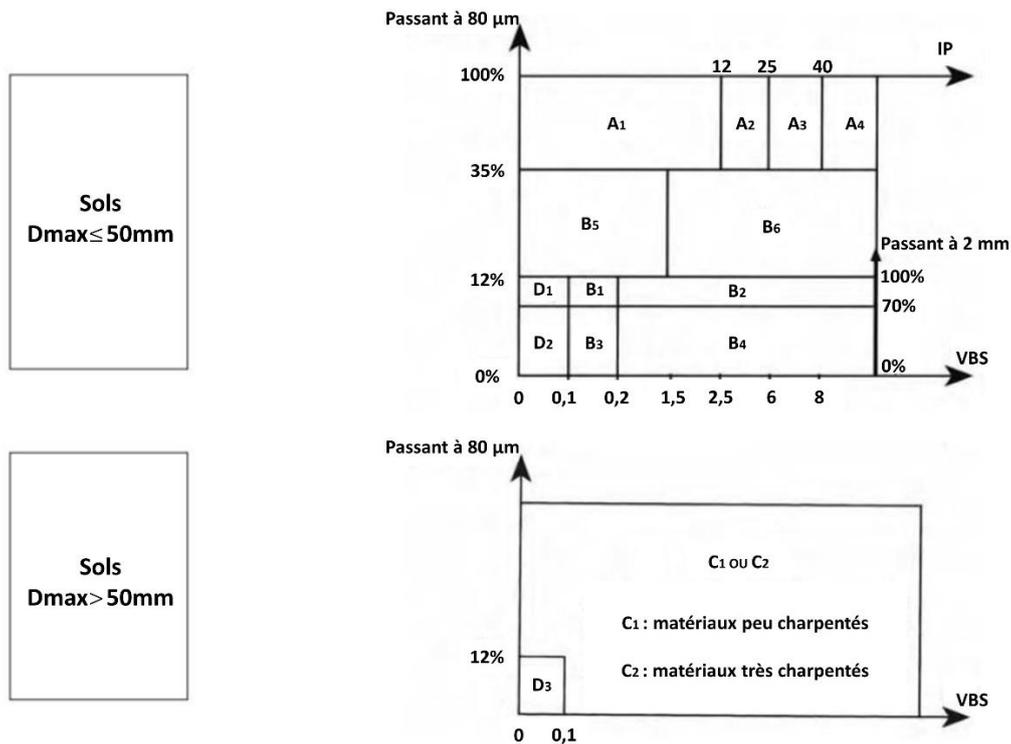


Figure 3-4 : Classification des sols fins et grossiers (GTR, 2000)

Classe	Sous-classe	Caractéristiques principales
A Sols fins	A1 : Löss	Changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneurs en eau.
	A2 : Sables fins argileux, limons	Très employés sur les chantiers de terrassement.
	A3 : Argiles	Difficiles à mettre en œuvre sur chantier.
	A4 : Argiles très plastiques	Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé sur les chantiers.
B Sols sableux et graveleux avec fines	B1 : Sables silteux	Matériaux sableux insensibles à l'eau.
	B2 : Sables argileux	Matériaux réagissant rapidement aux variations hydriques.
	B3 : Graves silteuses	Matériaux graveleux insensibles à l'eau.
	B4 : Graves argileuses	Matériaux graveleux sensibles à l'eau.
	B5 : Sables très silteux	Sables au comportement proche des Löss.
C Sols avec fines et gros éléments	C1 : Alluvions grossières	Matériaux anguleux peu charpentés.
	C2 : Argiles à silex	Matériaux anguleux très charpentés.
D Sols insensibles à l'eau	D1 : Sables alluvionnaires	Matériaux sans cohésion, perméables et érodables
	D2 : Graves alluvionnaires propres	Matériaux sans cohésion et perméables, peuvent supporter du trafic
	D3 : Graves alluvionnaires	Matériaux sans cohésion et perméables, inadaptés au malaxage.

Tableau 3-1 : Détail de la classification (GTR, 2000)

3.2 Comportement des sols au compactage

3.2.1 Généralités sur le compactage

Le compactage est réalisé afin de déformer plastiquement un sol dans le but de réduire son indice des vides. En génie civil, ce processus augmente la capacité portante et la durabilité du sol en tant que structure subissant des sollicitations (Biarez et Favre, 1975). Sur les chantiers de terrassements, la circulation des engins s'effectue généralement sur des sols compactés. Par exemple, dans le cadre de la construction d'une chaussée, l'approvisionnement des matériaux des couches de fondation est réalisé par la circulation des tombereaux sur la couche de forme (Figure 3-5). Cette couche est constituée de matériaux granulaires. Elle est compactée afin d'avoir une capacité portante suffisante pour assurer la traficabilité des engins à court terme et pour supporter la structure de chaussée à long terme (GTR, 2000 ; AIPCR, 2019). De même, pour les pistes temporaires qui servent à la circulation des véhicules, on réalise préalablement un compactage afin de limiter la formation d'ornières. Comme les surfaces à compacter sont généralement importantes, ce compactage est principalement réalisé avec des engins munis de rouleaux. Ces derniers peuvent être vibrants ou non, en acier ou constitués de plusieurs pneumatiques (plutôt préconisés pour le compactage des enrobés). Les rouleaux en acier sont soit lisses soit munis de pieds dameurs qui pénètrent dans le sol pour réaliser un pétrissage en plus de la compression.

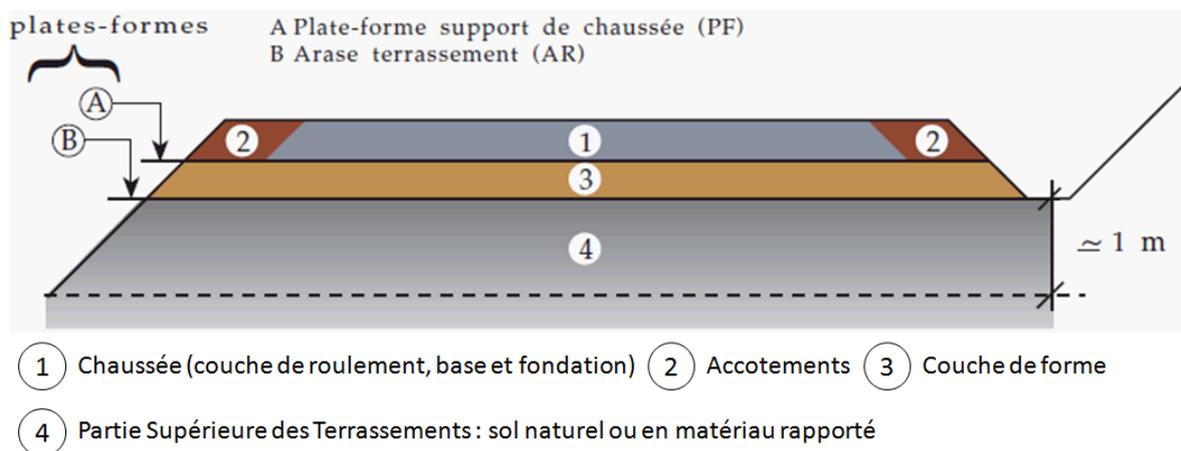


Figure 3-5 : Vue en coupe 2D d'une structure de chaussée (GTR, 2000)

Le principe de mise en œuvre de la structure consiste dans un premier temps à humidifier le sol pour former des agrégats. Ces derniers sont ensuite déformés et réarrangés lors du compactage (Figure 3-6). Dans le cas d'un compactage par roulement, les agrégats subissent une évolution temporelle des contraintes verticales, horizontales et de cisaillement. Cela est dû à la rotation du tenseur des contraintes induite par la circulation du rouleau (Figure 3-7).

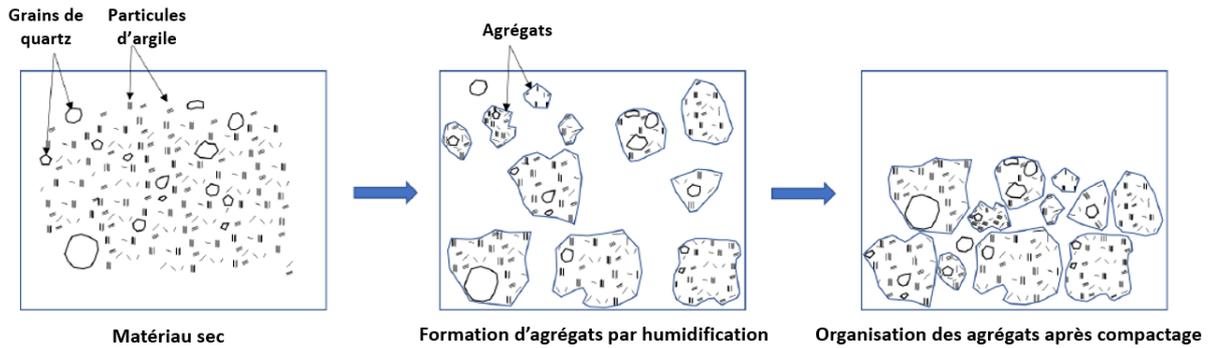


Figure 3-6 : Formation des agrégats lors de la mise en œuvre du sol par humidification et compactage (Sediki, 2018)

Pour des essais en laboratoire, les sols sont généralement compactés soit de façon statique en appliquant un chargement vertical uniforme sur l'ensemble de la surface d'un échantillon, soit de façon dynamique par impacts successifs d'un marteau qui se déplace pour balayer toute la surface de l'échantillon, soit par vibration ou malaxage (Ping et al., 2003). Ces méthodes ne permettent pas de reproduire la rotation du tenseur des contraintes décrite à la Figure 3-7. Il n'est pas possible en les appliquant d'obtenir les états de surface comparables à ceux rencontrés in-situ. Nous verrons à la section 5.1.1 la méthode adoptée dans nos essais pour résoudre cette problématique.

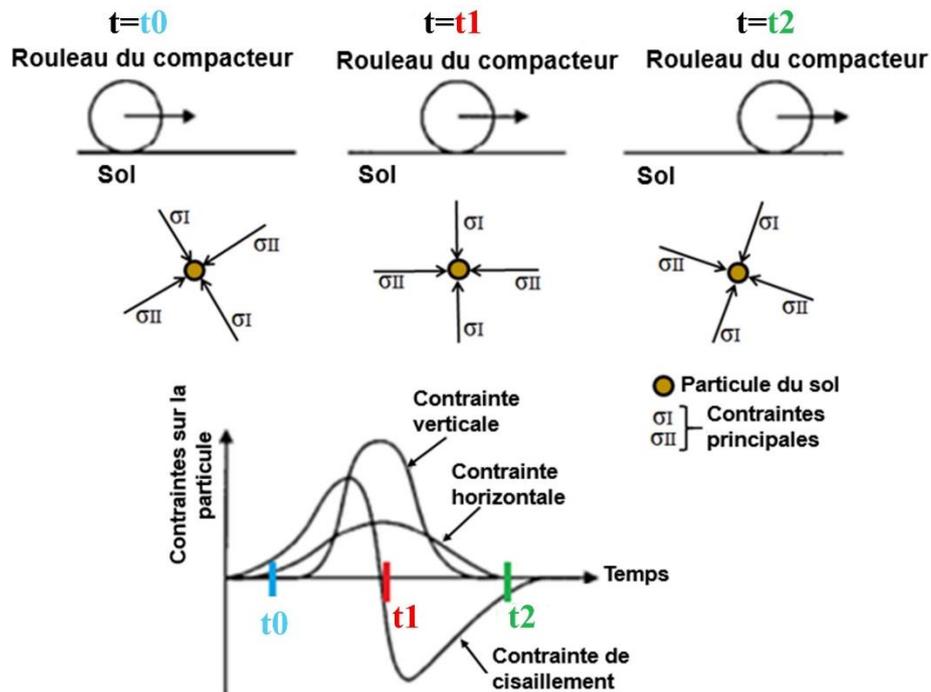


Figure 3-7 : Rotation du tenseur des contraintes sur une particule d'un sol compacté par roulement, adapté de Lekarp et al. (2000)

L'essai de référence pour la caractérisation du compactage d'un sol est l'essai Proctor (Proctor, 1933). Il consiste tout d'abord à compacter un sol dans une éprouvette à une teneur en eau donnée. Ensuite, on détermine la masse volumique sèche ρ_d du sol dans l'éprouvette. En répétant cette opération pour plusieurs teneurs en eau et en appliquant toujours la même énergie de compactage, il est possible de

tracer la « courbe Proctor » de l'évolution de ρ_d en fonction de la teneur en eau (Figure 3-8). La forme en cloche de cette courbe peut s'expliquer par l'effet lubrificateur de l'eau qui facilite l'arrangement des particules solides et qui augmente donc la densité du sol jusqu'à une valeur maximale, appelée « Optimum Proctor Normal » (OPN) (Leroueil et Hight, 2013). Au-delà de ce maximum, une augmentation de la teneur en eau entraîne uniquement une augmentation du volume d'eau du sol et donc diminue sa densité.

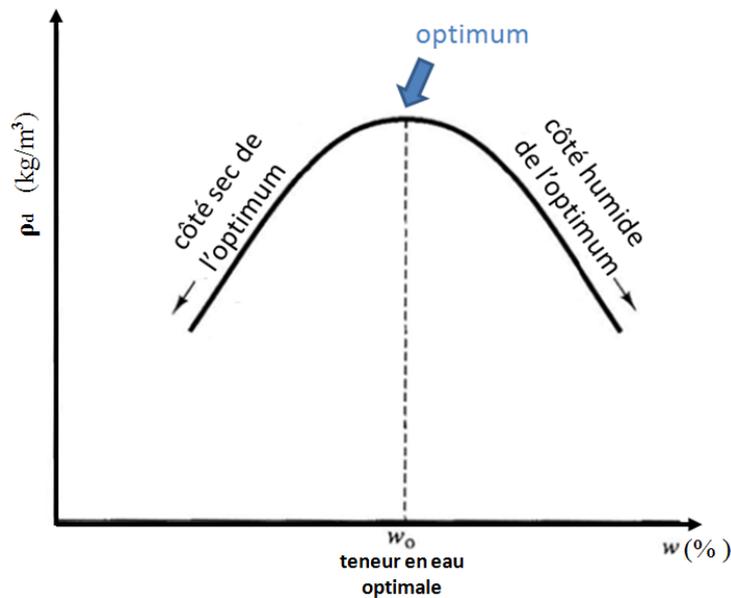


Figure 3-8 : Courbe Proctor typique d'un sol. L'optimum Proctor est l'état de densité maximale, il correspond à la masse volumique sèche maximale obtenue après compactage à une teneur en eau dite « optimale ».

Le mode, l'énergie de compactage et la teneur en eau du sol vont avoir une influence sur la microstructure de ce dernier en termes d'arrangement et d'agrégation des particules entre elles et de distribution des pores (Sediki, 2018). Cette influence est décrite à la section suivante.

3.2.2 Modification de la microstructure du sol en lien avec le compactage

Dans la littérature, la microstructure des sols est généralement évaluée de manière quantitative avec la Porosimétrie par Intrusion de Mercure (PIM) et qualitative à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) (Delage et al., 1996, Romero et Simms, 2008, Romero et al., 2011, Casini et al., 2012, Alonso et al., 2013, Burton et al., 2015, Sediki et al., 2018b). Ces techniques permettent de mettre en évidence la porosité des sols en définissant trois types de pores : les macropores de diamètre supérieur à 30 μm , les mésopores de diamètre compris entre 30 μm et 0,2 μm et les micropores de diamètre inférieur à 0,2 μm . Il est courant de n'en considérer que deux types : les macropores et les micropores, les premiers étant situés entre les agrégats et les seconds à l'intérieur (Figure 3-9).

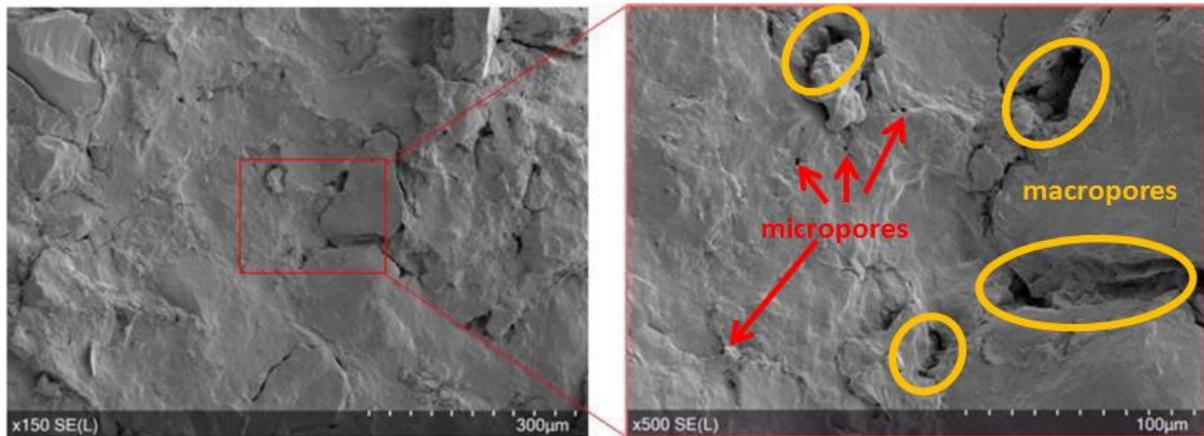


Figure 3-9 : Observation au MEB de l'argile à silex de St-Calais (France) compactée in-situ par un engin à rouleaux lisses sans-vibrations (adapté de Sediki, 2018)

L'évaluation quantitative de la porosité par PIM consiste à introduire du mercure dans une éprouvette de sol. Il faut appliquer une pression au mercure pour qu'il pénètre dans les pores. Pour qu'il entre dans un pore circulaire de diamètre Φ , la pression à appliquer est déterminée à l'aide de l'équation de Washburn (Eq. (3.6)) :

$$P_{Hg} = \frac{4 \times \sigma_{Hg} \times \cos\theta_{Hg}}{\Phi} \quad (3.6)$$

où σ_{Hg} est la tension superficielle du mercure ($0,484 \text{ N.m}^{-1}$ à $25 \text{ }^\circ\text{C}$) et θ_{Hg} est l'angle de contact du mercure avec le matériau ($\approx 150^\circ$).

Au fur et à mesure que l'on augmente la pression, on mesure le volume V injecté. La courbe de distribution porale est obtenue en traçant la fraction volumique de mercure injectée par unité de masse du sol ($dV/d\log\Phi$, en mL.g^{-1}) en fonction du diamètre des pores. La Figure 3-10 présente la distribution porale de deux échantillons d'un mélange de sable et d'argile kaolinite compactés dans la même éprouvette (l'un en 1 couche et l'autre en 3 couches faisant chacune l'épaisseur du tiers de l'éprouvette). La Figure 3-10 met en évidence une distribution unimodale pour le compactage en 3 couches et bimodale pour le compactage en 1 couche. On remarque que le compactage affecte principalement les pores de taille plus importante ($\approx 10 \text{ }\mu\text{m}$). Plus le sol est compacté à une densité élevée et moins il a de macropores. Or, on considère généralement que les écoulements d'eau ont lieu dans les macropores du sol connectés entre eux (Ranaivomanana et al., 2017). Ainsi, le compactage affecte la perméabilité du sol et donc la capacité d'infiltration de l'eau. Ce point est essentiel à analyser lorsque l'on souhaite quantifier l'efficacité de l'arrosage d'un sol pour en limiter les émissions de poussières.

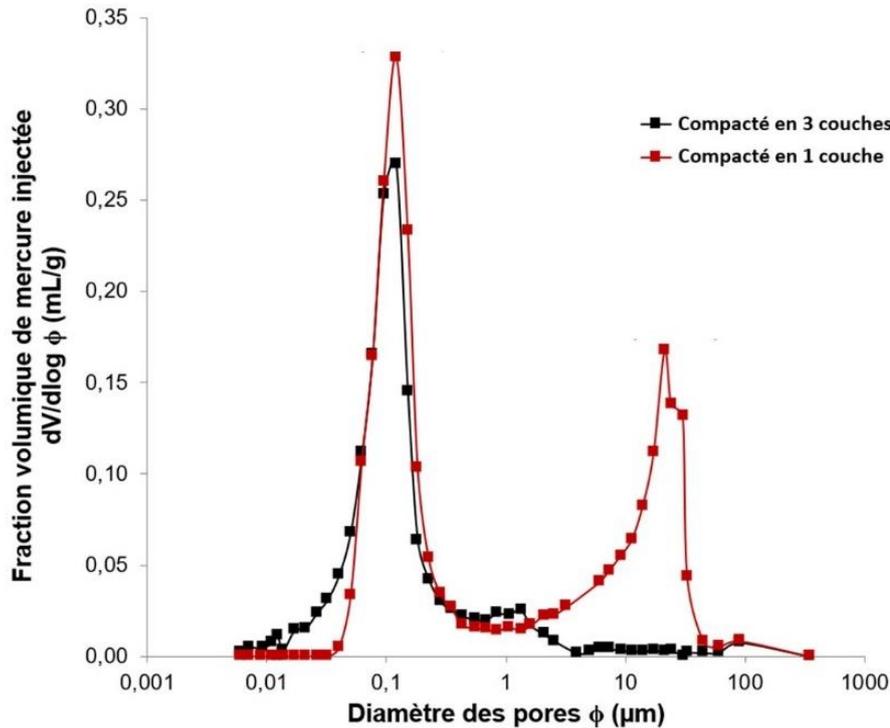


Figure 3-10 : Distribution porale d'un mélange sable/kaolinite compacté dans un moule Proctor en 1 couche (courbe rouge) et en 3 couches (courbe noire) à la teneur en eau optimale (Sediki, 2018)

La teneur en eau a une influence sur la microstructure post-compaction. En effet, Tarantino et De Col (2008) ont montré que des sols compactés du côté sec de l'OPN voient leur indice des vides augmenter lorsqu'ils sèchent. En revanche, l'indice des vides diminue lors du séchage pour des sols compactés du côté humide. Il est établi dans la littérature qu'un compactage côté sec de l'optimum génère communément une structure bimodale et un compactage côté humide une structure unimodale (Delage et al., 1996, Casini et al., 2012, Leroueil et Hight, 2013, Burton et al., 2015). Cette structure contient très peu de macropores. Elle est donc intéressante dans un contexte de limitation de l'envol des poussières sachant que les macropores (ou « pores inter-agrégats ») sont des zones de faiblesse de la matrice granulaire et que leur présence facilite l'arrachement des agrégats sous sollicitations dues au trafic.

3.2.3 Comportement volumétrique des sols partiellement saturés lors du compactage

Les sols non saturés sont des milieux poreux dans lesquels les pores contiennent à la fois de l'eau et de l'air. L'eau étant incompressible, c'est l'air qui se comprime ou qui est évacué lors du processus de compactage du sol. La courbe Proctor (voir Figure 3-8) ne permet pas de caractériser ce phénomène car elle ne tient compte que de la teneur en eau du matériau. Kodikara (2012) propose d'utiliser plutôt le ratio d'humidité e_w (Eq. (3.7)) dans les modèles constitutifs des sols non saturés compactés (Eq. (3.7)) :

$$e_w = w \times G_s \quad (3.7)$$

où G_s est le poids spécifique des grains du sol (Eq. (3.8)) :

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_{eau}} \quad (3.8)$$

où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau (1000 kg.m⁻³).

Une représentation des courbes de compactage d'un sol dans l'espace e-e_w-p (indice des vides-ratio d'humidité-pression nette de compactage (Pa)) permet d'avoir un aperçu de l'état de saturation et de la microstructure d'un sol en fonction de l'énergie de compactage déployée (Figure 3-11).

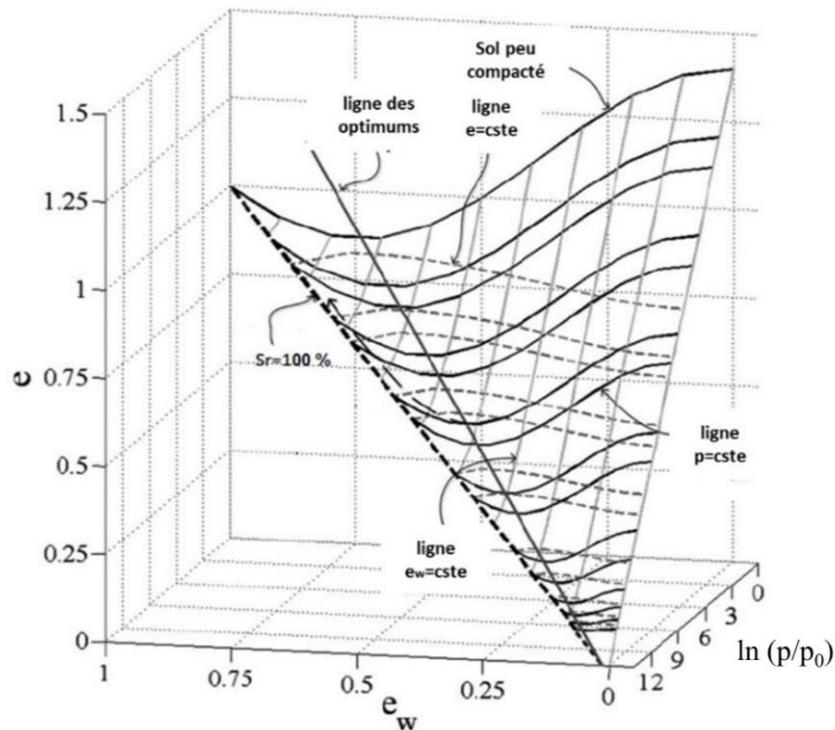


Figure 3-11 : Courbes de compactage d'un sol dans l'espace e-e_w-p (adapté de Kodikara, 2012)

Les trois paramètres de la Figure 3-11 vont influencer la capacité portante du sol ainsi que la manière dont les agrégats vont se former et se réarranger lors du compactage. Ils auront ainsi un rôle prépondérant dans la manière dont le sol compacté va se comporter lorsqu'il sera sollicité par la circulation des véhicules. Mettre en évidence ce comportement est essentiel pour comprendre les mécanismes d'apparition des poussières en surface. Cependant, il existe relativement peu d'études à l'heure actuelle sur cette problématique. Elles sont détaillées dans la section suivante.

3.3 Dégradation des sols sous sollicitations de trafic

Les agrégats formés par le compactage du sol peuvent être arrachés de la surface puis déstructurés sous l'effet de la circulation des véhicules. Ces processus entraînent l'apparition de particules fines en surface qui ne sont plus liées à la matrice granulaire et qui sont donc susceptibles de s'envoler en générant des nuages de poussières (Lohnes et Coree, 2002, Sediki, 2018).

La circulation d'un engin sur une surface se caractérise par la transmission au sol de deux types d'efforts : des efforts de compression dus au poids de l'engin et des efforts de cisaillement dus au déplacement par l'intermédiaire des pneus. Ce cisaillement résulte des frottements des pneumatiques avec le sol qui sont générés par le glissement (adhérence) et le roulement des roues sur la surface (Karafiath et Nowatzki, 1978). L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (Figure 3-12-a) permet de caractériser ce mécanisme. Il consiste à placer un sol dans un récipient constitué de deux boîtes et d'exercer une force verticale sur celui-ci. L'une des boîtes est fixe et l'autre se déplace progressivement. Ce déplacement entraîne la création d'une force de cisaillement dans le sol qui est mesurée par une cellule de force. En traçant l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement, il est possible de déterminer la résistance au cisaillement du sol (τ_{max} sur la Figure 3-12-b) sous une certaine contrainte normale σ_n . En réalisant cet essai avec différentes valeurs de σ_n , il est possible d'estimer les paramètres du critère de rupture de Mohr-Coulomb (Eq. (3.9)) :

$$\tau_{max} = c + \sigma_n \times \tan\phi \quad (3.9)$$

où c et ϕ représentent la cohésion (kPa) et l'angle de frottement ($^\circ$) du sol, respectivement.

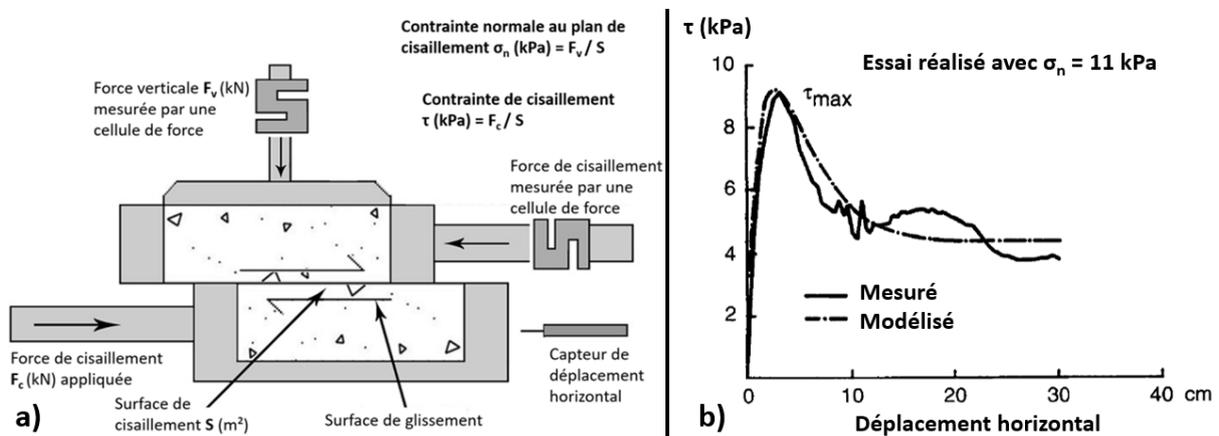


Figure 3-12 : a) Principe de l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande et b) Exemple de courbe expérimentale obtenue pour un essai (adapté de Wong, 2001)

L'arrachement par un pneu en circulation d'un agrégat de sol correspond à une rupture en cisaillement de ce dernier au niveau de la zone de contact avec le pneu. Il est donc nécessaire de connaître les paramètres de cisaillement à l'interface pneu / sol. Pour ce faire, il s'agit de réaliser l'essai décrit précédemment mais en remplaçant le sol dans l'une des demi-boîtes par le matériau constituant le pneu, à savoir du caoutchouc. Selon le même principe, les paramètres de Mohr-Coulomb à l'interface caoutchouc / sol sont établis (Eq. (3.10)) :

$$\tau_{max} = c_a + \sigma_n \times \tan\delta_a \quad (3.10)$$

où c_a et δ_a correspondent respectivement à l'adhésion (kPa) et à l'angle de frottement d'interface ($^\circ$) entre le caoutchouc et le sol.

Il est alors possible de déterminer les contraintes de cisaillement mobilisées à l'interface sol / pneu lorsque ce dernier est en circulation (τ_{mob} sur la Figure 3-13-a). Ce sont ces contraintes qui vont arracher les agrégats du sol selon un angle de rupture α (Figures 3-13-b et 3-13-c). Sur la Figure 3-13-c, le demi-cercle correspond à l'état des contraintes lors de la rupture dans le sol lorsque les contraintes principales valent σ_1 et σ_3 . Il est tangent à la courbe du critère de rupture de Mohr-Coulomb (Eq. (3.9)).

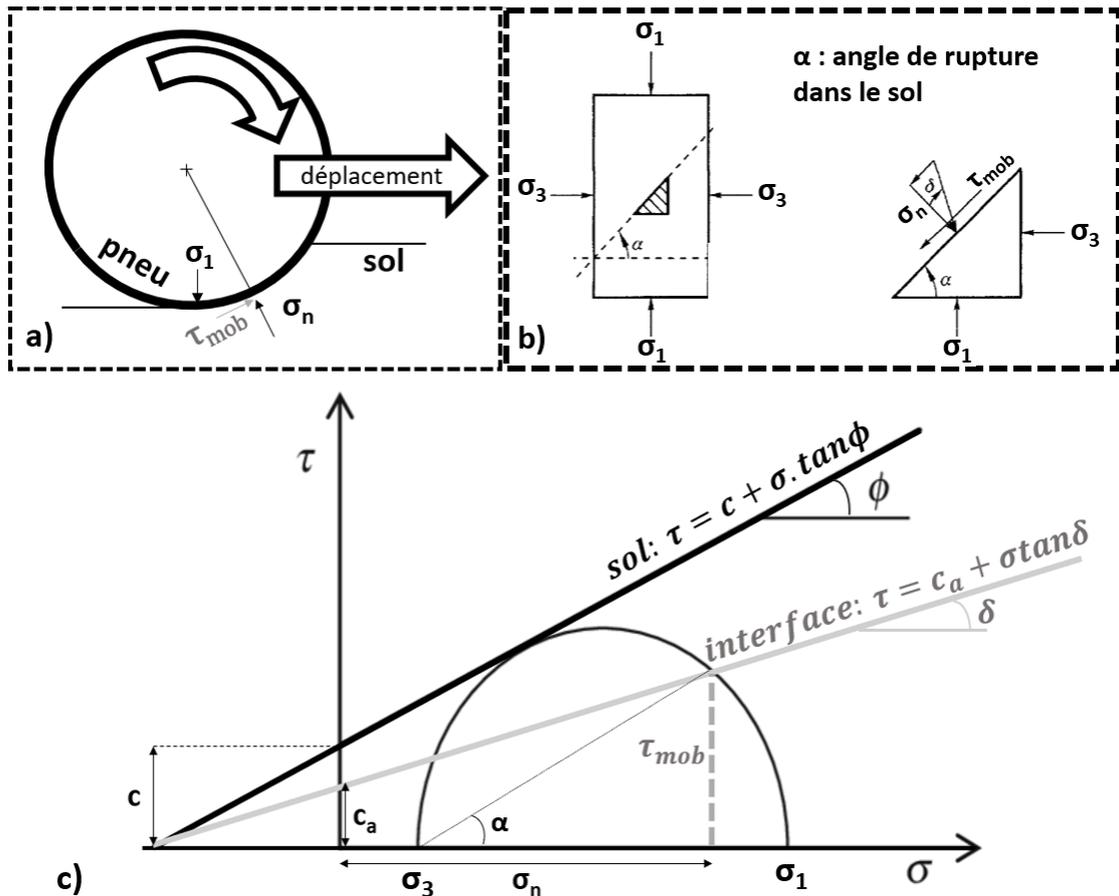


Figure 3-13 : a) Mécanisme de mobilisation des contraintes de cisaillement lors de la circulation d'un pneu sur un sol ; b) Agencement des contraintes dans la zone de rupture du sol ; c) Estimation de ces contraintes à partir des critères de Mohr-Coulomb (adapté de Karafiath et Nowatski, 1978)

L'arrachement par le pneu des agrégats en surface du sol initie le processus d'envol des poussières. Ce phénomène a été très peu étudié dans la littérature. La seule étude notable est celle de Sediki (2018). Elle a permis de mettre en évidence le mécanisme de détachement progressif des agrégats du sol lors des passages successifs de roue. N'étant plus liés à la matrice granulaire, ceux-ci se désagrègent à cause du frottement avec les pneumatiques et conduisent à une accumulation de particules fines en surface du sol (Figure 3-14).

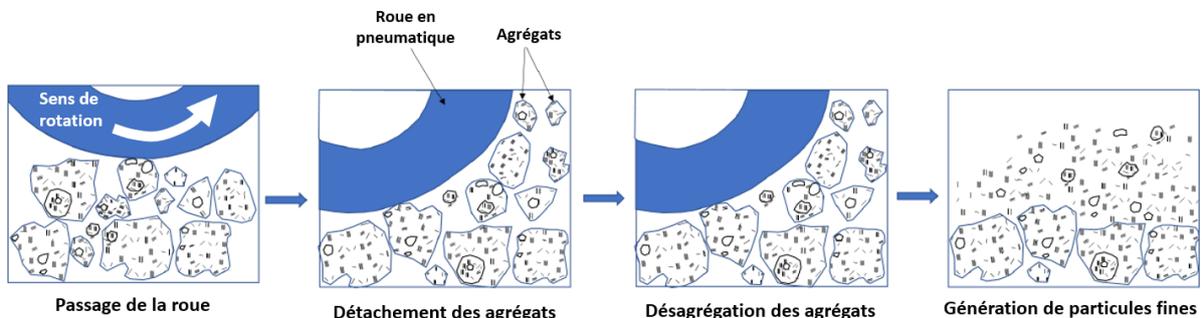


Figure 3-14 : Mécanismes de déstructuration des agrégats sous sollicitations de trafic (Sediki, 2018)

Sediki (2018) a travaillé avec des mélanges de sable et d'argile kaolinite compactés dans des éprouvettes suivant différentes configurations (Figure 3-15) détaillées dans le Tableau 3-2. Ces éprouvettes ont ensuite subi des sollicitations de trafic. Les déformations de surface et les quantités de particules arrachées à la matrice granulaire ont été mesurées en fonction du nombre de cycles de passages de roue. Parmi les configurations testées, l'étude a permis de montrer que la configuration « B » (Tableau 3-2) correspondait à la dégradation de surface la plus faible. Cette configuration consiste à compacter le sol à la densité optimale et à une teneur en eau correspondant à 75% de la teneur en eau optimale.

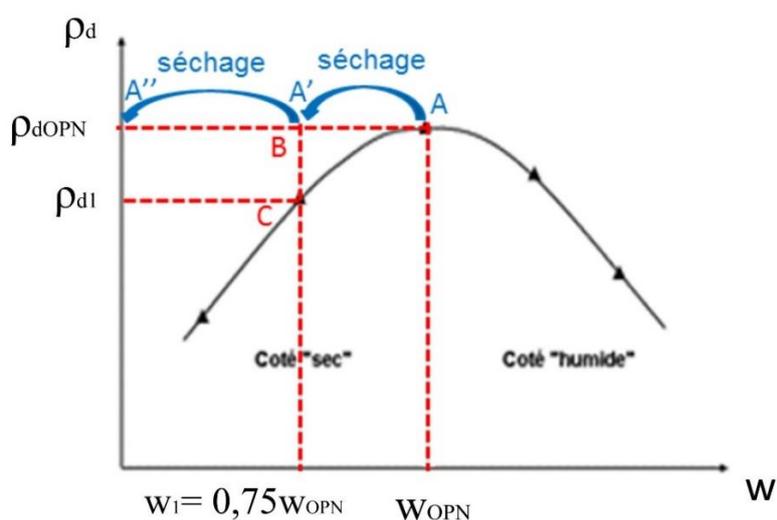


Figure 3-15 : Configurations de compactage des éprouvettes sollicitées par Sediki (2018)

Configuration	Conditions de compactage	Séchage en étuve (40°C)	Conditions de déstructuration
A	W_{OPN} / ρ_{dOPN}	Non	W_{OPN} / ρ_{dOPN}
B	$0,75W_{OPN} / \rho_{dOPN}$	Non	$0,75W_{OPN} / \rho_{dOPN}$
C	$0,75W_{OPN} / \rho_{dI}$	Non	$0,75W_{OPN} / \rho_{dOPN}$
A'	W_{OPN} / ρ_{dOPN}	Oui	$0,75W_{OPN} / \rho_{dOPN}$
A''	W_{OPN} / ρ_{dOPN}	Oui	$w=0\% / \rho_{dOPN}$

Tableau 3-2 : Conditions de préparation et de sollicitation des éprouvettes de Sediki, 2018

La limitation des essais de sollicitations des sols réalisés par Sediki (2018) est liée au fait qu'ils ont été effectués avec un pneu lisse alors que les pneus des tombereaux sont sculptés. L'effet du type de pneu sur les émissions de poussières a été très peu étudié. On peut néanmoins noter les études de Pirjola et al. (1995) et de Hussein et al. (2008) qui ont analysé l'influence de pneus cloutés, hiver et été sur les émissions de poussières. Ils ont montré que les pneus cloutés génèrent entre 2 et 6 fois plus de PM_{10} que les pneus hiver et entre 4 et 17 fois plus de PM_{10} que les pneus été. Toutefois, les essais ont été réalisés sur des routes pavées. L'exploitation de leurs résultats est donc difficile à extrapoler aux situations rencontrées sur les chantiers de terrassement.

En faisant circuler un véhicule sur des sols sableux du désert Mojave (États-Unis), Gillette et al. (1982) ont montré que la déstructuration des sols sous trafic dépendait de l'épaisseur et de la résistance des croûtes formées en surface du sol. En effet, la présence d'argile et de sels solubles dans un sol entraîne

la formation d'une croûte dure en surface lors du séchage. Cette croûte est d'autant plus résistante que la teneur en argile est élevée. Ils ont estimé que les passages du véhicule entraînaient une diminution de la rugosité du sol car ils cassaient puis compactaient les agrégats. Cependant, ce compactage n'est que partiel et il laisse en surface des particules fines qui ne sont plus liées à la matrice granulaire.

Ayant établi l'origine de la présence des particules fines en surface des sols des chantiers de terrassement, nous pouvons à présent analyser les mécanismes qui permettent d'éviter l'envol de ces particules. Ceci est l'objet de la partie suivante.

3.4 Interactions entre l'eau et les particules du sol

La présence d'eau dans un sol est un des facteurs prépondérants pour limiter l'envol des particules sous forme de poussières. En effet, l'eau adsorbée et les ponts capillaires entre les particules, créés par la présence d'eau interstitielle, participent à accroître les forces inter-particulaires. Notons que ces dernières comprennent également des forces d'intensité moindre, comme les liaisons hydrogène et les forces électrostatiques et de Van der Waals (Israelachvili, 2011). Ces forces créent une cohésion entre les grains du sol en les maintenant en contact les uns avec les autres. La Figure 3-16 présente le cas simplifié d'un contact entre deux grains sphériques liés entre eux par des forces de capillarité. Une fine couche d'eau adsorbée (d'épaisseur inférieure à 1 nm) entoure chacun des grains. L'adsorption correspond à la fixation des molécules d'eau par des phénomènes électrostatiques. La quantité d'eau adsorbée est fonction de la surface des grains. Elle peut donc être très importante pour des sols fins comme les argiles dont les particules ont une surface spécifique très grande. Ainsi, le phénomène d'adsorption peut être négligé pour les sables mais il doit être pris en compte pour les sols argileux (Fécan et al., 1999).

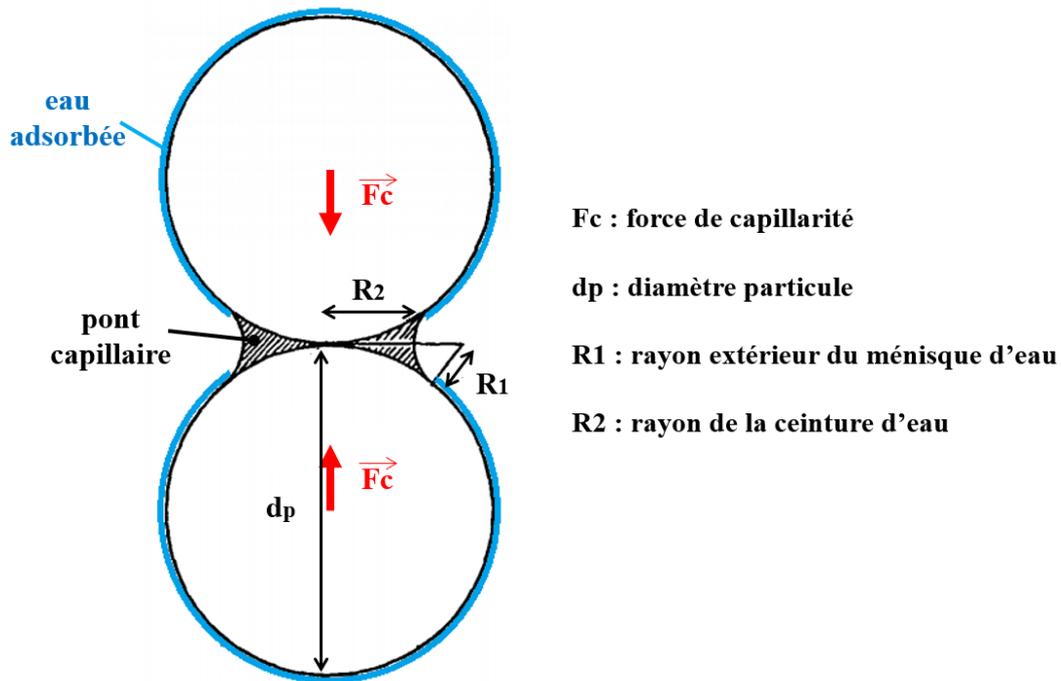


Figure 3-16 : Contact entre deux grains sphériques humides. Présence d'eau sous forme d'un pont capillaire entre les deux grains et d'un fin film autour des surfaces correspondant à l'adsorption. Les forces de capillarité sont indépendantes de la gravité (adapté de Haines, 1925)

Haines (1925) fut l'un des précurseurs dans l'étude du pont capillaire. Il a démontré qu'à l'interface eau/air, la pression de l'air était plus élevée que celle de l'eau. Cela génère un déficit de pression, appelé « suction », qui permet d'expliquer la forme concave du pont liquide. Ses travaux ont été poursuivis par Fisher (1926) qui a déterminé que deux grains sphériques sont maintenus en contact chacun par une force d'attraction capillaire F_c , dont l'expression est donnée par l'Eq. (3.9) :

$$F_c = 2\pi R_2 \sigma_{H_2O} + \pi R_2^2 \sigma_{H_2O} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.9)$$

où R_1 et R_2 sont respectivement les rayons du ménisque et de la ceinture du pont capillaire (voir Figure 3-16) et σ_{H_2O} est la tension superficielle de l'eau ($\approx 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$ pour l'eau à 20 °C).

Des travaux plus récents (Kruyt et Millet, 2017 ; Mielniczuk et al., 2017 ; Nguyen et al., 2019) ont encore amélioré le modèle analytique de description du pont capillaire entre deux sphères. En réalité, comme les particules d'un sol ne sont pas sphériques mais anguleuses, le contact entre deux cônes est plus représentatif de l'interaction entre deux grains (Figure 3-17).

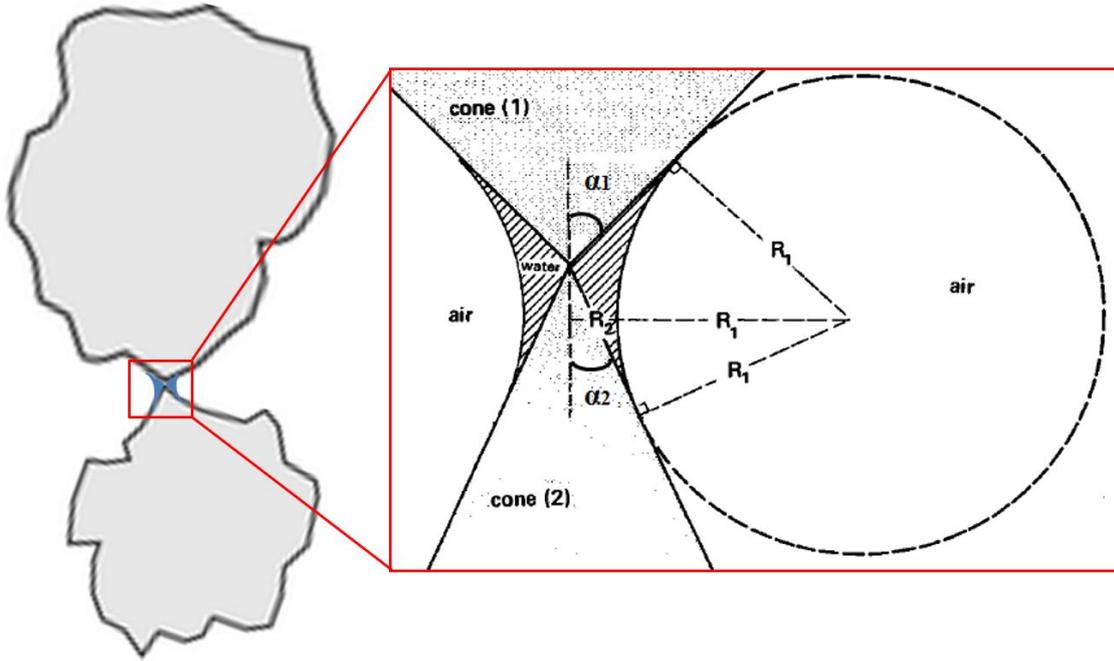


Figure 3-17 : Pont capillaire au point de contact entre deux particules anguleuses (adapté de McKenna-Neuman et Nickling, 1989)

En travaillant avec cette géométrie, McKenna-Neuman et Nickling (1989) ont trouvé une expression plus réaliste pour la force de capillarité (Eq. (3.10)) :

$$F_c = \frac{\pi \sigma_{H_2O}^2}{|\psi_m|} G(\alpha_1, \alpha_2) \quad (3.10)$$

où ψ_m est le potentiel matriciel de l'eau du sol qui tient compte de l'effet de succion entre l'eau et les grains solides et G est un coefficient fonction de la géométrie de contact (angles α_1 et α_2 , Figure 3-17). Les forces de capillarité entraînent une augmentation de la vitesse seuil d'envol par rapport à l'état sec. Cette augmentation va dépendre de la compacité de la matrice granulaire. Si chaque grain est en appui sur trois autres grains, la formule sera donnée par l'Eq. (3.11) :

$$U_{ttw} = U_{ttd} \left[\frac{F_c \cdot \sin 2\beta \cdot 2 \cos \beta}{\frac{\pi}{6} \cdot d^3 (\rho_s - \rho_a) g \cdot \sin \beta} + 1 \right]^{0,5} \quad \beta \approx 30^\circ \quad (3.11)$$

Si chaque grain est en appui sur quatre autres grains, l'équation précédente deviendra (Eq. (3.12)) :

$$U_{ttw} = U_{ttd} \left[\frac{F_c \cdot \sin 2\beta \cdot (2 \cos \beta + 1)}{\frac{\pi}{6} \cdot d^3 (\rho_s - \rho_a) g \cdot \sin \beta} + 1 \right]^{0,5} \quad \beta \approx 45^\circ \quad (3.12)$$

où U_{ttw} est la vitesse seuil d'envol à l'état humide et β est l'angle de repos des particules. Cet angle est présenté sur la Figure 3-18 pour une vue en 2 dimensions.

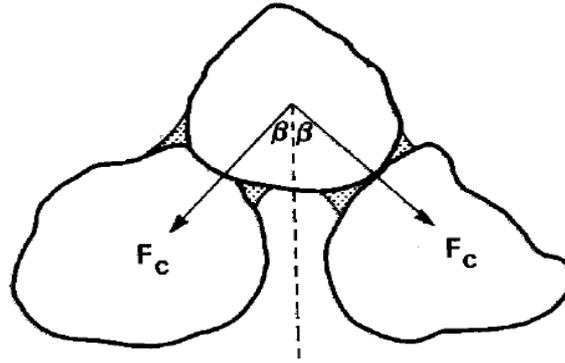


Figure 3-18 : Forces de capillarité et angles de repos entre les grains d'un sol (adapté de McKenna-Neuman et Nickling, 1989)

Ces formules sont adaptées aux sols sableux. Elles ne s'appliquent pas aux sols argileux dans lesquels une part significative de l'eau du sol est adsorbée. Fécan et al. (1999) ont modifié ces formules pour qu'elles s'adaptent à ce type de sols. En dessous d'une certaine teneur en eau w^* , ils ont estimé que le sol est dans un état hygroscopique où l'eau est uniquement adsorbée par les particules et où elle ne contribue pas à augmenter les forces inter-particulaires. Les forces de cohésion capillaires commencent à apparaître quand le sol rentre dans le domaine pendulaire, c'est-à-dire quand l'eau commence à former des ponts capillaires entre les grains (Figure 3-19). Lorsque la phase liquide devient continue et piège l'air sous forme de bulles, le sol rentre dans le domaine funiculaire (Gras, 2011). Pour distinguer les domaines hygroscopique et pendulaire, Fécan et al. (1999) ont développé le paramétrage suivant (Eq. (3.13)) :

$$\frac{U_{\tau tw}}{U_{\tau td}} = 1 \text{ si } w \leq w^* \quad (3.13-a)$$

$$\frac{U_{\tau tw}}{U_{\tau td}} = [1 + A'(w - w^*)^{b'}]^{0,5} \text{ si } w > w^* \quad (3.13-b)$$

$$w^* = 0,0014(\%argile)^2 + 0,17(\%argile) \quad (3.13-c)$$

où A' et b' sont des coefficients qui dépendent théoriquement des propriétés texturales et de rétention d'eau des sols. Expérimentalement, ces coefficients varient extrêmement peu en fonction du type de sol et valent respectivement environ 1,21 et 0,68.

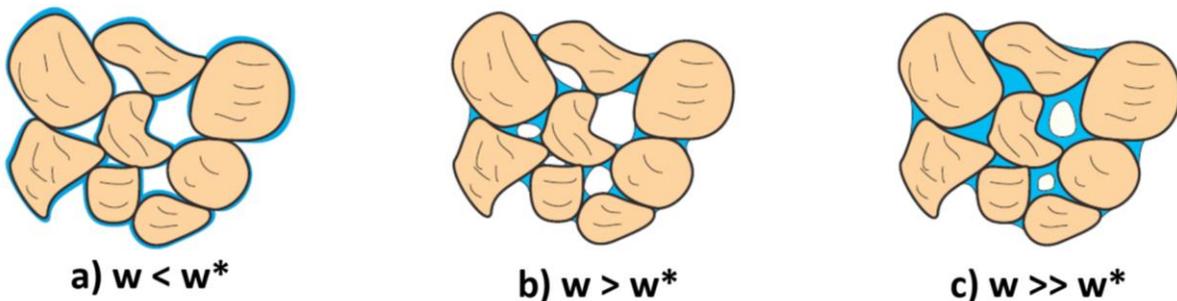


Figure 3-19 : Interaction entre l'eau (en bleu) et les grains pour un sol dans le domaine a) hygroscopique (adsorption uniquement), b) pendulaire (adsorption et ponts capillaires) et c) funiculaire (adapté de Soulié, 2005)

Lorsqu'un sol est séché à l'air, au bout d'un moment, il n'y a plus suffisamment d'eau en surface pour former des ponts capillaires entre les grains et il ne reste que de l'eau adsorbée. Les grains en surface entrent donc dans le domaine hygroscopique. D'après l'hypothèse de Fécan et al. (1999), cela correspond à l'état sec en termes de seuil d'envol. Cette hypothèse est remise en question par Ravi et al. (2006). Ils estiment que l'eau adsorbée peut contribuer significativement à la résistance à l'envol pour des sols argileux relativement secs à cause de la succion résiduelle. Ils ont mis en évidence l'impact sur le seuil d'envol d'un autre paramètre : l'humidité relative de l'air (HR). Pour démontrer cela, ils ont séché des sols en étuve puis les ont placés en soufflerie. Une fois l'équilibre atteint entre l'humidité du sol et l'humidité relative de l'air, ils ont simulé des écoulements d'air pour déterminer le seuil d'envol des particules. La Figure 3-20 présente leurs résultats pour un sol de type limon-argileux. Trois zones se distinguent sur la courbe et peuvent s'expliquer en considérant les forces inter-particulaires selon l'expression de McKenna-Neuman (2003) (Eq. (3.14)) :

$$F_i = F_{V+E} + |\psi_m| \times A_h \quad (3.14)$$

où F_{V+E} correspond aux forces de Van der Waals et électrostatiques et A_h représente l'aire de contact humide entre deux grains adjacents.

Dans le premier intervalle ($10\% \leq HR \leq 40\%$), la vitesse seuil d'envol augmente avec l'humidité relative car le film d'eau adsorbée autour des particules s'épaissit (A_c augmente donc F_i augmente). Dans le second intervalle ($40\% \leq HR \leq 70\%$), une augmentation de l'humidité relative entraîne une petite augmentation de A_h mais une forte diminution du potentiel matriciel. Par conséquent, les forces inter-particulaires diminuent et le seuil d'envol également. Dans le troisième intervalle ($HR \geq 70\%$), les forces inter-particulaires s'amplifient car l'augmentation de la teneur en eau entraîne la formation des premiers ponts capillaires qui se multiplient entre les grains du sol (A_h augmente fortement). Cela est en cohérence avec les travaux de Hänel (1976) et Zhang et McMurry (1993) qui ont montré que l'eau constitue plus de 50% de la masse des particules fines lorsque l'humidité relative excède 70%.

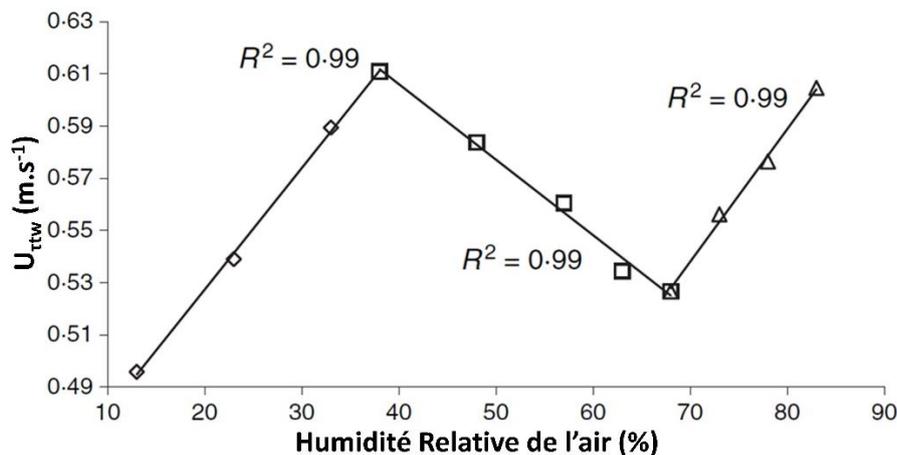


Figure 3-20 : Vitesse seuil d'envol des particules d'un limon-argileux en fonction de l'humidité relative de l'air environnant (Ravi et al., 2006)

Des études existent également pour quantifier l'efficacité de l'arrosage sur la limitation des émissions de poussières dues au trafic (USEPA, 1988 ; Flocchini et al., 1994 ; Muleski et al., 2005). Cette efficacité est définie comme le rapport entre la concentration massique de poussières évitées (écart des concentrations sans et avec arrosage) et la concentration de poussières initiale (sans arrosage). Elle s'exprime en pourcentage. Par exemple, Flocchini et al. (1994) ont montré que l'ajout d'eau sur un sol

très sec, faisant passer sa teneur en eau de surface de 0,56% à 2%, entraînait une réduction de 86% des émissions de PM₁₀. L'efficacité de l'arrosage est quantifiée par l'USEPA (USEPA, 1988) à l'aide d'un modèle empirique (Eq. (3.15)) :

$$E_{ff} = 100 - \frac{0,8 \times e_v \times t_{hj} \times \Delta t_{eau}}{i} \quad (3.15)$$

où E_{ff} désigne l'efficacité du contrôle des poussières par arrosage (exprimé en %), e_v est le taux d'évaporation de l'eau (mm.h⁻¹), t_{hj} est le trafic horaire journalier (h⁻¹), Δt_{eau} est la durée entre deux applications d'eau (h) et i est le débit surfacique d'arrosage (l.m⁻²).

A notre connaissance, il n'existe pas de cartographie des taux d'évaporation de l'eau en France. En s'appuyant sur les données existantes au Sud-Est des États-Unis (Farnsworth et al., 1982), dont le climat est le même qu'en France métropolitaine d'après la classification de Köppen (Hufty, 2001), on peut estimer que les taux d'évaporation sur les chantiers français pourraient être compris entre 0,1 et 0,3 mm.h⁻¹.

Les mesures de l'USEPA (USEPA, 1995) ont permis de développer le modèle bilinéaire présenté à la Figure 3-21. Ce modèle quantifie l'impact de la modification de la teneur en eau de surface d'un sol vis-à-vis des concentrations en PM₁₀ générées par le trafic sur ce sol. Il a été établi à l'origine par des mesures sur des chaussées publiques non revêtues. Néanmoins, il correspond également bien à des mesures plus récentes effectuées lors de la circulation d'engins sur des chantiers de terrassement (Muleski et al., 2005). Il apparaît qu'au-delà d'une certaine teneur en eau dite « seuil » (environ 8%), l'efficacité de l'arrosage augmente moins rapidement. On peut estimer qu'à partir de cette teneur en eau, la surface commence à être saturée. Cette affirmation est confirmée par Muleski et al. (2005) qui ont montré que l'eau rendait le sol boueux au-delà de ce seuil. Cette boue est alors transportée par les roues des engins. Elle peut salir les routes environnantes et générer de la poussière supplémentaire en séchant.

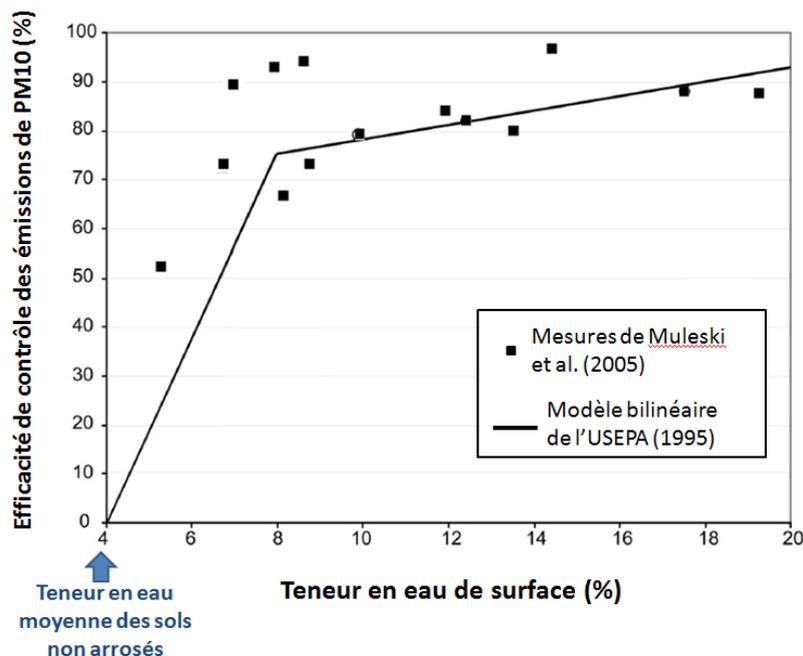


Figure 3-21 : Efficacité du contrôle des émissions de poussières en fonction de la teneur en eau de surface pour des mesures sur chantiers de terrassement (carrés noirs). Comparaison avec le modèle de l'USEPA établi pour les routes non revêtues (Muleski et al., 2005)

Après arrosage, un suivi sur le long terme a permis d'établir que l'efficacité du contrôle des poussières diminuait de 3% à 14% par heure (WRAP, 2006). Plus l'humidité relative de l'air est faible, plus cette diminution est rapide. Cette baisse d'efficacité est la même quelle que soit la quantité d'eau appliquée au départ (Muleski et Cowherd, 2001). Elle est due au séchage progressif du sol par évaporation et aux sollicitations causées par des cycles répétés de trafic. Ce processus a été détaillé par Struss et Mikucki (1977). Ils se sont intéressés au moment opportun pour l'arrosage des sols (Figure 3-22). Lors de l'apparition des premières poussières en surface, ils estiment que l'arrosage est prématuré car le sol directement sous la couche de poussières est encore humide et que cette humidité peut remonter à la surface par des processus de pompage liés à la circulation des véhicules. Lorsque la couche de surface sèche commence à s'épaissir et qu'elle atteint un peu plus d'un demi-centimètre d'épaisseur, il devient impératif d'arroser. Leur étude démontre que le gradient d'humidité peut être très important dans le sol : la surface peut être totalement sèche sur un centimètre d'épaisseur alors qu'à peine plus profondément (à environ 5 cm d'épaisseur), le sol peut être encore parfaitement humide et plastique. Il n'est donc pas nécessaire d'arroser en grande quantité car l'eau ne pourra pénétrer que superficiellement dans le sol et restera ruisseler en surface.

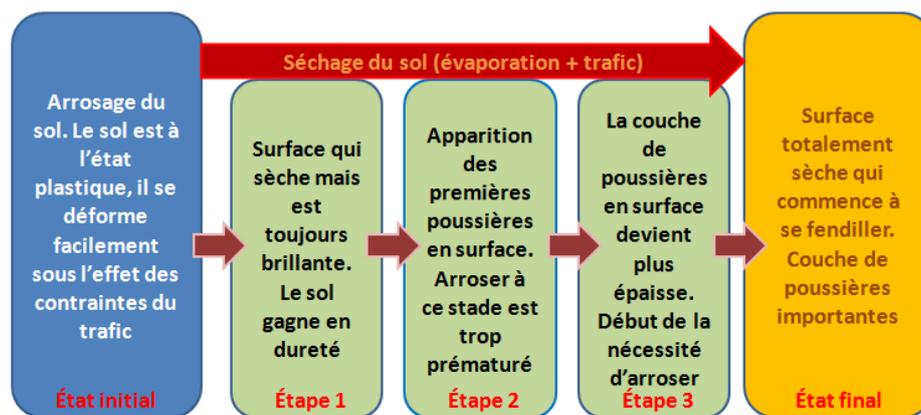


Figure 3-22 : Étapes du séchage d'un sol soumis à des sollicitations de trafic (d'après Struss et Mikucki, 1977)

3.5 Conclusion

Cette section nous a permis de mettre en évidence les propriétés hydromécaniques des sols qui gouvernent leur potentiel à produire de la poussière. Nous avons souligné que la dégradation des sols était un processus qui résultait de leur mise en œuvre et des sollicitations qu'ils subissaient. À ce jour, il apparaît que les connaissances sont encore relativement limitées en ce qui concerne le mécanisme de déstructuration des surfaces en lien avec les cycles de trafic. En effet, la caractérisation des sols a été développée afin de quantifier principalement leurs propriétés structurelles. Il n'y a pas eu de lien véritablement établi entre les propriétés géotechniques des sols et leur propension à générer de la poussière. Pour ce qui est de la limitation de l'envol de ces poussières, l'interaction entre l'eau et les particules du sol a été très étudiée. Cependant, il n'y a encore que relativement peu d'études qui se sont intéressées à la quantification de l'effet de l'arrosage des sols sur les chantiers de terrassement (en termes de concentrations de poussières dues au trafic). A l'heure actuelle, cela ne permet pas de proposer des préconisations sur les quantités optimales d'eau à appliquer en fonction des conditions climatiques et du type de sol.

3.6 Bilan de l'état de l'art et intérêts des travaux

Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité des travaux entrepris par l'Université Gustave Eiffel (Razakamanantsoa (2012) ; Razakamanantsoa (2017) ; Sediki (2018) ; Pagès (2018) ; Duran-Garcia, 2020), en collaboration avec le SPTF (Syndicat Professionnel des Terrassiers de France), la FNTF (Fédération Nationale des Travaux Publics) et l'ESTACA (École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile). L'objectif est d'établir des préconisations pour l'optimisation de la lutte contre l'envol des poussières sur les chantiers de terrassement. Ces travaux apparaissent nécessaires, compte tenu du manque de connaissances sur ce sujet à l'heure actuelle. Cette limitation a été mise en évidence dans la revue de littérature présentée précédemment. Nous la détaillons plus précisément dans la section suivante.

3.6.1 Verrous scientifiques

L'étude bibliographique a montré le manque d'informations concernant les émissions réelles de poussières des chantiers de terrassement. En France, seules les émissions du secteur global de la construction sont vaguement quantifiées (CITEPA, 2020-a ; CITEPA, 2020-b), sans précision en fonction des activités. Le manque de données oblige à utiliser les facteurs d'émissions établis par l'USEPA (voir Tableau 1-2) pour quantifier les émissions d'un chantier en particulier, et ce malgré leurs nombreuses limitations (empirisme pur, description sommaire du sol, ...).

Une quantification plus précise des émissions permettrait notamment une meilleure gestion de l'eau nécessaire pour abattre les poussières sur les chantiers. Pour assurer un tel objectif, il apparaît nécessaire de lever un certain nombre de verrous scientifiques détaillés ci-dessous.

3.6.1.1 Effet de la mise en œuvre et des sollicitations de trafic sur la dégradation des sols

Cette thèse se situe dans la continuité des travaux de Sediki (2018) sur la dégradation de surface de sols compactés vis-à-vis des sollicitations de trafic. Il s'agit de compléter l'étude qui visait à mettre en évidence l'effet du compactage sur la microstructure du sol et à analyser son instabilité de surface en lien avec l'hydratation. Dans ses travaux, Sediki (2018) a étudié l'initiation de la dégradation de surface des sols lors de la circulation d'un pneu lisse. Afin de s'approcher d'une configuration rencontrée sur les chantiers de terrassement, il est nécessaire de mettre en évidence l'influence de la sculpture des pneus sur la dégradation de surface. L'une des finalités est de pouvoir établir un lien entre les propriétés des sols et leur propension à générer de la poussière. Ce dernier point est absent des caractérisations géotechniques à l'heure actuelle.

3.6.1.2 Interaction sol / atmosphère sur surfaces compactées et dégradées

Étudier la couche limite d'un écoulement sur quelques centimètres au-dessus d'un sol permet d'analyser le processus d'initiation de l'envol des particules présentes en surface. Dans la littérature, le développement des couches limites au-dessus d'un grand nombre de surfaces différentes a été étudié, particulièrement dans le cadre des travaux sur l'érosion éolienne. Il s'agit généralement d'études sur des sols naturels ou sur des lits de grains solides reproduits en soufflerie. Excepté les travaux de Pagès (2018), il n'existe à notre connaissance aucune caractérisation de la couche limite sur des sols compactés

alors que ces derniers constituent l'essentiel des pistes des chantiers de terrassement. De plus, il n'existe pas non plus d'études sur la couche limite au-dessus d'un sol ayant été dégradé par du trafic.

3.6.1.3 Écoulements de sillage des engins de chantier

Les écoulements d'air qui se développent dans le sillage d'un véhicule en circulation dépendent fortement de la géométrie de ce dernier. Si les sillages en aval des voitures et de certains véhicules industriels ont été analysés, il n'existe aucune étude sur les écoulements générés dans le sillage des engins de transport de matériaux sur les chantiers. La connaissance de ces sillages est particulièrement importante car ils constituent des structures énergétiques qui influencent la mise en suspension et le transport des poussières (Edvarsson et Magnusson, 2009 ; Barnes et Connor, 2014).

3.6.1.4 Mécanismes d'émission des poussières lors de la circulation d'un véhicule

A ce jour, les modèles les plus utilisés dans le monde pour estimer les émissions de poussières des véhicules sont ceux développés par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA, 1995). Néanmoins, diverses études ont montré des écarts importants entre ces modèles et les émissions mesurées sur les routes non revêtues et sur les chantiers (Watson et al., 1996 ; Gillies et al., 2005 ; Muleski et al., 2005). Cela est dû au fait qu'ils ont été développés pour des échelles régionales et nationales. Ils ne prennent en compte ni les paramètres environnementaux, ni les paramètres physiques liés au sol (type de sol, état de dégradation) et à la géométrie des véhicules. Il apparaît nécessaire de mener une étude analysant plus finement les mécanismes mis en jeu dans les émissions.

3.6.2 Objectifs de la thèse

L'objectif majeur de ce travail est d'étudier le phénomène d'envol des poussières sur les chantiers de terrassement en s'appuyant sur les deux disciplines que sont la mécanique des sols et la mécanique des fluides. Il s'agit d'examiner la dégradation des sols compactés sous sollicitations de trafic qui entraîne l'arrachement des particules en surface. L'envol de celles-ci est analysé en considérant le cisaillement généré par les pneus ainsi que l'interaction sol/atmosphère. Le transport des poussières dans les écoulements de sillage des engins de chantier est également examiné. Il s'agit de mettre en évidence les processus qui amènent des particules de sol, initialement liées entre elles au sein d'une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques. L'attention est portée sur les paramètres géotechniques, environnementaux et aérodynamiques qui conduisent à une augmentation de la concentration des poussières en suspension sur les chantiers. L'atténuation de la visibilité est étudiée en tant que critère de déclenchement de l'arrosage des sols. Le cœur de la problématique traitée dans cette thèse est de pouvoir réaliser in-fine des économies d'eau sur les chantiers. La Figure 3-23 présente une vue globale des mécanismes étudiés. La partie suivante détaille les moyens expérimentaux et la méthodologie adoptée pour mener à bien cette étude qui combine des essais en laboratoire et in-situ.

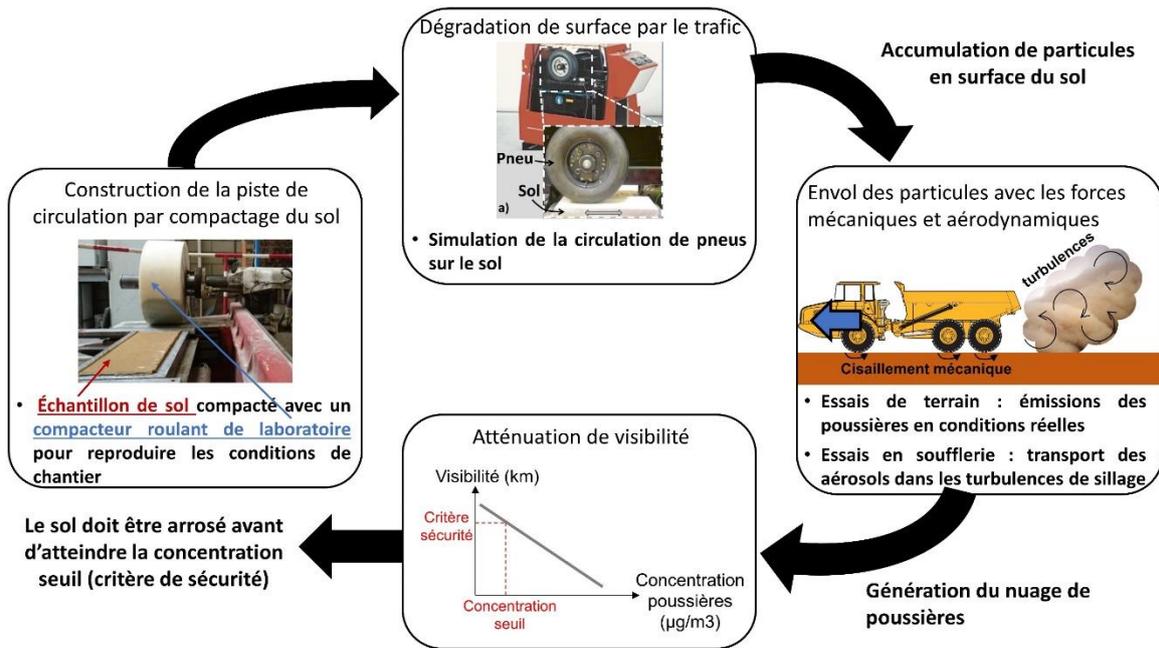


Figure 3-23 : Processus étudiés au cours de la thèse (adapté de Le Vern et al., 2021b)

Partie II : Dispositifs expérimentaux **et méthodologie**

Chapitre 4 : Dispositifs expérimentaux

Dans ce chapitre, les dispositifs expérimentaux utilisés pour mener à bien cette thèse sont présentés. Dans un premier temps, les appareils permettant la mise en œuvre et la dégradation des sols sont décrits (compacteur roulant de laboratoire et simulateur de trafic). Dans un second temps, les dispositifs nécessaires pour l'étude aérodynamique sont détaillés (souffleries, maquettes et systèmes LASER). Finalement, les instruments utilisés lors des mesures in-situ sont présentés (visibilimètre, granulomètres optiques et roue dynamométrique).

4.1 Mise en œuvre et dégradation des sols

Dans cette thèse, le phénomène d'accumulation de particules sur les sols est étudié en laboratoire. Il est lié à la dégradation de surface à cause de la circulation des engins. À l'aide des appareils décrits ci-dessous, notre objectif est de reproduire le plus fidèlement possible la mise en œuvre et les sollicitations que subissent les sols qui servent de pistes de circulation sur les chantiers.

4.1.1 Compacteur roulant de laboratoire

Comme décrit dans la section 3.2.1, les méthodes classiques de compactage en laboratoire ne permettent pas d'appliquer une rotation continue du tenseur des contraintes que subissent les sols lorsqu'ils sont compactés par des rouleaux sur le terrain (voir Figure 3-7, page 47). Les états de surface obtenus ne sont donc pas comparables à ceux rencontrés in-situ. Comme l'état de surface est un paramètre essentiel pour l'étude de l'interaction sol/atmosphère, le choix a été fait de compacter les éprouvettes de sol par roulement afin de reproduire les conditions de terrain. Pour ce faire, le compacteur roulant de laboratoire de l'Université Gustave Eiffel a été utilisé (Figure 4-1).

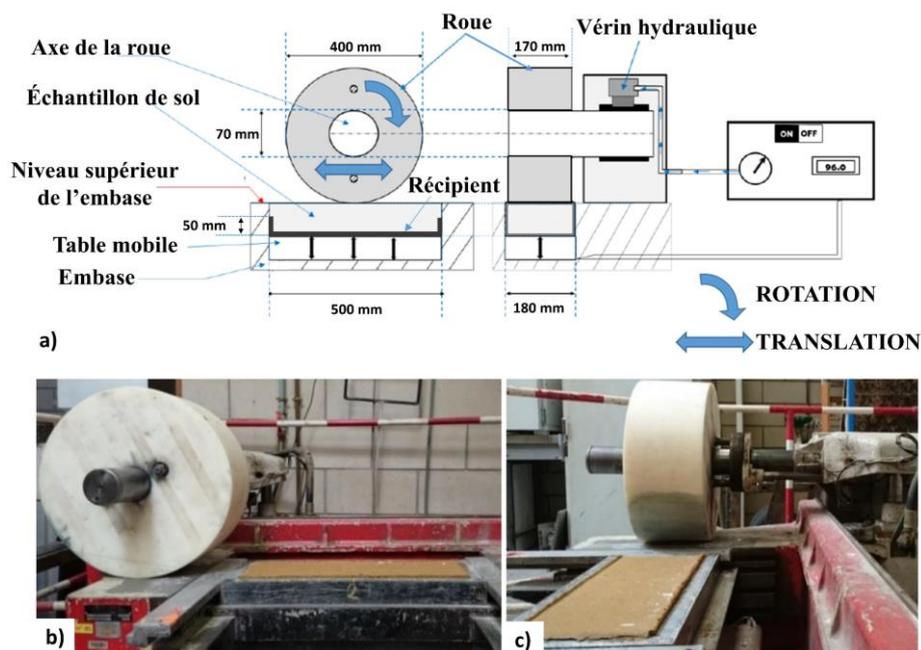


Figure 4-1 : Compacteur roulant de laboratoire. a) Schéma de principe ; b) Vue de côté ; c) Vue de face (adapté de Sediki, 2018)

Ce dispositif permet de compacter des éprouvettes parallélépipédiques de sol par passages successifs d'une roue lisse en Ertalon (thermoplastique). Les dimensions des éprouvettes sont $500 \times 180 \times 50 \text{ mm}^3$. Le processus de compactage est le suivant : la quantité totale de sol à compacter, préalablement humidifiée à l'optimum Proctor, est versée dans le récipient qui est placé dans l'embase. Une table mobile soulève l'échantillon jusqu'à ce que la surface du sol soit 5 mm au-dessus du niveau supérieur de l'embase. Ensuite, la roue fait un aller-retour au-dessus de l'échantillon afin de compacter ces 5 mm de sol. Initialement, la hauteur du sol non compacté dans l'embase est d'environ 100 mm. Pour le compacter dans le récipient faisant 50 mm de haut, il est donc nécessaire de reproduire 10 fois ce processus. Lors du compactage, l'effort vertical exercé par le vérin est de 1050 kg, ce qui correspond à une masse linéique sur la roue de 63.26 kg.cm^{-1} . Ainsi, l'effort de compactage se rapporte à ce qui peut être obtenu sur les chantiers car cette masse linéique est du même ordre de grandeur que celle d'un compacteur de terrain de 20 tonnes (un peu plus de 60 kg.cm^{-1}) (Bomag, 2019, Hamm, 2019). La vitesse de déplacement de la roue en Ertalon est de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ ($1,1 \text{ km.h}^{-1}$), ce qui est comparable à la vitesse de compactage des rouleaux de chantier ($\sim 2 \text{ km.h}^{-1}$). Le choix d'utiliser de l'Ertalon pour le matériau de la roue a été fait afin d'alléger le dispositif, les roues des compacteurs sur les chantiers étant généralement en acier. Le Vern et al. (2020a) ont montré que l'utilisation de ce matériau permet de reproduire des conditions de compactage proches des conditions de terrain.

4.1.2 Simulateur de trafic

Après compactage, les sols sont dégradés à l'aide du simulateur de trafic VECTRA de l'Université Gustave Eiffel. Cet appareil (Figure 4-2-a) simule le déplacement d'une roue équipée d'un pneu de 400 mm de diamètre. Le mouvement est généré de la manière suivante : la rotation d'un motoréducteur est transformée en mouvement de translation alternatif à l'aide d'un bras télescopique. Le mouvement est transmis à un chariot mobile monté sur un rail. La roue est fixée à ce chariot et se déplace donc longitudinalement le long du rail en réalisant des passages alternatifs sur une distance de $0,410 \pm 0,005 \text{ m}$ avec une fréquence de $1,0 \pm 0,1 \text{ Hz}$ (Figure 4-2-b). Cela correspond à une vitesse moyenne d'environ 4 km.h^{-1} . Ainsi, ce simulateur de trafic permet de reproduire le contact d'un pneu roulant sur un sol avec une vitesse environ 7 fois plus faible que celle atteinte par les engins sur les chantiers.

Cet appareil est généralement utilisé pour étudier l'orniérage des matériaux bitumineux à l'aide d'un pneu lisse (Dongmo-Engeland, 2005 ; Gabet et al., 2011 ; Perraton et al., 2011). Ce pneu (désigné « L » sur la Figure 4-2-c) a également été utilisé dans l'étude de Sediki (2018). L'originalité de nos essais consiste à utiliser ce dispositif pour étudier la dégradation de sols à l'aide de pneus sculptés. Deux pneus désignés « S1 » et « S2 » (Mitas FL-08 et Continental IC 10) ont été utilisés durant les essais (Figure 4-2-d et 4-2-e). Ils ont été gonflés à 600 kPa comme spécifié par le constructeur. Leur action de contact sur le sol est obtenue au moyen d'un vérin situé sous l'échantillon. La pression appliquée par le vérin durant les essais est de 320 kPa (valeur minimale du dispositif). Elle correspond à des pressions de contact pneu/sol de 509 kPa pour le pneu lisse, 898 kPa pour le pneu Mitas FL-08 et de 753 kPa pour le pneu Continental IC10 sans tenir 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. Les pressions de contact ont été évaluées en divisant la force de contact par la surface de contact avec une plaque. Les pressions de contact simulées sont entre 2 et 4 fois plus élevées que celles sans pénétration des pneus Michelin XADN (utilisés sur de nombreux tombereaux articulés) qui varient entre 200 et 400 kPa pour des charges conventionnelles (Caterpillar, 2014). Les essais réalisés reproduisent donc le

mouvement des pneus en caoutchouc sur le sol avec trois principaux effets d'échelle : fortes contraintes appliquées, faibles vitesses de déplacement et absence de couple moteur sur la roue.

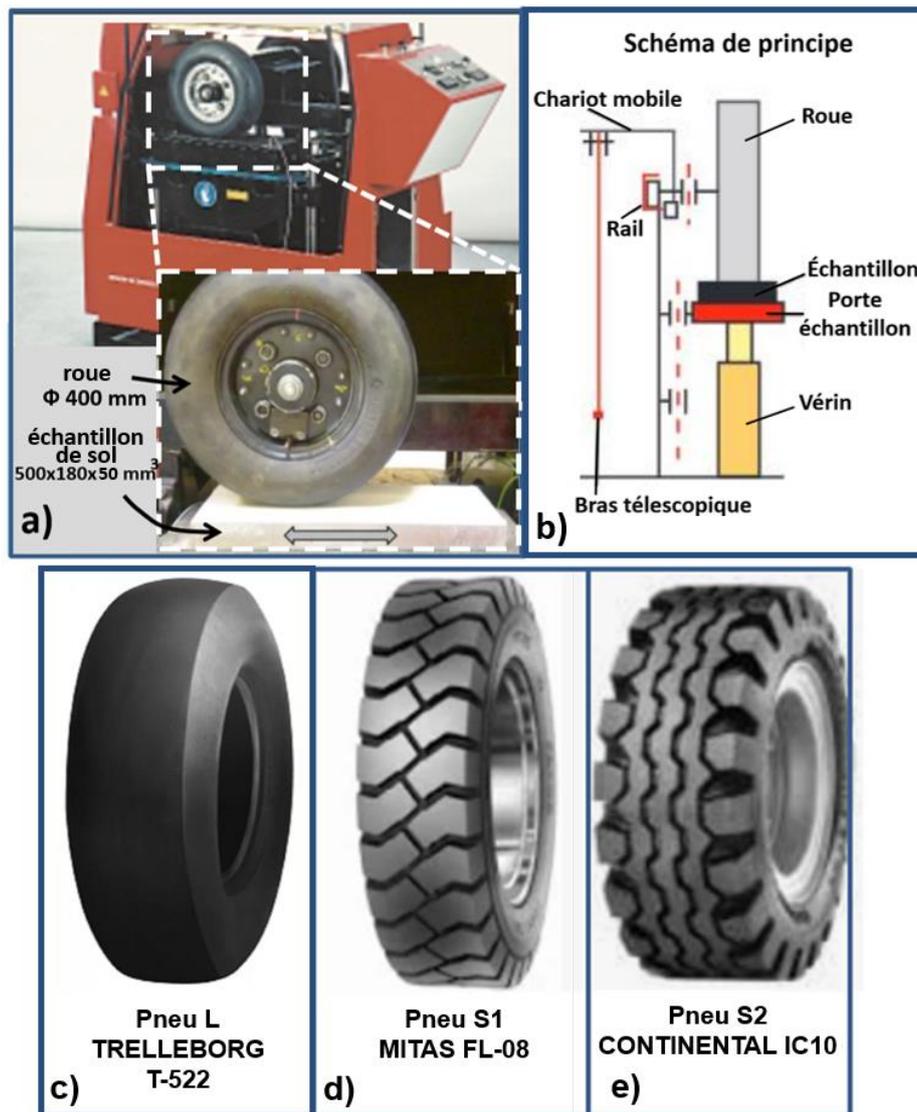


Figure 4-2 : a) Vue de côté du simulateur de trafic ; b) Schéma de principe (vue de face) ; c) Pneu lisse utilisé dans l'étude de Sediki (2018) ; d) et e) Pneus sculptés utilisés dans la présente étude

4.2 Étude aérodynamique

Les phénomènes aérodynamiques sont étudiés à l'aide de deux souffleries qui sont décrites dans un premier temps. La caractérisation des écoulements dans le sillage des camions en circulation est réalisée à l'aide de maquettes qui sont présentées dans un second temps. Finalement, les systèmes optiques non intrusifs (LASER) permettant de caractériser les champs de vitesse sont décrits.

4.2.1 Souffleries

La soufflerie utilisée pour les essais avec le dispositif LDV (voir section [4.2.3.1](#)) est le modèle Deltalab EA103 de l'ESTACA Campus Ouest (Figure 4-3). Cette soufflerie subsonique possède une veine d'essais d'un mètre de long pour une section carrée de $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$. Des vitesses de vent allant jusqu'à 40 m.s^{-1} peuvent être simulées par aspiration à l'aide d'un ventilateur équipé d'un moteur de 3 kW. Des mesures dans la veine d'essai à vide (Rodriguez, 2018) ont montré que l'intensité turbulente de l'écoulement d'air généré dans cette soufflerie était très faible ($<1\%$) en dehors des couches limites.

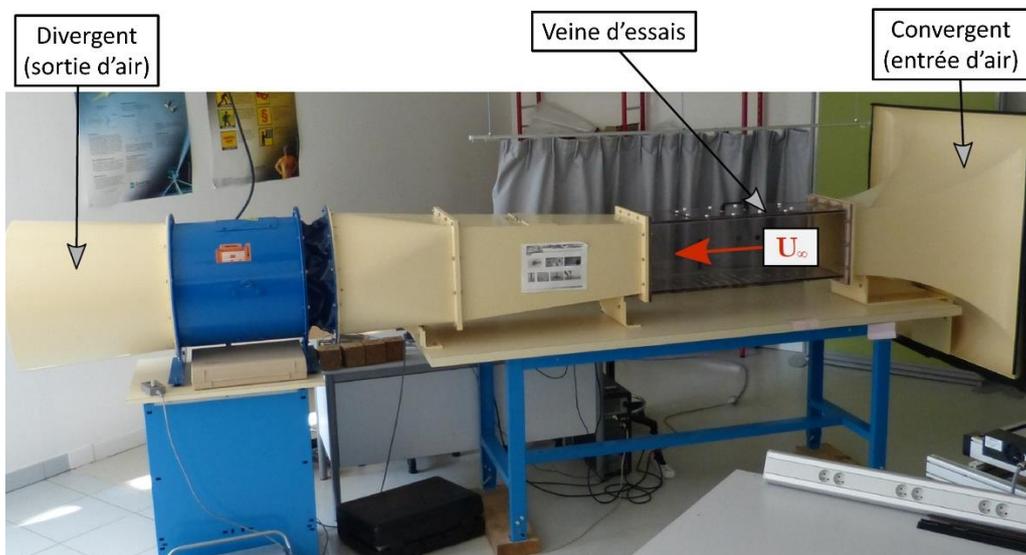


Figure 4-3 : Soufflerie DeltaLab EA103 de l'ESTACA (Rodriguez, 2018)

La soufflerie utilisée pour les essais avec le dispositif PIV (voir section [4.2.3.2](#)) est présentée à la Figure 4-4. Il s'agit d'un modèle artisanal fabriqué dans le cadre de cette thèse à l'Université Gustave Eiffel. Elle permet de simuler par aspiration une vitesse de vent de 3 m.s^{-1} dans une veine d'essai de dimensions $1,0 \times 0,3 \times 0,3 \text{ m}^3$ à l'aide d'un ventilateur centrifuge de 1,5kW. Le niveau de turbulence résiduel dans la veine à vide est défini comme étant l'écart type de la distribution des vitesses divisé par la vitesse moyenne de l'écoulement. Il a pu être abaissé à 6,5% à l'aide de 2 grilles et d'un nid d'abeille en entrée de soufflerie. Cette valeur reste toute de même élevée car des décollements de couche limite se produisent dans le convergent réalisé à l'aide de bavettes en caoutchouc. Ces turbulences résiduelles sont néanmoins beaucoup plus faibles que celles générées dans le sillage des maquettes (voir section suivante).

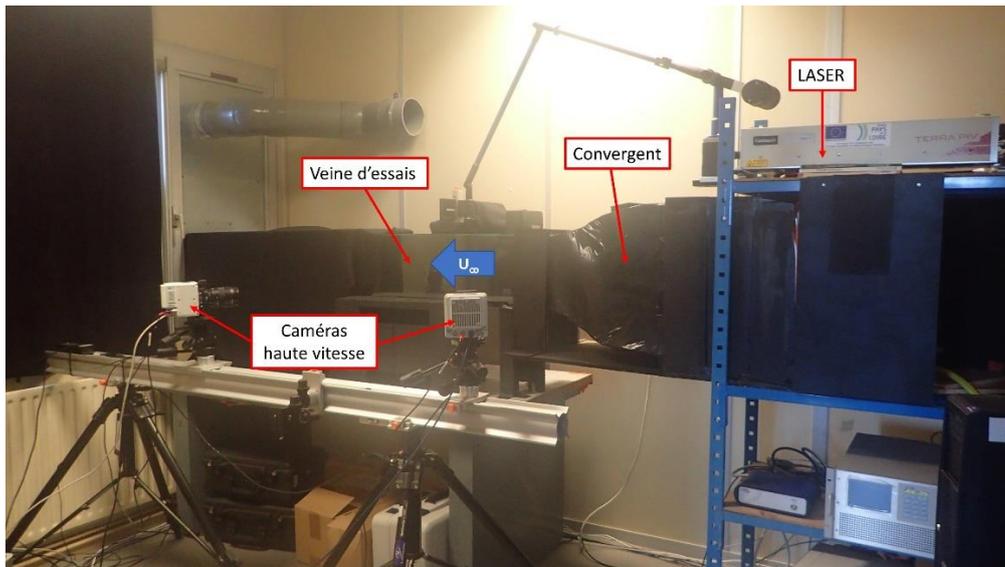


Figure 4-4 : Soufflerie de l'Université Gustave Eiffel

4.2.2 Maquettes

Pour l'étude des écoulements de sillage, deux maquettes sont utilisées :

- Tombereau articulé Caterpillar 725 à l'échelle 1/50 (Figure 4-5)
- Camion Mercedes 8x4 (8 roues dont 4 motrices) à l'échelle 1/50 (Figure 4-6)

Ces deux camions représentent les deux catégories d'engins de transport de matériaux rencontrés sur les chantiers de terrassement (tombereaux à cabine profilée avec moteur à l'avant et camions à cabine avancée avec moteur sous la cabine). L'étude doit permettre de mettre en évidence les différences vis-à-vis des écoulements dans le sillage de ces deux géométries relativement différentes.

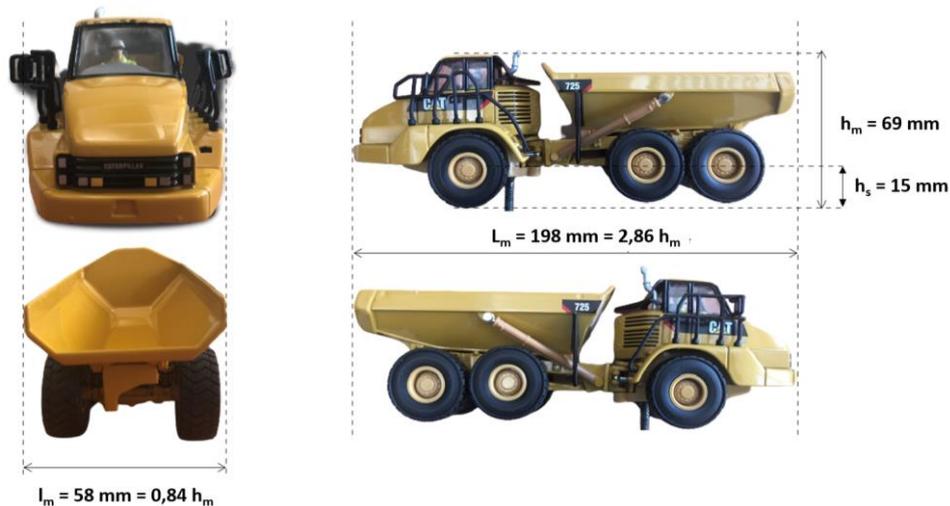


Figure 4-5 : Maquette échelle 1/50 de tombereau articulé Caterpillar 725 (adapté de Duran-Garcia, 2020)



Figure 4-6 : Maquette échelle 1/50 de camion Mercedes 8x4 (adapté de Duran-Garcia, 2020)

Lors d'études en soufflerie avec des maquettes, il est important de tenir compte du coefficient de blocage ϵ de ces dernières dans la veine d'essai (Eq. (4.1)) :

$$\epsilon = \frac{h_m \times l_m}{h_v \times l_v} \quad (4.1)$$

où h_m et h_v correspondent respectivement aux hauteurs de la maquette et de la veine d'essai (m) et l_m et l_v à leurs largeurs (m).

Dans la présente étude, le coefficient de blocage est de 4,3% pour le tombereau et 3,6% pour le 8x4. Ces valeurs sont inférieures à 6%, on considère donc que les effets de parois sont négligeables sur les écoulements mesurés (West et Apelt, 1982).

4.2.3 Vélocimètres LASER

Dans la présente étude, les mesures de vitesses en soufflerie sont réalisées à l'aide de systèmes optiques non-intrusifs. Les deux appareils utilisés s'appuient sur des techniques de mesures complémentaires (l'une ponctuelle, l'autre surfacique). Elles sont détaillées ci-dessous.

4.2.3.1 Mesures ponctuelles : Vélocimétrie LASER à effet Doppler (LDV)

Un vélocimètre LASER à effet Doppler (LDV) permet d'effectuer des mesures locales de vitesse d'un fluide. Ces mesures sont considérées comme ponctuelles car elles sont réalisées sur des volumes de très faibles dimensions. La mesure nécessite d'ensemencer le fluide à l'aide d'un générateur de fumée. Le système LDV mesure la vitesse de ces particules de fumée de la manière suivante (Boutier et al., 2012) : deux faisceaux LASER sont émis et se croisent pour générer des franges d'interférences à l'endroit où l'on souhaite mesurer la vitesse. Lorsqu'une particule passe à travers ces franges, elle génère par diffusion une succession de scintillements dont la fréquence est enregistrée par une cellule photosensible. L'émission lumineuse est convertie en signal électrique dont l'analyse permet, en considérant l'effet Doppler, d'accéder à la vitesse de la particule. Le système LDV DANTEC Dynamics

2D Flow Explorer utilisé pour les essais (Figure 4-7) génère des franges d'interférences dans deux plans perpendiculaires, permettant de mesurer les composantes longitudinale et verticale de la vitesse. Le Tableau 4-1 présente les caractéristiques des deux paires de faisceaux générés par le dispositif.

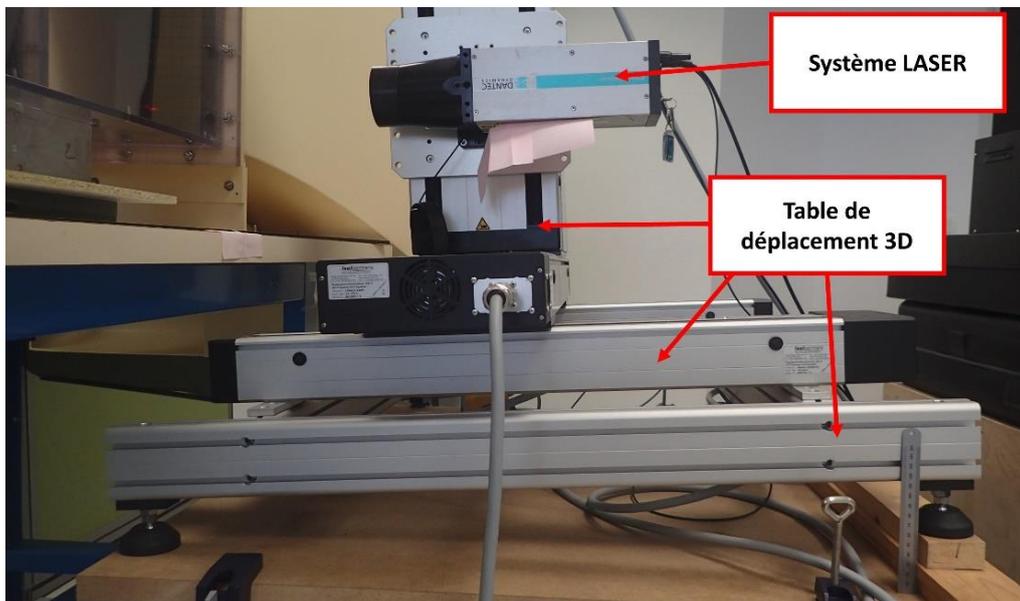


Figure 4-7 : Système de mesure LDV DANTEC installé sur la table de déplacement 3D

Composante de vitesse mesurée	Longueur d'onde (nm)	Volume de mesure (mm ³)	Nombre de franges (-)	Interfrange (μm)
Longitudinale U	660	$0,168 \times 0,168 \times 2,806$	30	5,448
Verticale V	785	$0,200 \times 0,200 \times 3,338$	30	6,396

Tableau 4-1 : Caractéristiques des deux paires de faisceaux LASER du système LDV DANTEC Dynamics (DANTEC Dynamics, 2012)

Le système LASER est installé sur une table de déplacement 3D permettant de changer facilement la position du point de mesure à partir du PC d'acquisition. Le logiciel BSA Flow Software 5.03.00 permet de contrôler les paramètres d'acquisition ainsi que le déplacement de la sonde pour caractériser une région complète de l'écoulement. Le générateur de fumée utilisé pour l'ensemencement est le système SAFEX S 195 G qui pulvérise un mélange de di-éthylène glycol et de vapeur d'eau. Ce système, couramment utilisé lors de mesures LDV (Algieri et al., 2005), génère des particules micrométriques qui sont suffisamment petites pour que l'on puisse considérer qu'elles suivent parfaitement les lignes d'écoulement d'air dans la soufflerie (Boutier et al., 2012).

4.2.3.2 Mesures surfaciques : Vélocimétrie par image de particules (PIV)

La vélocimétrie par image de particules (PIV) consiste également à mesurer la vitesse de fines particules qui ensemencent un fluide. Avec ce système de mesure, ces particules passent à travers une nappe LASER dont elles diffusent la lumière (Figure 4-8). Le déplacement des particules à travers la nappe LASER est enregistré à l'aide de caméras. Des méthodes statistiques permettent de calculer, à partir des images prises successivement, les champs de vitesse dans le plan de la nappe. Dans notre étude, nous utilisons un système TERRA PIV haute fréquence Nd :YLF (LASER de longueur d'onde 532 nm généré

à partir d'un cristal de fluorure d'yttrium-lithium dopé au néodyme) associé au logiciel LaVision DaVis 10.0. Deux caméras haute vitesse CMOS VEO 410L/S filment la nappe LASER afin d'obtenir une vision stéréoscopique de l'écoulement. De cette manière, il est possible de déterminer les trois composantes des vecteurs vitesses (Prasad, 2000). Ces caméras 12 bits, de résolution 1280×800 pixels, sont équipées d'objectifs ZEISS Milvus ZF.2 de focale 100 mm. Elles ont un taux d'acquisition allant jusqu'à 4000 images par seconde et sont placées à 1 m du plan de mesure afin d'obtenir un champ de mesure de 245×143 mm². Pour les essais PIV, l'ensemencement de la veine de la soufflerie est réalisé avec un générateur de particules d'huile d'olive. Les particules générées sont micrométriques et sont couramment utilisées pour les mesures avec PIV (Raffel et al., 2018).

Les mesures LDV et PIV sont complémentaires. En effet, la LDV permet de mesurer de façon précise spatialement et temporellement la dynamique de l'écoulement mais elle ne permet pas d'avoir une vision simultanée à plusieurs endroits de mesure. Inversement, les mesures PIV sont moins précises (fréquence d'acquisition moins élevée) mais elles donnent accès simultanément à l'évolution de l'ensemble de l'écoulement sur toute une surface. Elles permettent de plus d'estimer la composante de vitesse transversale de l'écoulement.

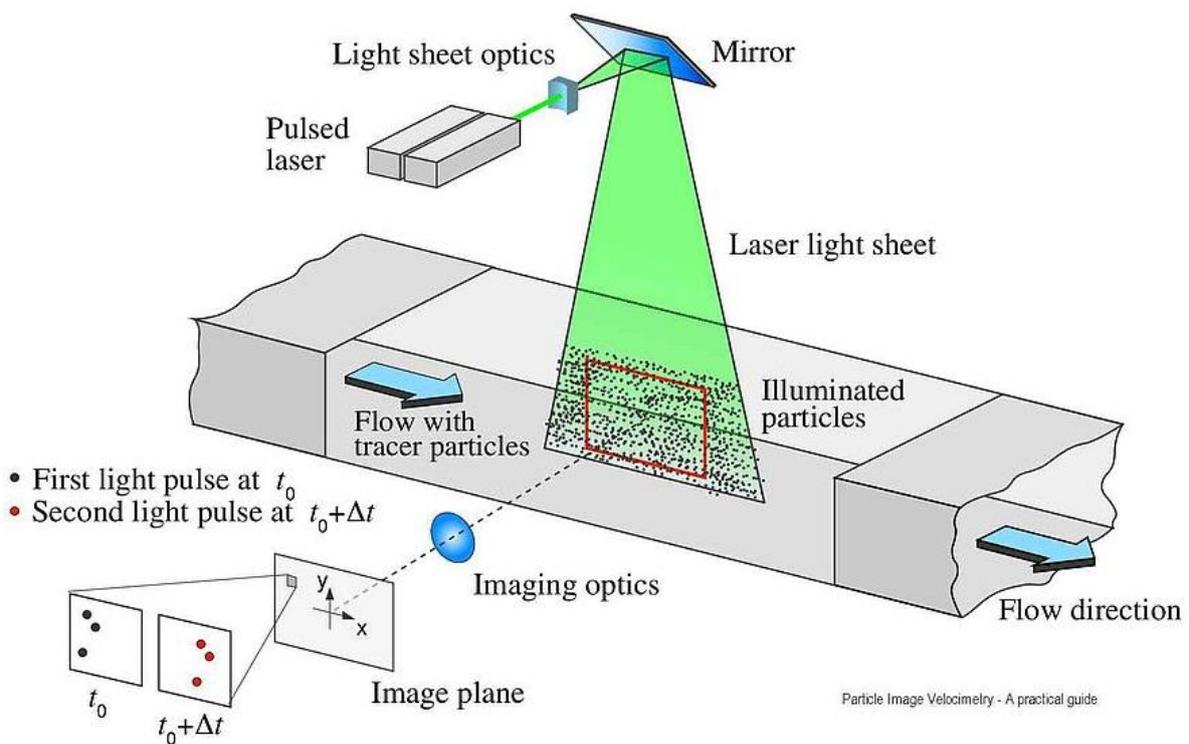


Figure 4-8 : Principe de mesure par PIV (Raffel et al., 2018)

4.3 Mesures in-situ

Des essais sur piste ont été réalisés afin de relier la concentration de poussières mises en suspension avec les efforts générés par les pneus lors de la circulation d'un véhicule. En parallèle, des mesures d'atténuation de visibilité et des conditions météorologiques ont été réalisées. Les appareils nécessaires pour mener à bien ces mesures sont décrits ci-dessous.

4.3.1 Visibilimètre et station météo

Lors des essais, un visibilimètre modèle BIRAL SWS-100 a été utilisé (BIRAL, 2014). Cet appareil permet de mesurer l'atténuation du rayonnement solaire causée par un aérosol en suspension. Il est composé d'une cellule émettant un rayonnement lumineux et d'un récepteur composé d'une cellule photoélectrique (Figure 4-9). Cette dernière reçoit une partie de la lumière qui a été diffusée et permet la détermination du coefficient d'extinction défini par l'Eq. (4.2) :

$$EC = \Delta SC \times K_{\theta} \quad (4.2)$$

avec ΔSC le coefficient de diffusion de la lumière émise sur l'intervalle angulaire (θ sur la Figure 4-9) et K_{θ} le facteur d'extrapolation angulaire (donnée constructeur).

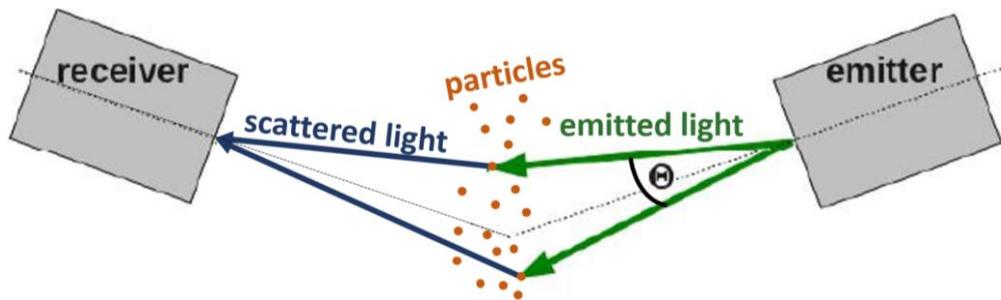


Figure 4-9 : Schéma de la mesure du rayonnement diffusé par le visibilimètre (adapté de Elias et al., 2015)

La mesure de la visibilité est donnée à l'aide de la formule de Koschmieder (Eq. (4.3)) :

$$visibilité = \frac{-\ln(CT)}{EC} \quad (4.3)$$

où CT correspond au seuil de contraste, rapport entre l'intensité lumineuse mesurée et celle de la source.

Le visibilimètre renvoie la mesure de la Portée Optique Météorologique (POM) qui correspond à la longueur du trajet que doit effectuer un rayon lumineux pour que son intensité soit réduite à 5% de sa valeur initiale. Il s'agit donc de la valeur de visibilité calculée en fixant le seuil de contraste CT à 5%.

La lumière émise par le visibilimètre BIRAL est dans le domaine de l'infrarouge avec une longueur d'onde de 850 nm. Sa gamme de mesure de POM est comprise entre 0,01 et 2 km. Le choix de ce capteur a été fait car cette gamme inclut les conditions de sécurité routière. Par exemple, en France, il est justifié d'abaisser sa vitesse à 50 km.h⁻¹ lorsque la visibilité sur la route est inférieure à 50 mètres (Légifrance, 2018). Le système est également équipé d'une station météo METPAK PRO indiquant la température et l'humidité relative de l'air ainsi que la vitesse et la direction du vent. De plus, un pyranomètre permet de mesurer l'intensité du rayonnement solaire (luminance en W.m⁻²). Ce dispositif est présenté à la

Figure 4-10. La mesure de visibilité est réalisée à 1,5 m de hauteur par rapport au sol. La Figure 4-10 fait également apparaître un granulomètre optique dont le fonctionnement est décrit ci-après.

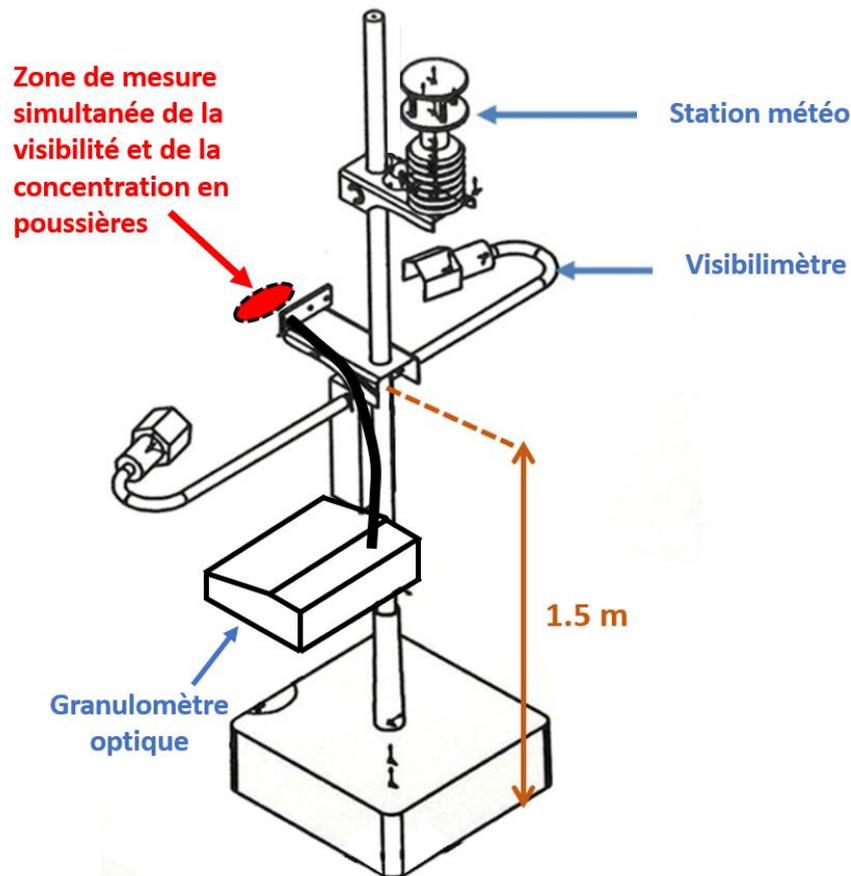


Figure 4-10 : Visibilimètre équipé de la station météo et du pyranomètre (Sediki et al., 2018a)

4.3.2 Granulomètres optiques

Un granulomètre optique est un appareil qui permet de mesurer la concentration en nombre des particules dans l'air. Les appareils utilisés sont un analyseur de poussière PALAS Fidas Mobile (Figure 4-11-a) et Fidas 200 (Figure 4-11-b). Ils sont équipés d'une pompe qui aspire les particules contenues dans l'air ambiant. Ces particules passent à travers un faisceau de lumière LED qui est alors diffusé suivant un angle qui dépend de la taille de la particule (Mie, 1908). La mesure de la taille des particules est réalisée avec un photomultiplicateur qui capte l'onde diffusée. Associé à un algorithme de comptage, la concentration massique en particules par unité de volume ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) peut être estimée en faisant l'hypothèse de sphéricité des particules. Le prélèvement est réalisé avec un tuyau de 8 mm de diamètre à un débit de $1,4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le Fidas Mobile et de $4,8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le Fidas 200. Cela correspond à des vitesses d'aspiration de $0,47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $1,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivement. Les deux appareils fournissent la granulométrie des particules sur 71 gammes de tailles allant de $0,17$ à $26 \mu\text{m}$ (paramétrages du constructeur). Ils ont été calibrés à l'aide de particules « MonoDust 1500 », préconisées par le constructeur (PALAS, 2016).

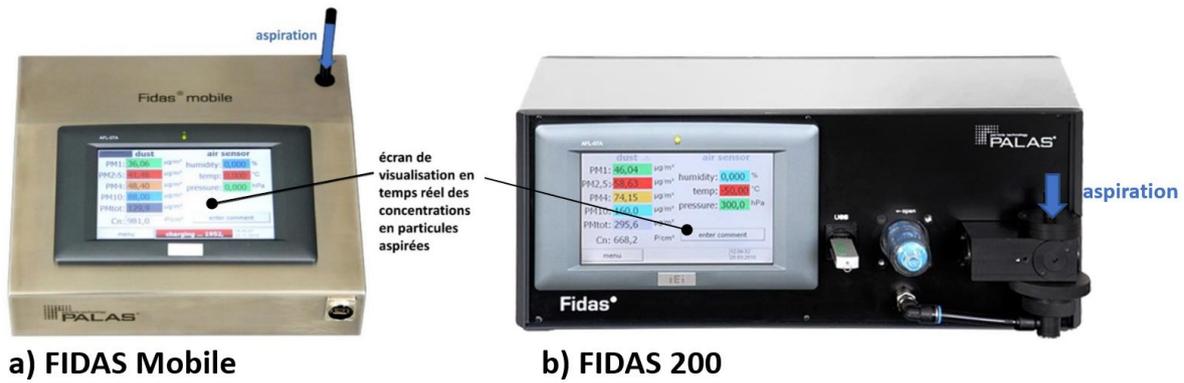


Figure 4-11 : Analyseurs de poussières en temps réel portatif a) Fidas Mobile et b) Fidas 200

4.3.3 Roue dynamométrique

L'étude des efforts de contact pneu/surface a été réalisée en instrumentant un véhicule d'essai (Renault Clio III), avec une roue dynamométrique Kistler RoadDyn S625 (Figure 4-12). À l'aide de jauges de déformation montées en pont de Wheatstone, cet équipement permet de mesurer en temps réel les efforts et les couples longitudinaux, verticaux et transversaux appliqués sur une roue d'un véhicule en circulation. Les données liées au torseur des efforts de contact pneu/chaussée sont renvoyées en temps réel à un ordinateur situé dans l'habitacle du véhicule. La fréquence d'acquisition est de 100 Hz.

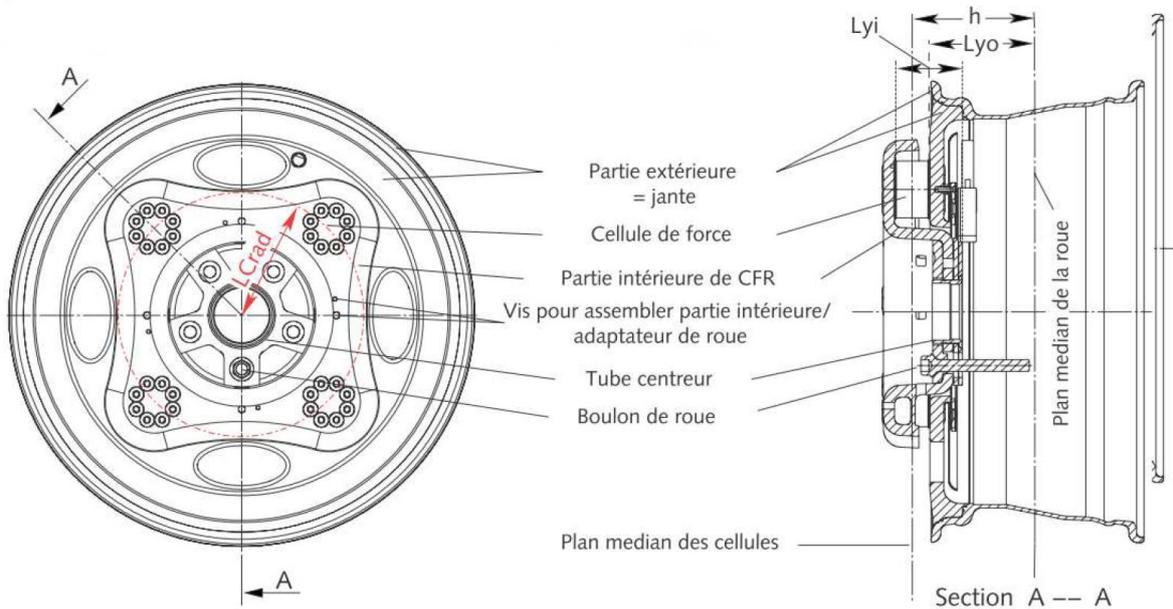


Figure 4-12 : Schéma de principe de la roue dynamométrique Kistler RoadDyn S625 (tiré de Orfila, 2009)

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les dispositifs expérimentaux ont été décrits. Tout d'abord, l'attention s'est portée sur les appareils de laboratoire. Dans un premier temps, les équipements de mise en œuvre et de dégradation des sols ont été présentés en insistant sur les effets d'échelles qui leur sont inhérents. Afin de permettre d'étudier l'apparition des poussières en surface des sols, ces appareils doivent reproduire le plus fidèlement possible les conditions rencontrées sur les chantiers. À ce titre, l'analyse du processus de compactage a fait l'objet de la publication d'un article (Le Vern et al., 2020a).

Dans un second temps, les souffleries et les appareils de mesure des paramètres aérodynamiques ont été décrits. En particulier, le principe de fonctionnement des mesures LDV et PIV a été détaillé. Ces appareils permettent de mener deux études : des mesures d'écoulement d'air à l'interface sol/atmosphère afin d'analyser l'initiation de l'envol des poussières et des mesures dans le sillage de maquettes afin d'examiner le transport et la dispersion des particules lorsque les camions circulent.

Finalement, les dispositifs permettant les mesures d'émissions de poussières in-situ ont été présentés. Les appareils utilisés permettent d'analyser les concentrations de poussières soulevées par des véhicules en fonction des paramètres physiques, mécaniques et météorologiques. L'atténuation de visibilité induite par les aérosols en suspension est également mesurée.

Il s'agit à présent de décrire la méthodologie adoptée pour l'utilisation de ces appareils dans le cadre de la présente étude.

Chapitre 5 : Méthodologie

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour mener à bien les essais. Dans un premier temps, l'étude du processus de dégradation des sols par le trafic est détaillée. Puis, les campagnes de mesures d'écoulements d'air en couche limite au-dessus des sols sont décrites. La caractérisation des écoulements de sillage des camions en soufflerie est présentée par la suite. Finalement, ce chapitre se conclut en exposant la méthodologie adoptée pour étudier les envols de poussières générés par la circulation de véhicules sur piste.

5.1 Dégradabilité par le trafic des sols compactés

Cette section traite de l'arrachement des particules en surface des sols dû au cisaillement généré par les pneus lors de la circulation de véhicules. Tout d'abord, les sols ayant servi pour l'étude sont caractérisés. Leur protocole de mise en œuvre et le procédé de quantification de la dégradation de surface lors du roulement d'un pneu sont ensuite détaillés. Finalement, la description du vernissage de surface des échantillons et son impact sur la modification de rugosité sont abordés.

5.1.1 Sols d'étude

Pour les expérimentations, le choix a été fait de mener une étude paramétrique en reconstituant des sols en laboratoire. Pour ce faire, des mélanges ont été réalisés à partir de deux matériaux de base : de l'argile kaolinite Speswhite (désignée par la lettre « K » par la suite) et du sable d'Hostun HN38 (désigné par la lettre « S »). Des observations de ces matériaux au MEB sont présentées en Figure 5-1. Il apparaît que l'argile est constituée de très fines plaquettes de quelques microns de longueur alors que le sable est constitué de grains beaucoup plus grossiers (plusieurs centaines de microns).

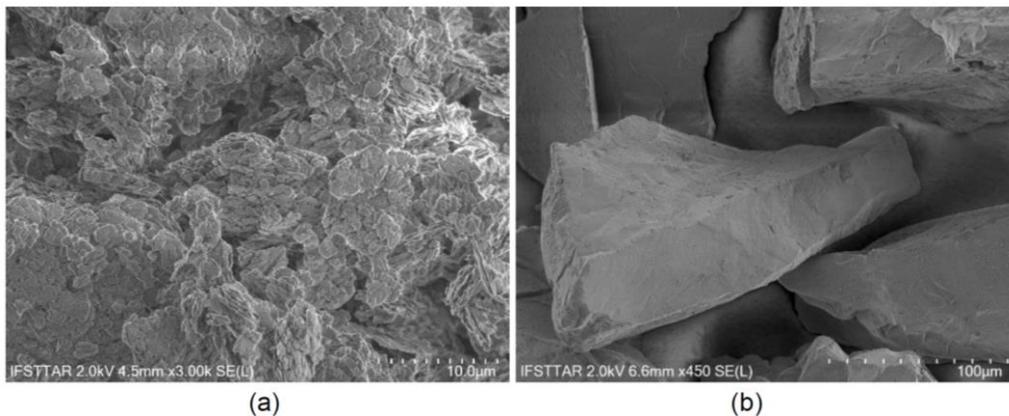


Figure 5-1 : Observations au MEB (a) des plaquettes d'argile kaolinite et (b) des grains de sable d'Hostun (Sediki, 2018)

Trois sols ont été reconstitués en laboratoire : une argile pure S0K100 (100% d'argile kaolinite) et deux mélanges S50K50 (50% de sable et 50% d'argile) et S75K25 (75% de sable et 25% d'argile). Un quatrième sol a également été étudié : du limon prélevé sur un chantier dans le secteur Val d'Europe en région parisienne (dénommé LVE par la suite). Ces quatre sols ont été caractérisés de manière exhaustive dans l'étude de Sediki (2018). Ici, nous en résumons les principales propriétés physiques

(Tableau 5-1). La surface spécifique a été mesurée à l'aide de la méthode d'adsorption des gaz de Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Brunauer et al., 1938) en suivant la norme ISO (2010). La valeur au bleu de Méthylène a également été mesurée (ASTM, 2019) tout comme la limite de liquidité et l'indice de plasticité (ISO, 2018). La teneur en eau optimale w_{OPN} et la masse volumique sèche maximale ρ_{dOPN} ont été déterminées à l'aide de l'essai Proctor Normal (BSI, 2010). D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000), le sol S0K100 est classé A3 (argile plastique), S50K50 et LVE sont classés A2 (sable fin argileux et limon), et S75K25 est classé A1 (sable fin peu argileux). Ainsi, notre étude s'appuie sur quatre sols de référence qui couvrent la gamme des sols fins susceptibles d'être rencontrés sur les chantiers de terrassement. On peut considérer que S75K25 est un sol au comportement gouverné par la fraction sableuse, S0K100 est gouverné par la fraction argileuse, LVE est gouverné par la fraction limoneuse et S50K50 est un mélange intermédiaire (Boussaid, 2005). On notera qu'un sol de type A4 n'a pas été étudié car il s'agit d'une catégorie de matériaux à fort retrait et gonflement (p. ex. une argile montmorillonite) sur lesquels il n'est pas envisageable de faire circuler des véhicules. Le Tableau 5-1 présente également le système de classification unifié (ASTM, 2017) dans lequel S0K100 est classé CH (argile de forte plasticité), S50K50 et LVE sont classés CL (argile sableuse et argile limoneuse) et S75K25 est classé SC (sable argileux).

Sol	S0K100	S50K50	S75K25	LVE
Propriétés granulométriques				
% < 2 μm	20	13	7,8	4
% < 80 μm	100	75	44	91
20 < % < 2000 μm	7	36,6	64	65
Propriétés physiques				
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
Surface spécifique ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$)	10,65	5,28	2,47	30,25
Paramètres de compactage Proctor Normal				
w_{OPN} (%)	28,2	16,0	12,4	15,6
γ_{dOPN} (kN.m^{-3})	14,7	18,0	18,7	18,1
Classification des sols				
Guide des Terrassements Routiers	A3	A2	A1	A2
American Society of Testing Materials	CH	CL	SC	CL

Tableau 5-1 : Propriétés des sols d'étude

La granulométrie des quatre sols a été déterminée à l'aide d'un granulomètre LASER Mastersizer 3000. Les résultats sont présentés sur la Figure 5-2. Les termes d_{10} et d_{80} correspondent aux diamètres des particules dont le pourcentage passant cumulé est de 10 % et 80 %, respectivement. Il apparaît une granulométrie plutôt uniforme pour S0K100 et LVE et plutôt discontinue pour les deux autres sols. Cela est dû à la différence de taille importante entre les grains de sable d'Hostun et les plaquettes d'argile kaolinite. Les sols S50K50 et S75K25 ont en effet deux modes très distincts dans leur granulométrie (4 μm et 200 μm) ce qui rend leur utilisation tout à fait intéressante pour étudier le phénomène d'agrégation caractérisé par l'agglomération des plaquettes d'argile autour des grains de sable.

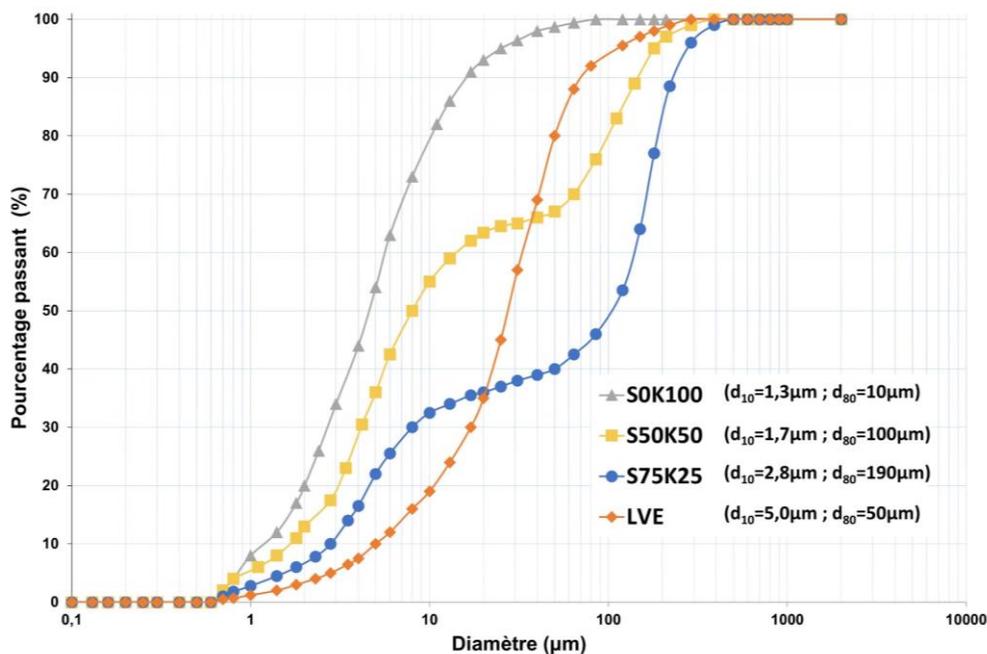


Figure 5-2 : Granulométrie des quatre sols (diamètre de surface projetée)

5.1.2 Mise en œuvre des sols

Afin de réaliser chaque mélange, les proportions de sable et d'argile sont placées dans un malaxeur puis la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau optimale (w_{OPN} du Tableau 5-1) est versée. Le malaxeur est enclenché jusqu'à obtenir un mélange avec une répartition homogène des matériaux et de l'eau. Celui-ci est ensuite versé dans des sacs plastiques fermés hermétiquement. Chaque mélange reste conditionné 24 heures afin d'assurer pleinement l'homogénéité hydrique. Des mesures de teneurs en eau réalisées sur plusieurs prélèvements permettent de vérifier l'homogénéité de la répartition de l'eau dans le matériau. La procédure est la même avec le limon Val d'Europe.

Les sols sont ensuite compactés avec le dispositif présenté en section 4.1.1. Pour éviter une formation trop importante d'agrégats, ils sont préalablement tamisés à 5 mm avant d'être versés dans l'embase du dispositif.

Dix échantillons ont été mis en œuvre selon les conditions décrites au Tableau 5-2. Chaque sol a été compacté dans une éprouvette parallélépipédique jusqu'à atteindre l'optimum Proctor (masse volumique sèche $\rho_{d, OPN}$) selon le protocole détaillé en section 4.1.1. Seul l'échantillon IX n'a pas été compacté à l'optimum Proctor mais suivant la configuration « C » présentée en Figure 3-15 afin d'étudier l'effet d'une modification de la teneur en eau de compactage sur la dégradation du sol.

Les trois premiers échantillons ont été uniquement compactés afin d'étudier dans un second temps l'interaction sol-atmosphère post-compactage (voir section 5.2.1).

Après compactage, les échantillons IV à VIII et l'échantillon X ont été laissés à l'air libre durant 24 heures avant d'être dégradés avec un simulateur de trafic. Ce temps d'attente permet de simuler des conditions de dégradation réalistes car les surfaces des sols sur les chantiers ont généralement le temps de sécher entre le compactage et la circulation des engins. La durée de séchage du sol va influencer son

comportement sous sollicitations de trafic. Cet effet n'a pas été étudié ici. Tous les essais ont été réalisés durant l'été sous des conditions météorologiques relativement similaires (environ $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ et une hygrométrie constante durant le compactage et la simulation de trafic en laboratoire). L'échantillon IX a été dégradé juste après le compactage afin de reproduire la configuration « C » (Figure 3-15 et Tableau 3-2, page 54).

Échantillon	Sol	ρ_a après compactage ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Teneur en eau durant le compactage (%)	Teneur en eau durant la dégradation par le trafic (%)	Nombre de passages de roue (N)	Type de pneu ^a
Échantillon I	S0K100	1470,00	28,20	-	-	-
Échantillon II	S50K50	1801,00	16,00	-	-	-
Échantillon III	S75K25	1873,00	12,40	-	-	-
Échantillon IV	S0K100	1470,00	28,20	21,12	20 000	S1
Échantillon V	S50K50	1801,00	16,00	12,98	20 000	S1
Échantillon VI	S75K25	1873,00	12,40	9,45	20 000	S1
Échantillon VII	S75K25	1873,00	12,40	8,95	10 000	S1
Échantillon VIII	S75K25	1873,00	12,40	9,30	20 000	S2
Échantillon IX	S75K25	1779,00	9,30	9,30	20 000	S1
Échantillon X	LVE	1810,00	15,60	11,70	20 000	S1

^a S1 : pneu MITAS FL-08 ; S2 : pneu CONTINENTAL IC 10 (Figure 4-2)

Tableau 5-2 : Conditions de compactage et de dégradation des sols d'étude

5.1.3 Dégradation de surface par roulement d'un pneu

Après compactage, les échantillons IV à X ont été dégradés à l'aide du simulateur de trafic dont le fonctionnement est décrit en section 4.1.2. Les échantillons IV, V, VI, VIII, IX et X ont subi 20 000 passages de pneus tandis que l'échantillon VII n'en a subi que 10 000 (Tableau 5-2). Ces nombres ont été choisis pour simuler les sollicitations que subissent les sols sur un site de construction durant une période d'environ un mois. Cela a été établi en s'appuyant sur les mesures du Midwest Research Institute effectuées sur quatre chantiers de terrassement aux États-Unis (Midwest Research Institute, 1996). À l'aide de compteurs de trafic, cette étude a permis d'estimer qu'il y avait entre 100 et 200 passages de camions à un même endroit par jour, soit entre 2 000 et 4 000 passages par mois. En considérant qu'un passage de camion correspond à 3 passages de roues (un tombereau articulé possède 3 roues de chaque côté, Figure 4-5), cela fait environ 10 000 passages de roues par mois sur une même surface. Ces mesures ont été réalisées sur des chantiers de terrassement durant des périodes de moyenne activité. Il est ici fait l'hypothèse que les périodes de forte activité peuvent entraîner au moins deux fois plus de trafic, soit 20 000 passages de pneus.

Pour chaque échantillon en cours de dégradation, le simulateur de trafic est arrêté au bout de 20, 60, 120, 300, 400, 500, 600, 800, 1 000, 2 000, 4 000 et 10 000 passages. À chaque arrêt de l'appareil, les particules arrachées du sol par le pneu sont collectées en balayant légèrement la surface à l'aide d'un pinceau souple puis elles sont pesées. Les incertitudes liées à cette méthode de mesure ont été quantifiées en réalisant des essais de répétabilité avec le sol S75K25. L'évolution de la masse des particules en fonction du nombre de passages du pneu permet de quantifier la dégradation de surface due aux cycles de trafic. Cette dégradation, notée « D » et exprimée en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, correspond à la masse cumulée de particules arrachées par rapport à la surface couverte par le pneu durant son mouvement ($0,04 \text{ m}^2$ dans la présente étude).

Pour les échantillons IV et V, les particules arrachées après 20 000 passages de pneu ont été placées dans un diffractomètre LASER afin de mesurer leur distribution granulométrique. Il en a été fait de même pour l'échantillon VI après 2 000, 10 000 et 20 000 passages.

5.1.4 Vernissage et mesure de rugosité de surface

Après dégradation, du vernis en spray a été appliqué sur la surface des échantillons IV, VI, VII, VIII et IX (Figure 5-3) afin de durcir la surface des sols. Cela a permis d'éviter tout envol de poussières qui aurait modifié l'état de surface des échantillons et donc perturbé les mesures de vitesse en couche limite lors des essais en soufflerie (voir section [5.2.2](#)).

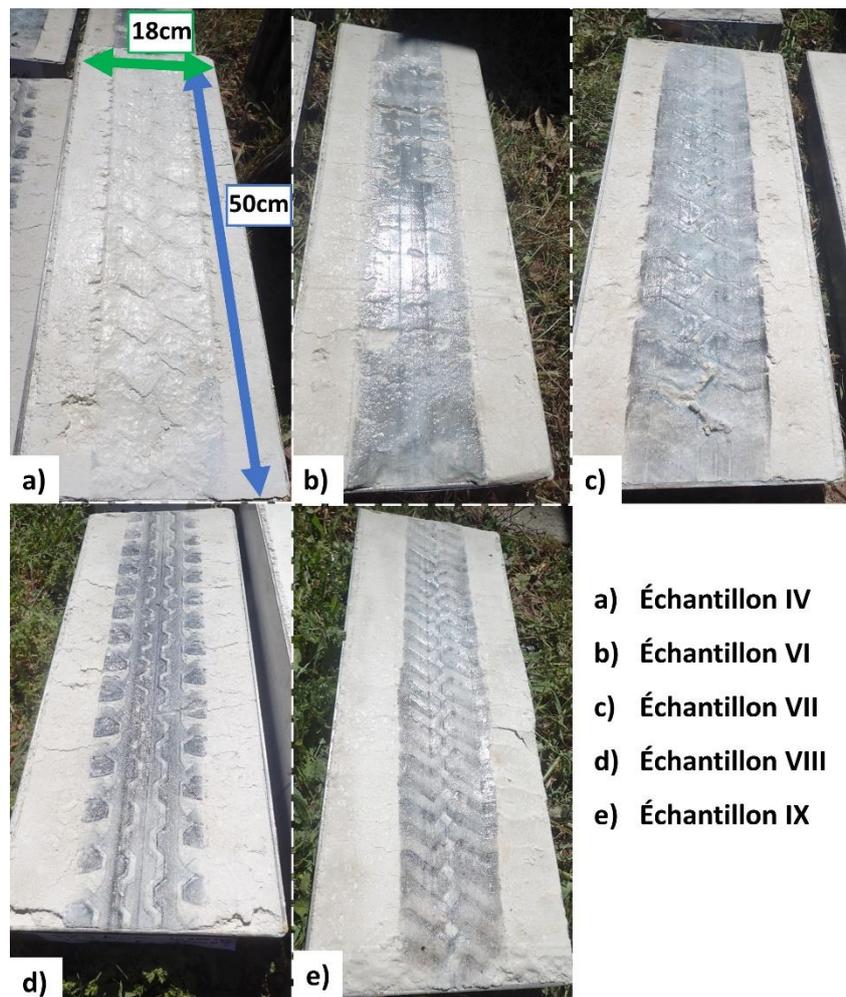


Figure 5-3 : Éprouvettes après application du vernis

Des mesures ont été réalisées avec un profilomètre rotatif portable ELATextur (Figure 5-4-a) avant et après mise en place du vernis pour vérifier si cette application avait modifié la rugosité de surface. Cet appareil a une résolution verticale de 10 μm et horizontale de 200 μm . Il effectue la mesure de profilométrie par rotation d'un faisceau LASER sur un cercle de 400 mm de circonférence (en rouge sur la Figure 5-4-a). Les résultats des mesures, présentés à la Figure 5-4, montrent que l'application du vernis ne modifie que très légèrement la rugosité de surface des éprouvettes (quelques centaines de micromètres tout au plus).

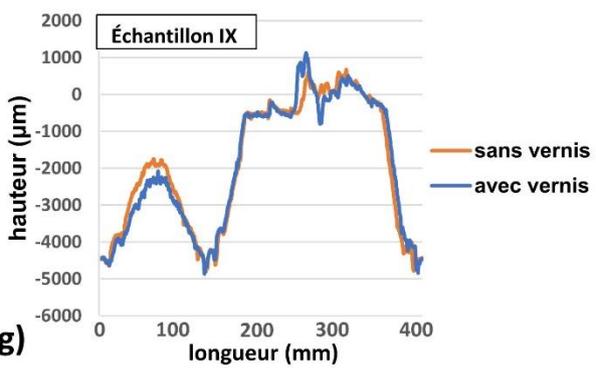
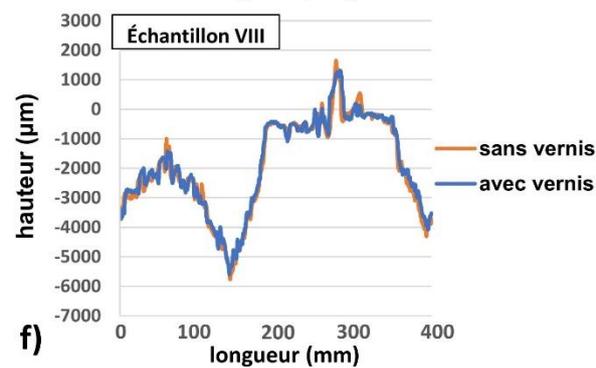
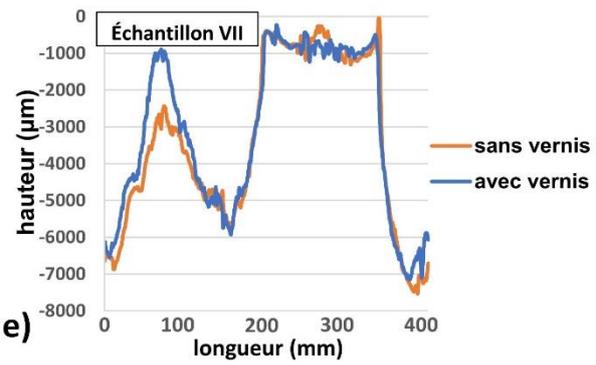
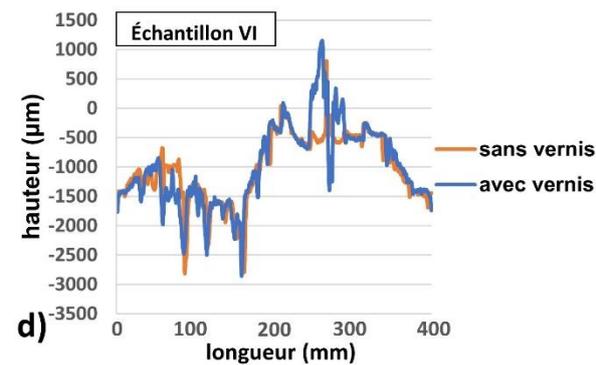
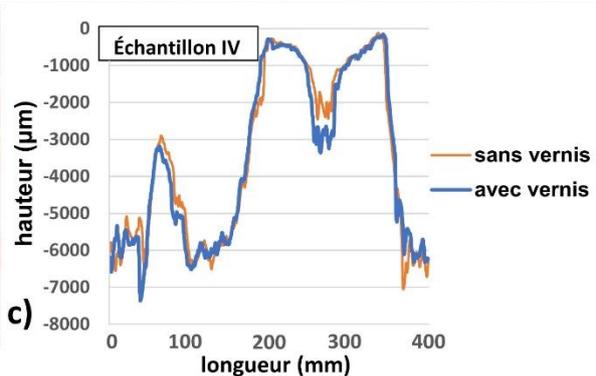
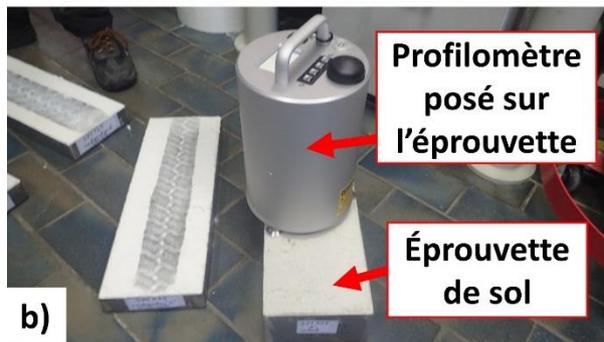


Figure 5-4 : a) Profilomètre rotatif portable posé sur une surface avec sa ligne de mesure (cercle rouge) ;
 b) Configuration des mesures sur les sols et profils de rugosité mesurés avant et après application du vernis sur l'échantillon b) IV, c) VI, d) VII, e) VIII et f) IX.

L'étude de la dégradation des sols permet d'analyser l'apparition des particules en surface qui sont ensuite susceptibles de s'envoler pour constituer un aérosol de poussières. Il s'agit donc dans un second temps d'étudier l'initiation de l'envol de ces particules. Cela est réalisé à l'aide de mesures des champs de vitesse de l'air au-dessus des sols en soufflerie.

5.2 Champs de vitesse en couche limite

Les processus d'envol des poussières sont en partie liés à l'interaction sol-atmosphère. Nous l'avons étudiée en réalisant des campagnes de mesures d'écoulements d'air juste au-dessus des sols en soufflerie. Deux campagnes distinctes ont été menées : une première sur les sols uniquement compactés et une seconde sur les sols dégradés par le trafic.

5.2.1 Protocole

Les éprouvettes de sol parallélépipédiques sont placées au milieu de la veine d'essais de la soufflerie Deltalab EA103. Cette dernière a été spécialement conçue afin que les éprouvettes puissent être positionnées de manière à ce que la surface du sol coïncide avec le plancher de la soufflerie, selon la disposition présentée à la Figure 5-5.

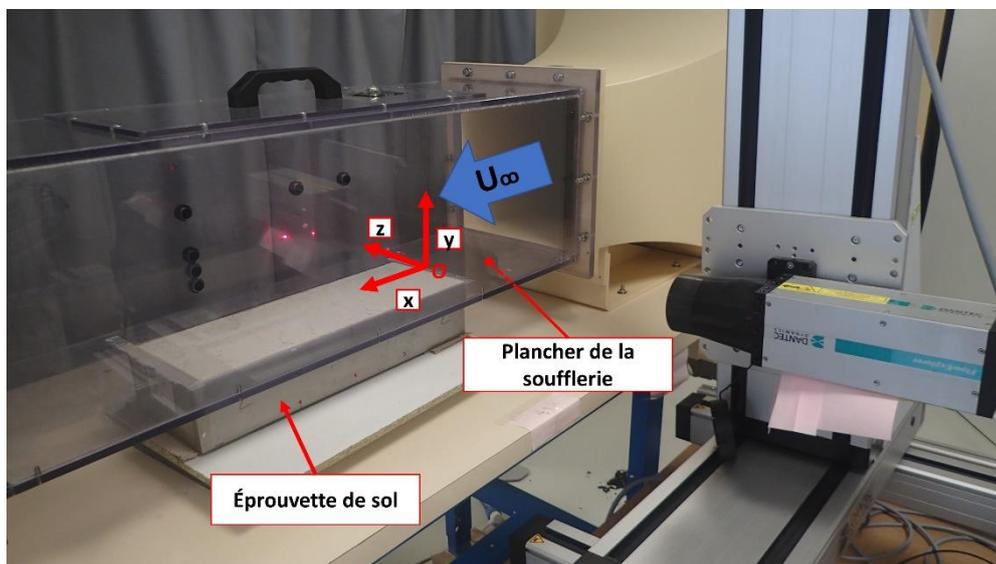


Figure 5-5 : Disposition de l'éprouvette dans la veine d'essai lors des mesures de champs de vitesses au-dessus des sols

On définit le système de coordonnées orthonormé suivant : x correspond à l'axe horizontal dirigé dans le sens de l'écoulement d'air, y est l'axe vertical et z l'axe transversal. L'origine du repère O est prise au centre du bord d'attaque de l'éprouvette.

Les profils verticaux de vitesse de l'écoulement ont été mesurés par LDV au centre ($z=0$) de la veine d'essai à quatre positions définies par les points 1 à 4 sur la Figure 5-6. Le premier point est pris comme une référence. Il est situé sur le plancher en PVC de la soufflerie ($x=-0,03$ m). Les trois autres points sont situés sur l'échantillon de sol ($x=0,05$, $0,15$ et $0,27$ m respectivement). Pour les mesures de couche limite, seule la composante horizontale de vitesse a pu être mesurée pour des raisons liées au dispositif optique. Sur la Figure 5-6, l'écoulement d'air est orienté de la gauche vers la droite.

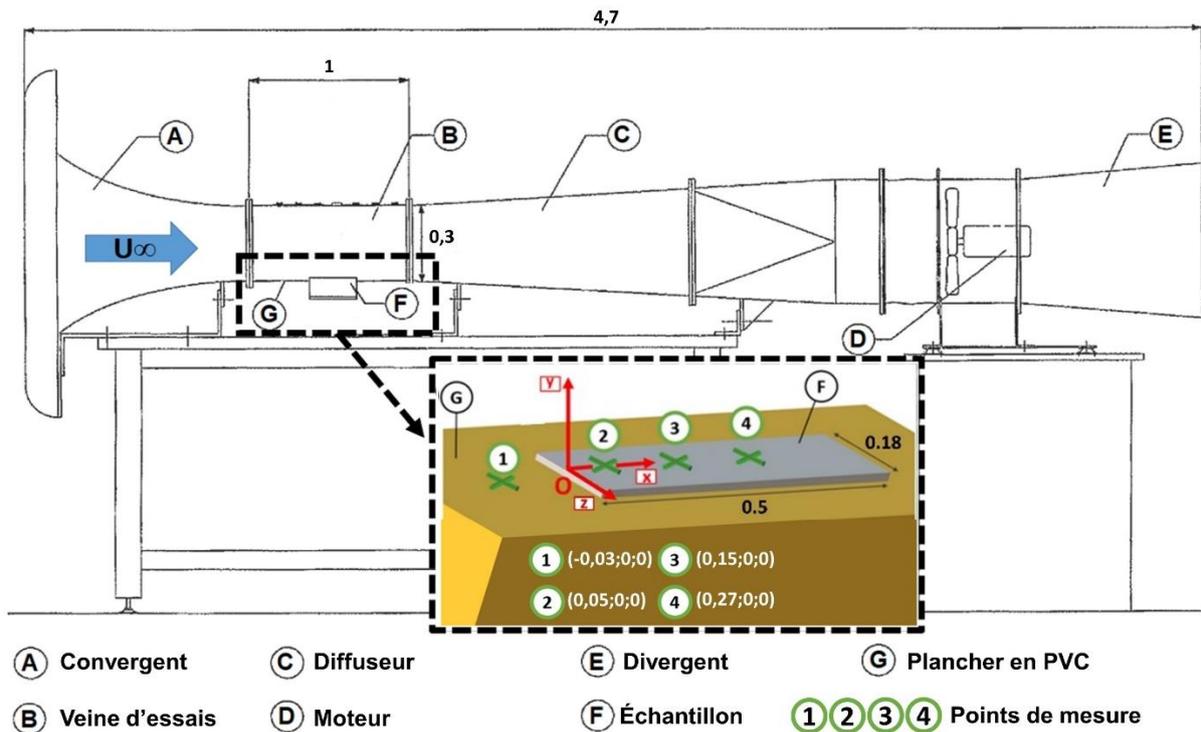


Figure 5-6 : Schéma de principe de la soufflerie avec zoom sur l'échantillon de sol. Les croix vertes correspondent aux locations des mesures des gradients de vitesses verticaux avec leurs coordonnées cartésiennes (x;y;z). Les distances sont en mètres.

5.2.2 Campagne de mesures sur les sols compactés

Une première campagne de mesures a été réalisée en mesurant les champs de vitesse sur les échantillons I, II et III qui ont été uniquement compactés sans subir de dégradation. Cinq différentes vitesses de vent ont été simulées au-dessus de chaque échantillon : $U_{\infty} = 4, 8, 12, 16$ et 20 m.s^{-1} . Les profils de vitesses (mesurés aux endroits 1, 2, 3 et 4 de la Figure 5-6) ont été caractérisés à l'aide de 39 points de mesure selon un maillage vertical défini au Tableau 5-3.

Distance par rapport à la surface (mm)	Espace vertical entre deux points de mesure (mm)	Nombre de points de mesure
$0 \leq y \leq 5$	0,25	21
$5,5 \leq y \leq 8$	0,50	6
$9 \leq y \leq 14$	1,00	6
$16 \leq y \leq 20$	2,00	3
$30 \leq y \leq 50$	10,00	3

Tableau 5-3 : Maillage vertical des points de mesure de la campagne expérimentale sur sols compactés

Ce maillage s'affine progressivement lorsque les points de mesure se rapprochent de la surface afin de caractériser finement le champ de vitesse en couche limite. À l'issue de cette première campagne de mesure, il a été choisi d'affiner encore plus le maillage en proche surface pour étudier la couche limite au-dessus des sols dégradés. Ce point est l'objet de la section suivante.

5.2.3 Campagne de mesures sur les sols dégradés

Une seconde campagne de mesures en soufflerie a été réalisée avec les échantillons IV, VI, VII, VIII et IX après qu'ils aient été dégradés en simulateur de trafic. Le protocole de mesure est le même que celui détaillé précédemment et illustré à la Figure 5-6. Étant donné le grand nombre d'échantillons, seules deux vitesses de vent ont été simulées : $U_{\infty} = 8 \text{ m.s}^{-1}$ et $U_{\infty} = 16 \text{ m.s}^{-1}$. Elles correspondent aux vitesses de circulation typiques des engins sur les chantiers (entre 30 et 60 km.h⁻¹). Le maillage vertical a été affiné par rapport à la section précédente et comporte désormais 43 points de mesure (Tableau 5-4).

Distance par rapport à la surface (mm)	Espace vertical entre deux points de mesure (mm)	Nombre de points de mesure
$0 \leq y \leq 2$	0,10	21
$2,2 \leq y \leq 3$	0,20	5
$3,5 \leq y \leq 5$	0,50	4
$6 \leq y \leq 10$	1,00	5
$12 \leq y \leq 20$	2,00	5
$30 \leq y \leq 50$	10,00	3

Tableau 5-4 : Maillage vertical des points de mesure de la campagne expérimentale sur sols dégradés

Cette campagne de mesures en soufflerie permet une caractérisation précise des écoulements d'air à l'interface sol/atmosphère. Associé à l'étude de la dégradation des sols, il est possible d'évaluer les quantités de poussières émises par le cisaillement des pneus. Cependant, les mesures effectuées ne tiennent pas compte des turbulences générées dans le sillage des camions en circulation sur les chantiers. Ces dernières sont analysées à l'aide de maquettes en soufflerie. La section suivante présente la démarche adoptée.

5.3 Écoulements dans le sillage des maquettes

Lors de la circulation des camions sur les chantiers, le transport et la dispersion des poussières peuvent être amplifiés par les turbulences générées dans leur sillage. Cette problématique a été étudiée par vélocimétrie LASER en soufflerie à l'aide de maquettes à échelle réduite. Deux campagnes d'essais ont été mises en place :

- Mesures des champs de vitesse en aval des maquettes avec LDV dans la soufflerie de l'ESTACA Campus Ouest à Laval ;

- Mêmes mesures mais avec PIV dans la soufflerie de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais.

Cette section présente les méthodologies adoptées pour chacune de ces deux campagnes expérimentales.

5.3.1 Mesures de sillage avec LDV

Les mesures LDV ont été réalisées dans le cadre du stage de fin d'études d'Edwin Duran-Garcia (Duran-Garcia, 2020). Les différentes configurations étudiées avec les maquettes sont présentées dans un premier temps. Le maillage des mesures en soufflerie est présenté par la suite. Finalement, le protocole d'acquisition et de filtrage des données est esquissé.

5.3.1.1 Configurations étudiées

L'étude a été menée afin d'analyser les écoulements dans le sillage d'un camion en fonction de sa géométrie, de sa vitesse de circulation et de la présence ou non de matériaux dans sa benne. Afin de mettre en évidence l'effet de la géométrie, deux maquettes de camions de formes très différentes ont été utilisées. L'une représente un tombereau (Figure 4-5, page 71) et l'autre un camion 8x4 (Figure 4-6, page 72). D'après les terrassiers interrogés, ce sont les deux types d'engins les plus utilisés sur les chantiers. Ces maquettes sont des reproductions exactes des camions réels à l'échelle 1/50. Elles permettent donc de respecter le critère de similitude géométrique qui est une condition nécessaire pour interpréter et transposer les résultats à l'échelle réelle (Gilliéron et Kourta, 2014). Pour simuler la présence de matériaux dans la benne, un pavé de polystyrène a été utilisé (Figure 5-7).



Figure 5-7 : Configuration « Benne pleine » du camion 8x4 (Duran-Garcia, 2020)

L'effet de la vitesse de circulation a été analysé en faisant varier la vitesse de l'écoulement d'air en soufflerie. Une étude de sillage automobile doit théoriquement respecter au mieux la similitude cinématique, à savoir l'égalité des nombres de Reynolds (Eq. (2.6), page 25) entre les essais à échelle réduite et ceux à l'échelle 1 (Gilliéron et Kourta, 2014). Cette similitude est toutefois difficile à respecter en laboratoire car travailler avec des maquettes échelle 1/50 nécessiterait un écoulement d'air en soufflerie 50 fois plus élevé que l'écoulement réel autour du camion. Ainsi, simuler une circulation à 30 km.h⁻¹ nécessiterait une vitesse de vent en soufflerie de 1 500 km.h⁻¹, ce qui est inenvisageable. De plus, des effets de compressibilité apparaissent à forte vitesse en soufflerie (Buschmann et Gas-el-Hak, 2003). Un certain nombre d'auteurs (Leclerc, 2008 ; Barros, 2015 ; Lahaye, 2016 ; Rossito, 2016) ont étudié cette question et n'ont pas constaté de modification des structures d'écoulement dans le sillage de maquettes pour des nombres de Reynolds supérieurs à 6,7.10⁴. Le choix a donc été fait de travailler dans cette gamme en simulant une vitesse d'écoulement de 8 m.s⁻¹ et de 16 m.s⁻¹ en soufflerie, ce qui correspond respectivement à un nombre de Reynolds de 5,4.10⁵ et de 1,1.10⁶ (calculés en prenant pour longueur caractéristique la hauteur de la maquette). Il s'agit ici de mettre en évidence l'effet d'un doublement de la vitesse d'écoulement sur les caractéristiques turbulentes de sillage. La discussion sera de nature plutôt qualitative, le non-respect de la similitude cinématique ne permettant pas une analyse quantitative vis-à-vis des contraintes générées par l'écoulement de sillage. Les conditions expérimentales permettent néanmoins de comparer, toutes choses étant égales par ailleurs, les différentes configurations étudiées. Elles sont présentées au Tableau 5-5.

Maquette	Présence matériaux dans la benne	Vitesse écoulement U_{∞} (m.s ⁻¹)	Notation
Camion 8x4	Oui	8	A
Camion 8x4	Non	8	B
Tombereau	Non	8	C
Tombereau	Non	16	D

Tableau 5-5 : Récapitulatif des configurations étudiées en soufflerie avec LDV

5.3.1.2 Plans de mesure et maillage

Afin de caractériser les écoulements tri-dimensionnels dans le sillage des maquettes, il est nécessaire de définir plusieurs plans de mesures. Dans cette étude, trois plans verticaux ont été considérés pour chacun des camions : le plan médian et un plan derrière chaque roue (Figure 5-8).

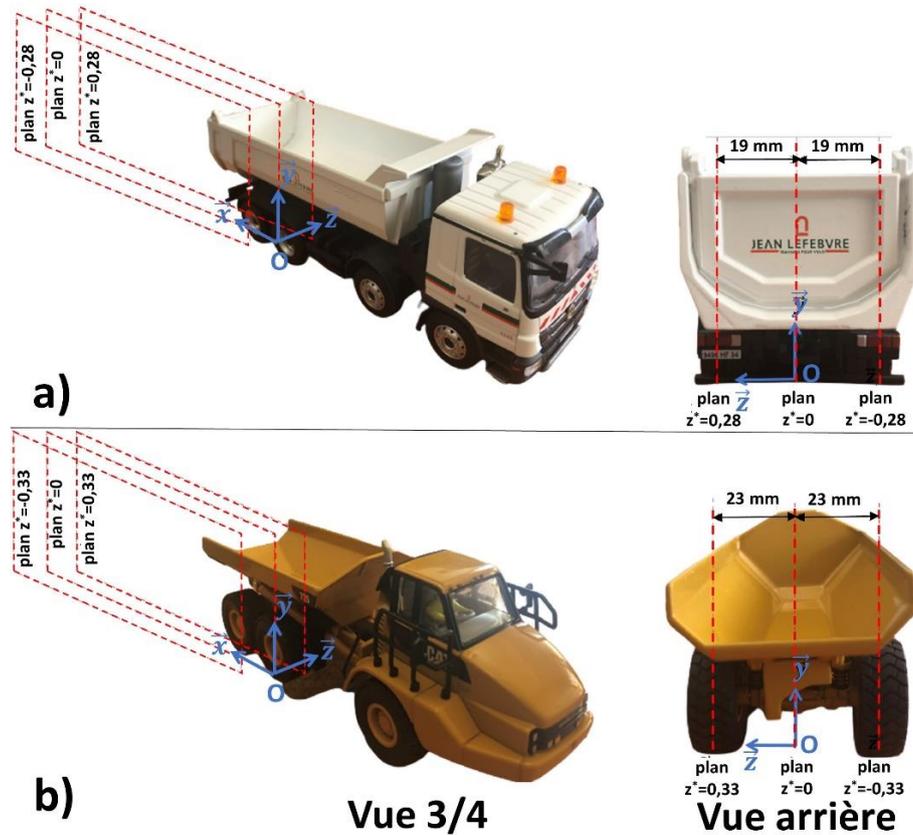


Figure 5-8 : Illustration des plans de mesures d'écoulements dans le sillage de la maquette a) du camion 8x4 et b) du tombereau (adapté de Duran- Garcia, 2020)

Le système de coordonnées cartésiennes (O, x, y, z) est défini de telle manière que son origine est située sur le plancher de la soufflerie, au niveau du culot du camion et dans le plan milieu de celui-ci. Les axes x, y et z sont respectivement dans la direction longitudinale, verticale et transversale. Pour faciliter les comparaisons entre les différentes configurations, on fera référence par la suite aux grandeurs adimensionnées x^*, y^* et z^* définies par (Eq. (5.1)) :

$$x^* = \frac{x}{h_m} ; y^* = \frac{y}{h_m} ; z^* = \frac{z}{h_m} \quad (5.1)$$

où h_m désigne la hauteur de la maquette (m).

Chaque plan consiste en 540 mesures ponctuelles de vitesse de l'écoulement d'air en utilisant le système LDV. Ce maillage spatial, identique pour les deux maquettes, est présenté à la Figure 5-9.

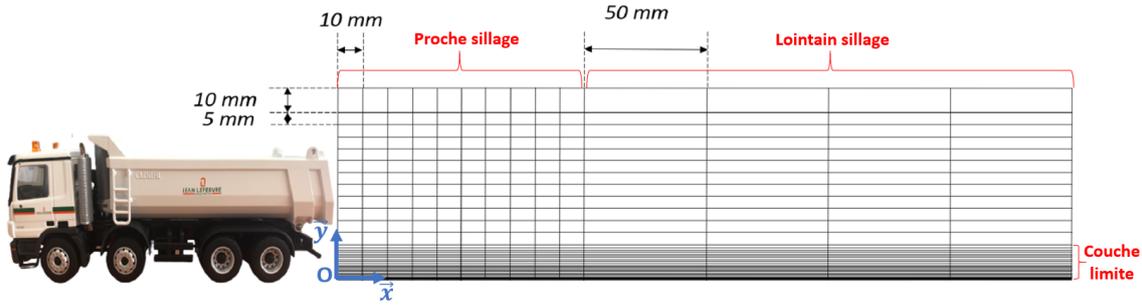


Figure 5-9 : Maillage des mesures en LDV dans le sillage des maquettes (adapté de Duran-Garcia, 2020)

Ce maillage comporte 3 zones :

- Proche sillage : Distance entre les points de mesures de 5 mm verticalement et de 10 mm horizontalement (132 points de mesure) ;
- Lointain sillage : Même distance verticale des points mais espacement horizontal de 50 mm (48 points de mesure) ;
- Couche limite : En proche paroi ($0 \leq y \leq 15$ mm) le maillage horizontal est le même que pour le proche et lointain sillage. Par contre, il est raffiné verticalement car les gradients de vitesse sont très importants dans cette zone. De plus, les écoulements qui s’y développent sont ceux qui contribuent à soulever les poussières présentes au sol, il est donc nécessaire de les caractériser plus finement. 360 points sont mesurés en couche limite. Le Tableau 5-6 détaille leur maillage vertical.

Distance par rapport à la surface (mm)	Espace vertical entre deux points de mesure (mm)	Nombre de points de mesure
$0 \leq y \leq 0,75$	0,25	4
$1 \leq y \leq 5,5$	0,5	10
$6 \leq y \leq 13$	1	10

Tableau 5-6 : Maillage vertical des points de mesure LDV en couche limite en aval des maquettes

5.3.1.3 Acquisition et filtrage des données

Le système LDV mesure les vitesses instantanées longitudinale U et verticale V de l’écoulement. Les variables d’intérêt sont les vitesses moyennes \bar{U} et \bar{V} ainsi que les fluctuations u' et v' . Par la suite, on fera référence aux grandeurs adimensionnées U^* , V^* , u'^* et v'^* définies par (Eq. (5.2)) :

$$U^* = \frac{\bar{U}}{U_\infty} ; V^* = \frac{\bar{V}}{U_\infty} ; u'^* = \frac{u'}{U_\infty} ; v'^* = \frac{v'}{U_\infty} \quad (5.2)$$

où U_∞ est la vitesse uniforme de l’écoulement dans la direction longitudinale (m.s^{-1}).

Pour des raisons liées à la géométrie du système optique de la LDV, les deux composantes U et V ont pu être mesurées sur l’ensemble du sillage à l’exception de la couche limite, où seule la composante longitudinale de vitesse était accessible.

Une étude de convergence des données dans le sillage d'une maquette a été menée par Rodriguez (2018) dans cette même soufflerie et avec le même système LDV. Il a montré que celles-ci se stabilisaient autour de 5% de leur valeur stationnaire au bout de 60 secondes. Cette valeur a donc été retenue comme temps d'acquisition pour chacun des points mesurés. Cela correspond au passage d'environ 1 800 particules dans le volume de mesure pour chaque point expérimental.

Après la campagne de mesures, les données expérimentales sont filtrées, notamment pour tenir compte des biais statistiques liées aux conditions d'ensemencement. En effet, la fumée d'ensemencement n'est pas répartie en permanence uniformément dans la soufflerie. La présence de particules dans le volume de mesure LDV est un processus aléatoire qui est pris en compte à l'aide de la méthode développée par Rodriguez et al. (2018). Par souci de concision, les différents traitements appliqués pour filtrer les données expérimentales ne sont pas détaillés dans le présent document. Le lecteur est renvoyé au manuscrit de Duran-Garcia (2020) et à l'article de Rodriguez et al. (2018) pour plus d'informations.

5.3.2 Mesures de sillage avec PIV

Afin d'avoir une vision instantanée de l'écoulement sur l'ensemble du sillage des maquettes, une campagne de mesures a également été réalisée avec le système PIV. Le système stéréo-PIV 2D3C (2 Dimensions de mesure, 3 Composantes de vitesse mesurées) utilisé permet d'avoir accès à la composante transversale de la vitesse W et à ses fluctuations w' , ce que ne permet pas le système LDV. De même que pour les composantes longitudinale et verticale, on définit les grandeur adimensionnées W^* et w'^* (Eq. (5.3)) :

$$W^* = \frac{\bar{W}}{U_\infty} ; w'^* = \frac{w'}{U_\infty} \quad (5.3)$$

5.3.2.1 Configurations étudiées et plans de mesures

Le système PIV est utilisé avec la soufflerie de l'Université Gustave Eiffel qui ne permet de simuler qu'une vitesse d'écoulement de 3 m.s^{-1} . Il n'y a donc eu que trois configurations testées en PIV avec les maquettes. Elles sont détaillées au Tableau 5-7. En prenant comme longueur caractéristique la hauteur des maquettes, les nombre de Reynolds correspondant sont de $2,0 \cdot 10^5$.

Maquette	Présence matériaux dans la benne	Vitesse écoulement U_∞ (m.s^{-1})	Notation
Camion 8x4	Oui	3	A'
Camion 8x4	Non	3	B'
Tombereau	Non	3	C'

Tableau 5-7 : Récapitulatif des configurations étudiées en soufflerie avec PIV

Les plans de mesures sont les mêmes que ceux détaillés aux Figures 5-8-a et 5-8-b.

5.3.2.2 Protocole expérimental

Le principe de mesure de la PIV est de déterminer le champ de vitesse d'un écoulement ensemencé par des particules en mesurant le déplacement de celles-ci durant un intervalle de temps dt . Pour déterminer ce déplacement, il faut connaître les échelles de longueurs des images prises par les caméras. Ces dernières doivent donc être préalablement calibrées à l'aide d'une mire placée à l'endroit de la mesure et tangente à la nappe LASER (Figure 5-10). Chaque plan de mesure nécessite une calibration spécifique.

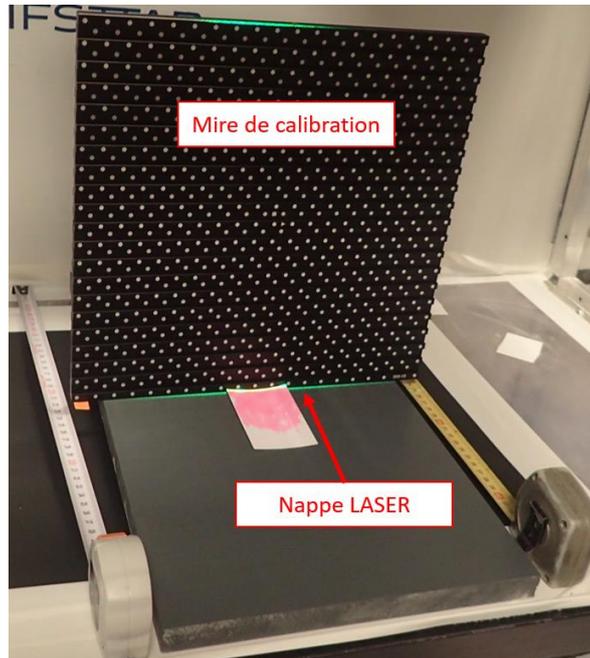


Figure 5-10 : Calibration des caméras à l'aide d'une mire tangente à la nappe LASER

La maquette est ensuite placée dans la soufflerie qui est ensemencée par de la fumée d'huile d'olive. Les particules de fumée sont illuminées par deux impulsions lumineuses de la nappe LASER espacées d'un temps $dt = 400 \mu s$. Cet intervalle de temps est suffisamment court pour permettre une bonne précision de mesure et suffisamment long pour distinguer clairement le déplacement des particules entre deux images. Chaque acquisition consiste à répéter cette double impulsion 100 fois à une fréquence $f_c = 800 Hz$. Lors de chaque impulsion, les caméras prennent une image. Il y a donc 100 paires d'images mesurées sur une durée de 125 ms. Le temps d'acquisition est faible et ne permet pas aux mesures d'être temporellement décorrélées. La convergence statistique n'est pas forcément assurée, en particulier pour les calculs d'écart-type. Toutefois, la fréquence d'acquisition permet d'avoir une bonne résolution temporelle du champ de vitesse. Le processus est illustré à la Figure 5-11.

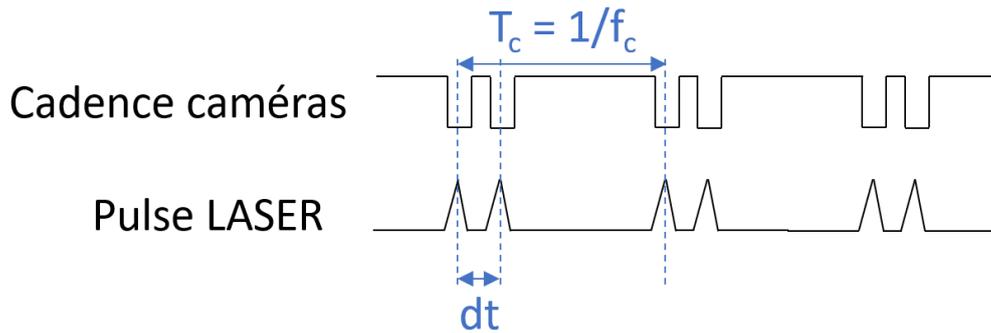


Figure 5-11 : Schématisation de la synchronisation du LASER et des caméras

Chaque couple d'images permet de déterminer le déplacement des particules sur l'intervalle de temps dt . Le post-traitement est réalisé à l'aide de l'algorithme d'inter-corrélation du logiciel LaVision DaVis 10.0. Les images sont divisées en fenêtres d'interrogation et chacune d'entre elles permet de tracer un vecteur vitesse. La Figure 5-12 résume le processus. Pour chaque fenêtre d'interrogation, l'algorithme déplace l'image prise à l'instant $t+dt$ par rapport à l'image prise à l'instant t . Pour chaque déplacement horizontal dx et vertical dy , les niveaux de gris entre les deux images sont comparés. Le déplacement des particules (dx, dy) correspond à la meilleure corrélation entre les deux images.

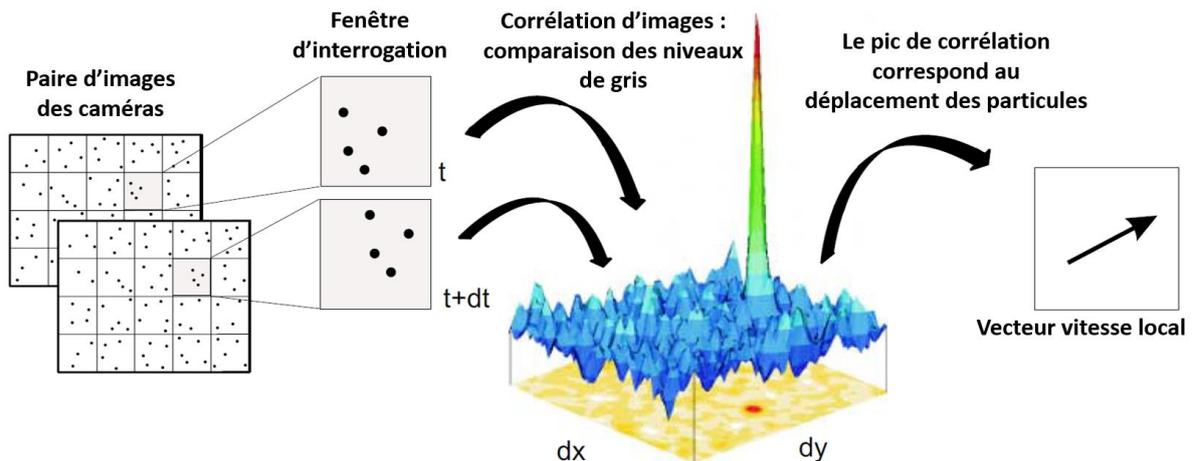


Figure 5-12 : Processus de détermination des vecteurs vitesse par PIV (adapté de Lavision, 2018)

Le processus de détermination des vecteurs vitesse est réalisé de façon itérative avec des fenêtres d'interrogation de taille décroissante de 64×64 à 16×16 pixels avec recouvrement de 75% des fenêtres. Cela donne un champ final de 71 400 vecteurs par image et donc une résolution spatiale qui correspond à un vecteur par $0,5 \text{ mm}^2$.

Les trois précédentes sections traitent de la dégradation et des écoulements d'air au-dessus des sols ainsi que des turbulences dans le sillage des camions. Il s'agit d'une première phase d'expérimentation en laboratoire qui comporte des effets d'échelle. Afin de compléter cette étude préalable, des essais en conditions réalistes de circulation de véhicules sont nécessaires. Ils sont présentés à la section suivante.

5.4 Envol de poussières par circulation de véhicules sur piste

Deux campagnes d'essais d'envol de poussières sur piste ont été réalisées. La première a eu pour objectif d'étudier l'envol de particules lors de la circulation d'un véhicule de tourisme et d'un 4x4 en conditions estivales. La seconde campagne d'essais s'est focalisée sur les envols de poussières générés par un camion 8x4. Nous décrivons ici les protocoles expérimentaux adoptés.

5.4.1 Essais avec véhicule de tourisme et 4x4

Cette section présente la première campagne d'essais réalisée sur la piste expérimentale de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais du 26 au 30 août 2019. Son objectif était d'étudier l'envol de particules généré par le passage de véhicules en conditions estivales. Ces conditions sont caractérisées dans le cadre des essais réalisés par des températures variant de 17 à 33 °C et une humidité relative comprise entre 50 et 80 %. L'étude a été menée afin de lier le mécanisme d'émission de poussières avec les paramètres physiques (type et quantité de particules, géométrie du véhicule), mécaniques (vitesse du véhicule, dynamique de contact pneu/surface) et environnementaux (vent, humidité relative et température de l'air). Tout d'abord, la piste d'essai est décrite. Ensuite, nous détaillons les véhicules utilisés ainsi que les particules étudiées. Finalement, le protocole expérimental est présenté.

5.4.1.1 Piste d'essais

La zone d'essais est présentée à la Figure 5-13. Elle était composée d'une partie dite de « lancement et d'accélération des véhicules » et d'une zone dite « de mesures » au sein de laquelle la circulation des véhicules se faisait sur un lit de particules préalablement disposées en surface de la chaussée. Cette chaussée était en enrobé afin de s'assurer qu'à chaque passage de véhicule ce sont uniquement les particules disposées en surface qui s'envolent. Des essais sur une piste non revêtue n'auraient pas permis de maîtriser ce paramètre. Cette configuration expérimentale permet d'étendre les résultats au problème de l'émission de particules due à la contamination des enrobés bitumineux (Hussein et al., 2018 ; Hichri et al., 2019).

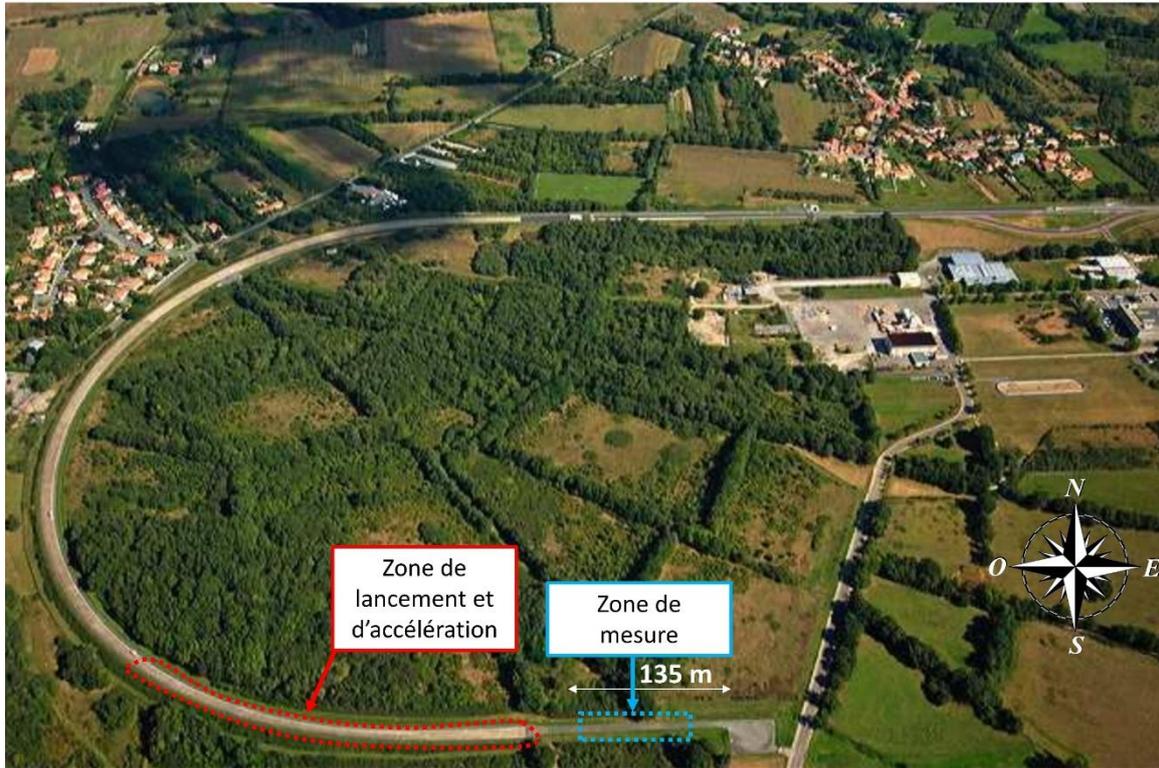


Figure 5-13 : Vue aérienne de la piste d'expérimentations de l'Université Gustave Eiffel

L'état de surface de la piste est quantifié par la rugosité moyenne arithmétique de son enrobé R_a (Whitehouse, 2012) (Eq. (5.4)) :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (5.4)$$

où L est la longueur de l'échantillon mesuré et Z l'évolution du profil de la hauteur de l'enrobé.

Six mesures de profil de rugosité ont été réalisées sur la piste à l'endroit de circulation des véhicules à l'aide du profilomètre LASER ELATextur (visible à la Figure 5-4, page 84). La rugosité moyenne calculée est $R_a = 662 \pm 58 \mu m$. Elle est illustrée sur la Figure 5-14.

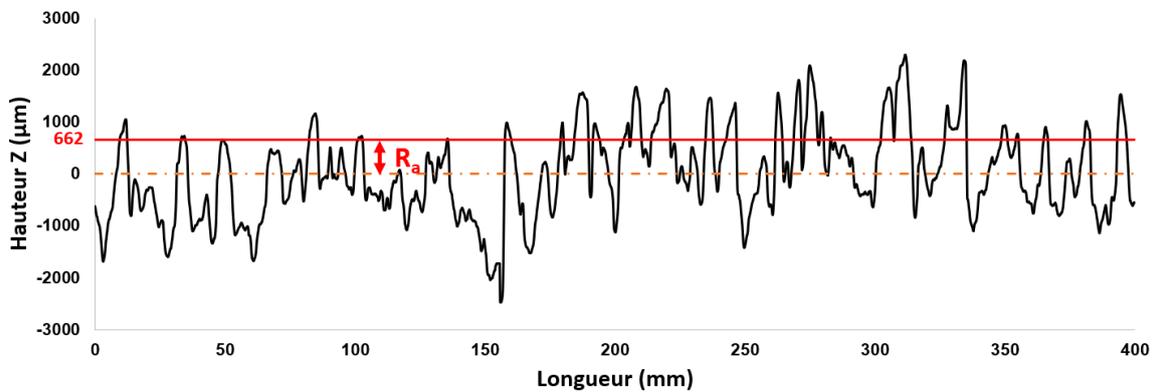


Figure 5-14 : Profil de rugosité de l'enrobé

5.4.1.2 Véhicules utilisés

Deux véhicules ont été utilisés lors des essais : une Renault Clio III (Figure 5-15-a) et un 4x4 Ford Ranger (Figure 5-15-b). Le premier véhicule a été choisi car il s'agit d'une des voitures les plus vendues en Europe et représentative des petites citadines. De plus, il était équipé d'un moyeu dynamométrique qui donne accès au torseur des efforts de contact pneu-surface (voir *section 4.3.3*). Sa géométrie est cependant éloignée de celle des engins susceptibles d'être rencontrés sur les chantiers. Le 4x4 est quant à lui beaucoup plus proche de la forme de camions de type tombereau. Il est d'ailleurs beaucoup plus massif (poids à vide de 2,3 tonnes contre 1,2 tonne pour la Clio) et susceptible d'être utilisé sur les routes non revêtues et les chantiers de terrassement. La Figure 5-15 montre que la Clio a une garde au sol environ deux fois plus faible que le 4x4 (120 mm contre 229 mm). D'un point de vue adimensionnel, le rapport garde au sol sur hauteur à vide (H/G en prenant les dénominations de la Figure 5-15) est également différent entre les deux véhicules (0,08 pour la Clio et 0,13 pour le 4x4). Le choix de leur utilisation a été fait entre autres afin de mettre en évidence l'effet de ce soubassement sur l'envol des poussières.

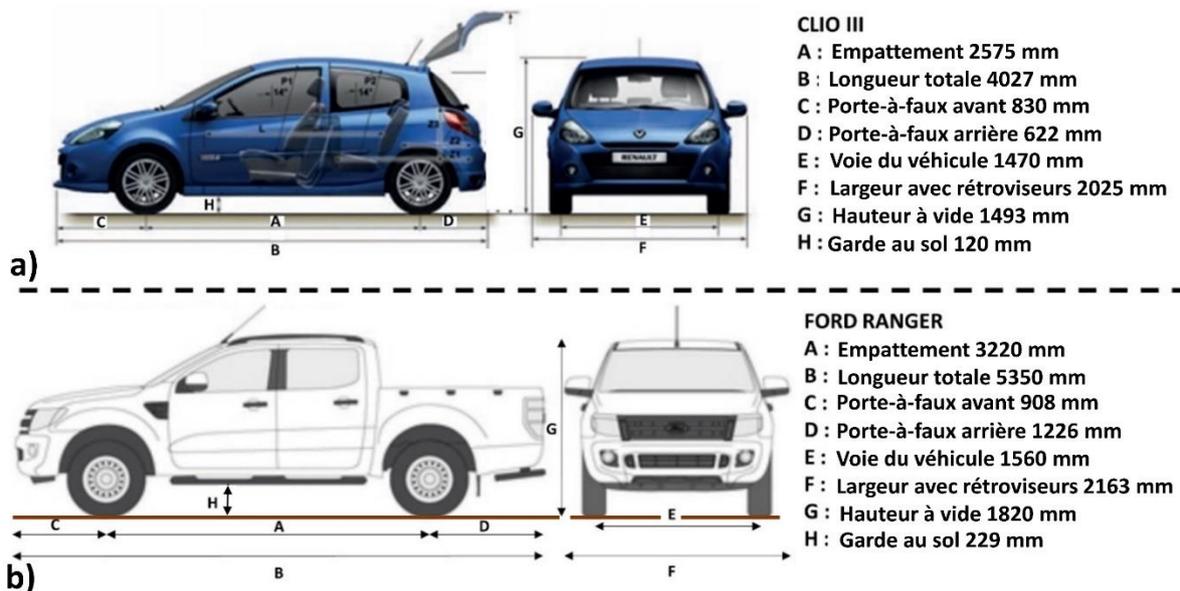


Figure 5-15 : Dimensions des véhicules a) Renault Clio III et b) 4x4 Ford Ranger

5.4.1.3 Matériaux étudiés

Lors des études sur l'envol des poussières lié à la circulation des véhicules sur les routes non revêtues, il n'y a généralement qu'un seul critère géotechnique pour caractériser le sol : le pourcentage de particules inférieures à 80 μm (Dyck et Stukel, 1976 ; USEPA, 1995 ; Etyemezian et al., 2003 ; Gillies et al., 2005 ; Muleski et al., 2005 ; Kuhns et al., 2010). Le United Soil Classification System désigne ce pourcentage comme étant la « teneur en limon » du sol. Les résultats des études ont montré que plus cette teneur est élevée, plus il y aura de poussières émises, toutes choses étant égales par ailleurs. Pour notre étude, nous avons choisi de travailler avec des particules ayant approximativement la même teneur en limon. Ainsi, nous pourrions vérifier si ce critère est suffisant pour caractériser l'envol des particules (le cas échéant nous mesurerons des émissions de poussières similaires avec les différents sols) ou s'il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres géotechniques.

Cinq types de particules ont été utilisées durant les essais : une argile kaolinite, une argile verte (mélange de montmorillonite et d'illite) et trois sols limoneux prélevés sur différents chantiers de terrassement en Europe : à Val d'Europe et à Strasbourg en France et à Marche les Dames en Belgique. Leurs courbes granulométriques sont présentées à la Figure 5-16. Sur cette figure, les courbes granulométriques de l'argile kaolinite et du limon Val d'Europe sont différentes de celles présentées à la Figure 5-2 (page 81), alors qu'il s'agit des mêmes matériaux. Cela est dû au fait que les granulométries présentées à la Figure 5-16 ont été mesurées par sédimentométrie alors que sur la Figure 5-2 elles ont été mesurées par diffraction LASER. Le choix a été fait ici d'utiliser la sédimentométrie car la granulométrie par diffractomètre LASER a tendance à sous-estimer la teneur en argile (Loizeau et al., 1994 ; Di Stefano et al., 2010).

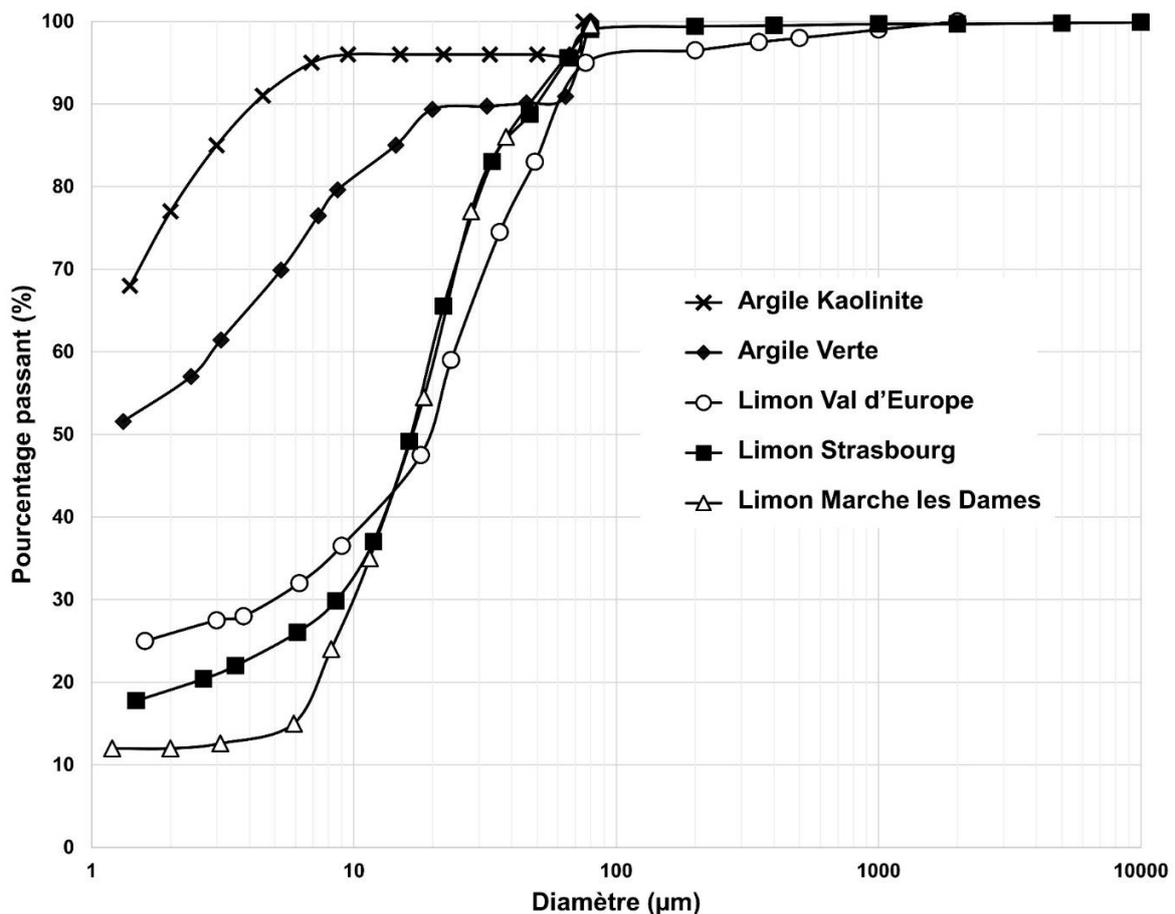


Figure 5-16 : Granulométries des particules (diamètre de Stokes)

Les sols présentés à la Figure 5-16 ont été choisis car ils ont des teneurs en limon proches (entre 95 et 100%) mais leurs autres propriétés géotechniques diffèrent (Tableau 5-8). Dans ce Tableau, les particules sont classifiées suivant la norme de l'American Standard for Testing Materials (ASTM, 2017) et celle du Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2000). Il apparaît que le Limon Val d'Europe, l'Argile Verte et le Limon de Strasbourg sont tous trois classés A2 selon le GTR. Il va donc être possible de vérifier si des sols ayant la même classification génèrent les mêmes quantités de poussière ou s'il est nécessaire de tenir compte d'autres paramètres.

Particules (désignation)	Passant 2 µm (%)	Passant 80 µm (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité (%)	Masse volumique des grains (kg.m ⁻³)	Classification	
						ASTM*	GTR**
Argile kaolinite (AK)	77	100	55,0	25,0	2620	CH Argile de haute plasticité	A3 Argile
Argile verte (AV)	53	100	50,7	15,7	2740	MH Limon de haute plasticité	A2 Argile peu plastique
Limon Val d'Europe (LVE)	26	95	36,5	15,7	2590	CL Limon argileux	A2 Limon
Limon de Strasbourg (LS)	19	99	40,3	24,9	2630	CL Limon argileux	A2 Limon
Limon Marche les Dames (LMD)	12	99,5	31,0	11,0	2640	CL Limon argileux	A1 Loess

* American Society for Testing Material
** Guide des Terrassements Routiers

Tableau 5-8 : Propriétés géotechniques des particules

5.4.1.4 Protocole expérimental

Afin de s'assurer de l'absence d'humidité sur les particules durant les essais, elles ont été préalablement placées en étuve à 105°C pendant 24 heures (ISO, 2014). Elles ont été ensuite tamisées à 2 mm pour rompre les éventuels agrégats puis conditionnées dans des sacs plastiques. Avant chaque passage de véhicule, les particules étaient disposées sur la chaussée suivant deux lignes faisant chacune 3 m de long et 0,3 m de large et écartées l'une de l'autre d'une distance correspondant à l'écart entre les deux pneumatiques (1,45 m pour la Clio et 1,56 m pour le 4x4). La largeur des lignes a été choisie afin d'être supérieure à celle des pneus des véhicules (20 cm pour la Clio et 25 cm pour le 4x4). La longueur a été choisie pour des raisons pratiques liées aux quantités de particules disponibles. Elle est suffisante pour générer un nuage de poussières mesurable et représentatif de l'émission du véhicule. Trois quantités de particules par unité de surface ont été testées : 200, 400 et 600 g.m⁻². Ces quantités correspondent à trois états de dégradation de sol distincts (faible, moyen et élevé) mis en évidence lors des essais avec simulateur de trafic (Le Vern et al., 2020b). Les zones où placer les particules étaient délimitées par des marquages au sol sur lesquels étaient apposés des cadres en bois. La quantité nécessaire de particules était versée dans ces cadres puis était étalée délicatement de façon homogène (visuellement) avec un pinceau. Le visibilimètre était placé sur le bas-côté de la route, 3 mètres après les lignes de particules et à 1,5 mètres sur le côté. Les essais se sont déroulés après neuf jours sans précipitations, sous des conditions d'humidité relative variant de 50 à 80% et de température comprise entre 17 et 33°C. La Figure 5-17 présente la disposition expérimentale.

Chaque essai a consisté à faire circuler l'un des deux véhicules à une vitesse prédéfinie (30, 45 ou 60 km.h⁻¹) sur un type de particules préalablement disposées au sol suivant une quantité surfacique donnée (200, 400 ou 600 g.m⁻²). La vitesse de 30 km.h⁻¹ correspond aux conditions de circulation généralement imposées lorsque le risque d'empoussièrement est important (notamment sur les chantiers). La vitesse de

45 km.h⁻¹ est une vitesse fréquemment atteinte en ville ou sur les chantiers. Quant à la vitesse de 60 km.h⁻¹, elle permet d'étudier l'effet d'un doublement de la vitesse par rapport à 30 km.h⁻¹.

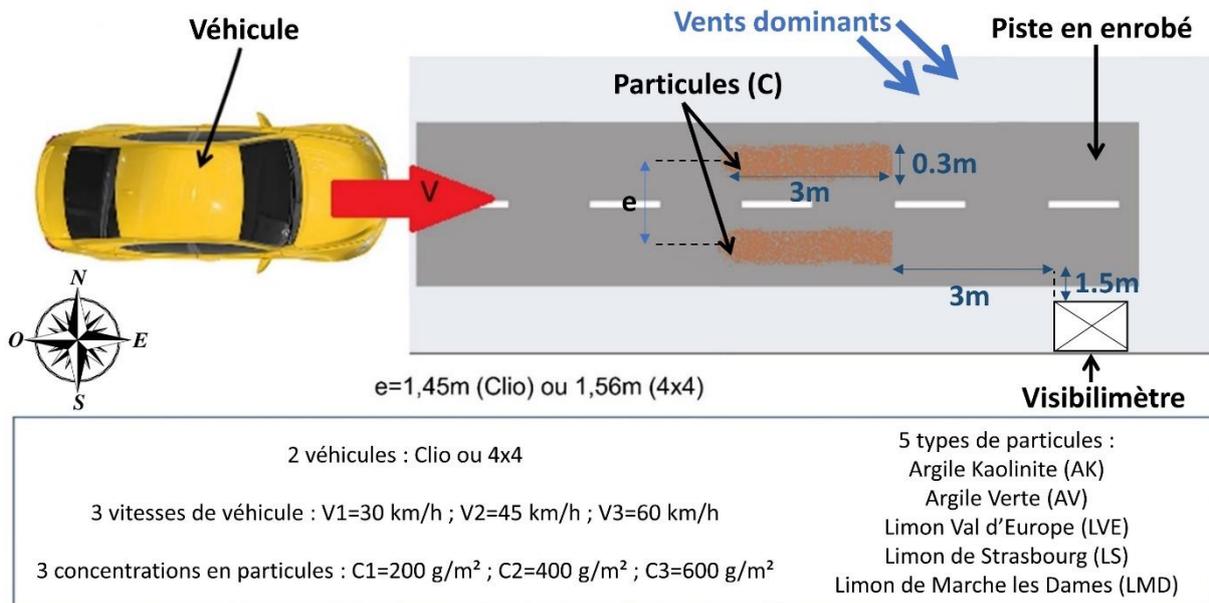


Figure 5-17 : Disposition expérimentale des essais avec les véhicules (le schéma n'est pas à l'échelle)

Lors des essais, le granulomètre optique Fidas Mobile mesurait les concentrations des particules mises en suspension suivant deux configurations :

- Soit la mesure était réalisée sur le bas-côté avec aspiration des particules à l'endroit de mesure de l'atténuation de visibilité, c'est-à-dire à 1,5 m de hauteur par rapport au sol ;
- Soit la mesure était réalisée en embarqué avec aspiration des particules directement derrière le pneu arrière droit du véhicule.

Après chaque essai, les particules restantes au sol étaient soufflées sur les côtés de la chaussée à l'aide d'un souffleur à feuille. Un balayage manuel de la route était également réalisé afin de s'assurer d'éliminer les particules situées dans les creux de l'enrobé.

La Figure 5-18 présente les deux véhicules (Figures 5-18-a et 5-18-b) ainsi que la mise en place du granulomètre optique Fidas Mobile pour les mesures embarquées avec le 4x4 (Figures 5-18-c). Pour ces mesures, l'entrée du tuyau pour l'aspiration des particules était située dans le plan médian de la roue arrière droite, à 30 cm du bord arrière du pneu et à 20 cm du sol (Figure 5-18-d). La distance entre le tuyau et le pneu était la même pour les mesures avec la Clio III. Toutefois, avec ce véhicule, le tuyau était à 10 cm du sol. Ces positionnements du tuyau sont liés à des considérations pratiques de fixation de l'appareillage vis-à-vis de la géométrie des véhicules.

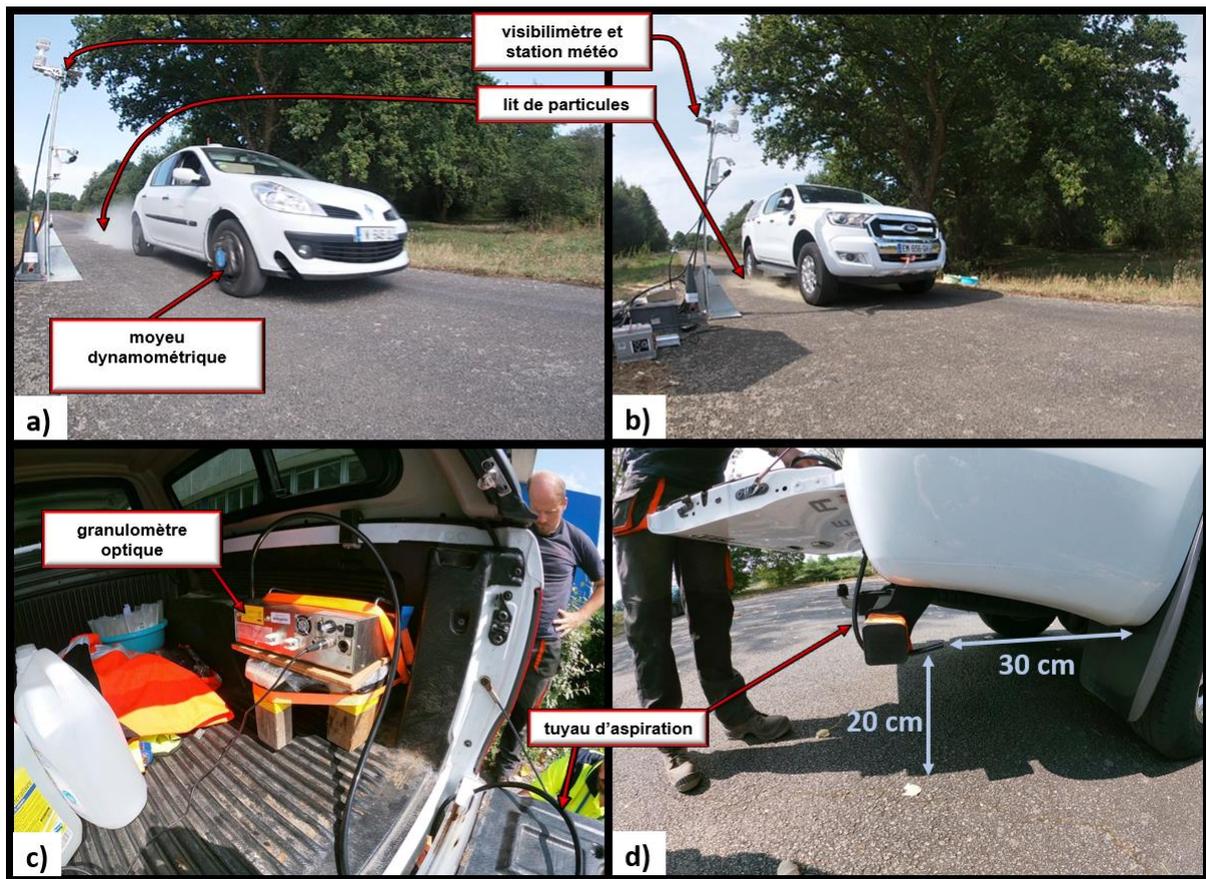


Figure 5-18 : Véhicules utilisés pour les essais : a) Renault Clio II et b) Ford Ranger ; Mesures embarquées avec c) installation du granulomètre dans le 4x4 et d) aspiration des particules directement derrière le pneu.

Au total, 74 essais ont été réalisés sur cinq jours avec différentes configurations. Le Tableau 5-9 présente l'ensemble des essais. Pour des raisons pratiques de temps et de quantités de matériaux disponibles, toutes les combinaisons de paramètres n'ont pas pu être testées. Le plan d'expériences a été établi en s'inspirant de la méthode Tagushi (Tagushi, 1987 ; Alexis, 1995) qui permet, avec un nombre limité d'essais, de mettre en évidence l'effet des paramètres expérimentaux sur le résultat final. Il est à noter que certaines configurations ont été testées plusieurs fois pour deux raisons :

- Vérifier la répétabilité des mesures en réalisant le même essai deux fois de suite ;
- Mettre en évidence l'effet des paramètres météorologiques sur l'envol des poussières en réalisant le même essai le matin et l'après-midi

Date	N° essai	Heure	Configuration*	Position FIDAS	Date	N° essai	Heure	Configuration*	Position FIDAS
26/08/19	1	10:01:32	LVE-V3-C1-Clio	Bas-côté	29/08/19	46	09:56:28	LMD-V3-C1-Clio	Embarqué
	2	10:20:09	LVE-V3-C1-Clio			47	10:08:37	LMD-V3-C1-Clio	
	3	10:38:48	LVE-V3-C2-Clio			48	10:19:49	LMD-V3-C2-Clio	
	4	10:58:29	LVE-V3-C2-Clio			49	10:31:48	LMD-V3-C1-Clio	
	5	11:14:07	LVE-V1-C1-Clio			50	10:44:03	LMD-V1-C1-Clio	
	6	11:36:07	LVE-V1-C2-Clio			51	10:54:17	LMD-V1-C2-Clio	
	7	13:49:14	LVE-V1-C2-Clio			52	11:04:36	LMD-V2-C1-Clio	
	8	14:06:47	LVE-V2-C1-Clio			53	11:15:12	LMD-V2-C2-Clio	
	9	14:29:16	LVE-V2-C2-Clio			54	11:27:33	LMD-V3-C3-Clio	
	10	14:44:31	LVE-V3-C3-Clio			55	11:36:30	LMD-V3-C1-Clio	
	11	15:04:44	LVE-V3-C3-4x4			56	11:47:55	LMD-V3-C2-Clio	
	12	15:22:35	LVE-V3-C2-4x4			57	14:06:50	LVE-V3-C1-Clio	
	13	15:39:29	LVE-V3-C1-4x4			58	14:16:55	LVE-V3-C1-Clio	
	14	15:57:43	LVE-V3-C2-4x4			59	14:29:14	LVE-V3-C2-Clio	
	15	16:31:47	LVE-V3-C2-4x4			60	14:39:10	LVE-V3-C3-Clio	
	16	17:00:05	LVE-V3-C2-4x4			61	14:48:07	LVE-V1-C2-Clio	
27/08/19	17	10:47:19	AK-V3-C1-Clio	Embarqué	30/08/19	62	15:16:18	LMD-V3-C3-4x4	Embarqué
	18	11:18:14	AV-V3-C1-Clio			63	15:29:25	LMD-V3-C2-4x4	
	19	11:33:58	AV-V3-C1-Clio			64	15:39:18	LMD-V1-C2-4x4	
	20	11:49:45	AV-V3-C2-Clio			65	09:16:21	AV-V3-C3-4x4	
	21	12:03:51	AV-V1-C1-Clio			66	09:28:21	AV-V3-C2-4x4	
	22	12:13:48	AV-V1-C2-Clio			67	09:44:43	AV-V3-C1-4x4	
	23	12:27:25	AV-V3-C3-Clio			68	09:54:24	AV-V2-C2-4x4	
	24	15:09:09	AV-V3-C3-4x4			69	10:05:50	AV-V1-C2-4x4	
	25	15:31:26	AV-V3-C1-4x4			70	10:39:52	AV-V3-C1-Clio	
	26	15:56:15	AV-V1-C1-4x4			71	10:51:03	AV-V3-C1-Clio	
27	16:10:51	AK-V3-C3-4x4	72	11:02:35	AV-V3-C2-Clio				
28/08/19	28	09:57:55	LS-V3-C1-Clio	Embarqué	73	11:13:42	AV-V3-C3-Clio	* La dénomination se lit de la manière suivante : Type de particules-Vitesse véhicule-Concentration particules-Véhicule Les sigles sont définis à la Figure 5-17	
	29	10:20:02	LS-V3-C1-Clio		74	11:26:07	AV-V1-C2-Clio		
	30	10:30:46	LS-V3-C2-Clio						
	31	10:40:24	LS-V3-C2-Clio						
	32	10:50:45	LS-V1-C1-Clio						
	33	11:00:16	LS-V1-C2-Clio						
	34	11:11:39	LS-V2-C1-Clio						
	35	11:39:44	LS-V2-C2-Clio						
	36	11:50:42	LS-V3-C3-Clio						
	37	14:05:28	LS-V3-C3-4x4						
	38	14:18:38	LS-V3-C2-4x4						
	39	14:30:30	LS-V3-C1-4x4						
	40	14:46:38	LS-V2-C2-4x4						
	41	14:58:02	LS-V1-C2-4x4						
	42	15:12:16	LVE-V3-C3-4x4						
	43	15:23:21	LVE-V3-C2-4x4						
	44	15:35:40	LVE-V3-C1-4x4						
	45	15:47:33	LVE-V1-C2-4x4						

Tableau 5-9 : Planning des essais d'envol de poussières sur piste

Chaque essai a été filmé par 3 caméras GoPro (une embarquée sur le véhicule et deux sur le bas-côté) afin d'avoir une vue globale de la formation du nuage de poussière lors du passage des véhicules (Figure 5-19). Les films réalisés ont également permis de vérifier pour chaque essai que les pneus du véhicule étaient bien passés sur les bandes de particules.

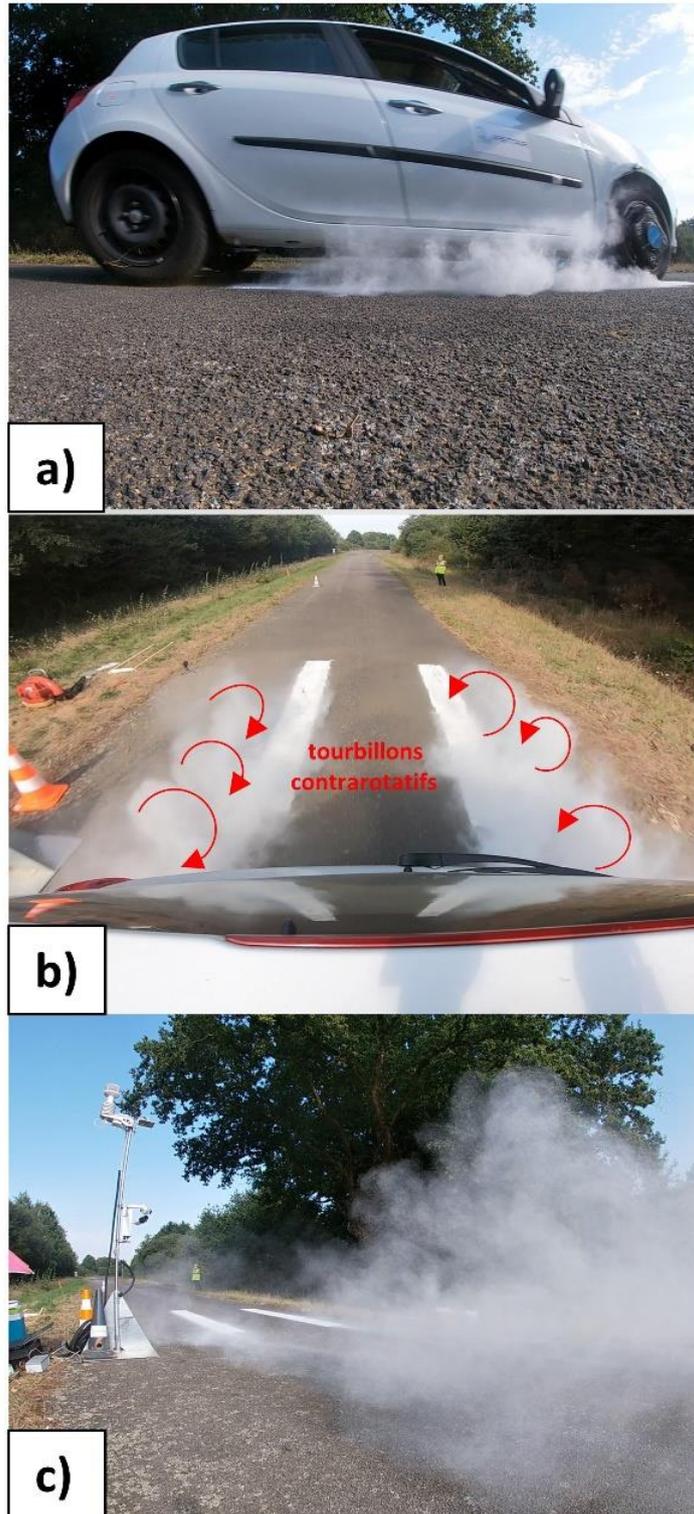


Figure 5-19 : Étapes filmées, lors du test n°17, de la formation du nuage de poussière avec a) accumulation des particules soulevées au niveau du soubassement, b) transport des particules dans les tourbillons de sillage et c) extension du nuage par advection et diffusion turbulente

5.4.2 Essais avec camion 8x4

La première campagne d'essais sur piste s'est focalisée sur des véhicules légers. Afin de se rapprocher des conditions rencontrées sur les chantiers de terrassement, une seconde campagne expérimentale a été menée avec un camion 8x4 le 28 septembre 2020. Cette section présente tout d'abord la piste où ont eu lieu les essais. Ensuite, nous présenterons le camion utilisé. Les particules étudiées étant les mêmes que celles de la précédente campagne expérimentale, le lecteur est renvoyé à la section [5.3.1.3](#) pour leur caractérisation. Finalement, le protocole expérimental est décrit.

5.4.2.1 Piste d'essais

La piste de la première campagne expérimentale n'ayant pas été à nouveau disponible, les essais avec camion ont été réalisés sur une autre piste en enrobé de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais (Figure 5-20). Comme lors des essais avec Clio et 4x4, la piste était composée d'une partie dite de « lancement et d'accélération du camion », d'une zone dite « de mesures » au sein de laquelle la circulation du camion se faisait sur un lit de particules préalablement disposées en surface de la chaussée et d'une zone de freinage.



Figure 5-20 : Vue aérienne de la piste d'essais avec camion

Afin de pouvoir comparer les résultats des essais avec camions à ceux réalisés avec la Clio et le 4x4, les rugosités des enrobés des deux pistes doivent être similaires. La rugosité de cette seconde piste a été mesurée à 6 endroits avec le profilomètre LASER ELATextur. La rugosité moyenne calculée à l'aide de l'Eq. (5.4) est $R_a = 689 \pm 92 \mu\text{m}$. Cette valeur est très proche de celle mesurée sur la première piste (4% d'écart), on considère donc que les conditions expérimentales sont les mêmes pour les deux campagnes expérimentales en ce qui concerne la rugosité de surface.

5.4.2.2 Camion utilisé

Lors des essais, un camion fréquemment rencontré sur les chantiers de terrassement a été utilisé : un porteur VOLVO FMX 450 8x4 (8 roues motrices dont 4 sont directrices). Ce camion a été choisi car il est l'un des plus grands modèles dans sa catégorie (semi-remorques à cabine avancée) à être utilisé pour les travaux de construction et les travaux publics. Préalablement aux essais, la benne du camion a été remplie de terre afin de le faire circuler à son poids maximal total en charge (environ 32 tonnes). On reproduit ainsi les conditions les plus sévères de circulation d'un camion pouvant amener à des émissions de poussières. Les caractéristiques techniques du camion sont présentées à la Figure 5-21.

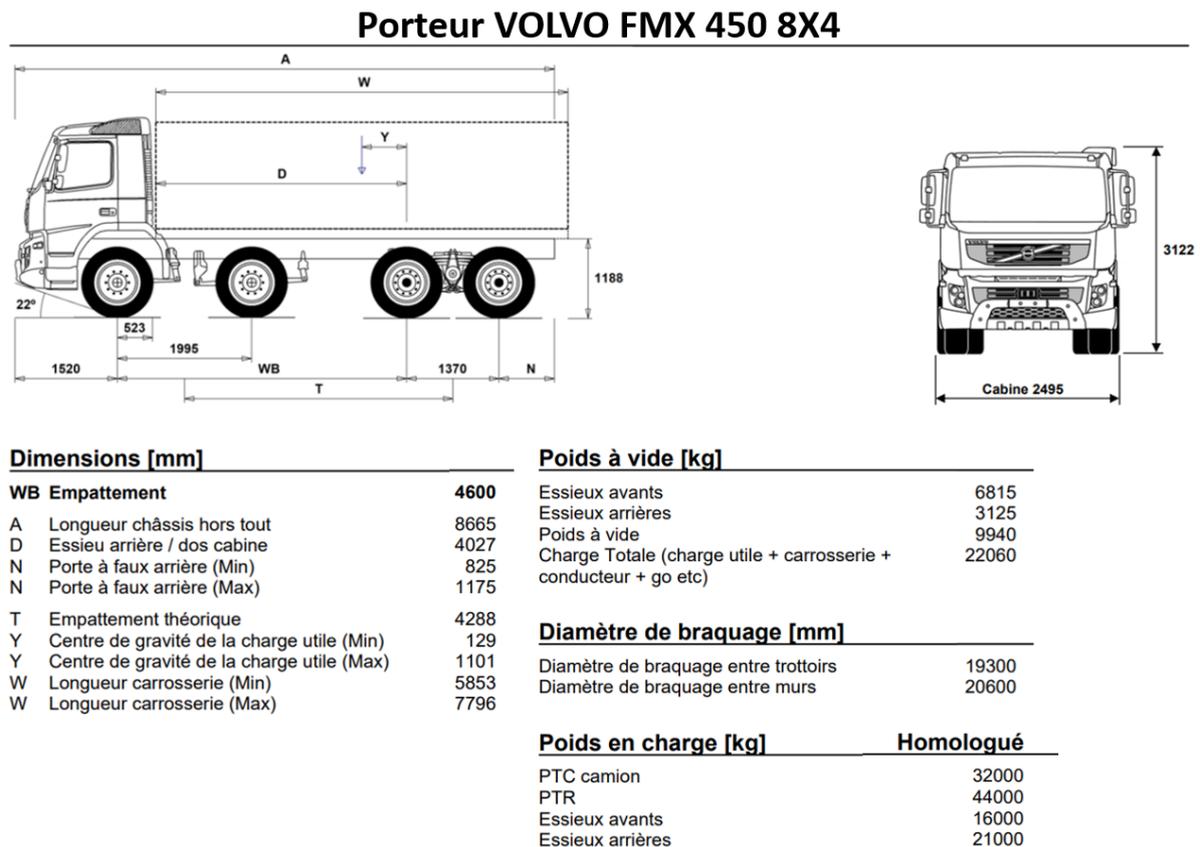


Figure 5-21 : Caractéristiques techniques du camion

5.4.2.3 Protocole expérimental

Afin de s'assurer de l'absence d'humidité sur les particules durant les essais, elles ont été préalablement placées en étuve à 105°C pendant 24 heures (ISO, 2014). Elles ont été ensuite tamisées à 2mm pour rompre les éventuels agrégats puis conditionnées dans des sacs plastiques. Avant chaque passage du camion, les particules étaient disposées sur la chaussée suivant deux lignes faisant chacune 6 m de long et 0,54 m de large et écartées l'une de l'autre d'une distance de 2,18 m correspondant à l'écart entre les deux pneumatiques du camion. La largeur des lignes a été choisie afin d'être supérieure à celle des pneus du camion qui était de 315 mm. La longueur a été choisie pour être légèrement supérieure à la distance entre les essieux avant et arrière du camion (5,97 m). Trois quantités de particules par unité de surface ont été testées : 200, 400 et 600 g.m⁻². Ces quantités sont les mêmes que celles étudiées lors de la précédente campagne expérimentale. Les zones où placer les particules étaient délimitées par des

marquages au sol. La quantité nécessaire de particules était versée dans un épandeur puis était versée sur toute la longueur. Cette technique, également utilisée par Langston et al. (2008), permet un épandage plus rapide des particules par rapport aux pinceaux utilisés lors de la première campagne expérimentale. Utiliser cette technique permet donc de réaliser plus d'essais sur une même journée. La précédente étude avait montré que l'argile kaolinite était très salissante vis-à-vis de la piste en enrobé, il a donc été choisi de ne pas utiliser ce matériau lors des essais avec le camion. Le visibilimètre était placé sur le bas-côté de la route, 3 mètres après les lignes de particules et à 1,5 mètres sur le côté. La Figure 5-22 présente la disposition expérimentale.

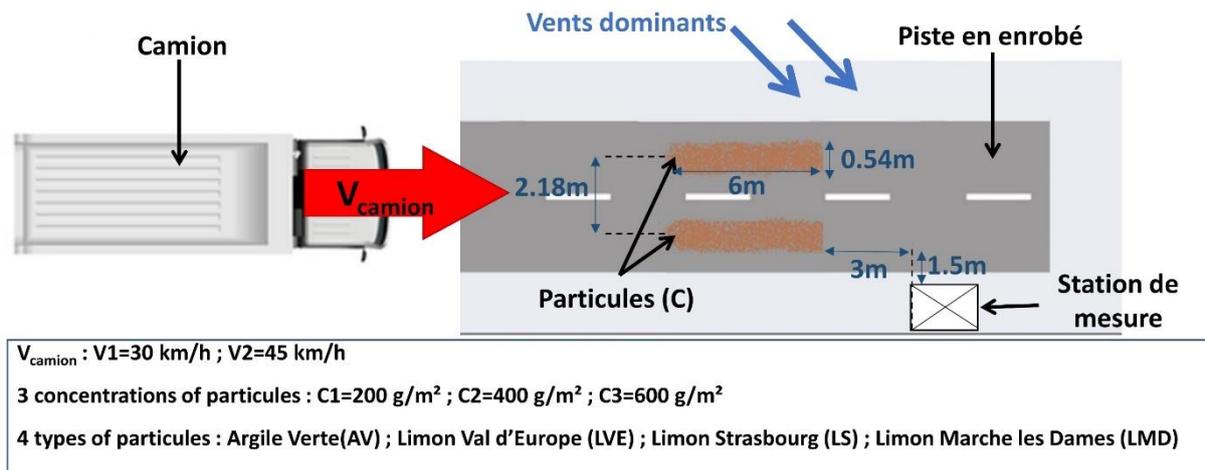


Figure 5-22 : Disposition expérimentale des essais avec le camion (le schéma n'est pas à l'échelle)

Chaque essai a consisté à faire circuler le camion à une vitesse prédéfinie (30 ou 45 km.h⁻¹) sur un type de particules préalablement disposées au sol suivant une quantité surfacique donnée (200, 400 ou 600 g.m⁻²). La vitesse de 30 km.h⁻¹ correspond aux conditions de circulation généralement imposées lorsque le risque d'empoussiérage est important sur les chantiers. La vitesse de 45 km.h⁻¹ peut néanmoins être atteinte par les camions sur certaines pistes de chantiers et il a donc été choisi d'étudier également cette vitesse.

Lors des essais, les deux granulomètres optiques mesuraient les concentrations des particules mises en suspension à deux endroits :

- La mesure du Fidas Mobile était réalisée sur le bas-côté avec aspiration des particules à l'endroit de mesure de l'atténuation de visibilité, c'est-à-dire à 1,5 m de hauteur par rapport au sol ;
- La mesure du Fidas 200 était réalisée en embarqué avec aspiration des particules directement derrière le pneu arrière gauche du camion.

Après chaque essai, les particules restantes au sol étaient soufflées sur les côtés de la chaussée à l'aide d'un souffleur à feuille. Un balayage manuel de la route était également réalisé avant de s'assurer d'éliminer les particules situées dans les creux de l'enrobé.

La Figure 5-23 présente le passage du camion sur les particules ainsi que la mise en place du granulomètre optique Fidas 200 pour les mesures embarquées (Figures 5-23-a). Pour ces mesures, l'entrée du tuyau pour l'aspiration des particules était située dans le plan médian de la roue arrière gauche, à 15 cm du bord arrière du pneu et à 50 cm du sol. Ce positionnement du tuyau est lié à des

considérations pratiques de fixation de l'appareillage vis-à-vis de la géométrie du camion. L'emplacement du visibilimètre et du Fidas Mobile pour la mesure de concentration des particules sur le bas-côté est visible sur la Figure 5-23-b.

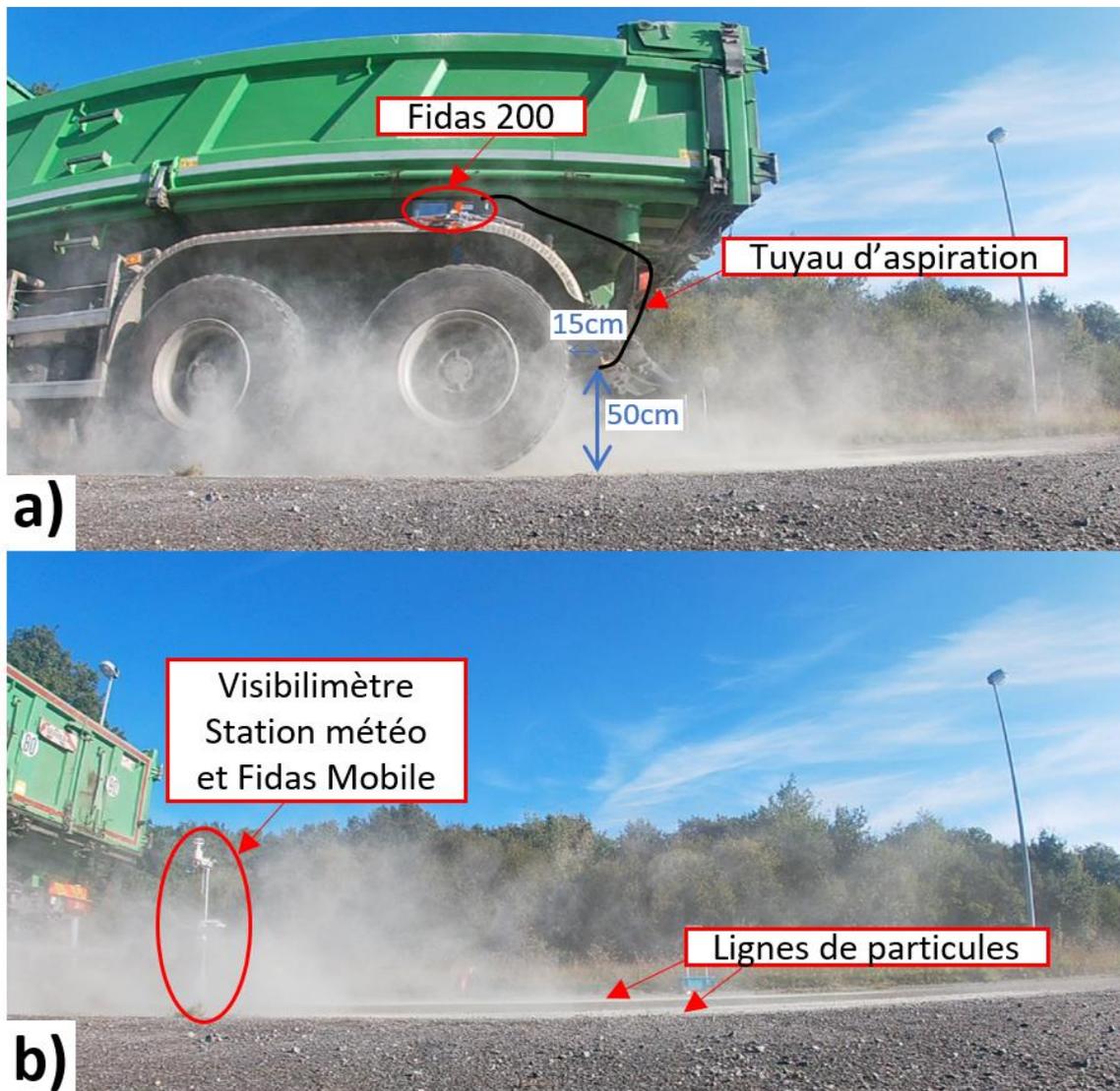


Figure 5-23 : a) Passage du camion sur les particules avec visualisation de l'emplacement du Fidas 200 et du tuyau d'aspiration des poussières ; b) Nuage généré après le passage

Au total, 22 essais ont été réalisés avec différentes configurations. Ils sont détaillés au Tableau 5-10. Il est à noter que les essais sont numérotés à la suite de ceux effectués avec la Clio et le 4x4. De même que pour la première campagne expérimentale, le plan d'expérience a été mis en place en s'inspirant de la méthode Tagushi (Tagushi, 1987 ; Alexis, 1995). Chaque essai a été filmé par 2 caméras GoPro sur le bas-côté de la route afin d'avoir une vue globale de la formation du nuage de poussière lors du passage du camion. Les films réalisés ont également permis de vérifier pour chaque essai que les pneus du camion étaient bien passés sur les bandes de particules.

N° essai	Heure	Vitesse du camion (km.h ⁻¹)	Type de particules	Concentration en particules (g.m ⁻²)
75	10:13:45	30	Argile Verte	200
76	10:23:05	30	Argile Verte	400
77	10:34:36	30	Argile Verte	600
78	10:43:28	30	Argile Verte	200
79	10:52:45	30	Limon Val d'Europe	200
80	11:02:33	30	Limon Val d'Europe	200
81	11:11:07	30	Limon Val d'Europe	400
82	11:32:47	30	Limon Val d'Europe	600
83	11:42:45	30	Limon de Strasbourg	200
84	11:51:04	30	Limon de Strasbourg	400
85	12:01:14	30	Limon de Strasbourg	600
86	14:01:41	30	Limon Marche les Dames	200
87	14:18:10	30	Limon Marche les Dames	400
88	14:32:30	30	Limon Marche les Dames	600
89	14:44:05	45	Argile Verte	200
90	14:52:26	45	Argile Verte	200
91	15:01:33	45	Limon Val d'Europe	200
92	15:09:04	45	Limon Val d'Europe	400
93	15:16:25	45	Limon de Strasbourg	200
94	15:24:41	45	Limon de Strasbourg	200
95	15:32:24	45	Limon de Strasbourg	400
96	15:41:02	45	Limon Marche les Dames	400

Tableau 5-10 : Configurations des essais réalisés avec le camion

Les protocoles des essais in-situ ayant été décrits, la section suivante présente les méthodes d'analyse des résultats de mesure des différents capteurs utilisés.

5.4.3 Méthodes d'analyse des résultats des essais in-situ

5.4.3.1 Remarques préalables

Lors des essais avec Clio et 4x4, un problème technique a entraîné la perte des données de mesures du granulomètre effectuées durant la journée du 27/08/19. Les résultats des essais 17 à 27 ne sont donc pas disponibles (à l'exception des données météo, visibilimètre et des films réalisés).

5.4.3.2 Analyse des données renvoyées par le moyeu dynamométrique de la Clio III

Le moyeu dynamométrique a permis de mesurer en temps réel les forces et les moments qui s'appliquaient sur la roue avant droite de la Clio III. Ces paramètres sont définis suivant le système d'axe présenté à la Figure 5-24.

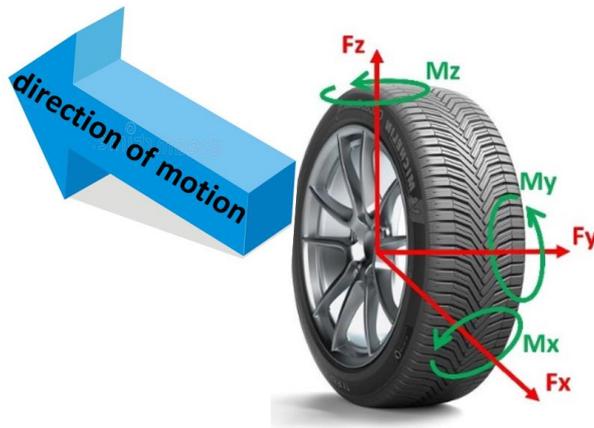


Figure 5-24 : Forces et moments tels que mesurés par le moyeu dynamométrique

Dans le contexte de l'étude, les paramètres qui vont avoir une influence sur l'envol des particules sont :

- La force longitudinale F_x qui caractérise le frottement entre le pneu et la chaussée ;
- La force verticale F_z qui caractérise l'action du poids du véhicule dans la mécanique de contact pneu/chaussée ;
- Le moment M_y qui caractérise également le frottement pneu/chaussée.

La Figure 5-25 montre que la force verticale F_z n'a pas beaucoup varié au cours des essais ($F_z \approx 3750 \text{ N} \pm 3\%$) étant donné que les masses de la Clio et de son conducteur ont toujours été les mêmes. De plus, l'uni de la route était de bonne qualité et la vitesse du véhicule était constante. Les variations dynamiques comme le mouvement du bas de caisse étaient donc absorbées par les amortisseurs. Le paramètre F_z n'est donc pas pris en compte dans l'analyse.

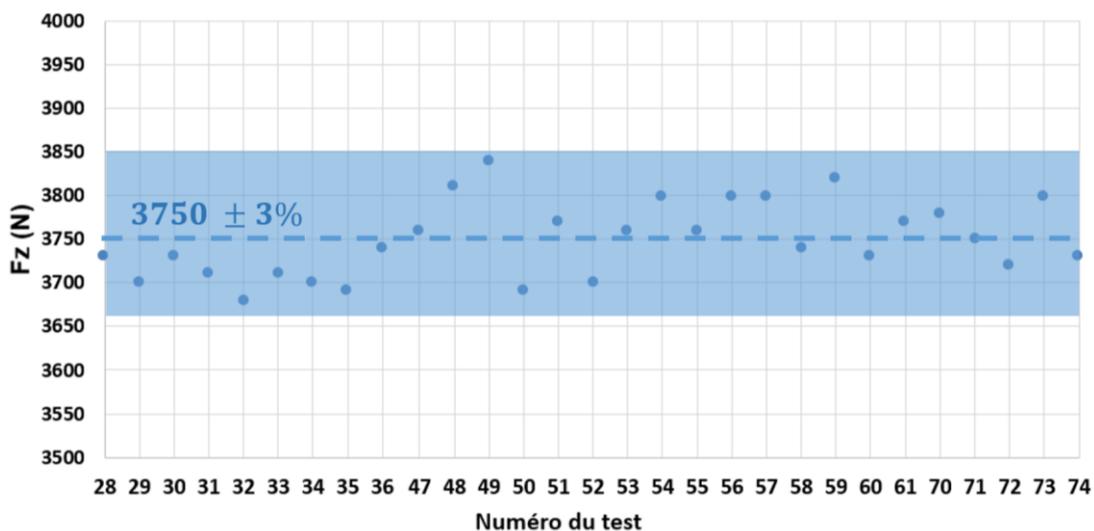


Figure 5-25 : Valeur moyennes des efforts verticaux F_z mesurés pour chaque test avec la Clio III

La Figure 5-26-a présente un exemple de l'évolution au cours du temps de la vitesse du véhicule, de F_x et de M_y pour le test n°52 (circulation de la Clio à 45 km.h⁻¹ sur 200g.m⁻² de particules de limon Marche les Dames). Cette Figure présente la durée totale d'un essai caractérisé par une évolution de la vitesse du véhicule en trois phases : accélération, vitesse stable puis décélération. Durant les phases d'accélération et de décélération, les paramètres F_x et M_y subissent des variations importantes dues aux

passages des vitesses et au freinage. Pour l'analyse, on tient compte des valeurs moyennes de ces paramètres (F_{x_moy} et M_{y_moy}) durant la période où le pneu est en contact avec les particules (Figures 5-26-b et 5-26-c). Cette période a lieu en phase de vitesse stable, ce qui explique que les variations de F_x et de M_y sont moins importantes que lors des phases d'accélération et de décélération.

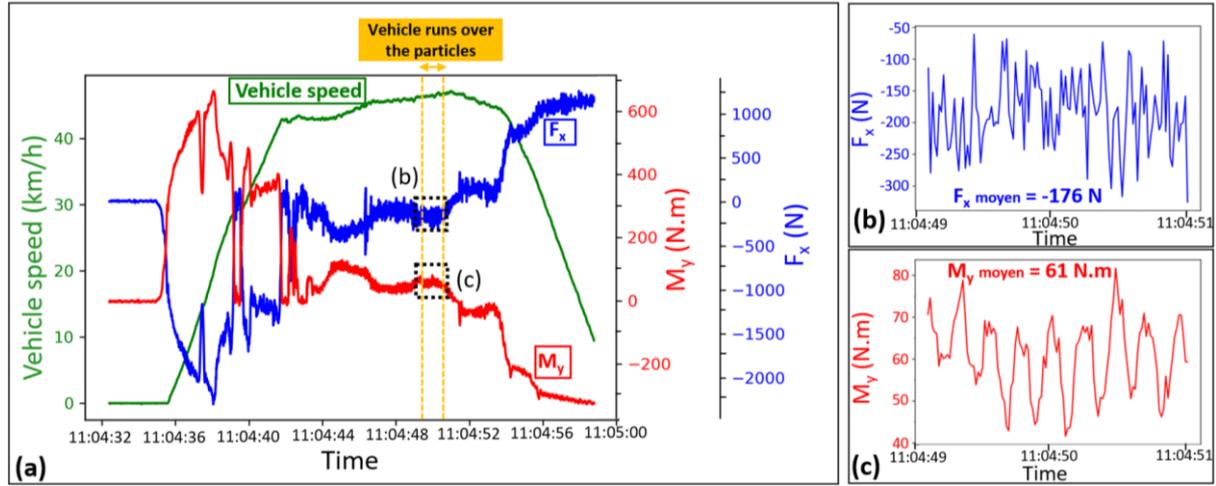


Figure 5-26 : (a) Évolution temporelle, pour le test n°52, de la vitesse du véhicule (courbe verte), de la force longitudinale (courbe bleue) et du moment vertical (courbe rouge) s'appliquant sur la roue du véhicule. Les courbes (b) et (c) présentent respectivement un zoom sur les évolutions de la force longitudinale et du moment vertical lors du passage du véhicule sur les particules.

5.4.3.3 Efficacité d'échantillonnage des granulomètres optiques

Les granulomètres aspirent les particules émises et renvoient l'évolution de la concentration des différentes classes de particules (PM_{10} , PM_4 , $PM_{2.5}$ et PM_1) en fonction du temps. Leur fréquence d'acquisition est de 1 Hz. La mesure est effectuée par aspiration de l'aérosol atmosphérique et son transport à travers un tuyau vers le volume de mesure optique. Dans nos expériences, l'efficacité d'échantillonnage n'est pas de 100% en raison des conditions sub-isocinétiques (vitesse d'échantillonnage inférieure à la vitesse du vent) et anisocinétiques (non-alignement des directions du vent et de l'échantillonnage) ainsi que des pertes par transmission inertielle dans le tuyau. L'efficacité d'échantillonnage η_{sample} est le produit des efficacités d'aspiration et de transport (Willeke et Baron, 2001) (Eq. (5.5)) :

$$\eta_{sample} = \eta_{asp} \times \eta_{trans} \quad (5.5)$$

L'efficacité d'aspiration η_{asp} est définie comme le rapport entre la concentration des particules entrant dans le tuyau est celle du milieu ambiant dans lequel l'échantillon est prélevé. Hangal et Willeke (1990) ont réalisé des expériences pour quantifier cette efficacité et ont trouvé l'expression suivante (Eq. (5.6)):

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\left(\frac{U_0}{U_s} \right) \cos\theta - 1 \right] \frac{1 - [1 + [2 + 0,617 \left(\frac{U_s}{U_0} \right)] S_{tk}']^{-1}}{1 - [1 + 2,617 S_{tk}']^{-1}} [1 - [1 + 0,55 S_{tk}' \exp(0,25 S_{tk}')]^{-1}]^{-1} \quad (5.6)$$

$$S_{tk}' = S_{tk} \cdot \exp(0,022\theta) \quad (5.7)$$

pour $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, où θ est l'angle entre la direction du vent et la direction d'échantillonnage, U_0 et U_s sont les vitesses du vent et d'échantillonnage ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et S_{tk} est le nombre de Stokes de la particule, défini par (Eq. (5.8)) :

$$S_{tk} = \frac{1}{18} \frac{\rho_s \cdot d \cdot U_0}{\mu \cdot L_c} \quad (5.8)$$

où ρ_s est la densité de la particule ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), d son diamètre (m), μ la viscosité dynamique de l'air ($18.5 \cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ à 20°C) and L_c est une longueur caractéristique (prise comme étant le diamètre du tube, c'est-à-dire 0,008 m).

Ils ont étendu la formule pour $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ (Eq. (5.9)) :

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\left(\frac{U_0}{U} \right) \cos\theta - 1 \right] \left[3Stk \sqrt{\frac{U}{U_0}} \right] \quad (5.9)$$

L'efficacité du transport η_{trans} est définie comme la fraction des particules aspirées qui sont transmises par le tube jusqu'au volume de mesure. Ce paramètre dépend du dépôt gravitationnel et des pertes inertielles. Okazaki et al. (1987) ont étudié l'efficacité du transport par dépôt gravitationnel et ont développé la formule suivante (Eq. (5.10)) :

$$\eta_{trans,grav} = \exp \left[-4,5 (L_c^{0,5} S_{tk}^{0,5} Re^{-0,25})^{0,75} \right] \quad (5.10)$$

où ici la longueur caractéristique L_c correspond à la longueur du tuyau.

Les pertes inertielles doivent également être prises en compte. Celles-ci ont été étudiées par Liu et al. (1989) qui donnent une efficacité de transport inertiel pour un échantillonnage sub-isocinétique (Eq. (5.11)) :

$$\eta_{trans,inert} = \frac{1 + \left[\frac{U_0}{U_s} - 1 \right] / \left[1 + \frac{2,66}{S_{tk}^{2/3}} \right]}{1 + \left[\frac{U_0}{U_s} - 1 \right] / \left[1 + \frac{0,418}{S_{tk}} \right]} \quad (5.11)$$

Dans les résultats présentés au Chapitre 8, les concentrations mesurées par les granulomètres sont corrigées à l'aide de l'Eq. (5.12) :

$$PM_X = \frac{PM_{Xmesuré}}{\eta_{sample}} \quad (5.12)$$

où PM_X est la concentration en particules de diamètre inférieur à $X \mu\text{m}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

5.4.3.4 Analyse des mesures de particules en embarqué

La Figure 5-27-a présente un exemple de l'évolutions des concentrations mesurées en embarqué pour le test n°45. La Figure 5-27-b présente les paramètres qui sont pris en compte dans la présente étude pour chaque courbe, à savoir : l'aire sous la courbe, la valeur maximale et la valeur moyenne. L'aire sous la courbe est déterminée par la méthode des trapèzes et permet de définir un « coefficient d'émission » ξ exprimé en $\mu\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$. La valeur moyenne est calculée en considérant les mesures entre le début du pic de

concentration et le retour à une concentration « normale ». Cette concentration est définie comme étant la moyenne des concentrations en PM_{10} mesurées entre deux essais, à savoir $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. On considère arbitrairement que le pic de concentration débute lorsque l'on dépasse de 100 fois cette valeur (concentration en PM_{10} supérieure à $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) et se termine lorsque l'on retombe sous la valeur de $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette procédure permet de mettre en évidence le moment où le véhicule circule sur les particules déposées au sol.

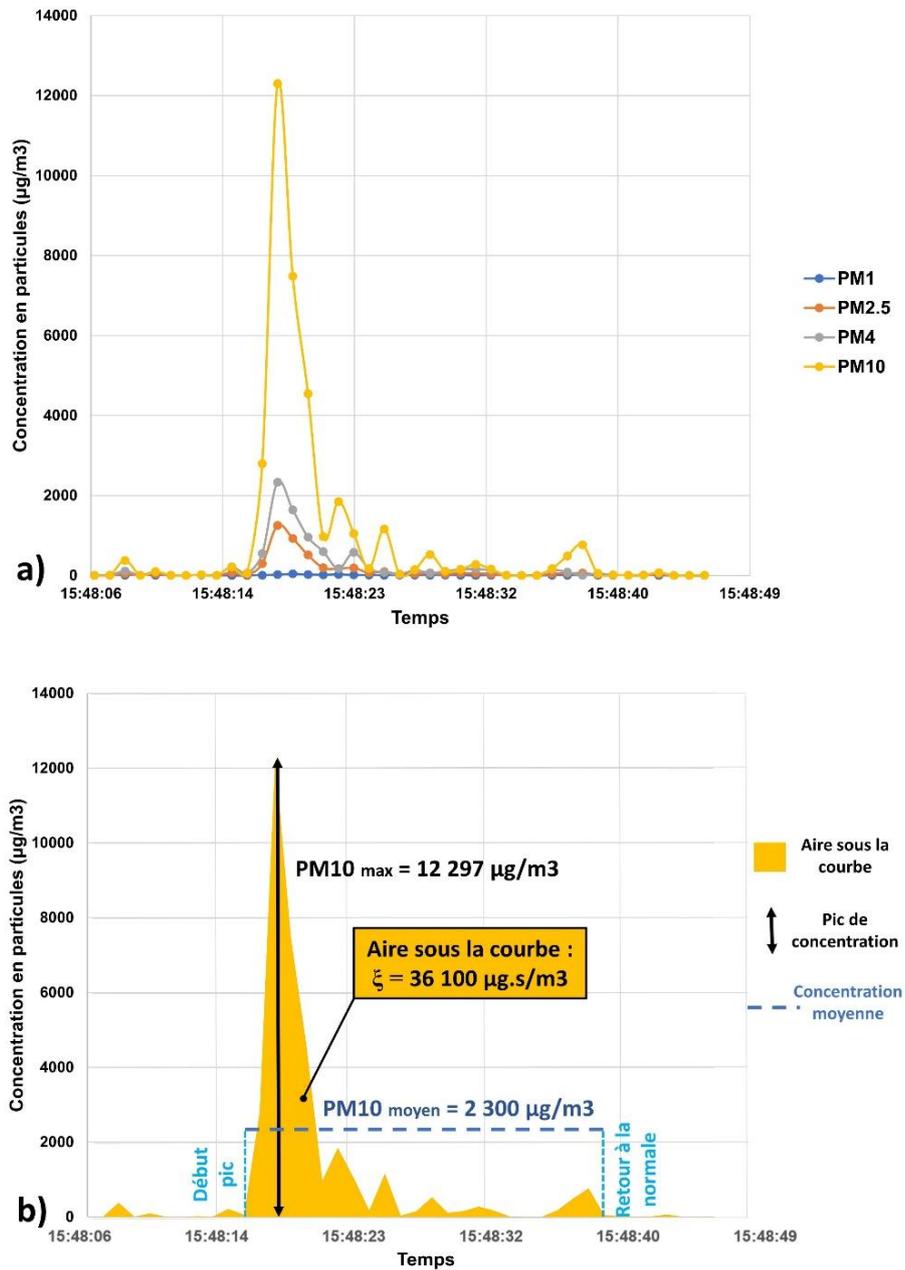


Figure 5-27 : a) Évolutions, pour le test n°45, des concentrations en particules mesurées derrière le pneu en fonction du temps par le granulomètre optique ; b) Mise en évidence, pour le même test et pour la courbe PM_{10} , des paramètres déterminés pour décrire chaque courbe

On peut noter la présence de petits pics de concentrations sur la Figure 5-27. On pourrait être amené à les associer à la dynamique de sillage, en particulier à la fréquence d'apparition des tourbillons qui se forment derrière les pneus du véhicule en circulation. Cependant, ces pics n'apparaissent pas pour l'ensemble des essais et la fréquence d'acquisition du granulomètre (1 Hz) est trop faible pour mettre en évidence les phénomènes turbulents de sillage.

Les essais ayant été réalisés en conditions non-isocinétiques, les mesures surestiment les concentrations des particules les plus grossières (Wilcox, 1956 ; Davies, 1968 ; Belyaev et Levin, 1974). L'analyse se focalise sur les PM_{10} car celles-ci ont peu d'inertie et sont donc moins affectées par des conditions d'échantillonnage non isocinétiques (Davies, 1968). Ce sont d'ailleurs les particules qui sont généralement considérées dans les études sur les émissions de poussières des routes non revêtues (USEPA, 1995 ; Etyemezian et al., 2003 ; Gillies et al., 2005 ; USEPA, 2006 ; Kuhns et al., 2010).

5.4.3.5 Analyse des mesures de particules sur le bas-côté de la route

Nous concentrons également l'analyse des émissions de poussières mesurées sur le bas-côté sur les PM_{10} . Nous considérons que les mesures du granulomètre optique sont représentatives de la concentration du nuage de poussières sur une hauteur correspondant à la distance verticale du capteur par rapport au sol (1,5 m). Des essais préliminaires ont été réalisés en faisant varier cette hauteur entre 1 m et 1,7 m. Ils ont montré que le maximum de concentration en particules était atteint pour cette hauteur de 1,5 m, qui se trouve donc au centre du panache de poussières généré par les véhicules. Pour chaque test, les séries temporelles de PM_{10} sont examinées pendant le pic de concentration de poussière induit par le véhicule. Le pic est défini par les mesures entre le début de l'augmentation de la concentration au-dessus de la concentration de fond et le retour à une concentration de fond (définie comme la moyenne des concentrations de PM_{10} mesurées entre deux tests, soit $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Le facteur d'émission par passage de véhicule est calculé en sommant les concentrations de PM_{10} avec l'Eq. (5.13) (Gillies et al., 2005) :

$$EF = \sum_{\text{début du pic}}^{\text{fin du pic}} U_0 \times PM_{10} \times \Delta z \times \Delta t \times 1000 \quad (5.13)$$

où EF est le facteur d'émission de PM_{10} en grammes par kilomètre parcourus par le véhicule ($\text{gPM}_{10}\cdot\text{vkt}^{-1}$, « vehicle kilometer traveled »), U_0 est la vitesse du vent moyennée sur 30 secondes ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), PM_{10} est la concentration en particules inférieures à $10 \mu\text{m}$ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) mesurée par seconde et corrigée avec l'Eq. (5.12), Δz est la hauteur du panache de poussières générées (prise comme correspond à la hauteur de la mesure, c'est-à-dire 1,5 m) et Δt est la durée durant laquelle le granulomètre mesure le panache de poussières (s). Le facteur 1000 est utilisé pour exprimer le résultat en émission de poussière par kilomètre.

Les mesures ont été effectuées à proximité de la route, à un endroit où la dispersion du panache de poussière n'est pas très importante. Nous considérons donc que les mesures de notre unique capteur peuvent être considérées comme représentatives de la concentration moyenne de particules dans le panache. Les essais préliminaires réalisés en faisant varier la hauteur du capteur ainsi que les observations visuelles effectuées tout au long des essais confirment cette hypothèse. Par ailleurs, nous mesurons en bord de route les poussières qui se redéposent à proximité de la source d'émission. Celles-ci ne sont pas prises en compte dans les inventaires des modèles à l'échelle régionale (Veranth et al., 2003) mais il est important de les considérer dans notre étude sur l'atténuation de la visibilité.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthodologie adoptée pour les essais expérimentaux a été présentée. Le protocole d'étude en laboratoire de la dégradation des sols a été décrit dans un premier temps. Ensuite, les méthodes d'analyse en soufflerie des écoulements d'air au-dessus des sols et dans le sillage des maquettes de camions ont été présentés. Finalement, les deux études in-situ d'envol de poussières par véhicules légers et par camion ont été détaillées. Cette méthodologie, basée sur des essais préalables en laboratoire suivis de mesures à l'échelle réelle, permet de mettre en évidence les mécanismes qui amènent des particules de sol, initialement liées entre elles dans une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques. Dans la partie suivante, les résultats issus de ces campagnes de mesures sont présentés et discutés.

Partie III : Résultats et discussions

Chapitre 6 : Mise en œuvre, dégradation des sols et interaction sol-atmosphère

Dans cette partie, nous présentons les résultats permettant de répondre aux objectifs 1 et 2 de la thèse, à savoir l'évaluation de la mise en œuvre et de la dégradation des sols ainsi que leur répercussion sur les écoulements d'air en proche surface. Dans un premier temps, l'interaction sol-atmosphère est analysée sur des sols ayant été uniquement compactés. On se focalise ici principalement sur l'étude des écoulements en couche limite. Pour une analyse plus détaillée du processus de compactage, le lecteur est renvoyé à l'article de Le Vern et al. (2020a). Dans un second temps, il est proposé une évaluation des émissions de poussières des sols compactés ayant été dégradés par du trafic. Cette problématique a également fait l'objet de la publication d'un article (Le Vern et al., 2020b).

6.1 Interaction sol-atmosphère sur les sols compactés

Ici, on s'intéresse à la caractérisation des écoulements d'air au-dessus des sols compactés et plus particulièrement à la partie « couche limite ». On rappelle que les trois échantillons analysés sont S0K100, S50K50 et S75K25, mélanges de sable d'Hostun « S » et d'argile kaolinite « K » compactés à l'optimum Proctor. Leurs propriétés sont détaillées aux Tableaux 5-1 et 5-2 et leurs granulométries sont tracées à la Figure 5-2. Concernant l'analyse du processus de compactage, le lecteur pourra se référer aux travaux de Sediki (2018) et de Le Vern et al. (2020a). Dans un premier temps, on s'intéresse aux propriétés générales des écoulements de couche limite. Puis, l'analyse porte sur l'initiation de l'envol des particules à l'aide d'un modèle de saltation. L'étude s'appuie sur les résultats obtenus par Pagès (2018).

6.1.1 Propriétés des écoulements de couche limite

6.1.1.1 Tracé des profils de vitesse et détermination des paramètres

Chacun des profils de vitesse, mesuré suivant le maillage détaillé au Tableau 5-3 (page 86), est de la forme présentée à la Figure 6-1-a. Il est possible d'en déduire l'épaisseur de couche limite δ qui correspond à la hauteur par rapport au sol à partir de laquelle la vitesse de l'écoulement atteint 99% de la vitesse maximale. La Figure 6-1-b présente le même profil en échelle semi-logarithmique inversée afin de faire apparaître la loi de paroi (Eq. (2.3)). Celle-ci correspond à la zone définie par les points verts sur la Figure 6-1-b. Une régression linéaire sur ces points permet d'obtenir la droite en pointillée définie par l'Eq. (6.1) :

$$U = m \times \ln(y) + c \quad (6.1)$$

où m est la pente de la courbe et vaut (Eq. (6.2)) :

$$m = \frac{U_\tau}{\kappa} \quad (6.2)$$

et c est l'ordonnée à l'origine (Eq. (6.3)) :

$$c = -\frac{U_\tau}{\kappa} \ln(y_0) \quad (6.3)$$

où U_τ est la vitesse de cisaillement de l'air en surface ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), κ est la constante de Von Kármán ($\approx 0,41$) et y_0 est la hauteur de rugosité (m). Il est donc possible, à partir de ces profils, de déterminer la vitesse de cisaillement et la hauteur de rugosité.

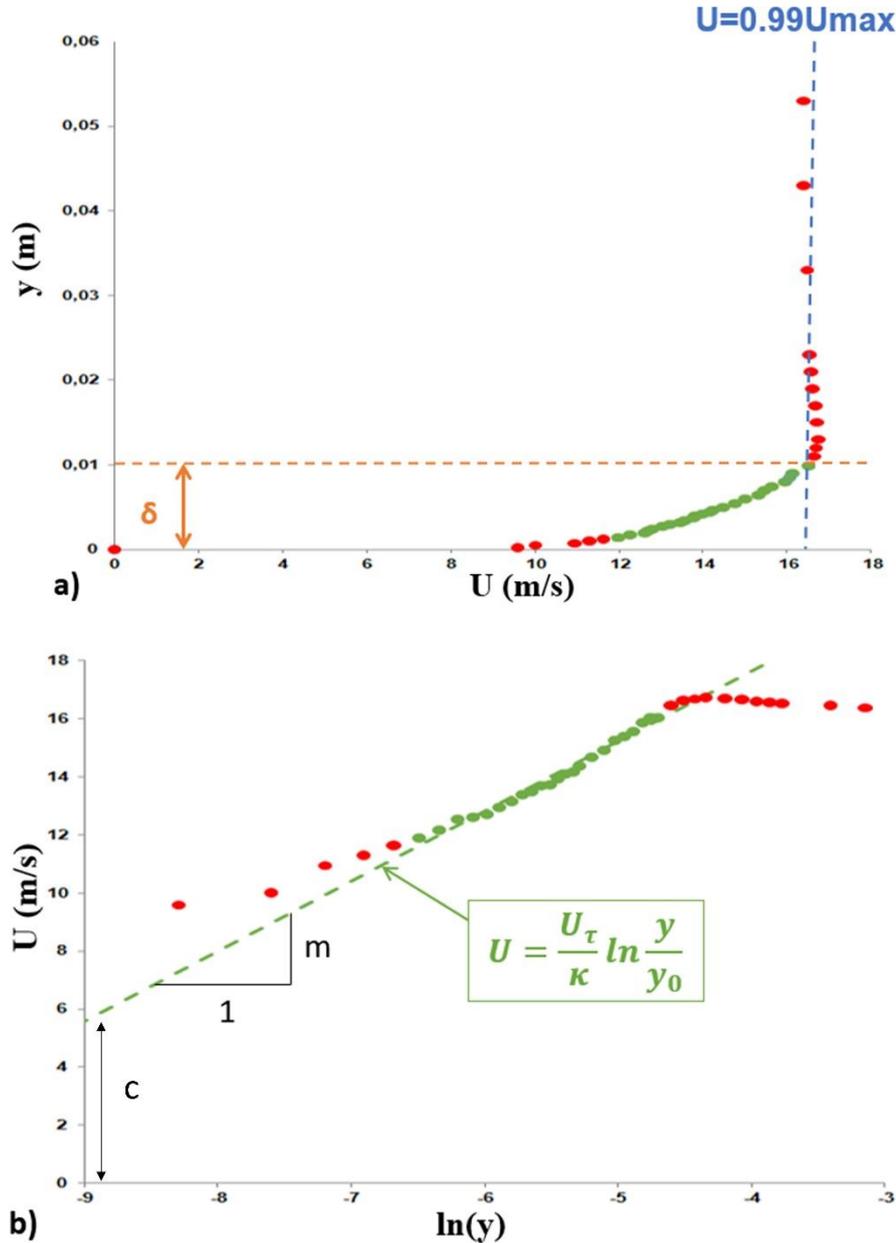


Figure 6-1 : a) Profil de vitesse au-dessus de l'échantillon I (S0K100) au point de mesure n°4 ($x=0,27\text{m}$) pour une vitesse d'écoulement $U_\infty=16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. b) Même graphique mais tracé en coordonnées inversées et semi-logarithmique où les points verts correspondent aux mesures situées dans la zone définie par la « loi de paroi » (Eq. (2.3), page 24)

6.1.1.2 Épaisseurs de couche limite

Des mesures de référence ont été prises sur le plancher en PVC de la soufflerie (point n°1, Figure 5-6, page 86). Les épaisseurs de couche limite à cet endroit sont présentées à la Figure 6-2. En théorie, indépendamment de l'échantillon placé en soufflerie, les épaisseurs de couche limite sur le plancher en PVC (δ_{PVC}) devraient être identiques pour une même vitesse d'écoulement U_∞ . La Figure 6-2 montre une certaine dispersion des mesures avec des écarts allant jusqu'à 10%. Cela peut s'expliquer par le pas de mesure ainsi que par la présence de petites perturbations propres à la réalisation de mesures expérimentales, l'air aspiré n'étant pas parfaitement homogène. Les vitesses incidentes ont également pu varier légèrement d'un essai à l'autre. De plus, le plancher de la soufflerie n'est peut-être pas parfaitement horizontal, ce qui affecterait la prise de mesure initiale ($y=0$) du capteur.

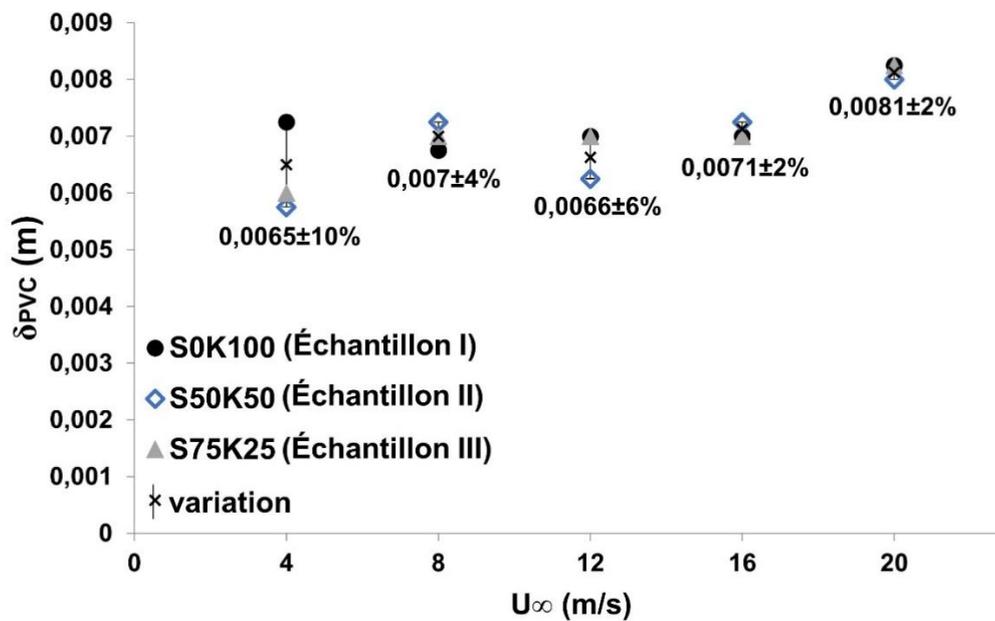


Figure 6-2 : Épaisseurs de couche limite de référence, prises sur le plancher en PVC de la soufflerie, lors des essais avec les trois échantillons. Les valeurs indiquées correspondent, pour une même vitesse d'écoulement, aux variations entre les trois échantillons

Afin de pouvoir comparer les mesures effectuées sur les échantillons, le choix a été fait de tracer les couches limites adimensionnelles (δ/δ_{PVC}), δ_{PVC} étant l'épaisseur de référence indiquée à la Figure 6-2 pour chaque échantillon et pour chaque vitesse. Les résultats sont présentés à la Figure 6-3. Ils montrent que l'épaisseur de couche limite augmente à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée de la soufflerie. Cette augmentation est d'autant plus importante que la vitesse de l'écoulement est faible et ce quel que soit l'échantillon de sol considéré. Cette observation correspond bien à la théorie qui veut que lors de l'établissement de la couche limite, son augmentation d'épaisseur soit inversement proportionnelle au nombre de Reynolds de l'écoulement (Schlichting, 1979).

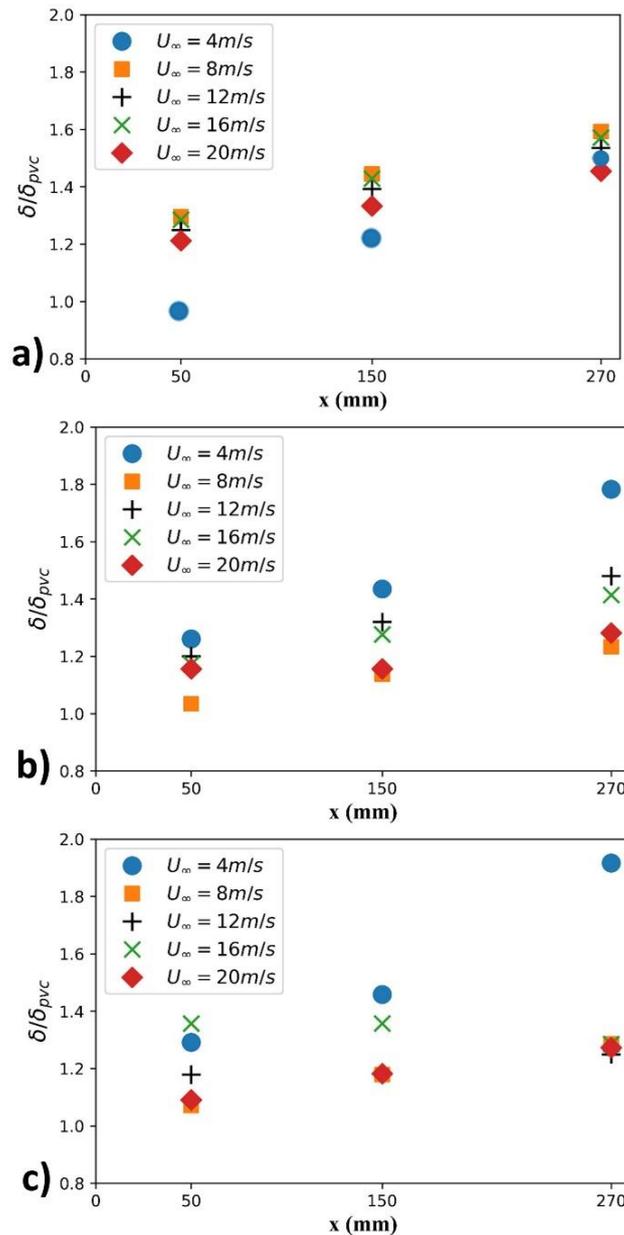


Figure 6-3 : Épaisseurs de couche limites adimensionnées pour les cinq vitesses d'écoulement générées sur l'échantillon a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25

On considère qu'une couche limite est pleinement développée lorsque son épaisseur ne varie plus avec la distance (Schlichting, 1979). Ainsi, on peut considérer que la couche limite n'est pas pleinement développée dans notre cas. Cela est dû au fait que nos points de mesure sont situés à quelques centimètres de l'entrée d'air. L'écoulement n'a donc pas eu suffisamment de place pour se développer pleinement (Cermak et Arya, 1970). Cela est d'ailleurs confirmé par le calcul des facteurs de forme (Eq. (2.7), page 25). Les résultats associés montrent que le régime est transitoire (passage de laminaire à turbulent) dans la plupart des cas et pour les points de mesure considérés (Figure 6-4). Comme suggéré par Williams et al. (1994), lorsqu'un flux d'air s'écoule au-dessus d'un lit de particules en soufflerie, ces dernières s'envolent tout d'abord dans la zone de transition. Cette région correspond aux endroits où la couche limite n'est pas encore pleinement développée et où les vitesses de cisaillement sont les plus élevées.

Les mesures présentées ici ont donc été réalisées dans la zone de plus forte probabilité d'envol des particules.

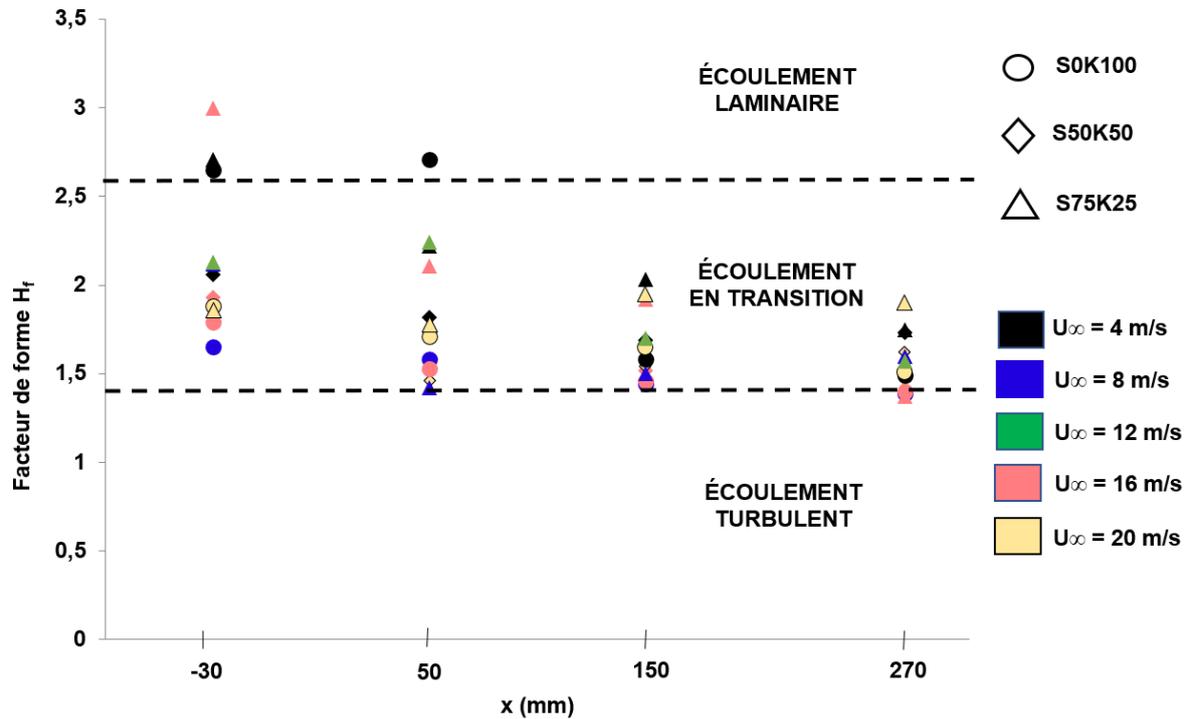


Figure 6-4 : Facteurs de forme des écoulements au-dessus des sols en fonction de la position de mesure. Les trois sols sont distingués par différents symboles. Les cinq vitesses sont distinguées par différentes couleurs.

6.1.1.3 Hauteurs de rugosité et vitesses de cisaillement

Les hauteurs de rugosité y_0 et les vitesses de cisaillement U_τ sont déterminées à partir des profils de vitesse en coordonnées semi-logarithmiques (Figure 6-1-b). Le Tableau 6-1 répertorie l'ensemble des hauteurs de rugosité calculées pour chaque échantillon et pour les cinq vitesses d'écoulement à l'aide de l'Eq. (6.3). D'une manière générale, les hauteurs de rugosité sont plus importantes pour les sols sableux par rapport à l'argile. Néanmoins, les erreurs relatives au calcul de ce paramètre sont importantes (entre 30% et 100% de marges d'erreurs calculées selon la méthode de Wilkinson, 1984) et ne permettent pas de tirer des conclusions définitives à ce stade.

U_∞	S0K100			S50K50			S75K25		
	x=0,05 m	x=0,15 m	x=0,27 m	x=0,05 m	x=0,15 m	x=0,27 m	x=0,05 m	x=0,15 m	x=0,27 m
4 m.s ⁻¹	6.7×10^{-4}	3.8×10^{-5}	9.5×10^{-6}	1.5×10^{-4}	4.8×10^{-5}	4.7×10^{-5}	4.4×10^{-4}	2.6×10^{-4}	1.2×10^{-4}
8 m.s ⁻¹	3.1×10^{-5}	6.0×10^{-6}	2.4×10^{-6}	3.9×10^{-5}	5.8×10^{-6}	7.8×10^{-6}	1.8×10^{-5}	8.1×10^{-6}	6.6×10^{-6}
12 m.s ⁻¹	4.7×10^{-5}	9.9×10^{-6}	2.9×10^{-6}	3.3×10^{-5}	3.7×10^{-6}	4.5×10^{-6}	7.4×10^{-5}	8.1×10^{-6}	3.1×10^{-6}
16 m.s ⁻¹	3.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	4.4×10^{-6}	3.6×10^{-5}	2.6×10^{-6}	2.6×10^{-6}	7.0×10^{-5}	2.4×10^{-5}	1.2×10^{-5}
20 m.s ⁻¹	8.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}	7.3×10^{-6}	2.7×10^{-5}	5.1×10^{-6}	1.4×10^{-5}	3.3×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.0×10^{-5}

Tableau 6-1 : Valeur des hauteurs de rugosité y_0 déterminées à partir de l'Eq. (6.3) (en mètres)

La Figure 6-5 présente les vitesses de cisaillement calculées à partir des profils de vitesse sur les trois sols. Les incertitudes ont été calculées selon la méthode de Wilkinson (1984) avec un intervalle de confiance de 95%.

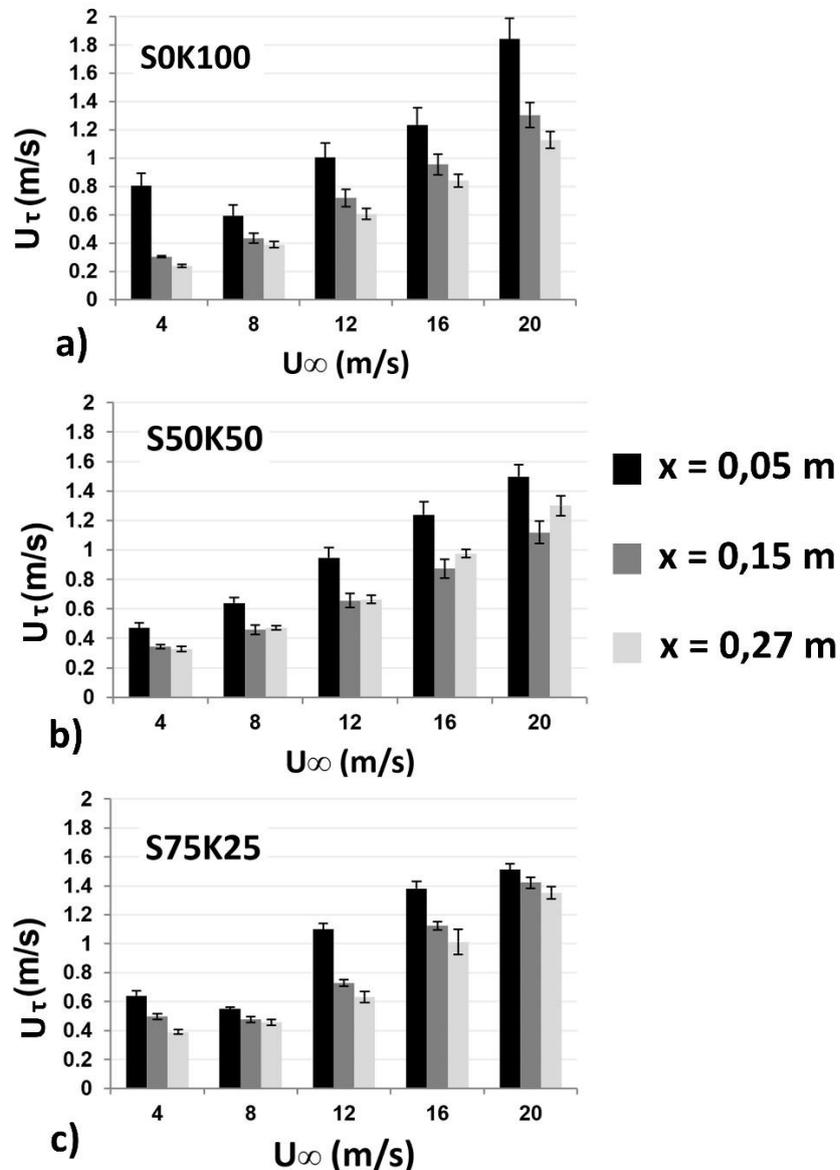


Figure 6-5 : Vitesses de cisaillement en fonction des vitesses d'écoulement d'air pour le sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25

Pour chaque sol, les vitesses de cisaillement augmentent linéairement avec la vitesse d'écoulement et sont toujours plus importantes à la position proche de l'entrée de la soufflerie ($x=0,05$ m) par rapport aux deux autres positions ($x=0,15$ m et $x=0,27$ m). Cela est dû au régime d'écoulement qui se rapproche de l'état turbulent à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée de la soufflerie. À partir des vitesses de cisaillement, il est possible de tracer les profils de vitesse en coordonnées adimensionnelles (Figure 2-2, page 26) $U^+ = f(y^+)$. La Figure 6-6 présente ces profils pour la position de mesure $x=0,27$ m. Pour une même vitesse d'écoulement, les courbes des différents sols ne se superposent pas. Cela est dû à l'effet

de la rugosité détaillé à la section 2.3. Plus la surface est rugueuse, plus la courbe est décalée vers le bas (Bergstrom et al., 2002 ; Krogstad et Antonia, 1999). Cela montre donc que le compactage ne permet pas de lisser totalement la surface des sols car l'effet de la rugosité apparaît clairement sur les sols contenant du sable (S50K50 et S75K25) par rapport au sol n'en contenant pas (S0K100).

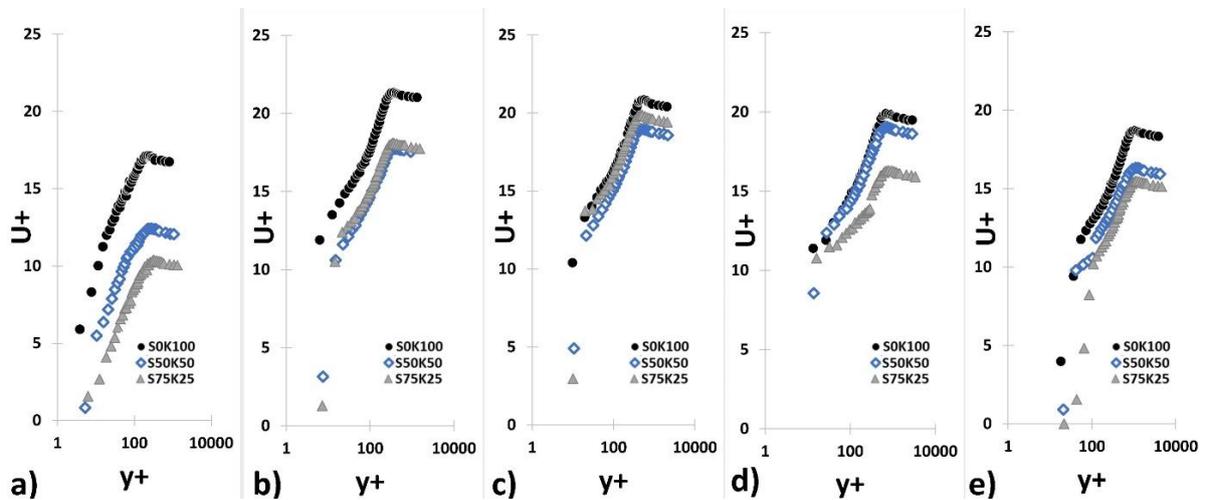


Figure 6-6 : Profils de vitesse en coordonnées adimensionnelles au point de mesure n°4 ($x=0,27m$) pour a) $U_{\infty}=4m.s^{-1}$, b) $U_{\infty}=8 m.s^{-1}$, c) $U_{\infty}=12 m.s^{-1}$, d) $U_{\infty}=16 m.s^{-1}$ et e) $U_{\infty}=20 m.s^{-1}$

6.1.2 Initiation de l'envol des particules par saltation

Dans cette section, nous nous sommes intéressés aux vitesses de cisaillement qui déclenchent le phénomène dit de « saltation » (voir section 2.2.1). Pour analyser le seuil d'envol des particules, on utilise le critère de Shao et Lu (2000) défini à la page 29 par l'Eq. (2.13) en prenant ici une densité moyenne des particules $\rho_s = 2620 kg.m^{-3}$. Ce modèle a été choisi car il est en bonne corrélation avec des données expérimentales récentes (Shao et Klose, 2016). Pour les sols d'étude, le diamètre des particules s'étale entre 1 et 200 μm . Pour ce qui est des vitesses de cisaillement estimées expérimentalement, elles vont de $U_{\tau}=0,24 m.s^{-1}$ à $U_{\tau}=1,35 m.s^{-1}$ pour les mesures à $x=0,27m$ où la couche limite est la plus développée. Ces résultats sont mis en parallèle avec le critère de Shao et Lu en traçant l'évolution de la vitesse de cisaillement en fonction du diamètre des particules (Figure 6-7). La zone hachurée de la Figure 6-7-a identifie la région où les vitesses de cisaillement sont théoriquement suffisamment élevées pour déclencher le soulèvement des particules. Il est à noter que ce critère a été établi par des mesures sur des sols non compactés pour lesquels les particules sont liées entre elles uniquement par des forces électrostatiques et de Van der Waals. Dans notre étude, les échantillons de sol ont été humidifiés et compactés. Les forces de liaison entre les particules sont donc plus importantes, en particulier grâce aux ponts d'eau capillaires. Ainsi, le soulèvement des particules sur les sols compactés est limité par rapport à celui des sols non compactés. Cependant, les résultats montrent que la dégradation de la surface d'un des trois échantillons compactés peut entraîner une émission importante de poussières pour les vitesses d'écoulement considérées. La Figure 6-7-b illustre la distinction entre les trois échantillons. Dans l'ensemble, en considérant l'aire des rectangles au-dessus de la courbe rouge sur la Figure 6-7-b, la probabilité de soulèvement des particules est globalement plus élevée pour les sols sableux S50K50 et S75K25 que pour l'argile S0K100. Il est à noter que pour la plus faible vitesse d'écoulement ($U_{\infty}=4m.s^{-1}$), il n'y a théoriquement aucun envol de particules sur le sol S0K100 ($U^*=0,24 m.s^{-1}$) alors que presque toutes les particules sont susceptibles de s'envoler pour S50K50 et S75K25 ($U^*=0,33 m.s^{-1}$ et $U^*=0,39 m.s^{-1}$, respectivement).

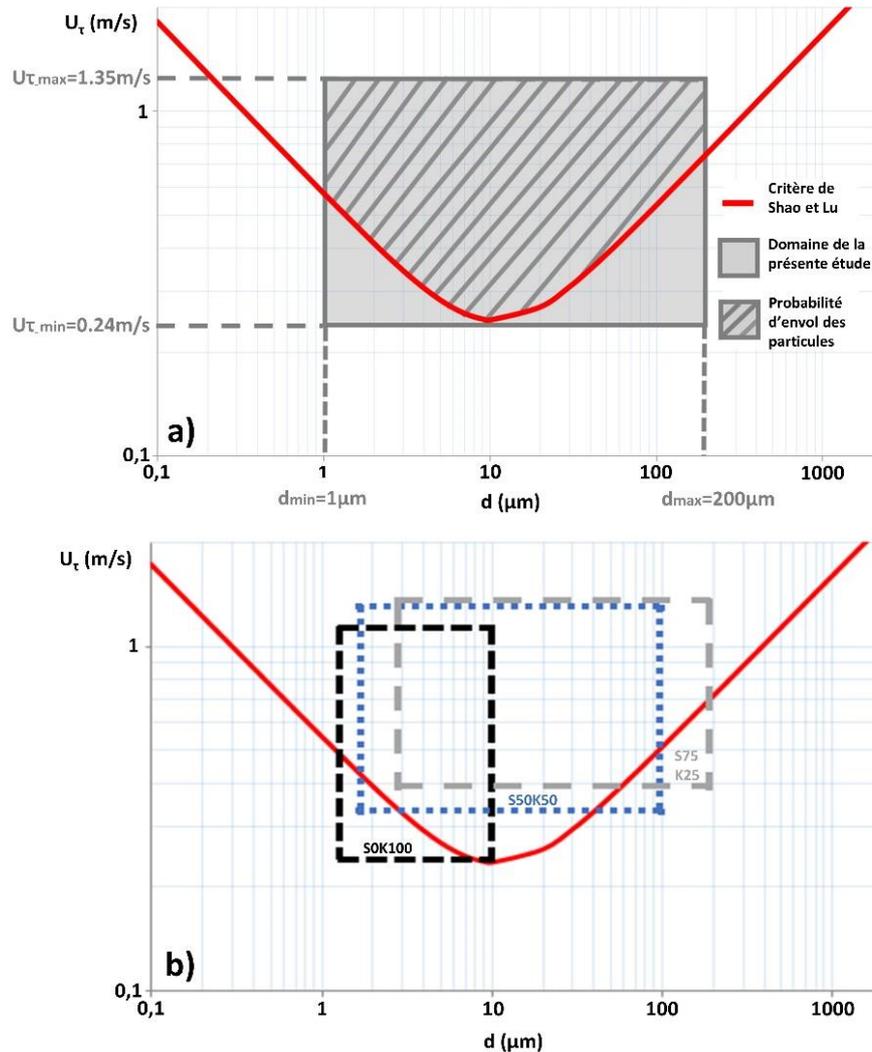


Figure 6-7 : a) Vitesse de cisaillement en fonction du diamètre équivalent en surface des particules. La zone ombragée correspond au domaine de la présente étude. La zone hachurée correspond à la probabilité d’envol des particules selon le critère de Shao et Lu (Eq. 2.13) caractérisé par la courbe rouge. B) Même graphique mais avec différents cadres pour distinguer les trois sols. Les frontières verticales des cadres correspondent à $d_{\min}=d_{10}$ et $d_{\max}=d_{80}$ (voir Figure 5-2, page 81)

6.1.3 Conclusion

Il a été mis en évidence que le compactage par roulement ne permet pas de réduire totalement la rugosité des sols. Les sols sableux étant plus rugueux, ils subissent des vitesses de cisaillement plus importantes. Ainsi, en considérant uniquement le phénomène de saltation, les sols sableux sont susceptibles de subir des envols de particules plus importants que les argiles. Il s’agit d’une étude préliminaire qui s’est intéressée principalement au phénomène d’érosion éolienne, mécanisme particulièrement problématique pour les sables (Bagnold, 1937 ; Chepil, 1959 ; Foucault, 1994 ; Shao et al., 1996, Tanière et al., 1997 ; Aguirre et al., 2004 ; Pätz et al., 2018 ; Swet et al., 2019). La partie suivante va mettre en évidence que ce qui est vrai dans le contexte de l’érosion éolienne ne s’applique pas forcément au contexte de l’envol des particules lors de la circulation de véhicules. Il s’agira de mettre en évidence l’importance de la prise en compte de la dégradation des sols et des turbulences dans l’écoulement.

6.2 Évaluation des émissions de poussières sur sols dégradés

Dans cette partie, l'objectif est d'estimer les émissions de poussières sur des sols dégradés. On détaille tout d'abord le modèle utilisé ainsi que ses paramètres d'entrée. L'évaluation de la dégradation des sols soumis à des cycles de circulation d'un pneu est présentée. L'évolution de la quantité de particules arrachées et de la granulométrie de ces particules sont quantifiées en fonction du nombre de passages de pneu sur la surface. Dans un second temps, les écoulements d'air à proximité de la surface des sols dégradés sont caractérisés avec un intérêt particulier pour les paramètres qui régissent l'envol des particules. Finalement, les données expérimentales sont implémentées dans le modèle d'envol des poussières afin de quantifier les émissions de chacun des sols. Des comparaisons avec des données de terrains sont également présentées.

6.2.1 Modèle d'envol des poussières

Dans la section précédente, l'estimation de l'envol des particules a été réalisée en se basant sur un modèle de saltation. Cependant, un tel modèle ne prend pas en compte la turbulence des écoulements et ne permet donc pas de rendre compte du phénomène d'émission de poussières lors de la circulation des véhicules en conditions réelles (Nicholson et al., 1989, Moosmüller et al., 1998). Ici, nous nous appuyons donc sur un modèle d'émissions lié à la turbulence des écoulements, à savoir le modèle CTDE (Convective Turbulent Dust Emission) développé par Klose et Shao (2012) et décrit à la section 2.2.2.

Pour rappel, ce modèle permet d'estimer le flux d'émission de poussières φ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) à l'aide de l'Eq. (2.19) présentée à la page 30. Ce modèle nécessite comme paramètres d'entrée :

- 1 La quantité de particules non liées à la matrice granulaire et susceptibles de s'envoler (paramètre « dégradation du sol ») ;
- 2 La distribution granulométrique de ces particules ;
- 3 La distribution statistique des efforts aérodynamiques que subissent les particules ;
- 4 La distribution statistique des efforts de cohésion de ces particules.

Le paramètre 4 est déterminé en s'appuyant sur le modèle empirique détaillé à l'Eq. (2.20) et illustré à la Figure 2-5 (page 31). La détermination expérimentale des paramètres 1, 2 et 3 est détaillée dans les sections suivantes.

6.2.2 Dégradation des sols par le trafic

6.2.2.1 *Modèle d'évaluation de la dégradation*

Il s'agit ici de quantifier l'évolution de la dégradation de surface causée par la circulation d'un pneu sur des sols compactés à l'optimum Proctor (échantillons IV, V, VI, VII et VIII, Tableau 5-2, page 82). Elle est caractérisée par le paramètre D (section 5.1.3). Les résultats des collectes et pesées des particules arrachées en fonction du nombre de passages de pneu sont présentés à la Figure 6-8.

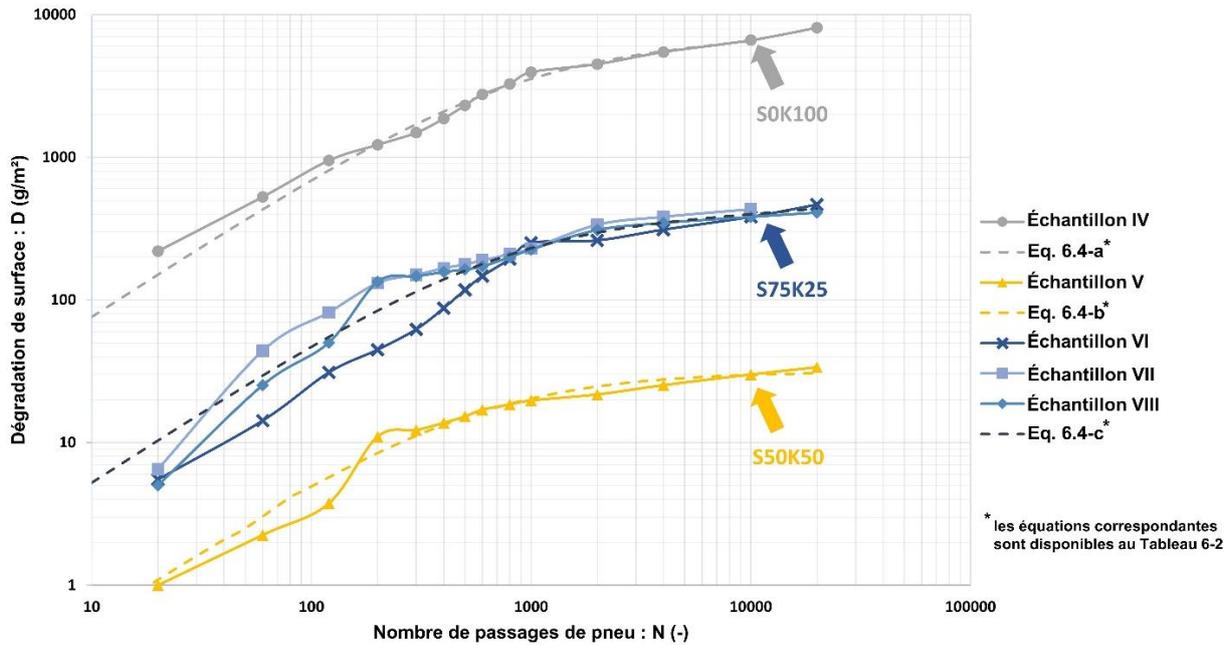


Figure 6-8 : Évolution de la dégradation des sols en fonction du nombre de passages de pneu

L'évolution de la dégradation semble suivre une allure similaire pour les trois sols : les courbes ont l'allure d'une partie de sigmoïde. Un modèle empirique est établi pour décrire cette évolution. Il s'agit d'un quotient de polynômes du second degré qui satisfait le critère $D(N=0)=0$ (Eq. (6.4)) :

$$D(N) = \frac{c_1 N^2 + c_2 N}{c_3 N^2 + c_4 N + c_5} \quad (6.4)$$

où N correspond au nombre de passages de pneu sur le sol et c_i ($i=1,2,\dots,5$) sont des coefficients déterminés à partir des résultats expérimentaux en utilisant la méthode des moindres carrés. Ces coefficients sont détaillés au Tableau 6-2.

Sol	Valeur du coefficient (g.m^{-2})					Équation correspondante
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	
S0K100	$-5,69 \times 10^{-2}$	$3,23 \times 10^3$	$-1,24 \times 10^{-5}$	$4,86 \times 10^{-1}$	$4,20 \times 10^2$	(6.4-a)
S50K50	$1,38 \times 10^1$	$-8,51 \times 10^2$	$4,41 \times 10^{-1}$	$2,14 \times 10^2$	$-1,50 \times 10^4$	(6.4-b)
S75K25	$1,11 \times 10^{-1}$	$8,40 \times 10^3$	$1,26 \times 10^{-4}$	$2,09 \times 10^1$	$1,58 \times 10^4$	(6.4-c)

Tableau 6-2 : Paramètres du modèle de dégradation des sols (Eq. 6.4)

Sur la Figure 6-8, la comparaison entre les données expérimentales et le modèle de l'Eq. (6.4) montre que ce dernier fournit une bonne représentation du comportement de chacun des sols. Notons que pour le sol S75K25, la courbe d'ajustement a été déterminée en considérant la moyenne des échantillons VI, VII et VIII. En effet, pour ce sol, on observe une bonne reproductibilité des résultats de dégradation pour les mêmes conditions d'essais (échantillons VI et VII dégradés avec le pneu S1) ainsi que pour l'échantillon dégradé avec un pneu différent (échantillon VIII dégradé avec le pneu S2).

D'une manière générale, le comportement est le même pour les trois sols : une augmentation régulière de la quantité de particules arrachées à la surface en fonction du nombre de passages de roues est observée, jusqu'à un certain seuil (environ 200 passages) où une inflexion dans la courbe apparaît. Lors des premiers cycles de circulation, le sol résiste au cisaillement généré par le pneu, mais l'empreinte de

ce dernier commence à se former progressivement en surface. Visuellement, après une dizaine de passages, les premiers agrégats se détachent du sol puis s'effritent, entraînant une augmentation significative de la dégradation du sol. Après quelques centaines de cycles, le sol commence à se plastifier : il y a moins de particules arrachées, l'orniérage (déformation structurelle) devenant alors le principal mode de dégradation.

La différence entre les trois sols repose sur la quantification de la dégradation. Après 100 passages de roue, celle-ci équivalait à plusieurs dizaines, plusieurs centaines et plusieurs milliers de grammes de particules par unité de surface pour S50K50, S75K25 et S0K100, respectivement. Le sol S50K50 se dégrade le moins car sa granulométrie est bien calibrée avec un bon équilibre entre le sable et l'argile. Sa microstructure n'est pas aussi poreuse que celle du sol S75K25, comme le montre les images MEB des trois sols compactés (Figure 6-9).

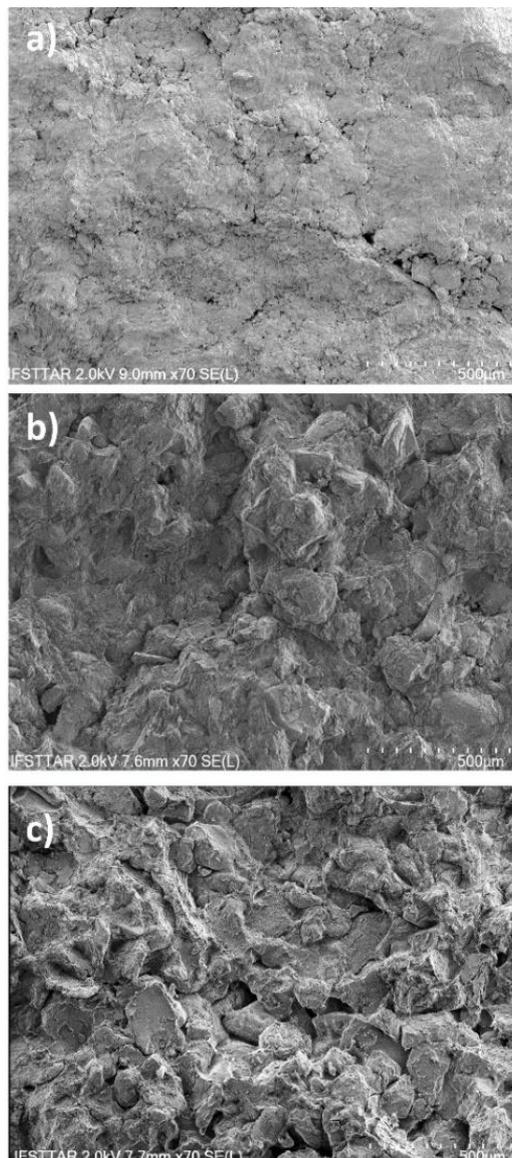


Figure 6-9 : Observation au MEB de la microstructure post-compactage du sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25. Micrographies de Sediki (non publiées)

Le déséquilibre entre la quantité de sable et d'argile dans le sol S75K25 explique la présence d'un plus grand nombre de macropores dans ce matériau. En effet, les particules de sable permettent l'apparition de larges espaces entre elles et ce sol ne contient pas suffisamment d'argile pour les remplir. Les macropores sont des zones de faiblesse dans la matrice granulaire. Leur présence augmente le risque de détachement des agrégats, expliquant la dégradation plus importante du sol S75K25. Le sol S0K100 présente quant à lui une granulométrie constituée uniquement de particules d'argile de faible porosité (Figure 6-9-a). Cependant, ce sol a une résistance au cisaillement inférieure d'environ 20% par rapport à celle du sol S50K50 et de 30% par rapport à celle du sol S75K25 (Le Vern et al., 2020a). Ainsi, la surface du sol S0K100 est beaucoup moins résistante aux contraintes générées par la circulation de la roue. Toutefois, des essais sur le terrain seraient nécessaires pour valider les dégradations observées lors des essais en laboratoire.

6.2.2.2 *Modèle d'évolution de la granulométrie*

Après avoir étudié l'apparition des particules en surface des sols lors du trafic, on s'intéresse désormais dans cette partie à leur granulométrie.

La Figure 6-10 présente la granulométrie initiale des trois sols ainsi que celle des particules arrachées après 20 000 passages de roue sur les sols S0K100 (Figure 6-10-a) et S50K50 (Figure 6-10-b). La Figure 6-10-c présente les mêmes courbes, ainsi que la granulométrie des particules arrachées à 2 000 et 10 000 passages de roue sur l'échantillon S75K25. Les granulométries, exprimées en pourcentage de particules dans une gamme de diamètres donnée, ont été obtenues par diffraction LASER car cette technique permet de mesurer la taille des agrégats de particules, ce que ne permet pas la mesure par sédimentométrie qui implique une défloculation (Marticorena et Bergametti, 1995). Dans l'ensemble, les particules détachées présentent un pourcentage plus faible de particules fines ($<10\ \mu\text{m}$) et un pourcentage plus élevé de particules grossières ($>10\ \mu\text{m}$) par rapport au sol d'origine. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les deux sols contenant du sable (S50K50 et S75K25). Cela s'explique par le fait que les particules de sable et d'argile s'agglomèrent pour former des particules plus grossières (agrégats) qui ont été arrachées par le pneu. La Figure 6-10-c montre que ce phénomène d'agrégation des particules diminue lorsque le nombre de passages de roue augmente. Il y a donc un effritement progressif des agrégats au fur et à mesure des passages du pneu.

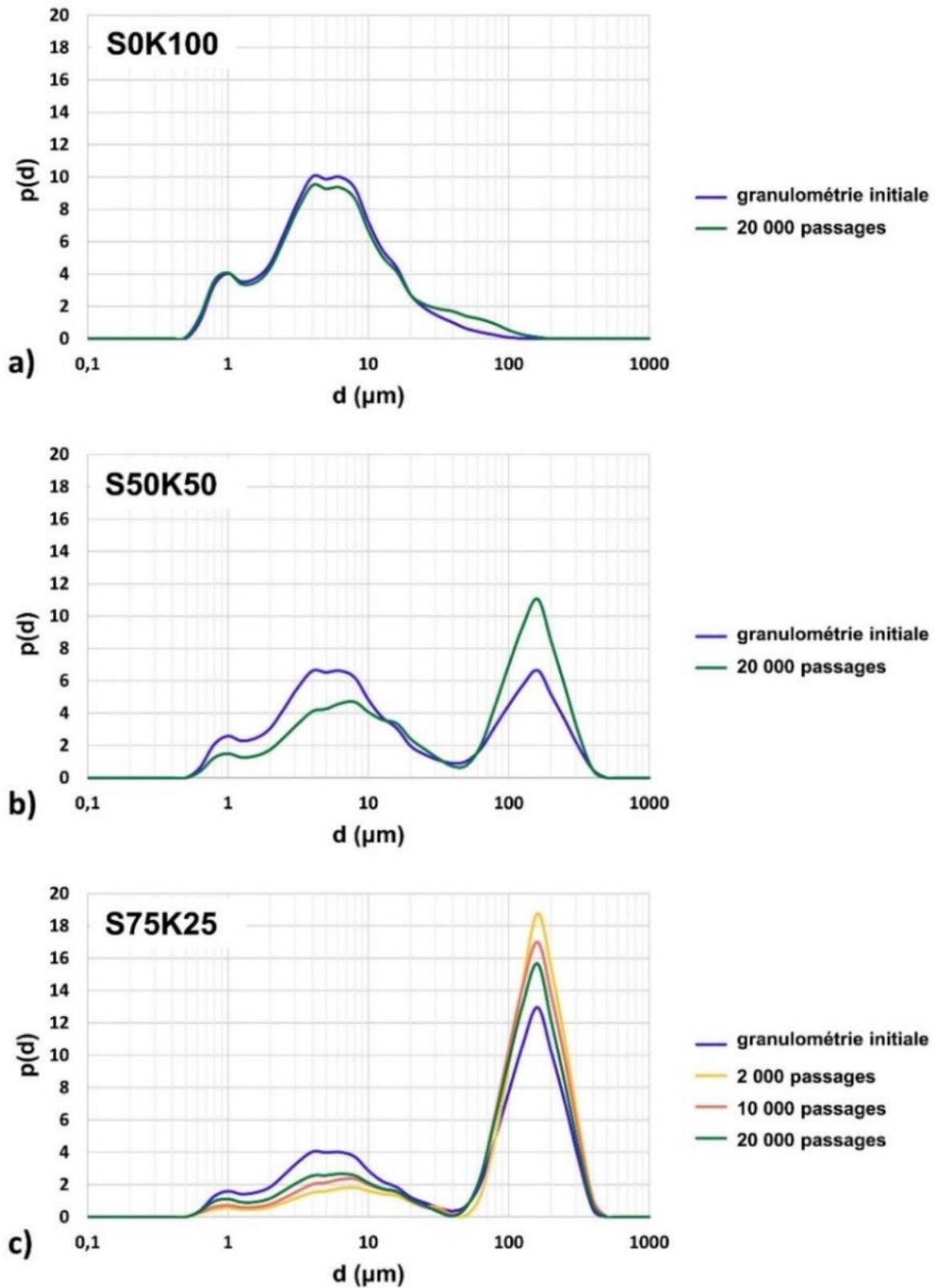


Figure 6-10 : Granulométries des sols (initiale) et des particules arrachées pour a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25 (diamètre équivalent en surface)

L'écart entre les courbes granulométriques correspondantes aux états dégradés par rapport à l'état initial du sol est évalué à l'aide d'une fonction empirique nommée Δ (Eq. 6.5). Cette fonction a été obtenue en tenant compte des propriétés des sols et du nombre de passages de roues. La méthodologie adoptée pour obtenir cette fonction est détaillée dans l'article de Le Vern et al. (2020b).

$$\Delta(N, d) = \frac{0,111 \times e^{[0,004(\%argile \times \%sable)]}}{0,49} \times (9,72 \cdot 10^{-10} N^2 - 4,92 \cdot 10^{-5} N + 1,09) \times \ln\left(\frac{d}{d_{min}}\right) \times \sin\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right)} \times \ln\left(\frac{d}{d_{min}}\right) + \pi\right] \quad (6.5)$$

où $\%argile$ correspond au pourcentage massique des particules inférieures à 2 μm et $\%sable$ celui des particules de taille comprise entre 20 μm et 2000 μm (U.S.D.A., 2017). d_{min} et d_{max} correspondent respectivement au diamètre minimal et maximal des grains du sol, exprimés en μm .

Si la distribution granulométrique du sol initial $p(d)_{sol_initial}$ est connue, il est alors possible d'estimer la granulométrie des particules arrachées après N passages de pneu ($p(d)_{N_passages}$) avec l'Eq. (6.6) :

$$p(d)_{N_passages} = \begin{cases} p(d)_{sol_initial} + \Delta(N, d) & \text{pour } d_{min} \leq d \leq d_{max} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.6)$$

La Figure 6-11 compare les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 6-10 avec les résultats des prévisions du modèle (Eq. (6.6)), qui correspondent aux lignes pointillées sur les Figures 6-11-a, 6-11-b et 6-11-c). La corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux est examinée en étudiant l'écart entre l'aire sous la courbe associée au modèle ($p(d)_{modèle}$) et l'aire sous la courbe expérimentale ($p(d)_{exp}$). L'écart en pourcentage est défini par l'Eq. (6.7) :

$$\text{écart}_{modèle/expérience} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{max}} p(d)_{modèle} \delta d - \int_{d_{min}}^{d_{max}} p(d)_{exp} \delta d}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} p(d)_{exp} \delta d} \times 100\% \quad (6.7)$$

À l'exception de l'intervalle 20 $\mu\text{m} < d < 60 \mu\text{m}$, où l'écart entre les courbes théorique et expérimentale est important pour les sols S50K50 et S75K25, les écarts moyens sont de 6% pour S0K100 et de 30% pour S50K50. Pour S75K25, les écarts moyens entre le modèle et les données expérimentales sont de 15 %, 32 % et 47 % pour 20 000, 10 000 et 2 000 passages, respectivement. Dans l'ensemble, le modèle est en bon accord avec les résultats expérimentaux, en particulier pour ce qui est des modes de la granulométrie (pics des courbes). Cela montre sa capacité à reproduire de manière satisfaisante les mécanismes de dégradation pour les trois sols.

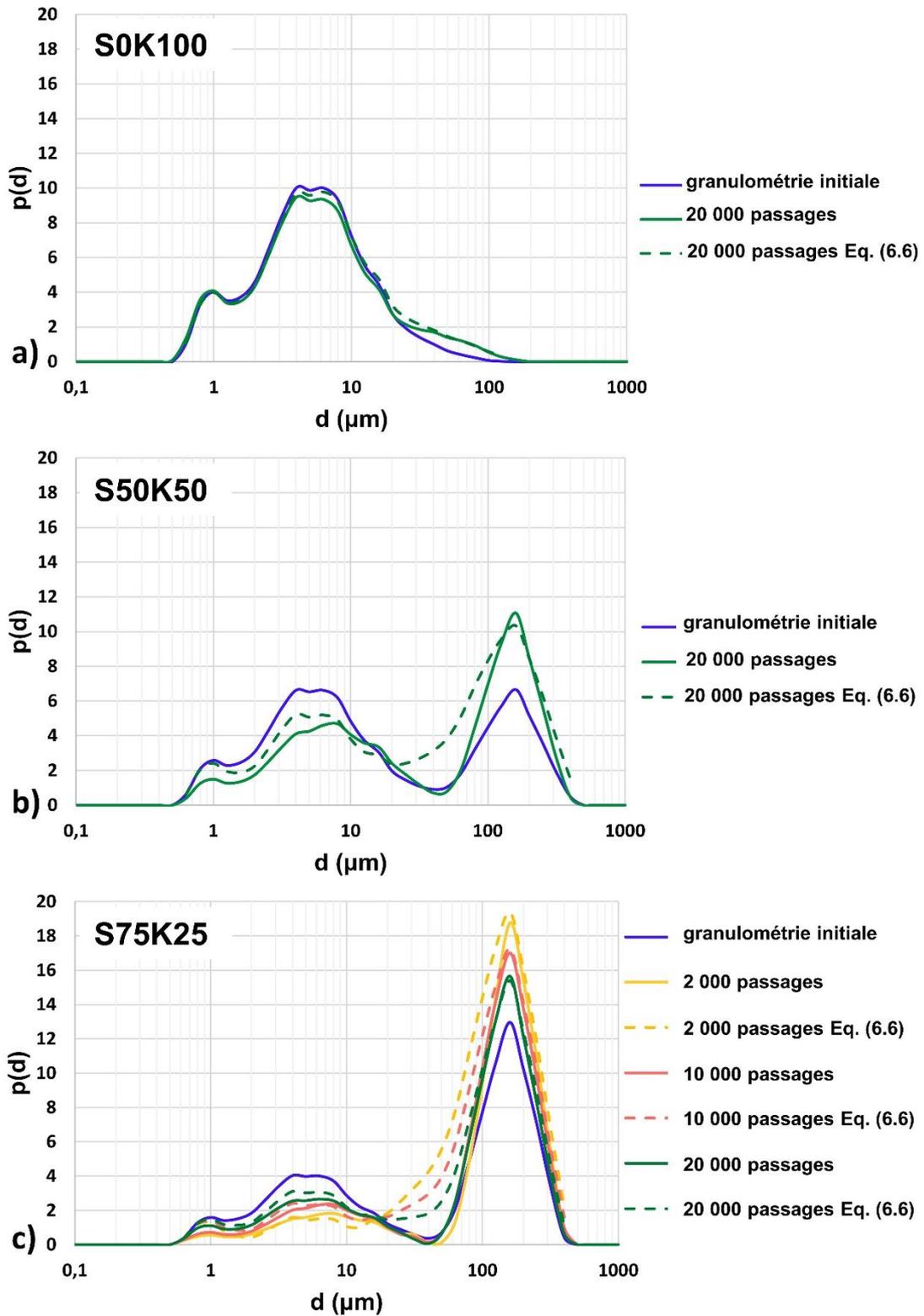


Figure 6-11 : Distributions granulométriques mesurées (lignes pleines) et modélisées (Eq. (6.6), lignes pointillées) pour le sol a) S0K100, b) S50K50 et c) S75K25 (diamètre équivalent en surface)

6.2.3 Caractérisation de couche limite sur les sols dégradés

Les sections précédentes se sont intéressées à l'apparition des poussières en surface du sol. Il est question à présent d'étudier l'initiation de leur envol.

Des écoulements d'air de vitesse $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$ et 16 m.s^{-1} ont été simulés en soufflerie au-dessus des sols dégradés. Les campagnes de mesures LDV ont permis l'estimation des paramètres tels que le facteur de forme H_f , la vitesse de cisaillement U_τ et l'épaisseur de sous-couche visqueuse δ_{vs} (Tableau 6-3). On rappelle que les paramètres U_τ , H_f et δ_{vs} sont calculés à l'aide des Eq. (2.4), (2.7) et (2.15), respectivement.

	Position (m)	$U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$			$U_\infty = 16 \text{ m.s}^{-1}$		
		H_f	$U_\tau \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\delta_{vs} \text{ (}\mu\text{m)}$	H_f	$U_\tau \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\delta_{vs} \text{ (}\mu\text{m)}$
Échantillon IV	x = -0,03	1,72	0,26	300	1,23	0,51	153
	x = 0,05	1,45	0,29	269	1,23	0,44	177
	x = 0,15	1,37	0,28	278	1,30	0,58	134
	x = 0,27	1,26	0,24	325	1,26	0,53	147
Échantillon VI	x = -0,03	1,78	0,32	244	1,39	0,54	144
	x = 0,05	1,22	0,30	260	1,52	0,62	126
	x = 0,15	1,50	0,34	229	1,33	0,66	118
	x = 0,27	1,38	0,31	252	1,35	0,62	126
Échantillon VII	x = -0,03	1,70	0,32	244	1,32	0,55	142
	x = 0,05	2,18	0,72	108	2,03	1,37	57
	x = 0,15	1,71	0,27	289	1,23	0,73	107
	x = 0,27	1,24	0,21	371	1,22	0,51	153
Échantillon VIII	x = -0,03	1,62	0,32	244	1,73	0,65	120
	x = 0,05	1,42	0,17	459	1,16	0,42	186
	x = 0,15	1,39	0,24	325	1,23	0,62	126
	x = 0,27	1,19	0,17	459	1,16	0,45	173

Tableau 6-3 : Paramètres caractérisant les profils de vitesses mesurés en soufflerie

Hormis quelques valeurs extrêmes (cellules grisées dans le Tableau 6-3), les épaisseurs de la sous-couche visqueuse sont très proches pour les différents échantillons en considérant une même vitesse d'écoulement (moins de 20% d'écarts relatifs). Par souci de simplicité, pour chaque vitesse, la moyenne sur toutes les valeurs a été choisie pour être implémentée dans le modèle d'estimation des émissions de poussières (Eq. (2.19), page 30). Ainsi, on prend $\delta_{vs}=300\mu\text{m}$ pour $U_\infty=8 \text{ m.s}^{-1}$ et $\delta_{vs}=135 \mu\text{m}$ pour $U_\infty=16 \text{ m.s}^{-1}$. À noter qu'une variation de 50% de ce paramètre dans le modèle conduit à une variation du flux de poussière de moins de 2 %.

Les mesures des champs de vitesse en soufflerie permettent de déterminer les fluctuations de vitesse au-dessus des échantillons et d'en déduire les contraintes de cisaillement de Reynolds générées par la turbulence au voisinage de la surface. Cependant, pour des raisons techniques, seules les fluctuations longitudinales de vitesse u' ont pu être mesurées dans cette zone. Afin de déterminer les contraintes de Reynolds, il est nécessaire d'avoir accès également aux fluctuations verticales et transversales (voir Eq. (2.18), page 30). Toutefois, en faisant l'hypothèse d'une turbulence isotrope, on peut considérer $u'=v'=w'$. En réalité, la turbulence est anisotrope et la fluctuation longitudinale u' est certainement plus importante que les deux autres. Ainsi, en faisant l'hypothèse d'une turbulence isotrope, on a tendance à surestimer les contraintes de cisaillement de Reynolds. Il est intéressant de noter que cette hypothèse est souvent utilisée dans les modèles numériques (Orszag, 1969 ; Berera et Ho, 2018 ; Rodriguez, 2019).

Les contraintes de cisaillement de Reynolds sont donc exprimées ici d'une manière simplifiée (Eq. 6.8) :

$$\tau_R(u' = v' = w') = \rho \sqrt{(u'u')^2 + (v'v')^2 + (w'w')^2} = \sqrt{2}\rho u'u' \quad (6.8)$$

τ_R peut donc être considéré comme étant le produit de deux variables u' , chacune suivant une distribution statistique $p_{u'}$. Ainsi, la distribution statistique des contraintes de Reynolds $p(\tau_R)$ est le produit de deux distributions statistiques. D'après Rohatgi (1976), on peut écrire (Eq. (6.9)) :

$$p(\tau_R) = \sqrt{2}\rho \int_{-\infty}^{+\infty} p_{u'}(x) \cdot p_{u'}(\tau_R/x) \cdot \frac{1}{|x|} dx \quad (6.9)$$

où la variable x correspond à l'ensemble des valeurs pouvant être prises par u' .

La Figure 6-12 montre un exemple de l'estimation de la distribution des contraintes de Reynolds pour l'échantillon VIII avec $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$. La Figure 6-12-a présente les profils d'intensité moyenne de turbulence longitudinale adimensionnée (u'/U_∞) pour chacune des 4 positions de mesure prises au-dessus de l'échantillon ($x=-0,03$; $0,05$; $0,15$ et $0,27 \text{ m}$). La Figure 6-12-b montre la distribution statistique des fluctuations de vitesse correspondant au point de mesure représenté par une croix verte ($x=0,27 \text{ m}$; $y=0,0001 \text{ m}$) sur la Figure 6-12-a. Les fluctuations de vitesse semblent suivre une distribution normale définie par l'Eq. (6.10) :

$$p_{u'} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u'-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6.10)$$

où μ et σ représentent respectivement la valeur médiane et l'écart type de la distribution.

À partir de la distribution statistique des fluctuations de vitesse, il est ensuite possible de déterminer la distribution $p(\tau_R)$ à l'aide de l'Eq. (6.9). Les résultats correspondants sont présentés sur la Figure 6-12-c. La Figure 6-13 présente les distributions $p(\tau_R)$ pour les quatre échantillons et pour la position $x=0,27\text{m}$. Les analyses ont été effectuées à cet endroit car il s'agit du point le plus éloigné de l'entrée de la soufflerie, la couche limite y est donc la plus développée. De plus, selon le Tableau 6-3, tous les profils de vitesse à cet endroit peuvent être considérés comme turbulents ($H_f < 1,4$). Les distributions $p(\tau_R)$ présentées à la Figure 6-13 sont très proches d'un échantillon à l'autre. Pour simplifier l'analyse, on va ici considérer uniquement les valeurs moyennes (lignes pointillées sur la Figure 6-13). Ainsi, pour une même vitesse d'écoulement U_∞ , on intègre dans le modèle d'émission une même distribution d'efforts $p(f)$ pour l'ensemble des échantillons. On utilise l'Eq. (2.17) définie à la page 30 pour calculer les distributions des efforts à partir des contraintes de Reynolds. La section suivante détaille les résultats obtenus en implémentant l'ensemble des résultats expérimentaux dans le modèle CTDE.

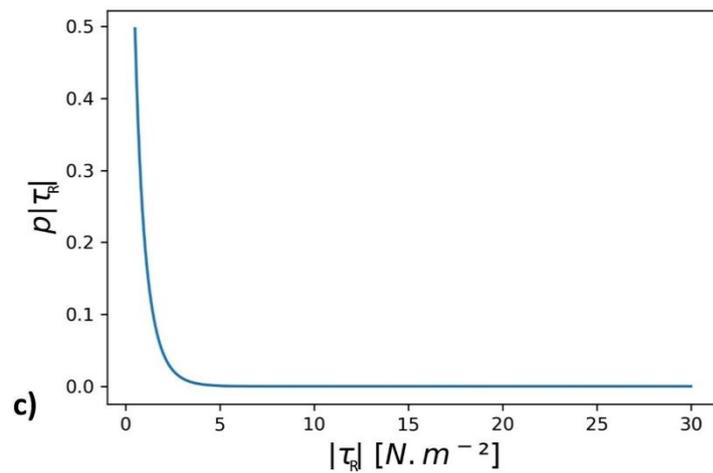
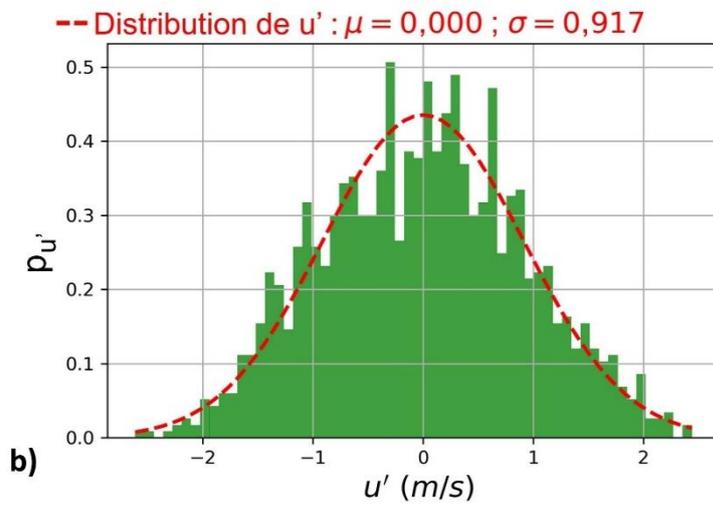
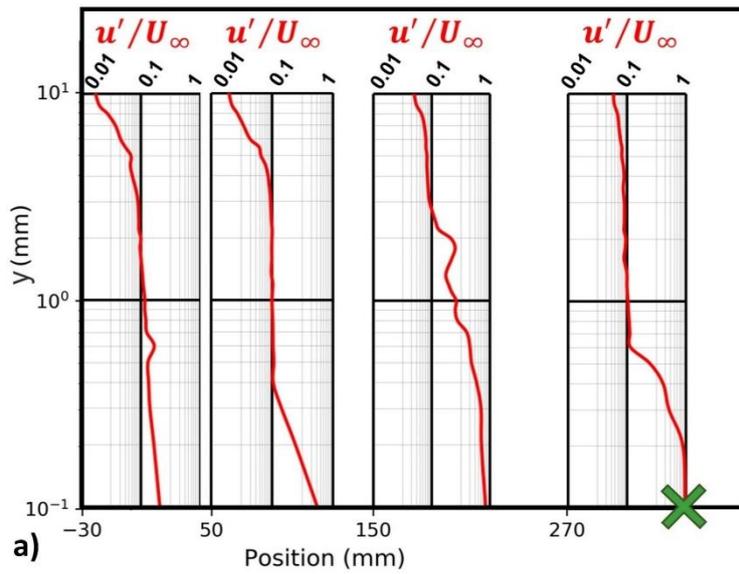


Figure 6-12 : Exemple, pour $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$, du processus de détermination de $p(\tau_R)$. a) Valeurs moyennes des fluctuations de vitesse au-dessus de l'échantillon ; b) Distribution des fluctuations de vitesse instantanées au point de mesure désigné par une croix verte ; c) PDF de τ_R déterminée à l'aide de l'Eq. (6.9)

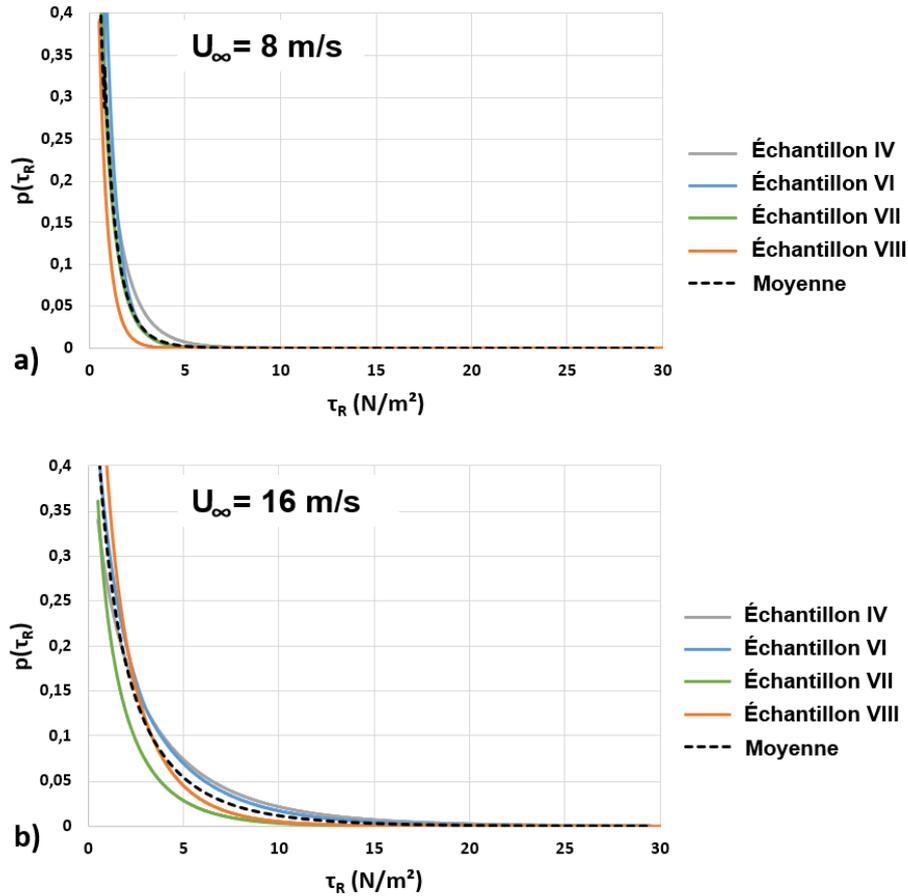


Figure 6-13 : Distributions $p(\tau_R)$ pour la position $x=0,27m$ et pour a) $U_\infty=8m.s^{-1}$ et b) $U_\infty=16 m.s^{-1}$. Les courbes pointillées correspondent aux valeurs moyennes qui sont par la suite implémentées dans le modèle d'émission de poussières

6.2.4 Estimation des émissions et comparaison avec des données de terrain

Le processus pour déterminer le flux d'émission de poussières à l'aide de l'Eq. (2.19) est le suivant :

- 1 On considère dans un premier temps les particules ayant un diamètre d donné ;
- 2 On calcule le nombre de particules de ce diamètre par unité de volume (paramètre N_d). Pour ce calcul, on part du paramètre D qui donne accès à la masse totale de particules par unité de surface du sol. En divisant par l'épaisseur de la sous-couche visqueuse, on obtient la masse de particules par unité de volume. Pour considérer uniquement les particules de diamètre d , on multiplie par $p(d)$. Le tout est divisé par la masse d'une particule afin d'obtenir le nombre de particules par unité de volume N_d (Eq. (6.11)) :

$$N_d(N) = \frac{\frac{D(N)}{\delta_{vc}} \times p(d)_{N_passages}}{\rho_s \times \frac{\pi d^3}{6}} \quad (6.11)$$

- 3 On calcule le temps de réponse T_p à l'aide de l'Eq. (2.16) ;
- 4 Connaissant $p(f_i)$ (Eq. (2.20)) et $p(f)$ (déterminée à l'aide de l'Eq. (2.17)), on peut calculer par double intégration la partie entre crochets de l'Eq. (2.19) ;
- 5 Finalement, on intègre sur l'ensemble de la distribution granulométrique $p(d)$ pour déterminer le flux d'émission de poussières pour l'ensemble des particules.

On peut choisir lors de l'étape 5 d'intégrer sur l'intervalle de notre choix. Ainsi, en intégrant sur l'intervalle $d_{\min} < d < 10 \mu m$, on peut quantifier les flux de PM_{10} . C'est ce qui est fait sur la Figure 6-14, où sont présentés les flux d'émissions de PM_{10} des trois sols pour 100, 1 000 et 10 000 passages de pneu et pour les deux vitesses d'écoulement. Il est à noter que l'échelle de la figure est logarithmique.

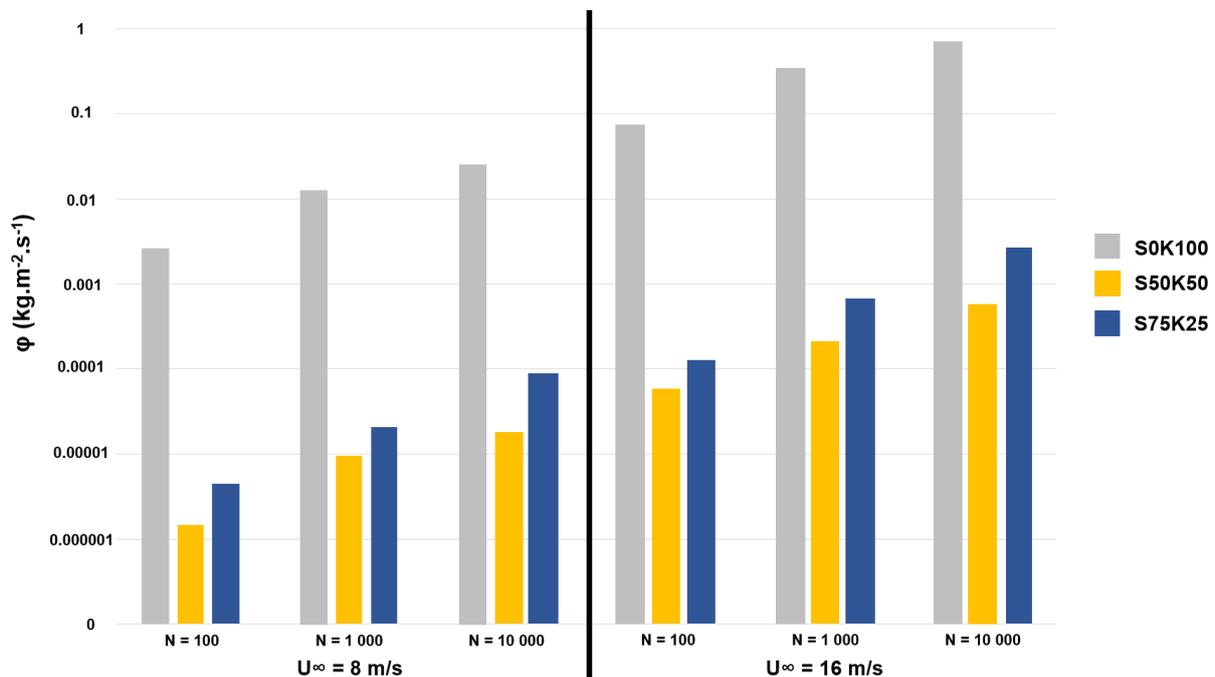


Figure 6-14 : Estimations des émissions de PM_{10} des trois sols pour 100, 1000 et 10000 passages de pneu et pour les deux vitesses $U_\infty=8 m.s^{-1}$ et $U_\infty=16 m.s^{-1}$

La Figure 6-14 montre que les émissions estimées pour le sol argileux (S0K100) sont de 2 à 3 ordres de grandeurs supérieures à celles des sols sableux (S50K50 et S75K25). Cela est dû à la dégradabilité très importante de ce sol ainsi qu'à sa granulométrie majoritairement composée de particules fines. Il apparaît en moyenne que pour les trois sols, la turbulence générée par l'écoulement à $16 m.s^{-1}$ entraîne un flux de poussière 30 fois plus important que pour l'écoulement à $8 m.s^{-1}$. Cela met en évidence toute l'importance de la limitation de la vitesse des véhicules pour réduire les émissions de poussières.

Des mesures lors de la circulation de véhicules sur des routes non revêtues ont montré que les concentrations de poussières émises directement derrière les pneus (exprimées en masse de particules par unité de volume d'air) étaient corrélées à la vitesse des véhicules élevée au cube (Etyemezian et al., 2003a, 2003b et 2003c). Ainsi, le fait de doubler la vitesse entraîne une multiplication par 8 de la concentration en poussières dans le sillage du véhicule. Dans nos essais, un doublement de la vitesse d'écoulement entraîne une multiplication par 30 des émissions. Nos estimations ne prenant en compte que la turbulence, on peut donc supposer que ce paramètre n'est pas le seul contributeur dans l'envol

des particules. Les conditions météorologiques ainsi que le cisaillement entre les pneus et le sol doivent avoir une influence majeure. Ces aspects seront étudiés au Chapitre 8.

Pour ce qui est de la comparaison des ordres de grandeur des émissions estimées avec des données de terrain, nous nous sommes appuyés sur l'étude de Gillies et al. (2005). Grâce à des mesures d'émissions de poussières lors de la circulation de différents types de véhicules sur des routes non revêtues, ils ont établi des facteurs d'émission (EF) exprimés en grammes de PM₁₀ émis par kilomètre parcouru par véhicule (g.vkt⁻¹, « gram per vehicle kilometer travelled »). Il est à noter que cette unité de mesure, bien que relativement singulière, est utilisée dans de nombreuses études d'émissions de poussières par des véhicules (Gillies et al., 1999 ; Etyemezian et al., 2003a ; Etyemezian et al., 2003b ; Etyemezian, 2003c ; Williams et al., 2008 ; Kuhns et al., 2010 ; Kavouras et al., 2016). Les résultats des mesures réalisées par Gillies et al. (2005) lors de la circulation de camions de l'armée américaine sont présentés au Tableau 6-4. Les facteurs d'émission par unité de surface (EF exprimé en g.m⁻²) sont indiqués pour des vitesses de circulation de 30 km.h⁻¹ (≈8m.s⁻¹) et de 60 km.h⁻¹ (≈16m.s⁻¹) afin de réaliser une comparaison avec nos résultats expérimentaux. Il est à noter que les facteurs d'émissions présentés dans le Tableau 6-4 (masse de poussières émise par unité de distance) évoluent linéairement avec la vitesse du véhicule. Ils ne doivent pas être confondus avec les concentrations (masse de poussières par unité de volume d'air) mesurées instantanément derrière les pneus qui, quant à elles, évoluent en fonction de la vitesse élevée au cube comme nous l'avons vu précédemment.

Type de véhicule	Masse (kg)	Largeur des pneus (m)	EF (g.vkt ⁻¹)	EF (g.m ⁻²) ^b	
				V = 30 km.h ⁻¹	V = 60 km.h ⁻¹
GMC C5500	5 227	0,245	19,01 × V ^a	1,16	2,32
M977 HEMTT	17 727	0,400	48,30 × V	1,81	3,62
M923A2 (5-ton)	14 318	0,355	47,40 × V	2,00	4,00
M1078 LMTV	8 060	0,395	18,51 × V	0,70	1,40

^a V: vitesse du camion (km.h⁻¹)

^b Le facteur d'émission exprimé en masse de PM₁₀ par unité de surface est calculé en considérant la surface de contact pneus/chaussée le long du parcours du camion (*surface de contact* = 2 × *largeur pneus* × *distance parcourue*)

Tableau 6-4 : Caractéristiques des camions et facteurs d'émission de poussières pour l'étude de Gillies et al. (2005)

En général, le temps nécessaire pour que le panache de poussière se dissipe dans le sillage d'un camion est de quelques dizaines de secondes (Organiscak et Reed, 2004 ; Reed et Organiscak, 2007). Pour les facteurs d'émission du Tableau 6-4, cela correspond à des flux d'émission de poussières compris entre 0,0001 et 0,001 kg.m⁻².s⁻¹. Ils sont du même ordre de grandeur que ceux estimés pour les sols S50K50 et S75K25 à 1 000 et 10 000 passages de roues (voir Figure 6-14). Néanmoins, les mesures de Gillies et al. (2005) ont été effectuées sur un sol ayant une teneur en limon (% particules inférieures à 80µm) inférieure à 7%, alors que les sols S50K50 et S75K25 ont respectivement des teneurs en limon de 73% et 44%. Il est donc raisonnable de penser que la circulation des véhicules sur ces sols aurait entraîné des émissions de poussières plus importantes que celles estimées dans la Figure 6-14. En effet, dans notre étude, les émissions de poussières sont estimées en tenant compte uniquement des turbulences d'un flux d'air à 30 km.h⁻¹ ou 60 km.h⁻¹, sans présence de véhicule. Lorsqu'un camion se déplace à ces vitesses, il génère dans son sillage des vortex (visibles sur la Figure 2-13, page 40) induisant des turbulences bien plus importantes. Cela n'a pas été pris en compte ici et fera l'objet d'une attention plus particulière au Chapitre 7.

6.2.5 Conclusion

Dans cette section, la dégradation par le trafic des sols compactés a été étudiée. Des modèles ont été établis pour quantifier la dégradation de la surface ainsi que l'évolution de la distribution granulométrique des particules arrachées en fonction du nombre de passages de roues. Ces résultats représentent une nouveauté car, si certaines études s'étaient intéressées aux émissions de poussières de sols dégradés par des pneus (Gillette et al., 1980 ; Meeks et al., 2013 ; Xu, 2014), il s'agit à notre connaissance des premiers travaux ayant évalué l'évolution de la dégradation et de la granulométrie sur des sols compactés.

L'interaction sol/atmosphère a été étudiée en simulant des vitesses d'écoulement de 8 m.s^{-1} et 16 m.s^{-1} en soufflerie au-dessus des sols dégradés. L'étude s'est concentrée sur la caractérisation des intensités de turbulence et des contraintes de cisaillement de Reynolds dans l'écoulement turbulent proche du sol.

Les résultats relatifs à la dégradation des sols et à la turbulence de l'écoulement ont été intégrés dans le modèle CTDE pour estimer les émissions de poussière sur les trois sols. D'une part, les résultats ont montré que les émissions pour le sol argileux étaient de plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles des sols sableux. D'autre part, la turbulence qui se développe pour une vitesse d'écoulement de 16 m.s^{-1} entraîne des émissions de poussière environ 30 fois plus élevées que celles estimées à 8 m.s^{-1} .

Les résultats obtenus à l'aide du modèle ont été comparés aux émissions de poussières provenant de la circulation des camions sur des routes non revêtues à des vitesses similaires. Les comparaisons soulignent l'importance de la prise en compte des facteurs environnementaux et du cisaillement généré par les pneus. Ce cisaillement va être étudié plus précisément dans la section suivante.

6.3 Effet de la sculpture des pneus et évaluation du modèle de dégradation

Dans cette partie, l'effet de la sculpture des pneus est analysé en comparant les résultats obtenus dans nos essais avec le pneu « S1 » (Figure 4-2-d) avec ceux de l'étude de Sediki (2018) réalisés avec le pneu lisse « L » (Figure 4-2-c) dans le simulateur de trafic présenté page 69. Ces résultats ont fait l'objet d'une présentation en conférence (Le Vern, 2021), Aux trois sols étudiés dans la section précédente (S0K100, S50K50 et S75K25) va s'ajouter un quatrième sol : un limon prélevé dans le secteur Val d'Europe en région parisienne (désigné « LVE »). Les propriétés géotechniques et les paramètres du comportement en cisaillement (voir section 3.3) de ces différents sols sont présentés au Tableau 6-5. Pour les propriétés granulométriques, on présente les teneurs en argile ($\% < 2 \mu\text{m}$) et en limon ($\% < 80 \mu\text{m}$) mais également le pourcentage de particules comprises entre 20 et $2000 \mu\text{m}$. En effet, dans la section précédente, 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. Les paramètres de cisaillement listés dans le Tableau 6-5 ont été obtenus avec des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande sur les sols préalablement compactés à l'optimum Proctor, c'est à dire à la teneur en eau w_{OPN} et au poids volumique sec $\gamma_{\text{d OPN}}$ (voir Tableau 6-5). La Figure 6-15 présente la détermination des contraintes de cisaillement mobilisées à l'interface des pneus. Ce paramètre a été défini à la Figure 3-13, page 53.

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	
γ _{d OPN} (kN.m ⁻³)		14,7	18,0	18,7	18,1	
<i>Comportement au cisaillement</i>						
Interne au sol	c (kPa)	170,1	194,8	36,4	103,4	
	φ (°)	13,7	15,9	31,0	25,8	
Interface sol / gomme	c _a (kPa)	34,9	87,4	35	58,7	
	δ (°)	18,4	13,9	30,2	15,4	
	Pneu lisse	τ _{mob_L} (kPa)	176,8	192,0	184,7	174,9
		α _L (°)	25,0	24,2	53,7	26,5
	Pneu sculpté	τ _{mob_S} (kPa)	275,8	275,0	310,6	269,1
		α _S (°)	32,2	27,0	53,8	26,5

Tableau 6-5 : Propriétés géotechniques et paramètres de cisaillement des sols

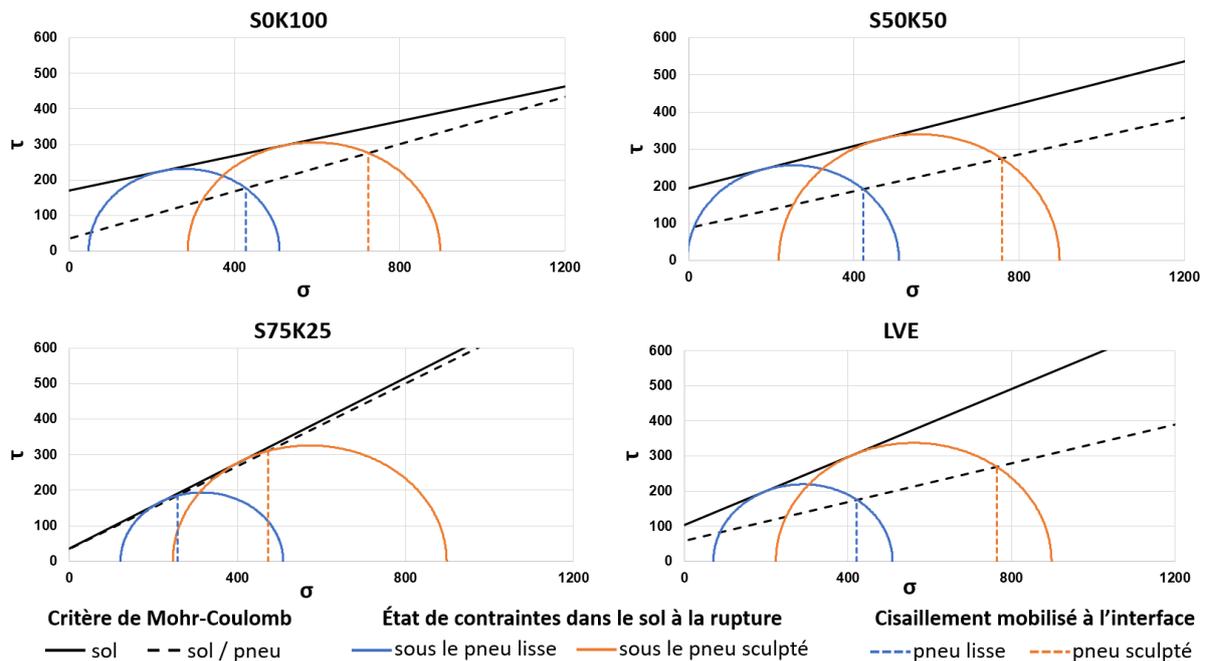


Figure 6-15 : Cercles de Mohr et contraintes mobilisées aux interfaces sol / pneus (tracé à l'aide des données de Sediki, 2018)

Les quatre sols ont été dégradés en simulateur de trafic par le pneu lisse « L » et le pneu sculpté « S1 ». Les conditions de circulation sur une piste non revêtue ont été reproduites en compactant les sols à l'optimum Proctor dans des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 500×180×28mm³. Le compactage a été réalisé à l'aide du compacteur roulant de laboratoire permettant de reproduire des états

de surface proches des conditions sur chantiers (Le Vern et al., 2020-a). 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 approximativement à la sollicitation d'une piste d'un chantier de terrassement sur une période d'un mois. Deux essais ont été réalisés avec le pneu « S1 » sur le sol S75K25 pour vérifier la répétabilité des résultats. Lors de chaque essai, l'appareil était stoppé à 13 reprises, 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 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). La section suivante présente les résultats et analyse l'effet de la sculpture des pneus.

6.3.1 Effet de la sculpture des pneus

La Figure 6-16 présente les mesures de dégradation de surface des différents sols avec les deux pneus.

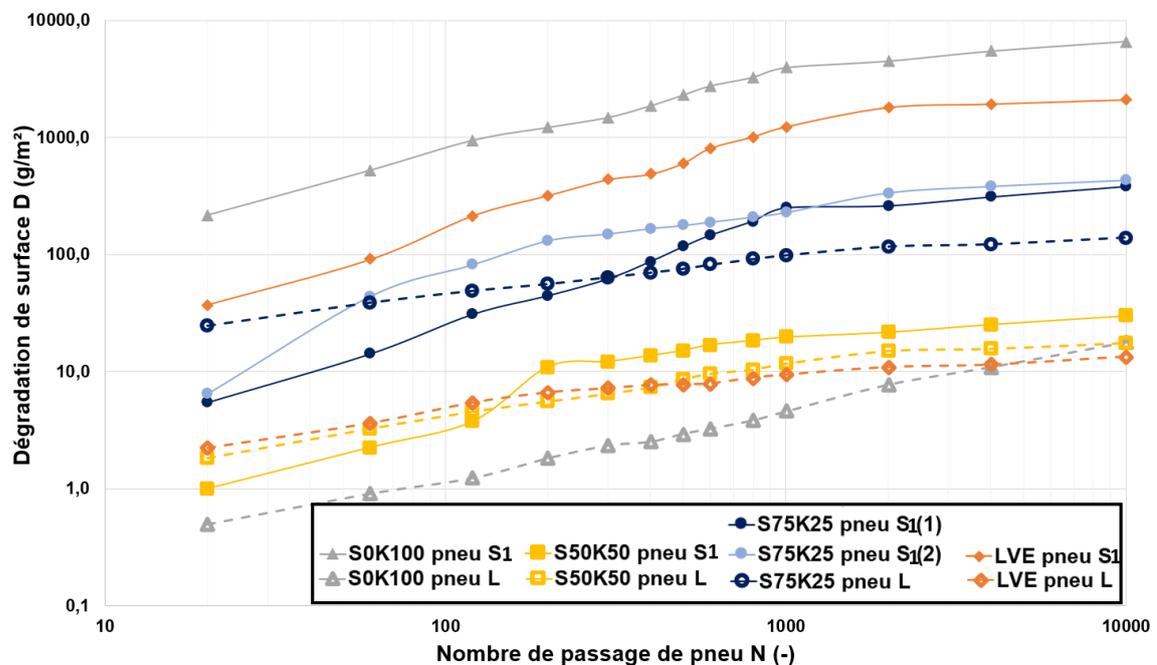


Figure 6-16 : Évolutions des dégradations de surface des sols en fonction du nombre de passages du pneu lisse « L » (lignes pointillées) et du pneu sculpté « S1 » (lignes pleines)

En considérant les résultats des essais de répétabilité sur le sol S75K25 avec le pneu S1 (points bleu clair et bleu foncé sur la Figure 6-16), il apparaît des variations de $\pm 20\%$ par rapport à la valeur moyenne. C'est une précision suffisante pour distinguer les ordres de grandeur des dégradations des différents sols. Il apparaît que d'une manière générale, celles-ci 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 S1. 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

généralisé par les sculptures du pneu S1 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 S1 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 par la suite sur les résultats expérimentaux obtenus avec le pneu S1

6.3.2 Modèle unifié de dégradation des sols avec pneu sculpté

L'objectif est ici d'obtenir un unique modèle pour quantifier l'évolution de la dégradation de l'ensemble des sols avec pneu sculpté. Il s'agit dans un premier temps de simplifier le modèle de dégradation développé dans la section 6.2 (Eq. (6.4), page 126) qui nécessite 5 paramètres pour chaque sol. Une réflexion plus approfondie a permis de modéliser chacune des courbes expérimentales à l'aide d'une fonction ne nécessitant que deux paramètres. Le choix s'est porté sur l'Eq. (6.12) qui permet de caractériser une fonction croissante dont le taux d'accroissement décroît progressivement :

$$D(N) = a \left(1 - e^{-\frac{N}{b}} \right) \quad (6.12)$$

où a et b sont deux coefficients empiriques qui dépendent du type de sol et N est le nombre de passages du pneu.

Les valeurs de ces deux coefficients sont présentées au Tableau 6-6. Elles ont été calculées à l'aide de la méthode des moindres carrés afin d'ajuster au mieux le modèle de l'Eq. (6.12) aux données expérimentales.

Sol	a	b	Équation correspondante
S0K100	5540	700	(6.12-a)
S50K50	27	600	(6.12-b)
S75K25	340	700	(6.12-c)
LVE	2190	1300	(6.12-d)

Tableau 6-6 : Paramètres du modèle de dégradation de surface des sols par le pneu sculpté (Eq. (6.12))

La Figure 6-17 présente les évolutions de la dégradation de surface D des différents sols en fonction du nombre de passages N du pneu sculpté. On peut distinguer les quatre sols suivant leur niveau de dégradation : « faible » pour le sol S50K50, « moyenne » pour S75K25, « élevée » pour le Limon Val d'Europe et « très élevée » pour S0K100. Il apparaît que le modèle de l'Eq. (6.12) est une bonne représentation de l'évolution de la dégradation des quatre sols.

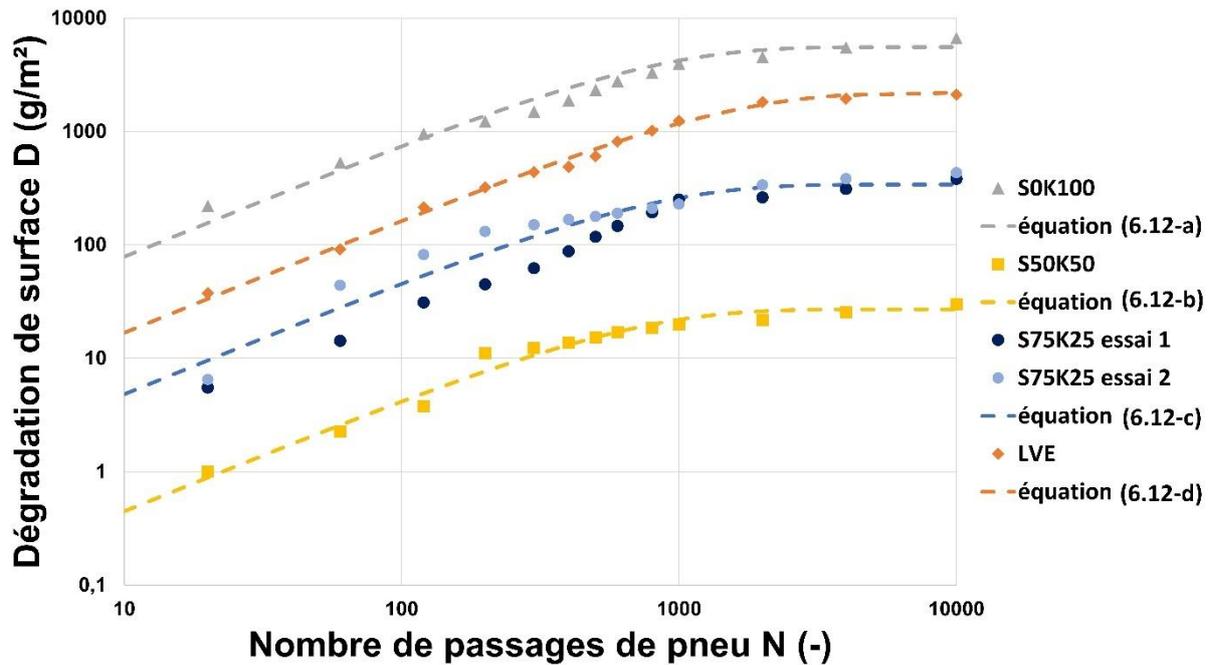


Figure 6-17 : Évolutions des dégradations de surface des sols en fonction du nombre de passages du pneu sculpté « S1 ». Les courbes pointillées correspondent au modèle de l'Eq. (6.12)

Il semble donc y avoir une loi de comportement générale dont les paramètres varient pour chacun des sols. On souhaite établir un unique modèle théorique qui puisse décrire leur comportement global. Le modèle envisagé est de la forme suivante (Eq. (6.13)) :

$$D(N, g_i) = D_{ref}(N) \cdot f(g_i) \quad (6.13)$$

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, donc D_{ref} est défini par l'Eq. (6.12-b).

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 (Eq. (6.14)) :

$$f = \frac{\sum_{k=1}^M \frac{D_k}{D_{ref}}}{M} \quad (6.14)$$

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 présentée à la section 6.2. Le paramètre qui permet de décrire au mieux la granulométrie des particules arrachées par le pneu a été identifié. Il s'agit du produit du pourcentage d'argile ($\%<2\mu\text{m}$) et du pourcentage de sable ($20\mu\text{m}<\%<2000\mu\text{m}$). On prend donc $g_1=\%argile$ et $g_2=\%sable$ et on trace sur la Figure 6-18-a l'évolution de f en fonction de $g_1 \times g_2$.

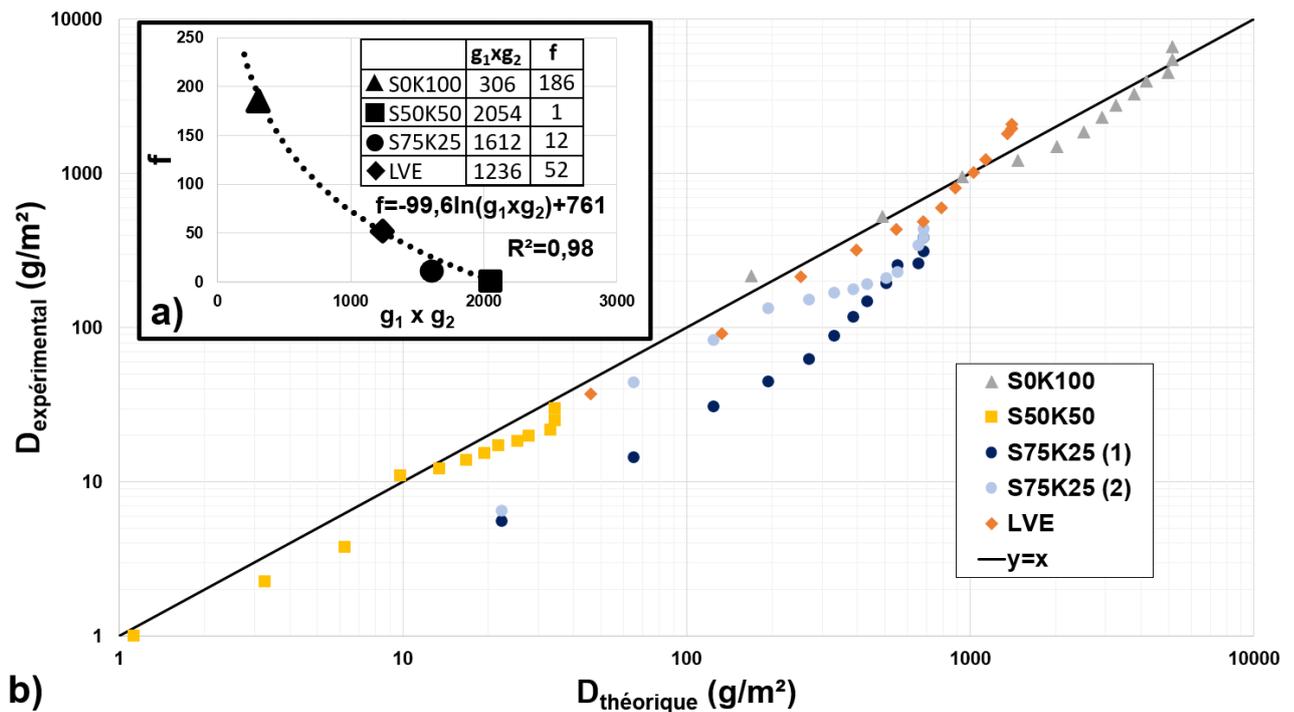


Figure 6-18 : a) Relation entre la fonction f et le produit du pourcentage d'argile (g_1) et du pourcentage de sable (g_2) des quatres sols ; b) Comparaison entre le modèle de l'Eq. (6.16) et les mesures expérimentales

La fonction permettant le meilleur ajustement des données ($R^2=0,98$) est définie par l'Eq. (6.15) :

$$f(\%argile, \%sable) = -99,6 \cdot \ln(\%argile \times \%sable) + 761 \quad (6.15)$$

A partir des Eq. (6.12), (6.13) et (6.15), on peut définir le modèle empirique de dégradation (Eq. (6.16)):

$$D_{théorique}(g/m^2) = 27 \left(1 - e^{-\frac{N}{600}} \right) \times [-99,6 \cdot \ln(\%argile \times \%sable) + 761] \quad (6.16)$$

A travers la comparaison entre les données expérimentales et le modèle proposé, la Figure 6-18-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, ce qui laisse envisager que ce modèle n'est pas totalement applicable aux sols à très forte teneur en sable.

L'Eq. (6.16) donne la masse de particules arrachées par unité de surface d'un pneu. Pour avoir la masse par kilomètre parcouru par un véhicule ayant un nombre R de roues de largeur l_r , on utilise l'Eq. (6.17) :

$$D_{théorique}(g/km) = D_{théorique}(g/m^2) \times l_r \times R \times 1000 \quad (6.17)$$

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.

6.3.3 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 à la section 6.2 (Eq. (6.5), page 130). 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'Eq. (6.18) :

$$E_{théorique}(g_{PM_{10}}/km) = D_{théorique}(g/km) \times p(d \leq 10\mu m)_{particules} \quad (6.18)$$

La Figure 6-19 présente la comparaison entre ce modèle et celui de l'USEPA (Eq. (1.8)) 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). On fait ici l'hypothèse que l'ensemble des particules arrachées à la matrice granulaire vont s'envoler.

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⁻¹ pour S75K25 et 10000 g.km⁻¹ 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. Il 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. Le modèle de l'USEPA ne permet pas de telles prédictions.

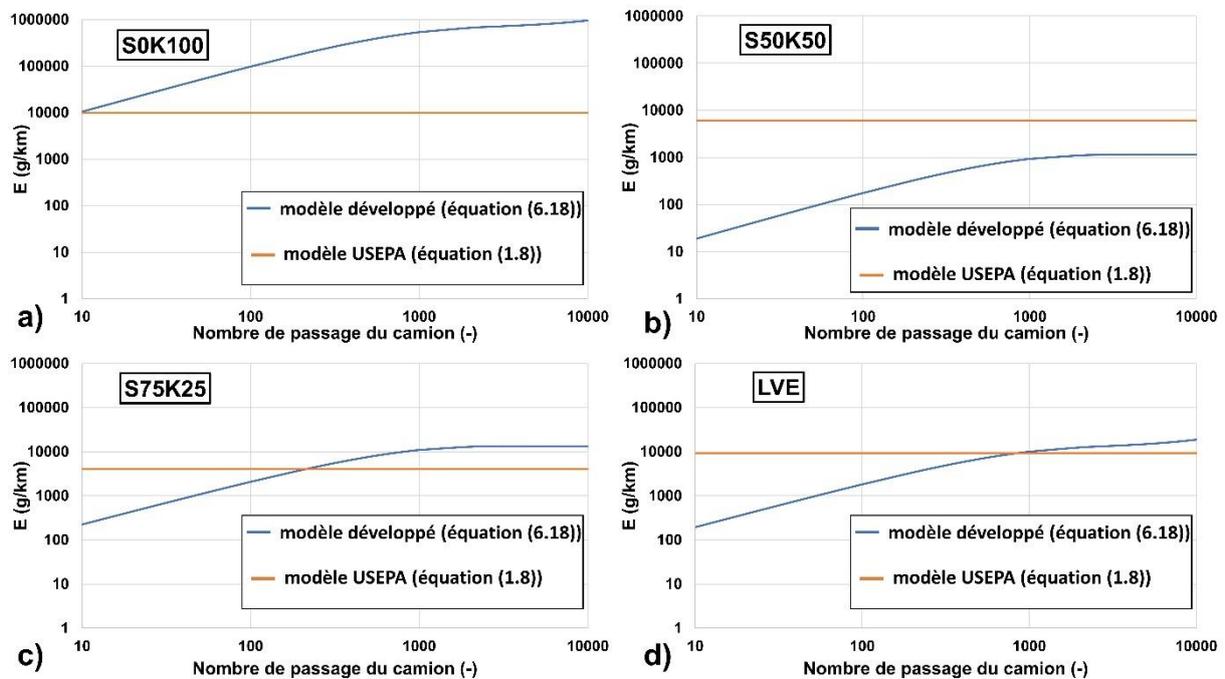


Figure 6-19 : Facteurs d'émission de PM₁₀ lors de la circulation d'un camion de 47 tonnes. Comparaison du modèle de l'Eq. (6.18) avec celui de l'USEPA pour le sol a) S0K100, b) S50K50, c) S75K25 et d) LVE

Le présent modèle a été établi à partir d'essais à l'échelle du laboratoire, réalisés à faible vitesse (4 km.h⁻¹) 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.

6.3.4 Conclusion

Cette étude a été réalisée afin de tendre vers une meilleure connaissance des mécanismes d'arrachement des agrégats liés à la circulation des pneus des camions sur les chantiers. A 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. Toutefois, il nécessiterait une validation à l'échelle 1 et pourrait servir à une meilleure gestion de l'arrosage durant la phase des terrassements. Pour améliorer la compréhension du mécanisme d'émission des poussières, les turbulences générées dans le sillage des camions doivent également être prises en compte. Ce point est abordé au chapitre suivant.

Chapitre 7 : Écoulements dans le sillage des engins de chantier

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats relatifs au troisième objectif de la thèse, à savoir la caractérisation du transport des poussières au cœur des écoulements générés dans le sillage des engins circulant sur les pistes. Dans un premier temps, les champs de vitesse moyenne des écoulements sont analysés pour chacune des configurations testées avec maquettes en soufflerie (écoulement de 8 m.s^{-1} avec un camion 8x4 benne pleine et benne vide ; écoulement de 8 et 16 m.s^{-1} avec un tombereau benne vide). On se focalise ici principalement sur les propriétés des écoulements de sillage et sur une comparaison des résultats de mesures obtenus avec LDV et PIV. Dans un second temps, les structures tourbillonnaires de sillage sont analysées en se focalisant sur les contraintes de Reynolds. Finalement, une analyse par quadrants est réalisée afin de discuter du transport des particules au sein des événements tourbillonnaires. Une partie des résultats présentés ci-dessous a fait l'objet d'une soumission d'article (Duran-Garcia et al., 2021).

7.1 Champs des vitesses moyennes

La Figure 7-1 présente les vitesses moyennes ainsi que les lignes d'écoulement sur les trois plans de mesure dans le sillage du camion 8x4 benne pleine (Figures 7-1 a, b et c) et benne vide (Figures 7-1 d, e et f) pour $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$.

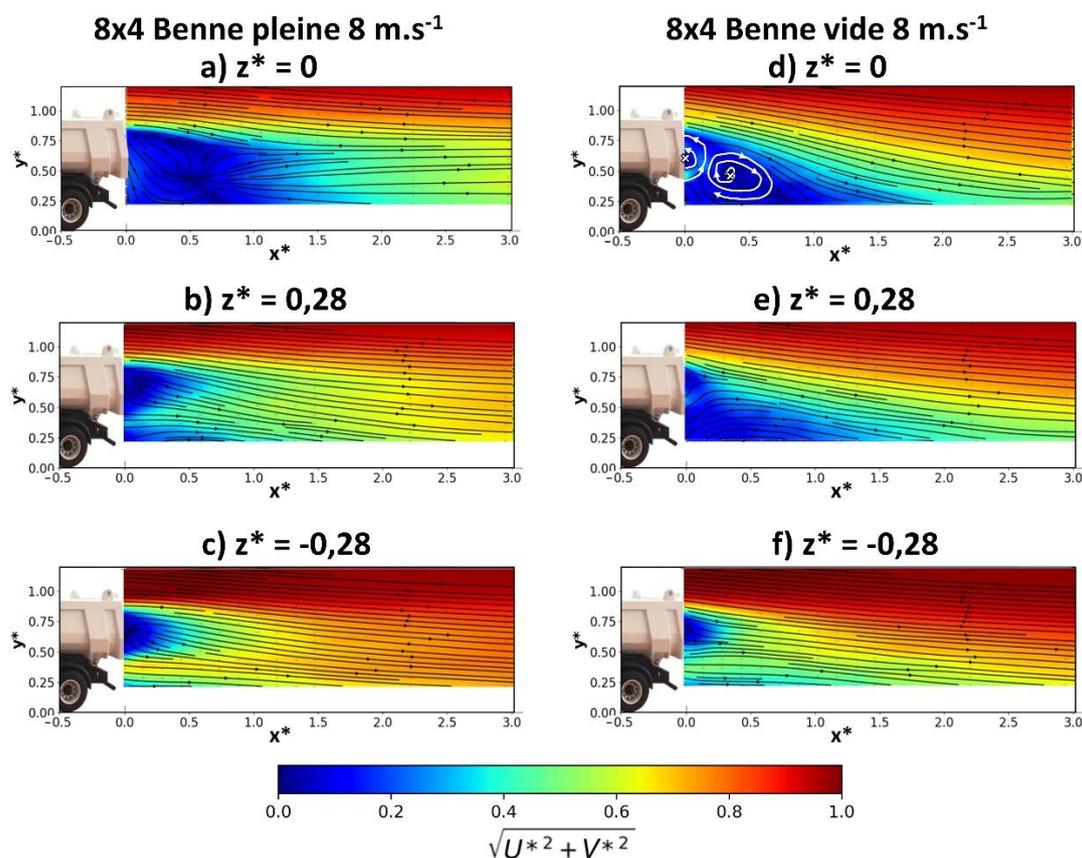


Figure 7-1 : Module de la vitesse adimensionné mesuré par LDV dans le sillage du camion 8x4 avec benne pleine dans le plan a) central, b) latéral gauche, c) latéral droit et avec benne vide dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit. La vitesse de l'écoulement est $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$ (adapté de Duran-Garcia, 2020).

La Figure 7-1 met en évidence la zone de fort ralentissement de la vitesse de l'air dans le sillage qui est particulièrement importante dans le plan médian du camion (zone en bleu sur les Figures 7-1-a et 7-1-d). Les lignes d'écoulement sur la Figure 7-1-d font apparaître deux tourbillons contrarotatifs (l'un centré sur $x^*=0,1$ et $y^*=0,6$ et tournant dans le sens horaire, l'autre de sens anti-horaire centré sur $x^*=0,4$ et $y^*=0,5$, croix blanches) qui ont également été mis en évidence dans le sillage des semi-remorques (Lo et Kontis, 2016 ; Lo et Kontis, 2017). L'écoulement est dissymétrique entre les plans $z^*=0,28$ et $z^*=-0,28$, probablement à cause des différents équipements présents sur le camion (pot d'échappement, échelle, rétroviseurs visibles sur la Figure 4-6, page 72). Cette dissymétrie semble plus prononcée lorsque la benne est vide car cette configuration entraîne des turbulences supplémentaires dues au fait que l'écoulement rencontre une rupture brutale de géométrie en passant au-dessus du creux de la benne. La configuration « benne pleine » a été établie avec une couche homogène de matériaux (Figure 5-7, p. 88) de sorte à limiter les décollements de couche limite. Elle génère une inclinaison moins importante de l'écoulement vers le bas (caractérisée par l'angle des lignes d'écoulement par rapport à l'horizontale).

La Figure 7-2 présente les mêmes plans de mesure des écoulements de sillage du camion 8x4 mais cette fois-ci obtenus avec la PIV pour $U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$. Il est à noter que la vitesse moyenne y est calculée à partir des trois composantes U , V et W alors que seules les deux premières composantes ont été mesurées en LDV.

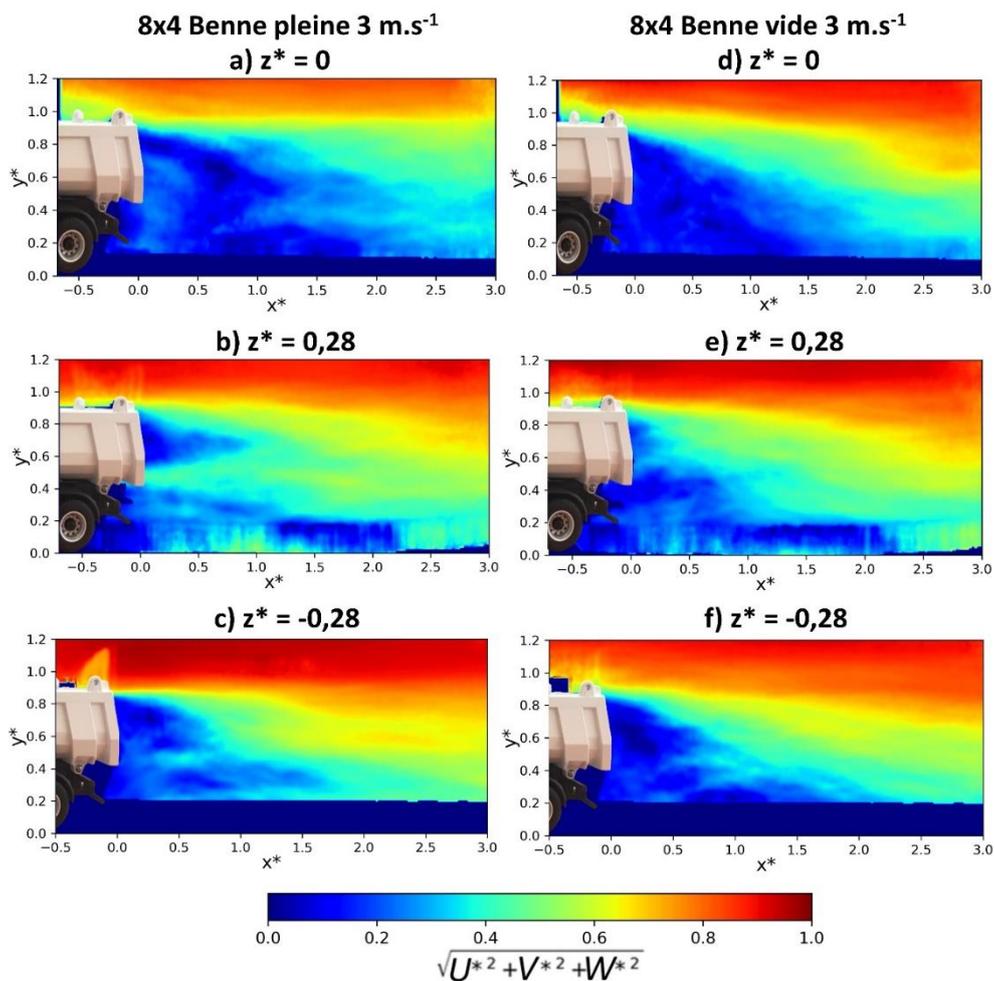


Figure 7-2 : Module de la vitesse adimensionné mesuré avec PIV dans le sillage du camion 8x4 avec benne pleine dans le plan a) central, b) latéral gauche, c) latéral droit et avec benne vide dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit. La vitesse de l'écoulement est $U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$.

La Figure 7-2 montre que, même avec une faible durée d'acquisition en PIV, on retrouve les mêmes champs de vitesses moyennes que ceux mesurés avec la LDV. En effet, les zones de recirculation de l'écoulement y ont les mêmes longueurs et les mêmes inclinaisons que sur la Figure 7-1. Cela montre notamment qu'une diminution importante de la vitesse ne change pas la forme des structures tourbillonnaires de sillage. Sur la Figure 7-2, certaines mesures en couche limite ($0 \leq y^* \leq 0,2$) sont moins précises voire inexistantes à cause de la réflexion de la nappe LASER sur le plancher de la soufflerie qui entraînait une saturation sur l'enregistrement des caméras. Une peinture anti-réflexion à base de rhodamine a été appliquée avant les essais mais elle n'a pas permis de corriger entièrement ce problème qui est récurrent lors des mesures PIV (Cadel et al., 2016).

La Figure 7-3 présente les cartographies des vitesses moyennes dans le sillage du Tombereau mesurées en PIV à 3 m.s^{-1} (Figure 7-3-a, b et c) et en LDV à 8 m.s^{-1} (Figures 7-3-d, e et f). Par souci de concision, les résultats des mesures LDV à 16 m.s^{-1} ne sont pas présentés. Ils donnent des cartographies en tous points similaires aux Figures 7-3-d, 7-3-e et 7-3-f. Cela démontre une nouvelle fois que dans le cadre de cette étude, la vitesse de l'écoulement n'influe pas sur les champs de vitesses moyennes adimensionnées.

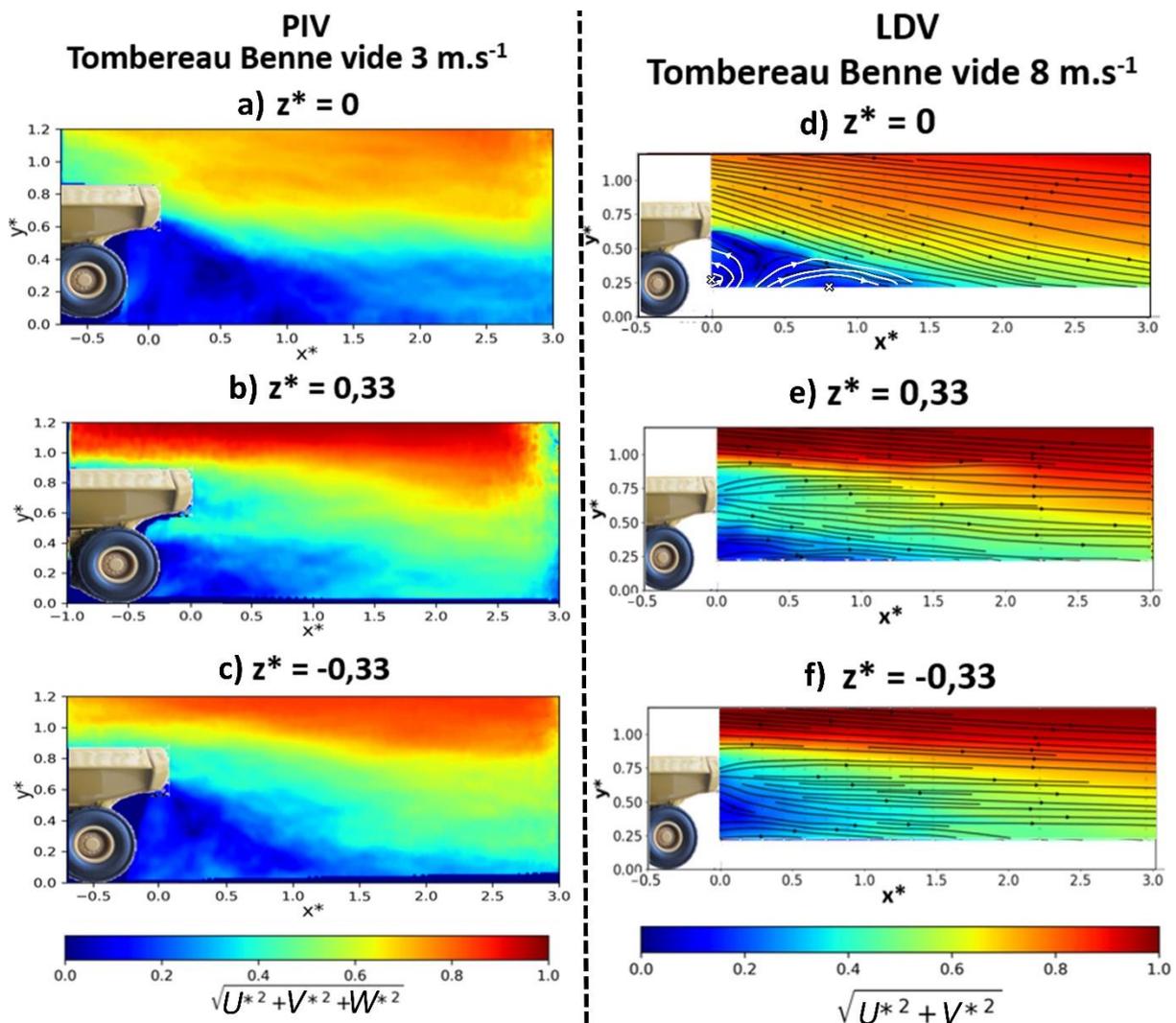


Figure 7-3 : Module de la vitesse adimensionné mesuré avec PIV pour $U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$ dans le sillage du tombereau avec benne vide dans le plan a) central, b) latéral gauche et c) latéral droit ; Les mêmes cartographies ont été mesurées avec LDV pour $U_\infty = 8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit.

De même que pour le camion 8x4, on retrouve les mêmes structures d'écoulements pour le tombereau que ce soit avec la LDV et la PIV. Les fortes turbulences résiduelles dans la veine d'essais de la soufflerie utilisée pour les mesures PIV n'ont donc pas eu d'impact sur les mesures. Les deux tourbillons contrarotatifs de la configuration « benne vide » sont également présents dans le plan médian du tombereau (Figure 7-3-d). Le centre des deux tourbillons est néanmoins plus bas avec ce camion qu'avec le 8x4. Cela est dû à la géométrie arrière de la benne en forme de V (visible sur la Figure 5-8-b) qui entraîne un rabattement beaucoup plus important de l'écoulement vers le bas. Cela est confirmé par l'analyse de la composante verticale de vitesse dont les cartographies sont présentées en Figure 7-4. On remarque effectivement que dans le sillage du tombereau, au-dessus de la zone de recirculation (caractérisée par la ligne pointillée qui délimite la zone des valeurs de u^* négatives) la vitesse verticale descend jusqu'à $v^* = -0,3$ (Figures 7-4-c et 7-4-d) alors qu'elle n'atteint que $v^* = -0,1$ pour le camion 8x4 (Figures 7-4-a et 7-4-b).

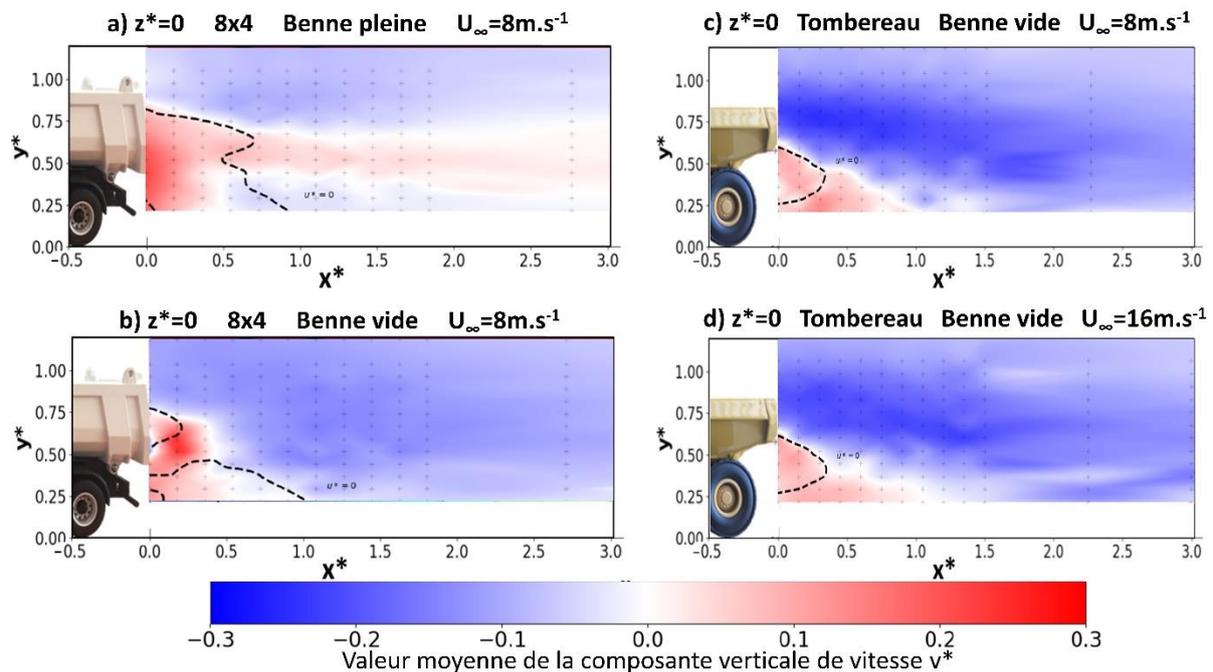


Figure 7-4 : Vitesse verticale adimensionnée v^* dans le plan médian à $8 m.s^{-1}$ pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration d) correspond au tombereau benne vide à $16 m.s^{-1}$ (adapté de Duran-Garcia, 2020).

Cette caractéristique améliore l'aérodynamisme du tombereau mais peut s'avérer problématique d'un point de vue de l'émission des poussières comme on le verra plus loin. En comparant les Figures 7-3-b et 7-3-e avec les Figures 7-3-c et 7-3-f, on observe que l'écoulement de sillage est également dissymétrique pour le tombereau. La principale raison peut être la présence d'un marchepied et d'une rampe d'accès à la cabine (visibles sur la Figure 4-5, page 71).

Cette première partie s'est attachée à une étude qualitative des écoulements dans le sillage des camions en ne présentant que des grandeurs moyennes adimensionnées. Par la suite, on s'intéresse aux champs des grandeurs turbulentes en ajoutant un aspect quantitatif à l'analyse. À ce titre, les grandeurs présentées dans les cartographies de la section suivantes ne sont pas adimensionnées afin de réaliser des comparaisons pour les différentes vitesses d'écoulement.

7.2 Champs des grandeurs turbulentes

Dans cette partie, l'étude se focalise sur les grandeurs turbulentes qui donnent naissance aux contraintes de Reynolds directement responsable de l'envol et du maintien en suspension des poussières dans le sillage. Dans un premier temps, leurs cartographies sont présentées et discutées pour les différentes configurations étudiées. Dans un second temps, une discussion sur l'anisotropie de la turbulence est proposée. Elle fait le lien avec les résultats obtenus au chapitre précédent. Finalement, les contraintes de Reynolds en proche paroi sont analysées.

7.2.1 Cartographies des contraintes de Reynolds

La Figure 7-5 présente les contraintes de Reynolds liées aux fluctuations longitudinales u' et verticales v' de vitesse dans le plan médian du camion 8x4. Les deux configurations testées (benne pleine et vide) sont présentées pour les essais à 3 m.s^{-1} mesurés avec PIV (Figure 7-5-a et b) et à 8 m.s^{-1} avec LDV (Figure 7-5-c et d). Les résultats montrent que les niveaux des contraintes de cisaillement les plus importants se trouvent en proche sillage ($x^* < 1$) juste derrière le point de décollement de l'écoulement en partie supérieure de la benne ($x^*=0$; $y^*=0,9$). Cette région génère un fort cisaillement car elle se trouve à la frontière entre la zone de l'écoulement non perturbé et la zone de recirculation. En comparant les échelles des Figures 7-5-a et b et celle des Figures 7-5-c et d, on observe qu'un passage de 3 à 8 m.s^{-1} (multiplication par 2,7 de la vitesse) entraîne une multiplication des contraintes de Reynolds par un facteur 5,6.

On a vu précédemment que la configuration benne vide entraînait un rabattement de l'écoulement vers le bas. Cela amène les zones de fortes contraintes de Reynolds à s'approcher du sol (jusqu'à environ $y^*=0,4$ sur les Figures 7-5-b et 7-5-d) alors qu'elles restent plutôt localisées sur une bande horizontale dans le haut du sillage pour la configuration benne pleine (zone de cisaillement délimitée par l'intervalle $0,6 < y^* < 1,0$ sur les Figures 7-5-a et 7-5-c). Ce phénomène pourrait accroître et/ou favoriser l'envol ainsi que le maintien en suspension des poussières. Pour vérifier cela, des expériences pourraient être menées en plaçant des particules sur le plancher de la soufflerie ou en les injectant juste à l'arrière des pneus. Cela n'a pas été possible dans notre cas car les particules seraient alors allées se loger dans le moteur de la soufflerie qui est placé en aval de la veine d'essais. De plus, la soufflerie étant en circuit ouvert, la simulation d'un envol réel de poussières aurait altéré la qualité de l'air dans le laboratoire.

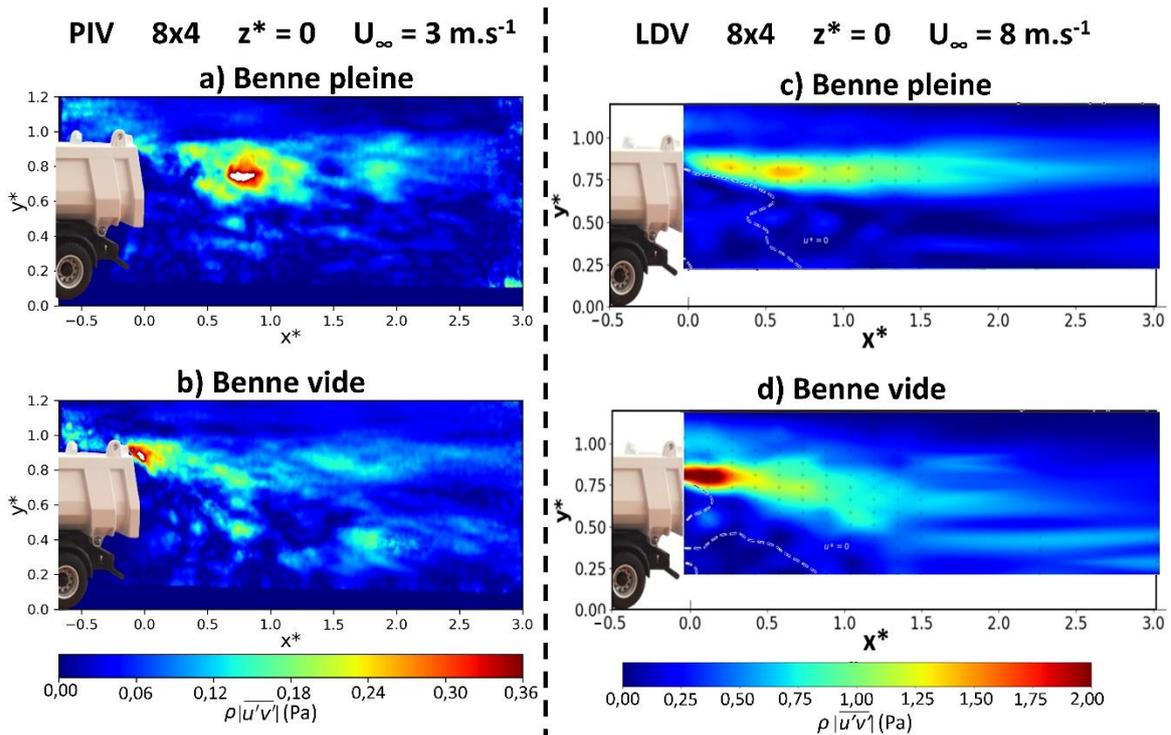


Figure 7-5 : Contraintes de Reynolds liées aux fluctuations longitudinales et verticales de vitesse dans le plan médian du camion 8x4. Mesures réalisées à 3 m.s^{-1} avec PIV pour la configuration a) benne pleine et b) benne vide ainsi que celles réalisées à 8 m.s^{-1} avec LDV pour la configuration c) benne pleine et d) benne vide. L'échelle des Figures a) et b) est inférieure à celle des Figures c) et d).

La Figure 7-6 présente les contraintes de Reynolds $\rho \overline{|u'v'|}$ dans les trois plans à l'arrière du tombereau benne vide. Les cartographies sont présentées pour les essais à 3 m.s^{-1} lors des mesures avec la PIV (Figure 7-6-a, b et c) et à 16 m.s^{-1} avec la LDV (Figure 7-6-d, e et f). La comparaison des échelles montre que le passage de 3 à 16 m.s^{-1} entraîne une multiplication des contraintes de Reynolds par un facteur proche de 17. Pour une configuration identique, les écoulements dans le sillage du tombereau sont encore plus déviés vers le bas que ceux du camion 8x4. Cela s'illustre par la zone de fort cisaillement qui descend jusqu'à une hauteur $y^*=0,25$ dans le plan $z^*=0$ (Figures 7-6-a et 7-6-d) et dans le plan $z^*=-0,33$ (Figures 7-6-c et 7-6-f).

La forme de la benne entraîne un décollement de l'écoulement plus haut sur les plans latéraux (point de décollement de coordonnées $(x^*=0, y^*=0,9)$ sur les Figures 7-6-e et 7-6-f) que sur le plan médian (point de décollement de coordonnées $(x^*=0, y^*=0,6)$ sur les Figures 7-6-e et 7-6-f). Cette géométrie pourrait entraîner une mise en suspension plus importante de poussières dans le plan milieu du tombereau suivi d'une dispersion latérale du nuage accrue par rapport au camion 8x4. Des observations en conditions réelles seraient nécessaires pour valider cette conjecture.

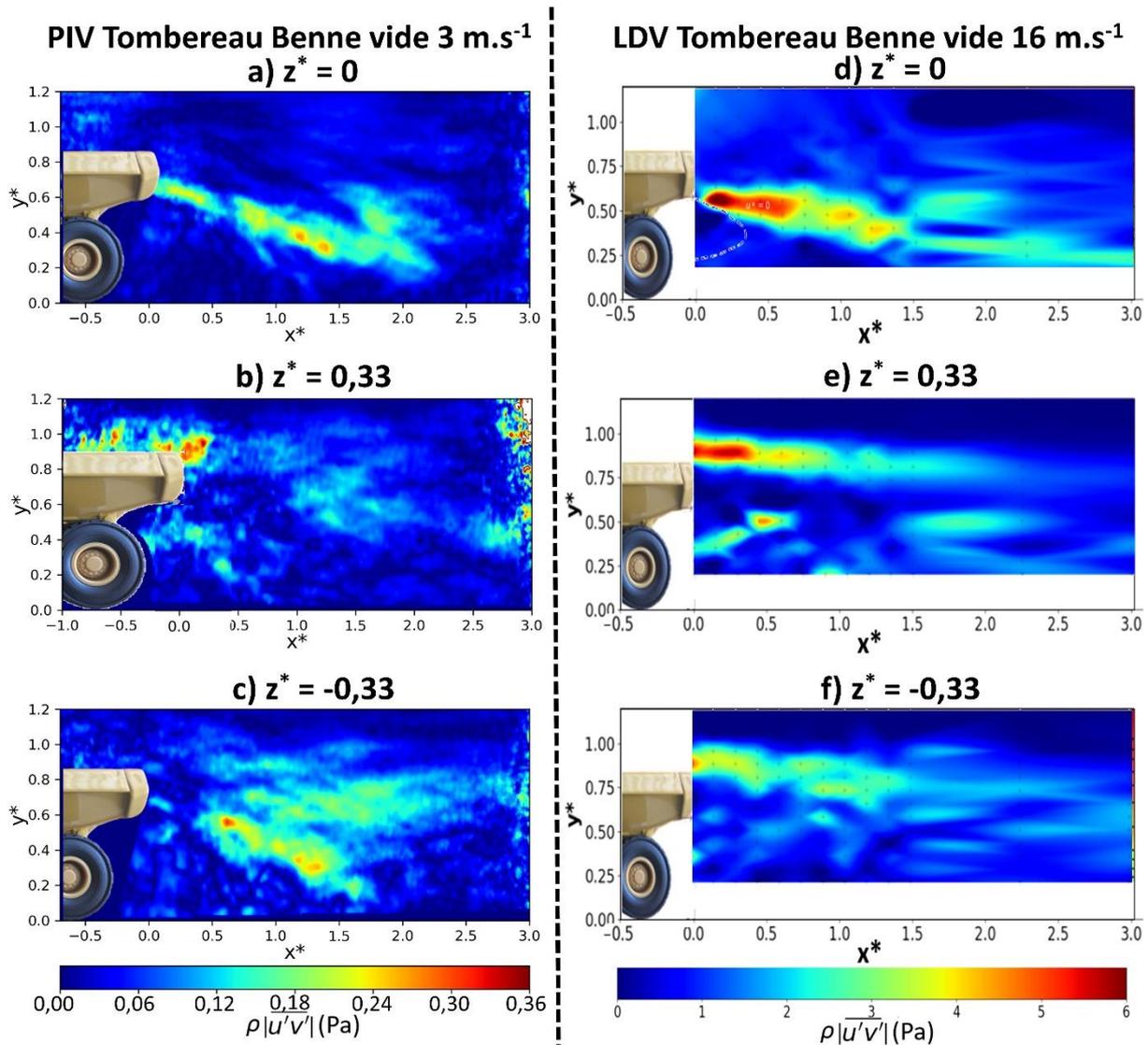


Figure 7-6 : Contraintes de Reynolds liées aux fluctuations longitudinales et verticales de vitesse dans le sillage du Tombereau. Mesures réalisées à 3 m.s^{-1} avec PIV dans le plan a) central, b) latéral gauche et c) latéral droit. Mesures réalisées à 16 m.s^{-1} avec LDV dans le plan d) central, e) latéral gauche et f) latéral droit. L'échelle des Figures a), b) et c) est inférieure à celle des Figures d), e) et f).

Les Figures 7-5 et 7-6 ne présentent que le terme croisé du tenseur de Reynolds $\rho \overline{|u'v'|}$. Pour avoir une vision complète du mécanisme qui entraîne la mise en suspension des poussières, il est nécessaire de considérer la force de soulèvement qui s'applique sur les particules. Comme il a été montré dans la section 2.2.2, celle-ci est directement proportionnelle à la contrainte de Reynolds associée au flux vertical de quantité de mouvement (Eq. (2.18), page 30). Cette dernière dépend également du terme croisé $\rho \overline{|v'w'|}$ faisant intervenir les fluctuations transversales de vitesse. Celles-ci sont analysées dans la section suivante.

7.2.2 Évaluation de l'anisotropie de la turbulence

Dans le chapitre précédent (section 6.2.3), l'hypothèse d'une turbulence isotrope ($u' = v' = w'$) avait été formulée afin de pouvoir utiliser le modèle d'émissions de poussières liés à la turbulence convective. Une telle hypothèse peut entraîner une surestimation des contraintes de Reynolds. Il s'agit ici de la quantifier en analysant le caractère anisotrope de la turbulence dans le sillage des camions. Pour chaque point de mesure réalisé en LDV, on s'intéresse au rapport $\overline{v'}/\overline{u'}$. En considérant l'ensemble des mesures sur un plan donné, on obtient une distribution statistique de ces rapports dont on extrait la valeur moyenne et l'écart type. Ils sont présentés au Tableau 7-1 qui montre que les fluctuations verticales de vitesse v' sont en moyenne 10% inférieures aux fluctuations longitudinales u' .

Camion	Configuration	Vitesse (m.s ⁻¹)	Plan	$\frac{\overline{v'}}{\overline{u'}}$ moyen	$\frac{\overline{v'}}{\overline{u'}}$ écart type
8x4	Benne pleine	8	$z^* = 0$	0,92	0,14
			$z^* = 0,28$	0,88	0,16
			$z^* = -0,28$	0,86	0,13
	Benne vide	8	$z^* = 0$	0,93	0,18
			$z^* = 0,28$	0,92	0,15
			$z^* = -0,28$	0,86	0,15
Tombereau	Benne vide	8	$z^* = 0$	0,93	0,18
			$z^* = 0,33$	0,94	0,12
			$z^* = -0,33$	0,90	0,10
		16	$z^* = 0$	0,91	0,18
			$z^* = 0,33$	0,93	0,20
			$z^* = -0,33$	0,89	0,13

Tableau 7-1 : Valeur moyenne et écart type de la distribution des rapports $\overline{v'}/\overline{u'}$ pour chaque plan mesuré avec LDV

Pour ce qui est de la troisième composante des fluctuations de vitesse w' , la Figure 7-7 présente une comparaison entre les contraintes de Reynolds $\rho|\overline{u'v'}|$ et $\rho|\overline{v'w'}|$ pour le plan médian de chaque configuration mesurée à l'aide de la PIV. En considérant la composante $\rho|\overline{u'v'}|$ (Figures 7-7a, 7-7-b et 7-7-c), des régions de fort cisaillement apparaissent très nettement au-dessus des zones de recirculation dans le sillage des camions. Elles n'apparaissent pas pour la composante $\rho|\overline{v'w'}|$ dont les valeurs sont beaucoup plus faibles. Dans les zones de cisaillement, il apparaît que $\rho|\overline{v'w'}|$ est entre 2 et 4 fois inférieure à $\rho|\overline{u'v'}|$. Ces observations sont également valides pour les deux plans latéraux.

Vis-à-vis des considérations précédentes, on fait les approximations suivantes pour les zones de cisaillement des écoulements de sillage :

- $v' \approx 0,9 u'$
- $v'w' \approx 1/3 u'v'$

On a donc une version simplifiée des contraintes de Reynolds (Eq. (7.1)) :

$$\tau_R = \rho \sqrt{(u'v')^2 + (v'w')^2} \approx \rho \sqrt{(0,9u'u')^2 + (0,3u'u')^2} = \sqrt{0,9}\rho u'u' \quad (7.1)$$

L'hypothèse d'une turbulence isotrope au chapitre précédent amenait à considérer que $\tau_R \approx \sqrt{2}\rho u'v'$ (Eq. (6.8), page 133), ce qui entraînait donc environ une surestimation des contraintes de Reynolds d'un facteur $\sqrt{2}/\sqrt{0,9} = 1,5$. Vis-à-vis des marges d'erreurs liées à la quantification des émissions de poussières (qui sont généralement données à l'ordre de grandeur près), cette surestimation ne remet pas en cause a priori les conclusions du précédent chapitre.

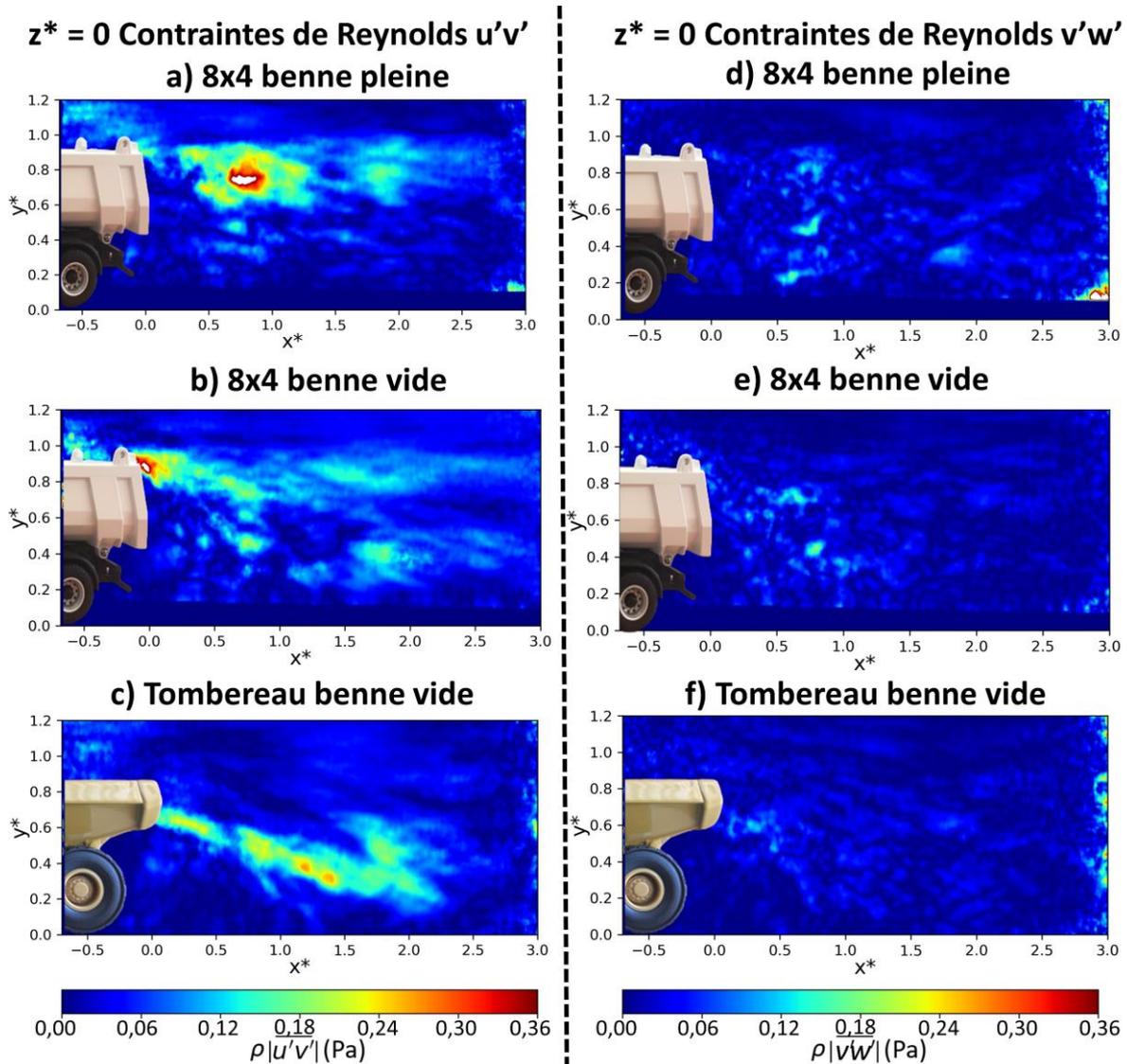


Figure 7-7 : Contraintes de Reynolds $\rho|u'v'|$ mesurées par PIV dans le plan médian pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. Contraintes de Reynolds $\rho|v'w'|$ mesurées par PIV dans le plan médian pour d) le camion 8x4 benne pleine, e) le camion 8x4 benne vide et f) le tombereau benne vide.

Pour étudier plus en détail la capacité des tourbillons de sillage à soulever les poussières présentes au sol, il est nécessaire de considérer les contraintes de Reynolds générées proche du plancher de la soufflerie.

7.2.3 Contraintes de Reynolds en proche paroi

Pour considérer les contraintes de Reynolds totales, on s'appuie sur les mesures réalisées par PIV car elles donnent accès aux fluctuations de vitesse dans les 3 directions de l'espace. La zone proche paroi est ici considérée comme étant la ligne $y^*=0,22$ située à 15 mm du plancher de la soufflerie. On ne considère pas une valeur inférieure en très proche paroi, les mesures PIV sont perturbées à cause des réflexions de lumière. Sur la ligne considérée, le post-traitement des données de la PIV donne accès à 357 points de mesures (un point tous les 0,8 mm) pour chaque paire d'images. Chaque acquisition consistant à prendre 100 paires d'images, cela correspond à 35 700 mesures des trois fluctuations de vitesse u' , v' et w' . On peut ensuite calculer pour chaque mesure la contrainte de Reynolds instantanée associée au flux vertical de quantité de mouvement τ_R à l'aide de l'Eq. (2.18) définie à la page 30. La Figure 7-8 présente leur distribution statistique sur la ligne $y^*=0,22$ pour quatre configurations (plan médian du tombereau vide, du 8x4 vide et du 8x4 plein ainsi que plan $z^*=0,33$ du tombereau vide). Par souci de concision, on ne présente pas d'autres plans car il apparaît que les configurations testées en soufflerie amènent aux mêmes distributions de contraintes de Reynolds en proche paroi (les variations d'une courbe à l'autre sur la Figure 7-8 sont trop faibles pour impliquer une variation sensible de la quantité de poussières soulevées).

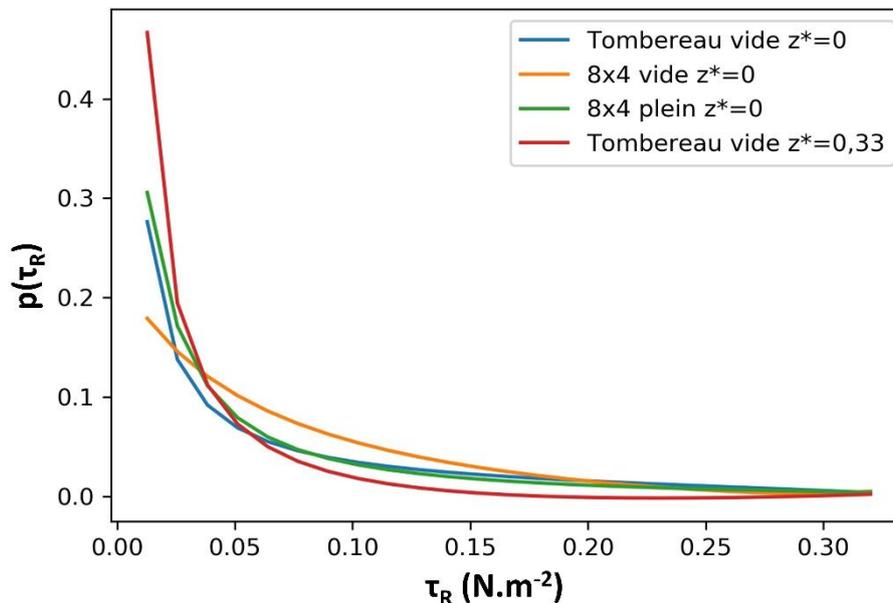


Figure 7-8 : Distributions $p(\tau_R)$ sur la ligne $y^*=0,22$ du plan $z^*=0$ pour la configuration Tombereau vide (courbe bleue), 8x4 vide (courbe orange) et 8x4 pleine (courbe verte) ainsi que pour le plan $z^*=0,33$ pour la configuration Tombereau vide (courbe rouge) mesurées avec PIV.

Ces distributions sont très proches les unes des autres et semblent indiquer que les écoulements de sillage tendent à initier l'envol des mêmes quantités de poussières, et ce quel que soit le camion et la présence ou non de matériaux dans la benne. Il faut toutefois noter qu'ils ont été obtenus à faible vitesse ($U_\infty = 3 \text{ m.s}^{-1}$) et il serait nécessaire de valider cette affirmation pour des écoulements plus rapides. On peut néanmoins envisager que la différence entre les configurations se fera surtout vis-à-vis de la quantité de poussières arrachées par les pneus, ce qui n'est pas quantifié ici. En revanche, la géométrie du camion et son chargement vont influencer le comportement des particules une fois que celles-ci se seront envolées. C'est l'objet de la section suivante qui repose sur la méthode des quadrants.

7.3 Analyse par quadrants

La méthode des quadrants, présentée à la section 2.2.3, permet de mettre en évidence la fréquence d'apparition dans l'écoulement d'événements turbulents appelés éjections (Q2) et balayages (Q4) qui sont les principaux contributeurs aux contraintes de Reynolds (Lu et Willmarth, 1973 ; Hurther et Lemmin, 2003 ; Wiggs et Weaver, 2012). Les balayages contribuent grandement à l'initiation du soulèvement des particules tandis que les éjections tendent à les maintenir en suspension (Lelouvetel et al., 2009).

La Figure 7-9 présente les cartographies des fréquences d'apparitions des événements de balayage Q4 dans le plan médian des quatre configurations mesurées par LDV. Un filtrage a été appliqué afin d'éviter de donner trop de poids aux contributions individuelles de contraintes de faible intensité. Pour cela, un critère de seuil a été défini afin de considérer uniquement les événements qui dépassent la contrainte moyenne d'au moins un écart-type (Sterk et al., 1988). Cette méthode a été appliquée entre autres par Wiggs et Weaver (2012) ainsi que Mayaud et al. (2016). La Figure 7-9-a montre que les fréquences d'apparition des balayages intenses sont très faibles (moins de 7%) dans la partie inférieure du sillage ($y^* < 0,75$) du 8x4 benne pleine. Ils sont beaucoup plus fréquents lorsque la benne est vide (Figure 7-9-b). La zone de cisaillement dans le sillage du tombereau est marquée par une grande fréquence d'apparition (entre 10 et 18 %) des balayages intenses (Figure 7-9-c). Lorsque la vitesse de l'écoulement double (Figure 7-9-d), les balayages intenses sont beaucoup plus fréquents et apparaissent dans le lointain sillage ($x^* > 2$).

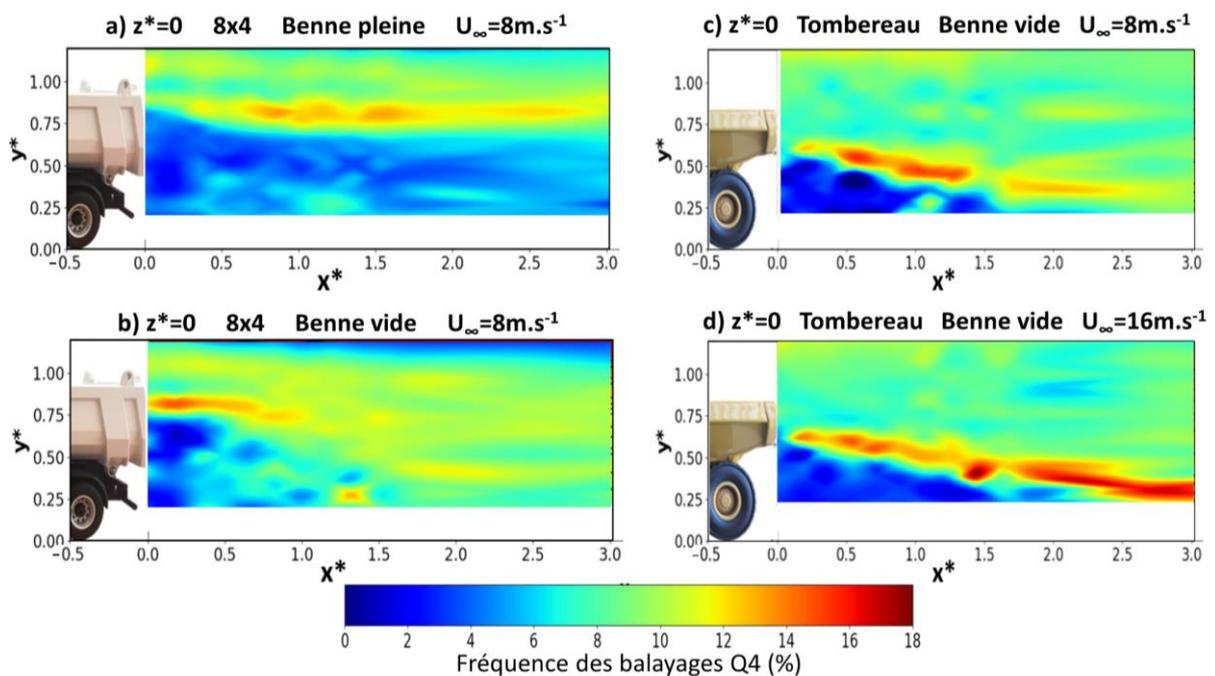


Figure 7-9 : Fréquences d'apparition des balayages de forte intensité dans le plan médian à 8 m.s⁻¹ pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration c) correspond au tombereau benne vide à 16 m.s⁻¹ (adapté de Duran-Garcia, 2020).

La Figure 7-10 présente les mêmes cartographies mais pour les fréquences d'apparition des fortes éjections (événements Q2 filtrés à un écart type). Il apparaît que les éjections les plus intenses n'apparaissent pas dans les zones de recirculation mais sont concentrées dans les zones de cisaillement

de l'écoulement. Leur fréquence d'apparition proche du sol est plus importante lorsque la benne du camion 8x4 est vide (Figure 7-10-b). De même que pour les balayages, le tombereau génère également beaucoup d'éjections intenses dans la zone de cisaillement de son sillage. Ce phénomène apparaît surtout dans le sillage lointain ($x^* > 1$). En comparant les cartographies du tombereau à 8 m.s⁻¹ (Figure 7-10-c) et à 16 m.s⁻¹ (Figure 7-10-d), on observe que le doublement de la vitesse multiplie l'intensité des éjections mais ne change pas fondamentalement leur fréquence d'apparition.

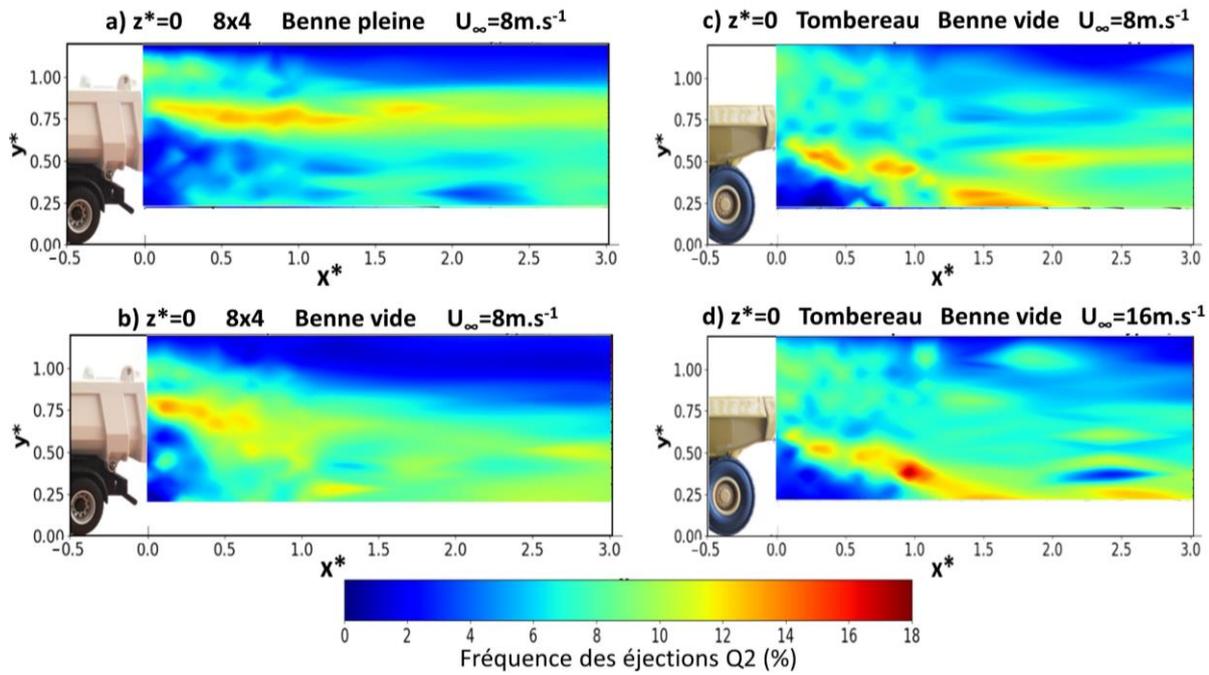


Figure 7-10 : Fréquences d'apparition des éjections de forte intensité dans le plan médian à 8 m.s⁻¹ pour a) le camion 8x4 benne pleine, b) le camion 8x4 benne vide et c) le tombereau benne vide. La configuration c) correspond au tombereau benne vide à 16 m.s⁻¹ (adapté de Duran-Garcia, 2020).

7.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les écoulements se développant dans le sillage de deux camions fréquemment rencontrés sur les chantiers de terrassement (camion à benne avancée « 8x4 » et camion articulé « tombereau ») ont été analysés à l'aide de maquettes en soufflerie. Différentes configurations ont été étudiées en faisant varier la vitesse d'écoulement et en simulant la présence ou non de matériaux dans la benne. En considérant les contraintes de Reynolds et en appliquant la méthode des quadrants, les résultats semblent indiquer que les écoulements dans le sillage du tombereau ont une capacité plus importante à soulever et à maintenir en suspension les poussières. C'est également le cas pour les écoulements générés par un camion circulant avec la benne vide plutôt qu'avec une benne remplie de matériaux. Il convient de noter que ces conclusions ne s'appuient que sur l'étude des écoulements. La présence de matériaux dans la benne peut effectivement améliorer l'aérodynamisme d'un camion. En revanche, elle va augmenter grandement sa masse et donc le cisaillement généré par ses pneus. Cela aura pour conséquence une augmentation des émissions de poussières. Afin d'étudier entre autres cet effet de la masse des véhicules sur la mise en suspension des particules, des essais sur piste à l'échelle 1 ont été réalisés. Ils permettent de compléter les analyses de laboratoire et sont présentés au chapitre suivant.

Chapitre 8 : Envol des particules lors de la circulation d'un véhicule

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs au quatrième et ultime objectif de la thèse qui consiste à mettre en évidence le mécanisme d'envol des poussières lié à la circulation d'un véhicule. Dans un premier temps, la remise en suspension des particules est analysée à travers les mesures de concentration réalisées directement derrière les pneus des véhicules ayant circulé sur piste. On se focalise tout d'abord sur les essais réalisés avec la Clio et le 4x4. Les résultats relatifs à la circulation du camion sont analysés par la suite. Dans un second temps, il est proposé une évaluation des émissions de poussières sur le bas-côté de la route. L'étude se concentre sur l'estimation des facteurs d'émission des véhicules et sur l'atténuation de visibilité correspondante.

8.1 Remise en suspension des particules directement derrière les pneus

Cette partie a pour objectif d'analyser l'effet de l'état de dégradation d'une piste non revêtue sur la remise en suspension des poussières directement derrière les pneus. On rappelle que l'état de dégradation est ici caractérisé comme étant la masse de particules libre de s'envoler par unité de surface de la route. Une analyse de la répétabilité des résultats est présentée dans un premier temps. Elle est suivie d'une discussion des résultats obtenus avec les véhicules légers qui ont fait l'objet d'une présentation en conférence (Le Vern et al., 2021a). Finalement, les coefficients d'émission obtenus avec le camion sont analysés.

8.1.1 Analyse de la répétabilité des résultats

Certaines configurations de paramètres (type de particules – masse de particules au sol – véhicule – vitesse véhicule) ont été testées à plusieurs reprises afin de vérifier la répétabilité des résultats (les acronymes sont ceux définis à la Figure 5-17, page 99) :

- La configuration LS – 200 g.m⁻² - Clio – 60 km.h⁻¹ a été testée deux fois ;
- La configuration LMD – 200 g.m⁻² - Clio – 60 km.h⁻¹ a été testée quatre fois ;
- La configuration LMD – 400 g.m⁻² - Clio – 60 km.h⁻¹ a été testée deux fois ;
- La configuration AV – 200 g.m⁻² - Clio – 60 km.h⁻¹ a été testée deux fois ;
- La configuration LVE – 200 g.m⁻² - Camion – 30 km.h⁻¹ a été testée deux fois ;
- La configuration AV – 200 g.m⁻² - Camion – 45 km.h⁻¹ a été testée deux fois ;
- La configuration LS – 200 g.m⁻² - Camion – 45 km.h⁻¹ a été testée deux fois.

Pour la Clio, les essais de répétabilité ont été réalisés à 60 km.h⁻¹ car c'est la vitesse pour laquelle les turbulences de sillage sont à priori les plus intenses et donc soulèvent en principe le plus de particules. Pour chaque configuration, la valeur moyenne des essais de répétabilité est calculée pour les grandeurs PM10_{max}, ξ et PM10_{moyen} (définies à la Figure 5-27, page 111). La valeur minimale et maximale sont aussi considérées. L'écart moyen pour chaque configuration est donné par l'Eq. (8.1) :

$$\text{écart_moyen}(\%) = \frac{\text{Valeur}_{\text{max}} - \text{Valeur}_{\text{min}}}{\text{Valeur}_{\text{moyenne}}} \times 100 \quad (8.1)$$

La Figure 8-1 présente les résultats des essais de répétabilité.

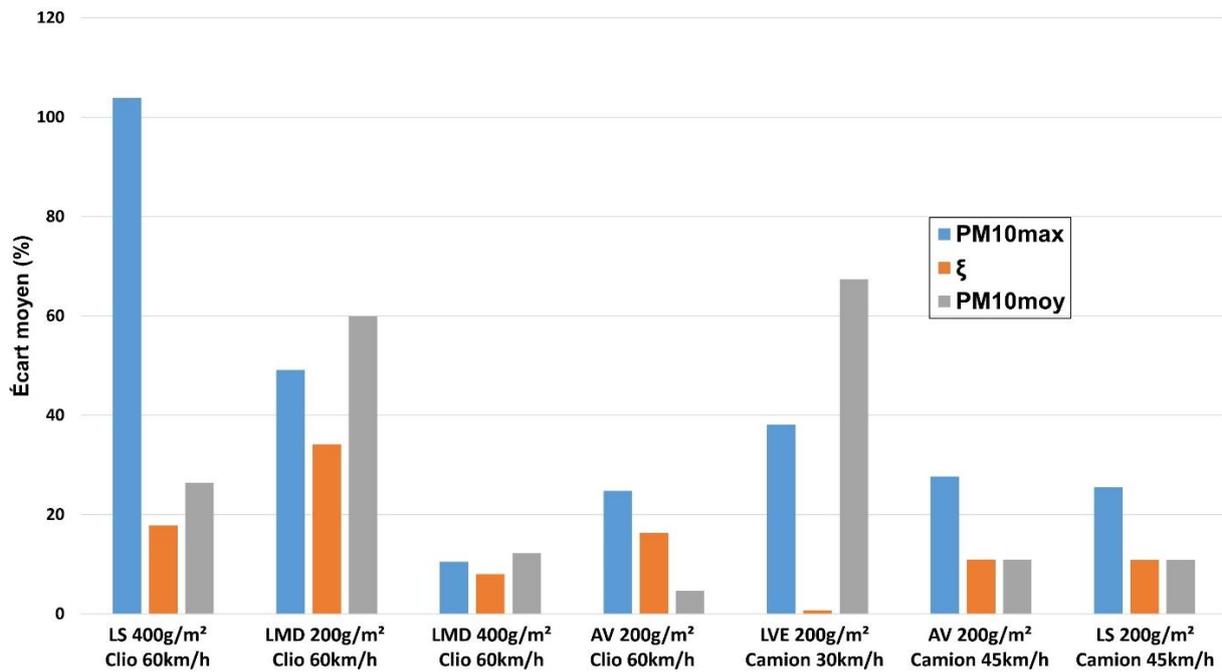


Figure 8-1 : Écarts moyens des essais de répétabilité

En considérant l'ensemble des essais de répétabilité, l'écart moyen global est de 40% pour PM10_{max}, 14% pour ξ et 27% pour PM10_{moyen}. Les écarts importants observés pour les pics de concentration sont dus à la très forte dépendance de ce paramètre à la cinématique d'aspiration des particules. En effet, leur distribution dans un panache de poussière est chaotique et il peut y en avoir plus ou moins à arriver en même temps dans le compteur de particules. Ainsi, pour un même nuage de particules, le pic de concentration peut varier significativement en fonction de la localisation de l'aspiration. Il est donc plus pertinent de s'intéresser à l'évolution de la quantité de particules aspirées en fonction du temps. À ce titre, le paramètre ξ , qui correspond à l'aire sous la courbe d'évolution de la concentration en fonction du temps, apparaît comme étant le plus approprié pour caractériser le nuage de poussière généré. C'est d'ailleurs le paramètre qui présente la meilleure répétabilité.

Afin de vérifier si ces écarts ne sont pas dus à l'évolution des conditions météorologiques, on trace l'évolution de ξ en fonction de l'humidité relative de l'air sur la Figure 8-2. Sur cette Figure, les traits tracés entre deux points expérimentaux servent uniquement à identifier la répétition d'une configuration.

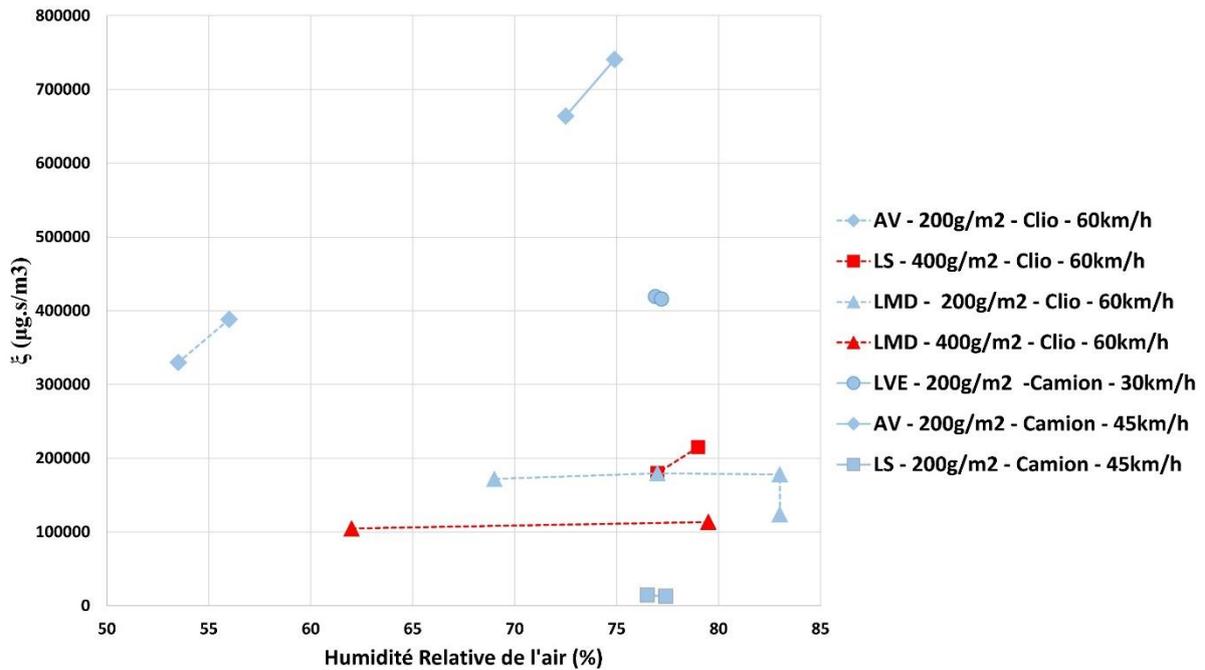


Figure 8-2 : Évolution pour les essais de répétabilité du coefficient d'émission ξ en fonction de l'humidité relative de l'air

Les essais de répétabilité avec la Clio sur le Limon Marche les Dames à 400 g.m^{-2} (triangles rouges sur la Figure 8-2) ont été réalisés avec une variation d'humidité relative importante (entre 62% et 79,5%) qui n'a entraîné qu'un faible écart sur ξ (8%). De même, les essais avec ce matériau à 200 g.m^{-2} (triangles bleus sur la Figure 8-2) montrent qu'une augmentation de l'humidité relative a entraîné pour un cas une faible augmentation de ξ et pour un autre une diminution. L'humidité relative n'apparaît donc pas comme étant un paramètre d'influence sur l'envol des particules directement derrière le pneu dans le cadre de nos essais. En effet, la circulation du véhicule avait lieu quelques minutes après le dépôt des particules sèches au sol. Les échanges hydriques n'ont donc pas eu le temps d'avoir lieu entre celles-ci et l'atmosphère. Pour mettre en évidence un effet de l'humidité, il aurait fallu laisser reposer les particules au sol jusqu'à atteindre l'équilibre atmosphérique, ce qui nécessite d'attendre quelques heures pour les sables et quelques jours pour les argiles (Ravi et al., 2006).

Pour ce qui est des autres paramètres météorologiques, on a obtenu lors de nos essais une forte corrélation inverse de l'humidité relative avec la puissance du rayonnement solaire ($R^2=-0,43$) et avec la température de l'air ($R^2=-0,93$). Ainsi, tout comme l'humidité relative, ces deux paramètres météo n'ont ici pas d'influence sur les émissions mesurées derrière le pneu. En ce qui concerne le vent, celui-ci n'a pas de répercussion directement derrière le pneu des véhicules. En effet, il a été observé visuellement que l'effet du vent apparaît plusieurs secondes après la mise en suspension des particules lorsque celles-ci ont atteint une certaine hauteur (supérieure à 1 mètre). En deçà de cette hauteur, ce sont les phénomènes aérodynamiques liés au sillage des véhicules qui brassent les particules, en particulier dans les tourbillons contrarotatifs visibles à la Figure 5-19-b, page 102.

Dans la suite de ce document, les résultats sont présentés avec des barres d'erreur qui tiennent compte des écarts moyens définis plus haut.

8.1.2 Coefficients d'émission des véhicules légers

Par souci de concision, nous concentrons l'analyse sur le paramètre ayant la meilleure répétabilité, à savoir le coefficient d'émission ξ . La Figure 8-3 montre son évolution en fonction de la vitesse du véhicule et de la concentration en particules au sol pour les essais avec la Clio III. Globalement, il apparaît qu'une augmentation de la vitesse entraîne une augmentation de ξ . Pour une même masse de particules par unité de surface, le doublement de la vitesse de la Clio III (de 30 à 60 km.h⁻¹) conduit à une multiplication du coefficient d'émission par un facteur allant de 1,5 (pour l'argile verte à 400 g.m⁻², Figure 8-3-a) à 5,7 (pour le limon de Strasbourg à 200 g.m⁻², Figure 8-3-c).

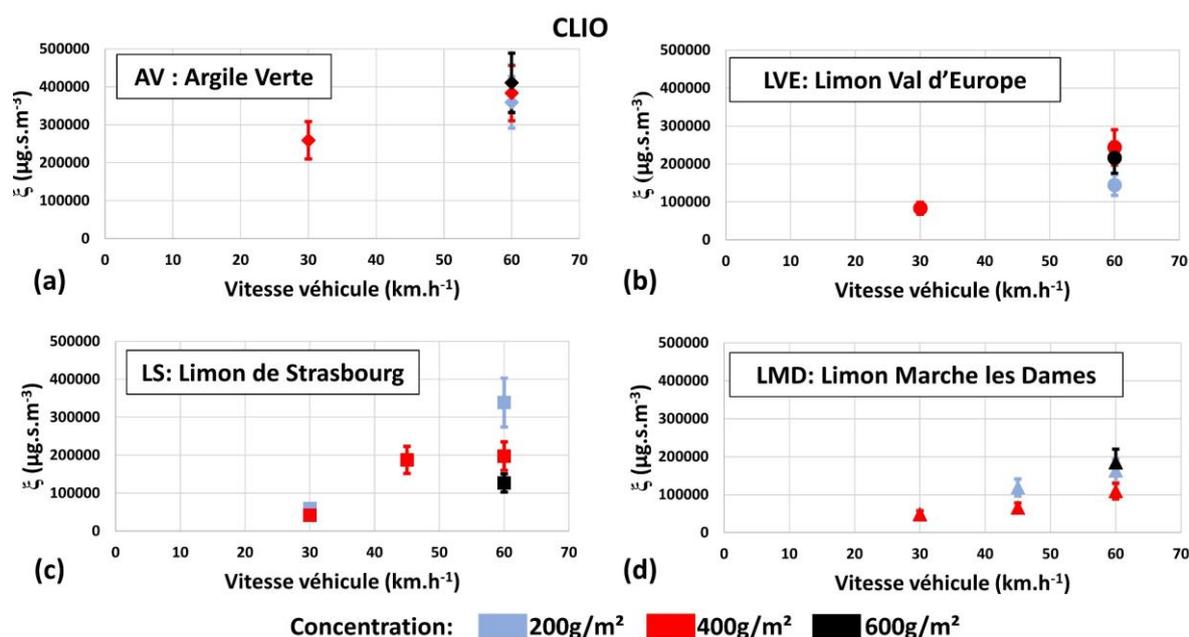


Figure 8-3 : Coefficients d'émissions des essais avec la Clio III sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames

Pour une même vitesse du véhicule, on observe qu'une augmentation de la concentration des particules au sol peut entraîner une diminution du coefficient d'émission. En effet, ce phénomène s'observe pour les essais à 60 km.h⁻¹ sur le limon Val d'Europe (Figure 8-3-b), pour les essais à 30 km.h⁻¹ et 60 km.h⁻¹ sur le limon de Strasbourg (Figure 8-3-c) et pour les essais à 45 km.h⁻¹ et 60 km.h⁻¹ sur le limon de Marche les Dames (Figure 8-3-d). Ce phénomène ne peut pas s'expliquer par les conditions météorologiques car elles n'ont pas d'effet sur les mesures embarquées comme indiqué dans la section précédente. Afin de vérifier si ce phénomène n'est pas dû à l'effort longitudinal F_x et au moment vertical M_y qui s'exercent sur le pneu au moment où il circule sur les particules, une Analyse en Composantes Principales (ACP) intégrant ces deux paramètres a été réalisée (Figure 8-4). Cette méthode d'analyse des données crée deux variables F1 et F2, appelées « composantes principales », qui sont décorrélatées l'une de l'autre. Elles forment deux axes permettant de définir le plan qui maximise la dispersion des données expérimentales afin de visualiser au mieux le nuage des résultats. Il est possible de tracer plusieurs plans avec l'ACP mais il n'y en a qu'un seul sur la Figure 8-4 car il contient l'essentiel de l'information (93,11 %). Sur le cercle des corrélations (Figure 8-4-a), chaque variable expérimentale est représentée par un vecteur. Plus l'angle entre deux vecteurs est faible et plus les deux variables correspondantes sont corrélées l'une à l'autre. La longueur du vecteur indique la qualité de projection de la variable dans le plan (F1, F2). Ici, il apparaît que la variable « concentration » n'est pas bien projetée dans ce plan. Cela signifie qu'elle n'a que peu d'impact sur la répartition des résultats

expérimentaux dans l'espace des corrélations. En effet, les symboles d'une même couleur sont répartis de façon éparse sur la Figure 8-4-b.

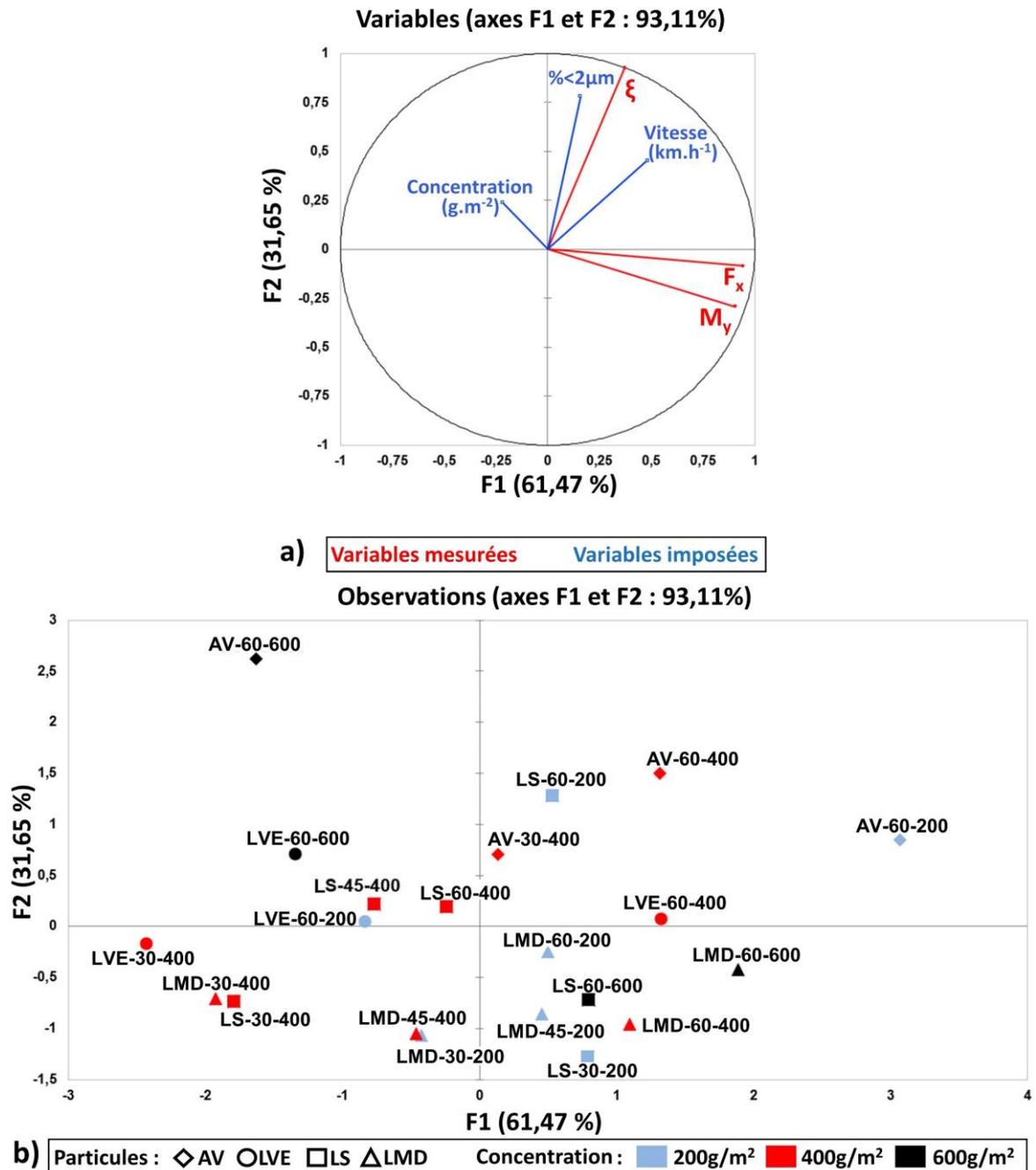


Figure 8-4 : Analyse en Composantes Principales des résultats des essais Clio embarqué. a) Cercle des corrélations des différentes variables et b) visualisation des essais dans l'espace des corrélations. Chaque essai est désigné par : Type de particules-vitesse véhicule-concentration

La Figure 8-4-a permet d'observer que le coefficient d'émission ξ est particulièrement corrélé avec le pourcentage de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ ($R^2=0,77$) et avec la vitesse du véhicule ($R^2=0,60$). Les variables F_x et M_y sont quant à elles fortement corrélées l'une à l'autre ($R^2=0,78$) car elles représentent le même phénomène physique. Leur corrélation n'est pas de 100% car du bruit apparaît dans les mesures de F_x en raison de conditions de roulement sans glissement. Le cercle des corrélations est tel que l'axe

des abscisses F_1 est fortement corrélé à F_x et M_y (corrélation de 94% et 91% respectivement) et l'axe F_2 est fortement corrélé à ξ (corrélation de 93%). Ainsi, l'analyse des observations sur ces deux axes (Figure 8-4-b) ne permet pas de conclure d'un effet des paramètres F_x et M_y sur le coefficient ξ pour des concentrations de 200 g.m^{-2} et 400 g.m^{-2} , les nuages des symboles bleus et rouges étant trop dispersés. Gillies et al. (2005) ont montré que le nombre de pneus d'un véhicule influence peu les émissions de poussières de ce dernier, ce qui laisse à penser que le cisaillement mécanique généré par les roues est moins prépondérant que la turbulence de sillage. Cela peut expliquer l'absence de corrélation entre les émissions et les efforts mécaniques mesurés par la roue dynamométrique pour les concentrations les plus faibles de particules au sol. Pour la concentration la plus importante (600 g.m^{-2} , symboles noirs sur la Figure 8-4-b), une tendance à la diminution de ξ apparaît lorsque F_x et M_y augmentent. Il s'agit sans doute d'un phénomène d'agrégation des particules entre elles causé par le pneu. En effet, le pneu compacte le lit de particules lorsqu'il roule dessus, ce qui forme des agrégats qui sont ensuite arrachés par la force de cisaillement (Sediki, 2018). Plus les efforts de cisaillement sont importants, plus ces agrégats sont nombreux. Beaucoup d'entre eux ont des tailles supérieures à $10 \mu\text{m}$ et ne sont donc pas mesurés par le granulomètre optique. Cela pourrait expliquer la diminution du paramètre ξ qui ne tient compte que des PM_{10} . Ce mécanisme semblerait apparaître lorsque la quantité de particules au sol est grande et il est particulièrement marqué pour les particules de tailles plus grossières (Limon de Strasbourg et Limon Marche les Dames). Ce phénomène d'agrégation a préalablement été mis en évidence lors de la dégradation des sols (Le Vern et al., 2020b). Une analyse de la granulométrie complète des particules aspirées par le compteur optique permettrait sans doute d'analyser plus précisément ce phénomène. Cependant, le seuil maximal de détection de l'appareil est de $26 \mu\text{m}$, ce qui ne permet pas de mettre en évidence le phénomène d'agrégation qui impliquerait la formation d'agglomérats de particules de plusieurs dizaines à centaines de μm de diamètre.

La Figure 8-5 présente les coefficients d'émission en fonction de la vitesse du véhicule et de la concentration en particules pour les essais avec le 4x4 Ford Ranger.

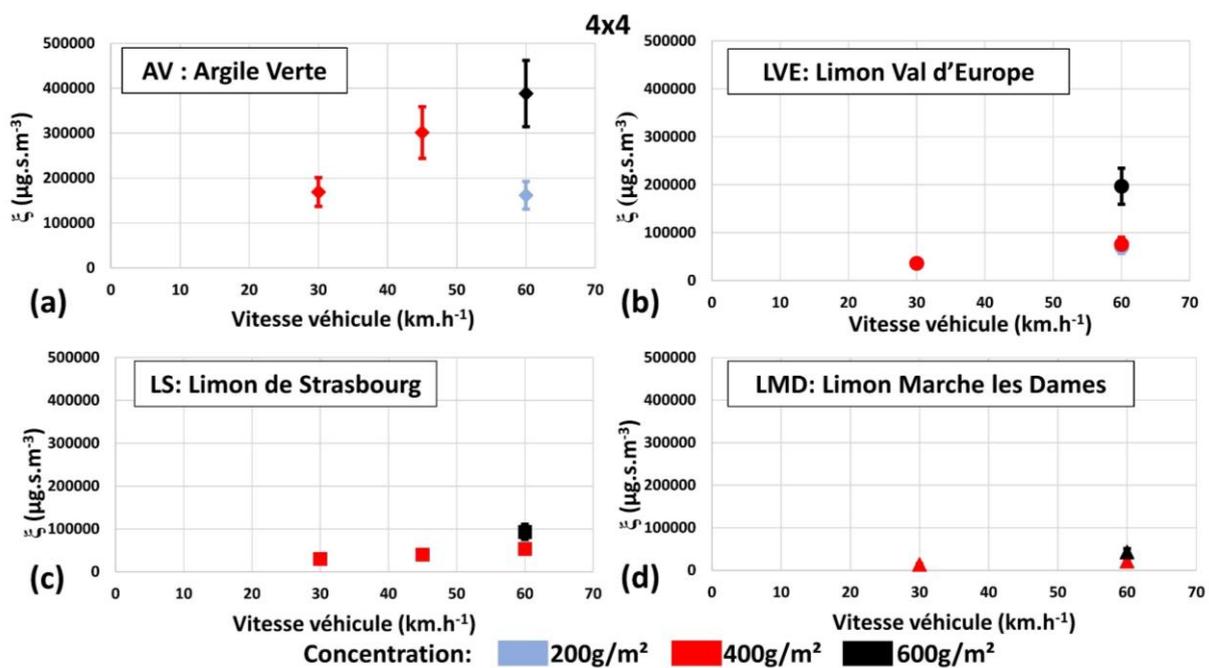


Figure 8-5 : Coefficients d'émissions des essais avec le 4x4 sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames

En comparant les Figures 8-4 et 8-5, on remarque que les ordres de grandeurs des émissions sont plus faibles pour les essais avec le 4x4 par rapport à ceux réalisés avec la Clio. Le 4x4 étant plus massif, on aurait pu s'attendre en théorie à une génération plus importante de particules. Or ce n'est pas le cas. L'explication pourrait provenir de la présence de bavettes semi-rigides derrière les pneus du 4x4 (visibles sur la Figure 5-18-d, page 100) alors que la Clio n'en possédait pas. Afin de quantifier la différence des émissions de poussières entre les deux véhicules, la Figure 8-6 présente les écarts des coefficients ξ obtenus entre les essais avec la Clio et ceux avec le 4x4. Ces écarts sont calculés à l'aide de l'Eq. (8.1). On remarque que l'écart moyen entre les émissions de ces deux véhicules est d'autant plus important que la teneur en argile des particules est faible. L'effet des bavettes semble ainsi être plus marqué pour les particules grossières que pour les particules très fines. Pour confirmer ce phénomène, il serait nécessaire de réaliser les essais avec un même véhicule avec et sans bavettes. L'écart d'émission entre les deux véhicules augmente également avec la vitesse.

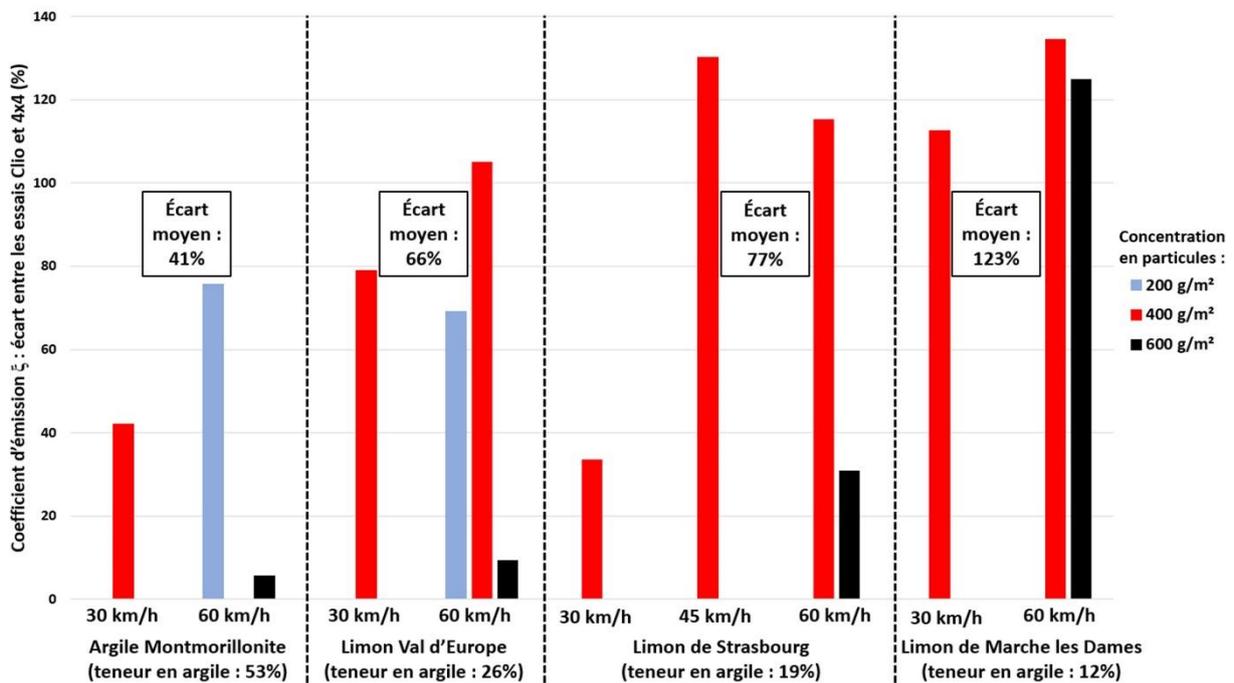


Figure 8-6 : Écarts des coefficients d'émissions entre les essais avec la Clio III et ceux avec le 4x4. Les écarts sont calculés à l'aide de l'Eq. (8.1).

D'une manière générale, les Figures 8-3 et 8-5 montrent des émissions de poussières différentes en fonction du type de particule. Or, les particules utilisées dans l'étude ont des pourcentages de passant à 80 μm proches (entre 95% et 100%). Il est donc mis en évidence que ce paramètre, bien qu'il soit souvent utilisé dans la littérature, n'est pas suffisant pour caractériser l'envol des poussières lié à la circulation des véhicules. Les Figures 8-4 et 8-6 permettent d'envisager que la teneur en argile (passant à 2 μm) des particules est un paramètre plus pertinent pour quantifier leur envol.

8.1.3 Coefficients d'émission du camion 8x4

La Figure 8-7 présente les coefficients d'émission en fonction de la vitesse et de la concentration en particules pour les essais avec le camion Volvo FMX 8x4. On notera que l'échelle verticale est deux fois plus grande que pour les Figures 8-3 et 8-5.

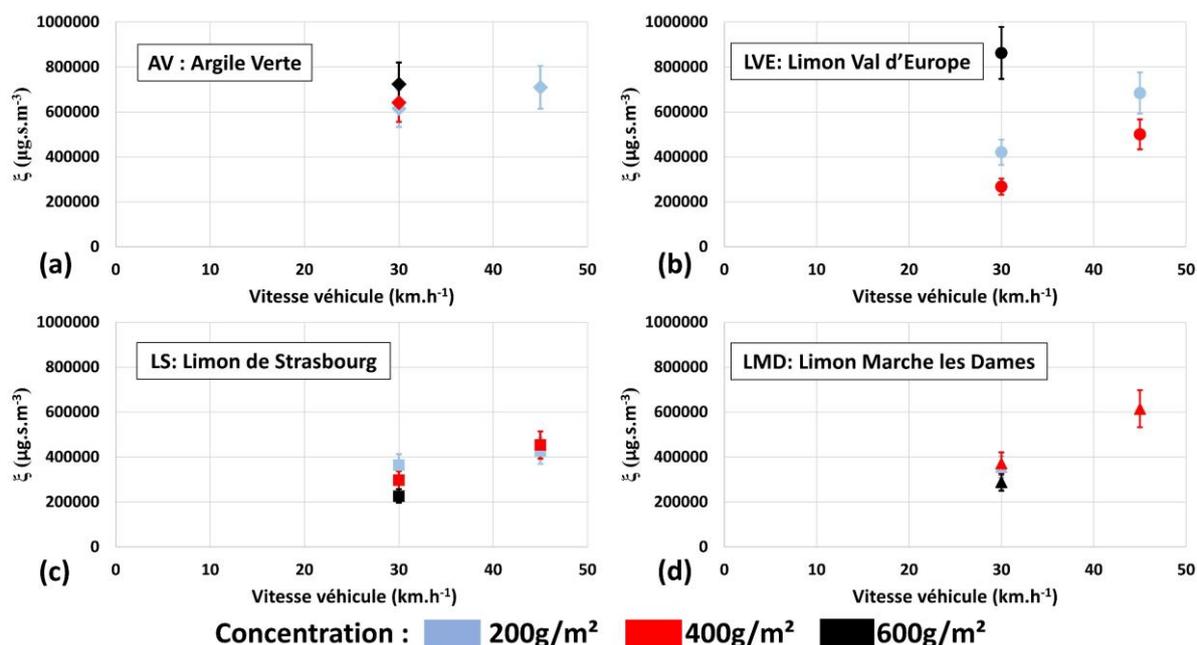


Figure 8-7 : Coefficients d'émissions des essais avec le camion 8x4 sur les particules de (a) Argile Verte, (b) Limon Val d'Europe, (c) Limon de Strasbourg et (d) Limon Marche les Dames

Pour les sols à forte teneur en argile (AV et LVE, Figures 8-7-a et 8-7-b), les coefficients d'émission du camion sont entre 2 et 4 fois plus élevés que ceux de la Clio et entre 4 et 8 fois plus élevés que ceux du 4x4. Pour les sols plus grossiers (LS et LMD, Figures 8-7-c et 8-7-d), les écarts entre les émissions du camion et ceux des véhicules légers sont encore plus importants. En effet, la circulation du camion sur ces particules entraîne un coefficient d'émission 7 à 10 fois plus élevé que pour la Clio et 10 à 28 fois plus élevé que pour le 4x4. Le cisaillement généré par les pneus de la Clio et du 4x4 est suffisant pour mettre en suspension la plupart des particules des sols AV et LVE qui sont très fines. En revanche, les sols LS et LMD ont une part plus importante de particules grossières qui peuvent servir de « protection » aux particules fines (Chepil, 1950a). Le cisaillement généré par les pneus des véhicules légers n'est pas suffisant pour soulever ces particules grossières. Elles peuvent par contre être mises en suspension par les pneus du camion car ils génèrent des efforts bien plus importants. En effet, ce dernier est entre 10 et 30 fois plus massif que le 4x4 et la Clio. Cela pourrait expliquer les faibles écarts d'émission du camion par rapport aux véhicules légers observés pour les sols fins et les écarts plus importants observés pour les sols grossiers. Ce phénomène a également été mis en évidence dans les travaux de Moösmuller et al. (2005).

8.1.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons étudié les envols de poussières directement derrière les pneus d'une Renault Clio III, d'un 4x4 Ford Ranger et d'un camion Volvo FMX 8x4. Quatre types de particules (Argile Verte, Limon Val d'Europe, Limon de Strasbourg et Limon de Marche les Dames) ont été déposées sur une chaussée à différentes concentrations (200 g.m⁻², 400 g.m⁻² et 600 g.m⁻²). Les véhicules ont circulé sur les lits de particules à différentes vitesses (30, 45 et 60 km.h⁻¹) et les concentrations de poussières mises en suspension étaient mesurées directement derrière le véhicule. Les conditions météorologiques étaient mesurées en temps réel sur le bas-côté de la chaussée.

Les résultats de l'étude permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Pour quantifier l'envol des particules, il n'est pas pertinent de ne considérer que leur teneur en limon (passant à 80 µm). En effet, les particules d'étude ont ici la même teneur en limon mais génèrent des émissions de poussières très différentes. Leur teneur en argile (passant à 2 µm) semble être un paramètre plus approprié ;
- De même, bien que ce soit souvent la seule donnée retenue dans la littérature, le seul poids du véhicule en circulation n'est pas un critère suffisant pour caractériser sa propension à émettre des poussières. Il ressort de notre étude que l'impact d'accessoires tels que des bavettes mises derrière les pneus est significatif. L'aérodynamique des véhicules est également un critère pertinent à prendre en compte ;
- L'effet de la vitesse du véhicule sur l'envol des poussières n'est pas un phénomène linéaire. En effet, un doublement de la vitesse peut entraîner une multiplication du coefficient d'émission par un facteur 5,7. L'effet de la vitesse dépend du type de véhicule et du type de particules ;
- Les résultats laissent envisager l'apparition d'un phénomène d'agrégation des particules par le pneu qui semble être d'autant plus marqué que la concentration en particules au sol est importante. Ce phénomène se caractériserait par la mise en suspension de particules plus grossières qui sont de taille supérieure à 10 µm. Une mesure de la granulométrie de l'intégralité des aérosols en suspension serait nécessaire pour valider cette hypothèse ;
- Les écarts entre les coefficients d'émission du camion et ceux des véhicules légers sont beaucoup plus élevés pour les sols grossiers que pour les sols fins. Cela est dû à la masse importante du camion qui génère un fort cisaillement au niveau des pneus ayant la capacité de mettre en suspension des particules plus grossières.

Cette étude est complétée par des mesures sur le bas-côté qui permettent d'estimer les facteurs d'émission des véhicules et de quantifier l'atténuation de visibilité qu'ils génèrent. La section suivante présente les résultats associés à ces mesures.

8.2 Évaluation des émissions de poussières sur le bas-côté de la route

Cette section présente les résultats des mesures sur le bas-côté de la route réalisées durant les mêmes campagnes expérimentales détaillées précédemment. L'objectif est d'établir les facteurs d'émission des véhicules (masse de poussière mise en suspension en fonction de la distance parcourue, $g.vkt^{-1}$ « grams per vehicle kilometer travelled ») en fonction de l'état de dégradation de la piste de circulation. Il s'agit également d'analyser le risque induit par les panaches de poussières vis-à-vis de la sécurité des véhicules. En mesurant la concentration des particules sur le bord de la route et l'atténuation de visibilité correspondante, un modèle reliant ces deux paramètres est établi. La discussion est menée dans le but d'optimiser la gestion du risque par arrosage des pistes sur les chantiers de terrassement. Ces travaux ont fait l'objet de la soumission d'un article (Le Vern et al., 2021c).

8.2.1 Facteurs d'émission

La Figure 8-8 présente les facteurs d'émission (Eq. (5.13), page 112) pour les expériences avec la Clio III et le 4x4 Ford Ranger sur les particules de Limon Val d'Europe.

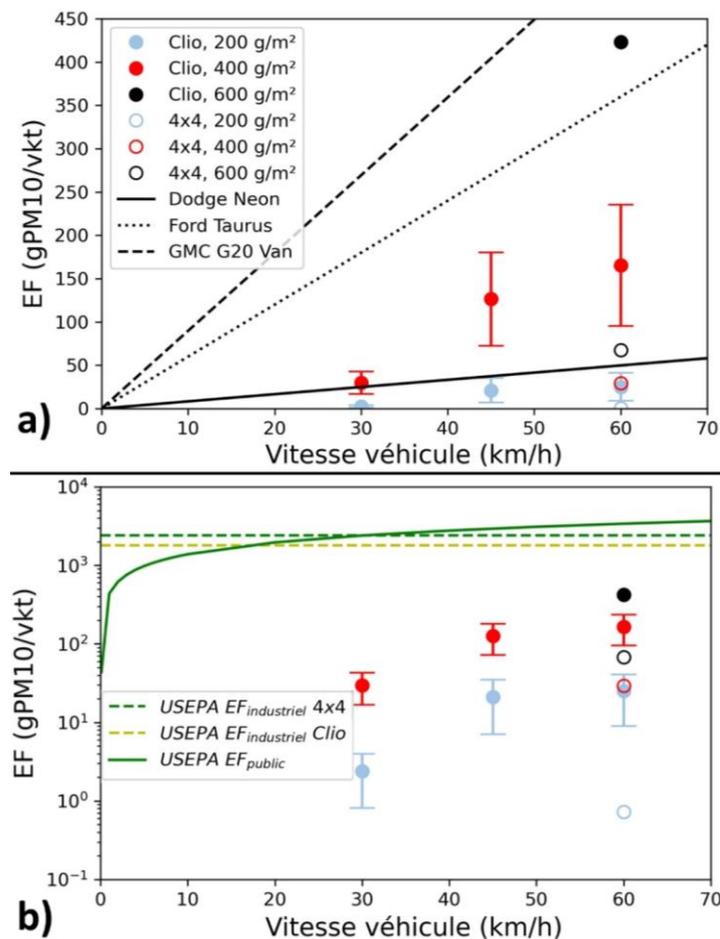


Figure 8-8 : Facteurs d'émission en fonction de la vitesse du véhicule et de la masse de particules par unité de surface pour les essais avec Clio et 4x4 Ford Ranger. a) Données expérimentales comparées avec celles de Gillies et al. (2005) obtenues avec une Dodge Neon (ligne pleine), un Ford Taurus (line pointillée) et un Van GMC C20 (ligne en tirets) ; b) Même résultats tracés en échelle semi-logarithmique and comparés avec les modèles de l'USEPA (Eq. (1.8) : lignes pointillées, Eq. (1.9) : ligne pleine).

Dans la Figure 8-8-a, les résultats sont comparés à ceux de Gillies et al. (2005) obtenus avec une Dodge Neon (masse : 1 176 kg), une Ford Taurus (masse : 1 516 kg) et une camionnette GMC G20 (masse : 3 100 kg). Il convient de noter que les courbes de Gillies et al. (2005) ont été obtenues à partir d'essais avec 9 vitesses de véhicule (16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72 et 81 km.h⁻¹). Ils ont montré que les facteurs d'émission étaient corrélés linéairement avec la vitesse du véhicule et que la pente de chaque courbe dépendait de la masse du véhicule. Selon ces critères, les facteurs d'émission attendus pour le 4x4 Ford Ranger (pesant 2 300 kg) auraient dû se situer entre la ligne en pointillés et la ligne en tirets sur la Figure 8-8-a. Or, elles sont inférieures de 1 à 2 ordres de grandeur. Cette différence peut être due à la présence de bavettes derrière les pneus du 4x4, qui pourraient réduire considérablement les émissions. Le même constat avait été établi à partir des mesures réalisées directement derrière les pneus du véhicule (voir section 8.1.2). Pour confirmation, il serait nécessaire de réaliser les tests avec le même véhicule avec et sans bavettes. La Clio a à peu près la même masse que la Dodge Neon et induit des facteurs d'émission du même ordre de grandeur pour la plus faible quantité de particules au sol (200 g.m⁻²) quelle que soit la vitesse du véhicule. En effet, la différence moyenne n'est que de 17 g.vkt⁻¹ entre la ligne noire pleine "Dodge Neon" et les points bleus de la Figure 8-8-a. Les expériences menées avec la Clio montrent qu'un doublement de la dégradation de surface de 200 à 400 g.m⁻² entraîne une multiplication par 7 (en moyenne) du facteur d'émission. Le triplement de la dégradation de 200 à 600 g.m⁻² entraîne sa multiplication par 18. Ces résultats montrent qu'il est crucial de prendre en compte l'état de surface d'une route non revêtue afin de quantifier sa propension à générer de la poussière. À ce jour, cet aspect n'est pas pris en compte dans les modèles existants. La Figure 8-8-b montre que l'utilisation des modèles de l'USEPA (Eq. (1.8) et (1.9), page 14) donne des facteurs d'émission compris entre 1 800 et 3 400 gPM₁₀.vkt⁻¹, ce qui est supérieur de plus d'un ordre de grandeur aux résultats expérimentaux de la présente étude. Ces modèles ont été développés à partir d'expériences sur des sols ayant une faible teneur en limon, alors qu'elle est élevée pour les particules que nous avons utilisées (plus de 95%). Ceci peut expliquer ces grandes différences. Il convient de noter que le modèle de l'USEPA pour les routes publiques (Eq. (1.9)) ne tient pas compte de la masse du véhicule et donne donc la même estimation des émissions de poussière pour le 4x4 et la Clio (courbe verte pleine dans la Figure 8-8-b).

La Figure 8-9 présente les facteurs d'émission pour les expériences avec le camion Volvo 8x4. Les résultats sont comparés à ceux de Gillies et al. (2005) obtenus avec un camion cargo M977 HEMTT de l'armée américaine ayant le même nombre de roues que notre camion mais une masse environ deux fois plus faible (17 727 kg contre 32 000 kg). A notre connaissance, aucune donnée n'est disponible dans la littérature sur les facteurs d'émission de poussières de camions ayant la même masse que celui utilisé dans la présente étude. Les résultats sont également comparés avec le modèle USEPA pour les routes publiques (Eq. (1.9)). Le modèle pour les routes industrielles (mines, carrières, Eq. (1.8)) n'est pas présenté dans les Figures. En effet, il donne des facteurs d'émission beaucoup trop élevés (environ 8 000 gPM₁₀.vkt⁻¹, quelle que soit la vitesse du camion) qui nécessiteraient de modifier l'échelle des Figures et donc d'amoindrir la visualisation des données.

Dans les essais présentés ici, toutes les particules ont environ la même teneur en limon (entre 95 et 100%). Par conséquent, le modèle USEPA (courbes vertes dans la Figure 8-9) donne des facteurs d'émission similaires pour chacune d'entre elles. Cependant, nos mesures montrent des divergences d'un type de particules à l'autre. Cela souligne que la teneur en limon n'est pas un paramètre suffisant pour évaluer la propension d'un sol à générer des poussières. Comme pour la Clio et le 4x4, les résultats avec le camion montrent également que l'état de dégradation du sol (masse de particules par unité de surface au-dessus du sol) influence fortement l'émission des poussières.

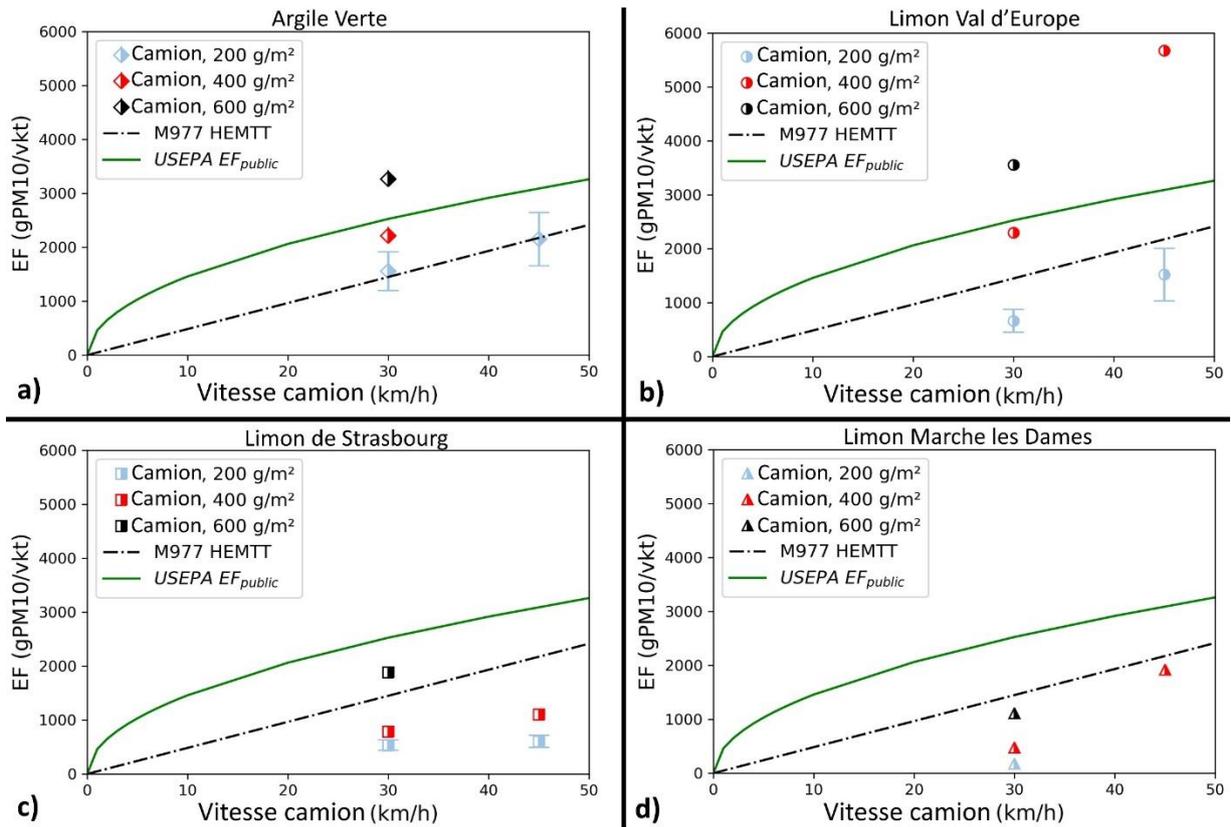


Figure 8-9 : Facteurs d'émission en fonction de la vitesse du camion Volvo FMX et de la masse de particules par unité de surface pour les essais sur a) Argile Verte, b) Limon Val d'Europe, c) Limon de Strasbourg et d) Limon Marche les Dames. Les résultats expérimentaux sont comparés avec ceux de Gillies et al. (2005) obtenus avec un camion M977 HEMTT (ligne brisée) et avec le modèle USEPA pour les routes publiques (Eq. (1.9), ligne verte).

Sur la base de ces résultats expérimentaux et des différentes observations, un modèle est développé pour quantifier les facteurs d'émission. La première étape consiste à identifier les paramètres les plus pertinents qui doivent être pris en compte. Il est bien établi dans la littérature (Gillies et al., 2005 ; Kuhns et al., 2010) que les facteurs d'émission sont linéairement proportionnels à la quantité de mouvement du véhicule (produit de la masse et de la vitesse). C'est également le cas pour notre étude. Les données expérimentales montrent que la prise en compte de l'état de dégradation du sol est également primordiale. De plus, le type de particules doit être considéré. Pour les données expérimentales obtenues avec le camion, la teneur en limon n'est pas un paramètre pertinent pour différencier les particules. En revanche, les quatre sols peuvent être distingués à travers leur teneur en argile ($\% < 2\mu\text{m}$). Enfin, les essais avec le 4x4 montrent que l'effet des bavettes derrière les pneus est également important. La présence de tels accessoires est prise en compte à l'aide d'un facteur de pondération. Sur la base d'une forme d'équation similaire à celles des modèles de l'USEPA (Eq. (1.8) et (1.9)), le modèle suivant est proposé (Eq. (8.2)) :

$$EF_{model} = x_1 \times p \times \left(\frac{a}{a_{ref}}\right)^{x_2} \times \left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^{x_3} \times f_b \quad (8.2)$$

où EF_{model} est exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ afin d'homogénéiser les unités dans l'équation (à multiplier par 10^6 pour l'exprimer en $\text{g}\cdot\text{vkt}^{-1}$), p est la quantité de mouvement du véhicule ($p = V_{véhicule} \times M$, en $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), a est la teneur en argile ($\% < 2\mu\text{m}$) des particules, a_{ref} est une teneur en argile de référence (prise

arbitrairement égale à 12%, ce qui correspond à la valeur minimale pour les particules utilisées dans la présente étude), D est la dégradation de surface du sol (masse de particules par unité de surface exprimée ici en kg.m^{-2}), D_{ref} est une dégradation de référence (prise arbitrairement égale à $0,2 \text{ kg.m}^{-2}$, la valeur minimale étudiée ici) et f_b est un facteur de pondération prenant en compte l'effet des bavettes derrière les pneus. Les coefficients x_1 , x_2 et x_3 sont des paramètres empiriques.

En réalisant une régression multiple avec un intervalle de confiance de 95 % sur les données expérimentales obtenues avec la Clio et le camion, les coefficients x_1 , x_2 et x_3 peuvent être déterminés. Le paramètre f_b est obtenu par corrélation des données expérimentales du 4x4 avec le modèle préalablement établi. Le modèle final est de la forme (Eq. (8.3)) :

$$EF_{model} = 7,6.10^{-10} \times p \times \left(\frac{a}{12}\right)^{1,05} \times \left(\frac{D}{0,2}\right)^{1,71} \times f_b \text{ avec } \begin{cases} f_b = 1 \text{ sans bavettes} \\ f_b = 0,15 \text{ avec bavettes} \end{cases} \quad (8.3)$$

Ce modèle montre que l'état de dégradation de la surface est le paramètre le plus influent sur les facteurs d'émission. La présence de bavettes derrière les pneus est modélisée comme pouvant entraîner une division par 7 des émissions de poussières. De futurs travaux seraient nécessaires pour valider cette observation et généraliser ce résultat pour tout type de véhicule.

La Figure 8-10 présente la comparaison entre les facteurs d'émission déterminés à partir des expériences et ceux calculés avec le modèle de l'Eq. (8.3). Dans l'ensemble, on constate une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales jusqu'à des valeurs de $3000 \text{ gPM}_{10}.\text{vkt}^{-1}$. Au-delà, le modèle tend à être moins précis dans la quantification des émissions, les différences entre la prédiction et les mesures pouvant aller jusqu'à un facteur 2. Cependant, il s'agit d'émissions de poussières très élevées induites par le camion qui ne sont raisonnablement pas réalistes sur les chantiers de construction. En effet, de l'eau sera déversée sur les pistes de circulation bien avant d'atteindre de telles émissions car elles sont associées à la formation de panaches de poussières opaques qui génèrent d'importantes réductions de visibilité.

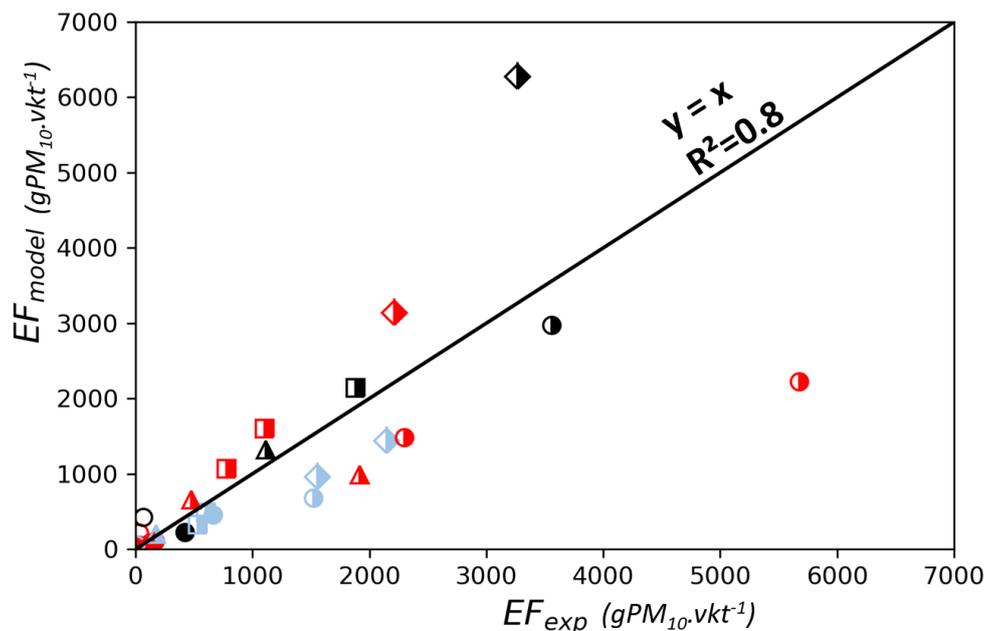


Figure 8-10 : Comparaison entre les données expérimentales et le modèle de l'Eq. (8.3). Les symboles sont les mêmes que sur les Figures 8-8 et 8-9.

8.2.2 Atténuation de visibilité

De nombreuses études ont établi un lien entre la concentration massique en PM_{10} et la réduction de visibilité (D’Almeida, 1986 ; Dayan et al., 2008 ; Jugder et al., 2014 ; Baddock et al., 2014 ; Camino et al., 2015). Les modèles qui ont été développés ont été présentés au Tableau 1-5 de la section 1.3.3 (page 19). Dans ces travaux, les sources d’émission des poussières étaient des déserts. Il est également reconnu que la concentration en PM_{10} peut être un bon indicateur de l’atténuation de visibilité sur les routes non-revêtues (Edvarsson et Magnusson, 2009). La Figure 8-11 montre la comparaison entre les modèles présentés dans le Tableau 1-5 et les mesures expérimentales de la présente étude. Pour ces dernières, la concentration en PM_{10} correspond à la valeur moyenne mesurée sur le bas-côté entre le début et la fin du pic de concentration des poussières générées par le passage du véhicule (Eq. (8.4)). La visibilité est moyennée sur la même période de temps.

$$\overline{PM_{10}} = \frac{1}{N} \sum_{\text{fin du pic}}^{\text{début du pic}} PM_{10} \quad (8.4)$$

où PM_{10} est la concentration en PM_{10} mesurée chaque seconde par le compteur optique de particule et corrigée à l’aide de l’Eq. (5.13), définie page 110, et N est le nombre de concentrations mesurées pendant que le nuage de poussières atteignait le capteur.

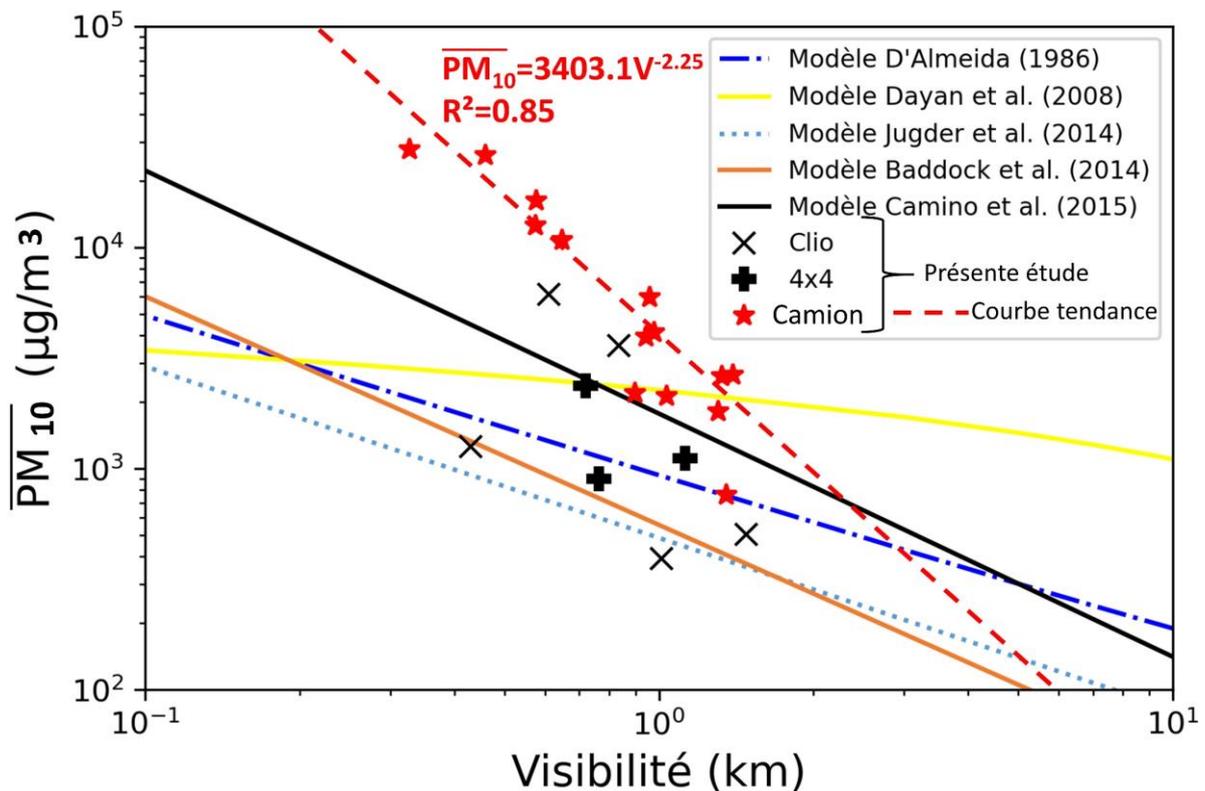


Figure 8-11 : Relation entre la visibilité moyenne et la concentration moyenne en PM_{10} sur le bas-côté de la route. Les données expérimentales sont comparées avec les modèles D’Almeida (1986), Dayan et al. (2008), Jugder et al. (2014), Baddock et al. (2014) et Camino et al. (2015). Ces modèles sont détaillés au Tableau 1-5.

Pour le même niveau de concentration en PM_{10} , il apparaît que les émissions de la Clio et du 4x4 ont tendance à réduire la visibilité de manière plus significative que le camion. En effet, le camion génère plus de cisaillement et donc émet des particules plus grossières qui ont une efficacité de diffusion par unité de masse plus faible par rapport aux petites particules (Moosmüller et al., 2005). Il apparaît ici que la concentration en PM_{10} n'est pas le meilleur indicateur de l'altération de la visibilité induite par les véhicules légers (Clio et 4x4). En effet, les données expérimentales sont très dispersées pour ces deux véhicules. En revanche, la loi de puissance donnée par l'Eq. (8.5) semble être une bonne représentation des données expérimentales associées au camion ($R^2=0.85$) :

$$\overline{PM_{10}} = 3403.V_i^{-2.25} \quad (14)$$

En comparant ce modèle avec les autres (Figure 8-11), on remarque que sa courbe de tendance a une pente plus importante. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il a été développé à partir de mesures simultanées de poussière et de visibilité au même endroit, ce qui n'est pas le cas des autres modèles qui ont abordé la question à l'échelle régionale. Le modèle développé devrait donc être plus pertinent pour considérer les atténuations de visibilité sur les chantiers de construction en tenant compte du fait qu'elles sont très localisées sur les pistes où circulent les camions.

8.2.3 Conclusion

Les principaux résultats des mesures sur le bas-côté de la route montrent que :

- L'état de dégradation de la surface du sol semble avoir une influence déterminante sur le facteur d'émission de poussières. Le doublement de la masse de particules par unité de surface au-dessus du sol entraîne des émissions de poussières induites par le véhicule plus de 3 fois supérieures. Cependant, ce paramètre n'est pas pris en compte dans les modèles classiques d'estimation des facteurs d'émission ;
- La teneur en limon ($\% < 80 \mu\text{m}$) ne doit pas être le seul paramètre considéré pour évaluer le soulèvement des particules. Pour les sols fins, le pourcentage de particules d'argile ($\% < 2 \mu\text{m}$) semble être de première importance pour quantifier leur propension à émettre des poussières ;
- La quantité de mouvement du véhicule n'est pas un critère suffisant pour caractériser sa propension à émettre des poussières. Il apparaît que l'impact d'accessoires tels que des bavettes derrière les pneus pourrait être significatif en réduisant les émissions d'un facteur 7 ;
- L'atténuation de la visibilité induite par les émissions de PM_{10} d'un camion peut être modélisée avec précision par une « loi puissance ». Ce n'est pas le cas pour les véhicules légers car ils soulèvent des particules plus fines qui ont une efficacité de diffusion par unité de masse plus élevée.

Finalement, les facteurs d'émission établis pourraient être implémentés dans des modèles de dispersion atmosphérique afin d'améliorer les connaissances sur les concentrations de poussière générées par les véhicules. Avec le modèle d'atténuation de la visibilité, il serait alors possible de quantifier les risques vis-à-vis de la sécurité sur les chantiers et d'anticiper l'arrosage des voies de circulation. Ces résultats s'inscrivent dans une démarche d'optimisation de l'utilisation de l'eau sur les chantiers de terrassement. Notamment, l'effet d'atténuation des poussières induit par les bavettes présente un intérêt particulier et devrait faire l'objet de recherches complémentaires. De nouvelles expériences en soufflerie permettraient de démontrer l'effet de ces accessoires sur l'écoulement de l'air dans le sillage des véhicules.

Conclusions et perspectives

Ces travaux de thèse ont été entrepris afin d'améliorer la compréhension des mécanismes et des conditions d'envol des poussières lié à la circulation des camions sur les chantiers de terrassement. L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence les quatre verrous scientifiques que cette étude se proposait de lever, à savoir :

1. Évaluer l'évolution de la dégradation et de la rugosité de surface d'un sol en fonction de sa mise en œuvre et des sollicitations qu'il subit ;
2. Étudier l'influence des paramètres précédents sur l'interaction sol/atmosphère et en particulier sur l'envol des particules présentes en surface ;
3. Caractériser le transport des poussières au cœur des écoulements générés dans le sillage des engins circulant sur les pistes ;
4. Mettre en évidence le mécanisme d'envol des poussières lié à la circulation d'un véhicule

Pour répondre au mieux aux différentes questions qui ont été soulevées, un protocole d'essais a été défini en tenant compte des avantages et des limites de chacun des dispositifs expérimentaux à disposition. Les différentes réflexions ont amené à diriger l'étude vers une analyse mécaniste-empirique avec couplage des deux approches « mécanique des sols / mécanique des fluides ». L'objectif qui a été établi fut de quantifier le phénomène d'envol des poussières sur les chantiers en s'appuyant sur les mécanismes fondamentaux qui régissent le soulèvement des particules et de compléter l'analyse par des mesures expérimentales. Pour ce faire, le choix a été fait d'étudier dans un premier temps le phénomène à l'échelle du laboratoire pour se diriger ensuite vers des mesures sur piste d'essais. Des mesures sur de véritables chantiers apparaissent comme incontournables et devront faire l'objet de futurs travaux.

L'étude des écoulements de couche limite, basée sur une analyse de l'interaction sol / atmosphère, a débouché sur la publication de deux articles (Le Vern et al., 2020a et 2020b). Ces études ont permis de caractériser les écoulements à proximité des sols compactés, phénomène non étudié jusqu'à présent. L'analyse de la déstructuration de surface des sols sous trafic s'est soldée par l'élaboration de modèles de quantification de l'accumulation de particules en surface ainsi que de l'évolution de la granulométrie de ces particules. L'évolution de la dégradation des sols a été peu abordée dans la littérature. Ces travaux représentent donc une nouveauté dans le domaine de l'étude des émissions de poussières et sont un premier pas dans la mise en place d'un modèle robuste de quantification de celles-ci. En particulier, il apparaît intéressant de poursuivre les essais de dégradation des sols en simulateur de trafic pour compléter la base de données établie et tendre vers une compréhension plus globale du phénomène. Le protocole expérimental pourrait faire l'objet d'une normalisation afin de mettre en place un nouvel essai géotechnique de caractérisation de la propension des sols à générer des poussières. L'une des perspectives serait d'étudier l'évolution de la dégradation de surface après son arrosage. En effet, celui-ci va entraîner la création d'une pellicule d'eau entre le pneu et les particules du sol, ce qui va modifier les propriétés de cisaillement à l'interface.

L'étude des écoulements générés dans le sillage des engins de chantier constitue également une partie importante de ces travaux de thèse. Ces essais, liant la mise en suspension des poussières aux caractéristiques turbulentes de sillage d'un camion 8x4 et d'un tombereau, ont permis d'aborder un aspect absent de la littérature à l'heure actuelle. En particulier, l'application de la méthode des quadrants sur les écoulements de sillage d'un véhicule apparaît comme relativement nouvelle. Cette thématique de recherche est particulièrement enthousiasmante car elle explore de nouveaux horizons scientifiques dans le domaine de l'émission de poussières des véhicules. Elle a amené à la soumission d'un article (Duran-Garcia, Le Vern et al., 2021). Les différentes configurations étudiées en soufflerie avec des maquettes se sont focalisées sur trois paramètres : le type de camion, sa vitesse et le remplissage ou non

de la benne. Les résultats ont permis de mettre en évidence des disparités importantes d'une configuration à l'autre. Ils laissent envisager que les écoulements dans le sillage d'un tombereau ont une capacité plus importante à maintenir en suspension les poussières que ceux dans le sillage d'un 8x4. De plus, la présence de matériaux dans la benne tend à améliorer l'aérodynamisme du camion, ce qui limite les turbulences dans son sillage et donc l'envol des particules. Il convient de noter que ces conclusions ne s'appuient que sur l'étude des écoulements. Un camion avec la benne pleine va être beaucoup plus massif et il arrachera donc avec ses pneus des quantités plus importantes de poussières du sol. L'étude des écoulements de sillage met en évidence des mécanismes intéressants et les perspectives pourraient être d'étudier l'effet de la forme du chargement dans la benne ou encore de la présence d'accessoires tels que des bavettes derrière les pneus. Il serait également intéressant de visualiser le transport des poussières dans les écoulements de sillage en plaçant des particules sur le plancher de la soufflerie ou en injectant juste derrière les pneus des maquettes.

Les essais de laboratoire ont permis de mettre en évidence dans un premier temps les mécanismes qui amènent des particules de sol, initialement liées entre elles au sein d'une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques. Il s'agissait dans un second temps de quantifier l'envol de ces aérosols à l'échelle 1. Pour ce faire, des essais de mise en suspension de particules par circulation de véhicules ont été réalisés sur piste d'essais. Ils ont amené à la soumission d'un article (Le Vern et al., 2021c). L'étude s'est focalisée sur la quantification des facteurs d'émission d'un véhicule de tourisme (Renault Clio III), d'un 4x4 (Ford Ranger) et d'un camion 8x4 (Volvo FMX). Les résultats ont permis d'affiner les modèles de l'USEPA en tenant compte de l'évolution de l'état de dégradation du sol. Le critère lié à la teneur en limon des particules, souvent utilisé dans la littérature sur l'envol des poussières, a été discuté. La présente analyse met en évidence la pertinence de tenir également compte de l'argilosité du sol. Un effet d'atténuation des poussières induit par la présence de bavettes derrière les pneus a été mis en évidence. Ce point présente un intérêt particulier et devrait faire l'objet de recherches complémentaires. Les émissions des véhicules ont été liées à l'atténuation de visibilité. Les facteurs d'émission établis pourraient être implémentés dans des modèles de dispersion atmosphérique afin d'avoir une connaissance spatiale des concentrations de poussière générées par les véhicules. Avec le modèle d'atténuation de la visibilité, il serait alors possible d'envisager les risques de sécurité sur les chantiers et d'anticiper l'arrosage des voies de circulation. Une perspective serait d'étudier plus en détail cette atténuation de visibilité afin d'établir un critère de sécurité.

Les résultats présentés dans ce document s'inscrivent dans une démarche d'optimisation de l'utilisation de l'eau sur les chantiers de terrassement. Dans le futur, ils devraient être condensés sous forme d'abaques et présentés dans un guide de recommandations pour la gestion des émissions de poussières à l'usage des professionnels.

Références

- AASHTO (1997) “The classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. AASHTO designation M145-91”, *Standards specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, Part I: Specification (18th edition)*
- Abu-Allaban, M., Gillies, J.A., Gertler, A.W., Clayton, R., Proffitt, D. (2003) “Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles”, *Atmospheric Environment* **37**(37):5283-5293, doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.05.005
- ADEME (2017) “Qualité de l’air et émissions polluantes des chantiers de BTP : Etat des connaissances et mesures d’atténuation dans le bâtiment et les travaux publics en faveur de la qualité de l’air.”, *Rapport*, 143 p.
- Adrian, R.J., Meinhart, C.D., Tomkins, C.D. (2000) “Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer”, *Journal of Fluid Mechanics*, **422**:1-54, doi: 10.1017/S0022112000001580
- Aguirre, C., Guo, Y., Ayrault, M. (2004) “Dispersion de particules solides en mouvement de saltation dans un écoulement turbulent”, *Comptes Rendus Mécanique* **332** :627-632, doi :10.1016/j.crme.2004.03.015
- AIPCR (2019) “Manuel Terrassement - Conception et réalisation d’ouvrages en terre – Infrastructures routières”, *Rapport de l’Association Mondiale de la Route*, 73 p., ISBN 978-2-84060-519-5
- Alastuey, A., Querol, X., Castillo, S., Escudero, M., Avila, A., Cuevas, E., Torres, C., Romero, P.M., Exposito, F., Garcia, O., Diaz, J.P., Van Dingenen, R., Putaud, J.P. (2005) “Characterisation of TSP and PM_{2.5} at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan Dust Episode (July 2002)”, *Atmospheric Environment*, **39**(26):4715-4728, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.018
- Alexis, J. (1995) “*Pratique industrielle de la méthode Tagushi*”, AFNOR, ISBN : 2-12-465008-4
- Algieri, A., Bova, S., De Bartolo, C. (2005) “Experimental and Numerical Investigation on the Effects of the Seeding Properties on LDA Measurements”, *Journal of Fluids Engineering* **127**(3):514-522, doi:10.1115/1.1899167
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M., Gens, A. (2013) “Compacted soil behavior: initial state, structure and constitutive modeling”, *Géotechnique* **63**(6):463-478, doi: 10.1680/geot.11.P.134
- Ashley, W.S., Strader, S., Dziubla, D.C., Haberlie, A. (2015) “Driving blind: Weather-related vision hazard and fatal motor vehicle crashes”, *Bulletin of the American Meteorological Society* **96**:755-779, doi:10.1175/BAMS-D-14-00026.1
- ASTM (2011) “Soil and Rock (I): D420-D5876”, *Annual book of ASTM standards, Volume 04.08*
- ASTM (2017) “ASTM D2487-17e1, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)”, *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM (2019) “ASTM C837-09, Standard test method for methylene blue index of clay”, *ASTM International, West Conshohocken, PA*
- Autrup, H. (2010) “Ambient air pollution and adverse health effects”, *Procedia Social and Behavioral Sciences* **2**(5):7333-7338, doi: 10.1016/j.sbspro.2010.05.089

- Axon, L. (1999) “The aerodynamic characteristics of automobile wheels – CFD prediction and wind tunnel experiment”, *PhD Thesis, Cranfield University*, 262 p.
- 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* **89**:329-336, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.02.038
- Bagnold, R.A., (1937) “The transport of sand by wind”, *Geograph. J.* **89**(5):409–438, doi:10.2307/1786411
- Banque Mondiale (2008) “Safe, clean and affordable transport for development”, *WB Group’s Transport Business Strategy*.
- Banque Mondiale (2011) “Quantifying the impacts of vehicle generated dust: a comprehensive approach”, *Rapport, Transport Research Support, World Bank*. 84 p.
- Barnes, D.L., Connor, B. (2014) “Managing dust on unpaved roads and airports”, *Report, Alaska Department of Transportation & Public Facilities, Alaska University Transportation Center*, 83 p.
- Baron, P.A., Willeke, K. (2005) “*Aerosols Measurements: Principles, Techniques and Applications*”, Wiley-Blackwell, New-York, Second edition.
- Barros, D. (2015) “Wake and drag manipulation of a bluff body using fluidic forcing”, *Thèse de doctorat, ISAE-ENSMA*, 97 p.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. et Palutikof, J. P. (2008) Le changement climatique et l’eau. *Document technique publié par le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève* (236 pages).
- Belyaev, S.P., Levin, L.M. (1974) “Techniques for collection of representative aerosol samples”, *Journal of Aerosol Science*, **5**(4):325-338, doi: 10.1016/0021-8502(74)90130-X
- Berera, A., Ho, R.D.J.G. (2018) “Chaotic properties of a turbulent isotropic fluid”, *Physical Review Letters* **120**(2):024101, doi: 10.1103/PhysRevLett.120.024101
- Bergdahl, I.A., Torén, K., Eriksson, K., Hedlund, U., Nilsson, T., Flodin, R., Järvholm, B. (2004) “Increased mortality in COPD among construction workers exposed to inorganic dust”, *European Respiratory Journal* **23**:402-406, doi: 10.1183/09031936.04.00034304
- Bergstrom, D.J., Kotey, N.A., Tachie, M.F. (2002) “The effects of surface roughness on the mean velocity profile in a turbulent boundary layer”, *Journal of Fluids Engineering* **124**(3):664-670, doi: 10.1115/1.1493810
- Bhattachan, A., Okin, G.S., Zhang, J., Vimal, S., Lettenmaier, D.P. (2019) “Characterising the role of wind and dust in traffic accidents in California”, *GeoHealth* **3**(10):328-336, doi:10.1029/2019GH000212
- Biarez J., Favre J.L. (1975) “Parameters filing and statistical analysis of data in soil mechanics”, *Proceedings 2nd International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Aachen, Germany*, vol.2, p.249-264.

- Biasi, L., de los Reyes, A., Reeks, M.W., de Santi, G.F. (2001) “Use of a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows”, *Journal of Aerosol Science* **32**:1175-1200, doi: 10.1016/S0021-8502(01)00048-9
- BIRAL (2014) “Operation and maintenance manual - SWS Present Weather Sensors”, *Technical Manual, Bristol Instrumental and Research Associates Limited*
- Bisal, F. (1973) “Initiation of movement of soil aggregates”, *Canadian Journal of Soil Science* **53**(4):481-482, doi: 10.4141/cjss73-066
- Bomag (2019) “Technical Data: BOMAG VARIOCONTROL BW 219 BVC-5”, *Technical paper, BOMAG, Fayat Group*. <https://www.bomag.com/ww-en/machinery/categories/single-drum-rollers-soil-compactors/bw-219-bvc-5-58639/> (consulté le 28 Janvier 2020).
- Bonelli, S. (2012) “*Érosion des géomatériaux : Érosion interne et de surface*”, Hermes Science Lavoisier, First Edition
- Boussaid, K. (2005) “Sol intermédiaires pour la modélisation physique : application aux fondations superficielles”, *Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes*. 299 p.
- Boutier, A., Arnal, D., David, L., Eléna, M., Haertig, J., Lecordier, B., Millan, P., Most, J.M., Riethmuller, M. (2012) “*Vélocimétrie laser pour la mécanique des fluides*”, Lavoisier.
- Braaten, D.A., Paw U, K.T., Shaw, R.H. (1990) “Particle resuspension in a turbulent boundary layer – observed and modelled”, *Journal of Aerosol Science* **21**:613-628, doi: 10.1016/0021-8502(90)90117-G
- Brunauer, S., Emmet, P.H., Teller, E. (1938) “Adsorption of gases in multimolecular layers”, *Journal of the American Chemical Society* **60**(2):309-319, doi: 10.1021/ja01269a023
- BSI (2010) “BS EN 13286-2: Unbound and hydraulically bound mixtures. Test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction” *BSI, London, UK*
- Burton, G.J., Pineda, J.A., Sheng, D., Airey, D. (2015) “Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying”, *Engineering Geology* **193**(2):363-373, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.05.010
- Bushmann, M.H., Gad-el-Hak, M. (2003) “Debate concerning the mean-velocity profile of a turbulent boundary layer”, *AIAA Journal*, **41**(4):565-572, doi: 10.2514/2.1994
- Cadel, D.R., Shin, D., Lowe, K.T. (2016) “A hybrid technique for laser flare reduction”, *In Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 4-8 January 2016, San Diego, California, USA*, doi:10.2514/6.2016-0788
- Call, D.A., Wilson, C.S., Shourd, K.N. (2018) “Hazardous weather conditions and multiple-vehicle chain-reaction crashes in the United States”, *Meteorological Applications* **25**:466-471, doi:10.1002/met.1714
- Camino, C., Cuevas, E., Basart, S., Alonso-Pérez, S., Baldasano, J.M., Terradellas, E., Marticorena, B., Rodriguez, S., Berjon, A. (2015) “An empirical equation to estimate mineral dust concentrations from visibility observations in Northern Africa”, *Aeolian Research* **16**:55-68, doi:10.1016/j.aeolia.2014.11.002

- Carrico, C.M., Kus, P., Rood, M.J., Quinn, P.K., Bates, T.S. (2003) “Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity”, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **108**(D23) doi: 10.1029/2003JD003405
- Casini, F., Vaunat, J., Romero, E., Desideri, A. (2012) “Consequences on water retention properties of double-porosity features in compacted silt”, *Acta Geotechnica* **7**:139-150, doi: 10.1007/s11440-012-0159-6
- 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 3 Décembre 2019).
- CEN (2010) “EN 13286-2 – “Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content – Proctor compaction”, *European Committee of Standardization*.
- Cermak, J.E., Arya, S.P.S. (1970) “Problems of atmospheric shear flows and laboratory simulation”, *Boundary-Layer Meteorology* **1**(1):40-60, doi: 10.1007/BF00193903.
- CGDD (2012) “Rapport de la Commission des comptes et de l’économie de l’environnement : Santé et qualité de l’air extérieur”, *Rapport*, 102 p.
- Chaligné, S. (2013) “Contrôle du sillage d’un corps non profilé : application expérimentale à une maquette simplifiée de véhicule industriel”, *Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon*, 252 p.
- CHEMINFO (2005) “Best practices for the reduction of air emissions from construction and demolition activities”, *Report prepared for Environment Canada, Transboundary Issues Branch*, 58 p.
- Chepil, W. S. (1945) “Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind”, *Soil Science* **60**(4):305–320, doi: 10.1097/00010694-194510000-00004
- Chepil, W.S. (1950a) “Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness”, *Soil Science* **69**(2):149-162
- Chepil, W.S. (1950b) “Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility”, *Soil Science* **69**(5):403-414
- Chepil, W.S. (1956) “Influence of moisture on erodibility of soil by wind”, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **20**(2):288-292.
- Chepil, W.S. (1959) “Equilibrium of soil grains at the threshold of movement by wind”, *Soil Science Society of America Proceedings* **26**(6):422-428, doi:10.2136/sssaj1959.03615995002300060019x
- Chepil, W.S., Woodruff, N.P. (1957) “Sedimentary characteristic of dust storms: II. Visibility and dust concentration”, *American Journal of Science* **255** 104-114, doi: 10.2475/ajs.255.2.104
- Chepil, W. S., Woodruff, N. P. (1963) “The physics of wind erosion and its control”, *Advan. Agron.* **15**: 211-302, doi : 10.1016/S0065-2113(08)60400-9
- Choi, H., Lee, J., Park, H. (2014) “Aerodynamics of heavy vehicles”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **46**:441-468, doi: 10.1146/annurev-fluid-011212-140616

- CITEPA (2020-a) “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.
- CITEPA (2020-b) “Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France”, *OMINEA 17^{ème} édition, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire*, 981 p.
- Clauser, F.H. (1956) “The turbulent boundary layer”, *Advances in Applied Mechanics* **4**:1-51, doi:10.1016/S0065-2156(08)70370-3
- Cogotti, A. (1983) “Aerodynamics characteristics of car wheels”, *Int. J. of Vehicle Design, Technological Advances in Vehicle Design Series*, **SP3**:173-196
- Corn, M. (1961) “The adhesion of solid particles to solid surfaces, II”, *Journal of the Air Pollution Control Association* **11**:566-584, doi: 10.1080/00022470.1961.10468039
- Cowherd, C., Kinsey, J.S. (1986) “Identification, assessment and control of fugitive particulate emissions”, *Report prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development*. 178 p.
- Crowe, C.T., Elger, D.F., Williams, B.C., Roberson, J.A. (2009) “*Engineering fluid mechanics*”, John Wiley & Sons, 9th edition.
- D’Almeida, G.A. (1986) “A model for Saharan dust transport”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **25**(7):903–916, doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2
- DANTEC Dynamics (2012) “BSA Flow Software v5.03 – Users Guide”, *Guide d’utilisation*, 412 p.
- Davies, C.N. (1968) “The entry of aerosols into sampling tubes and heads”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **2**(1):921-932, doi: 10.1088/0022-3727/1/7/314
- Dayan, U., Ziv, B., Shoob, T., Enzel, Y. (2008) “Suspended dust over southeastern Mediterranean and its relation to atmospheric circulations”, *International Journal of Climatology* **28**(7):915–924, doi: 10.1002/joc.1587
- Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y., Howat, M.D. (1996) “Microstructure of a compacted silt”, *Canadian Geotech. J.* **33**(1):150-158, doi: 10.1139/t96-030
- De Marsily, G. (1981) “*Hydrogéologie quantitative*”, Masson, Paris
- Di Stefano, C., Ferro, V., Mirabile, S. (2010) “Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods”, *Biosystems Engineering*, **106**:205-215, doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.03.013
- Djenedi, L., Talluru, K.M., Antonia, R.A.A. (2019) “A velocity defect chart method for estimating the friction velocity in turbulent boundary layers”, *Fluid Dynamic Research* **51**(4), doi: 10.1088/1873-7005/ab225c
- Duran-Garcia, E.E. (2020) “Etude expérimentale de l’émission de poussières dans l’atmosphère liée à la circulation des engins de chantier”, *MSc Thesis, École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile, Laval, France*, 59 p.

- Duran-Garica, E.E., Le Vern, M., Murzyn, F., Razakamanantsoa, A.R., Larrarte, F. (2021) “Comparative study of the flow in the wake of cab-over and articulated dump trucks: application to dust suspension”, *European Journal of Mechanics / B Fluids* (under review)
- Dockery, D.W., Pope, A.C., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speizer, F.E. (1993) “An association between air pollution and mortality in six US cities”, *The New England Journal of Medicine*, 329(24):1753–1759, doi: 10.1056/NEJM199312093292401
- Dongmo-Engeland, B. (2005) “Caractérisation des déformations d’orniérage des chaussées bitumineuses”, *Thèse de doctorat, INSA Lyon*, 265p.
- Dyck, R.I., Stukel, J. (1976) “Fugitive dust emissions from trucks on unpaved roads”, *Environmental Science & Technology*, 10:1046-1048, doi: 10.1021/ES60121A015
- 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
- El-Alti, M., Chernoray, V., Jahanmiri, M., Davidson L. (2011) “Experimental and computational studies of active flow control on a model truck-trailer”, *Proceedings of the International Conference, EFM 2011*, 2:600-615, doi: 10.1051/epjconf/20122501012
- Elias, T., Ramon, D., Dupont, J.C., Formenti, P. (2015) “Les centrales thermiques à concentration solaire : Le visibilimètre pour estimer l’atténuation du rayonnement solaire par les aérosols”, *13th SIRTAS Scientific Day, 22 June 2015*.
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Green, M., Pitchford, M., Watson, J. (2003a) “Vehicle-based road dust emission measurement: I—methods and calibration”, *Atmospheric Environment* 37(32):4559-4571, doi: 10.1016/S1352-2310(03)00528-4
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Hendrickson, K., Green, M., Pitchford, M., McGrown, M., Barton, K. (2003b) “Vehicle-based road dust emission measurement: II— effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM10 emission potentials from paved and unpaved roads”, *Atmospheric Environment* 37(32):4573-4582, doi: 10.1016/S1352-2310(03)00529-6
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Green, M., Pitchford, M., Watson, J. (2003c) “Vehicle-based road dust emission measurement: III— effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Valley, ID”, *Atmospheric Environment* 37(32):4583-4593, doi:10.1016/S1352-2310(03)00530-2
- Etyemezian, V., Ahonen, S., Nikolic, D., Gillies, J., Kuhns, H., Gillette, D., Veranth, V. (2004) “Deposition and Removal of Fugitive Dust in the Arid Southwestern United States: Measurements and Model Results”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(9):1099-1111, doi: 10.1080/10473289.2004.10470977
- Etyemezian, V., Kuhns, H., Nikolich, G. (2006) “Precision and repeatability of the TRAKER vehicle-based paved road dust emission measurement”, *Atmospheric Environment* 40(16):2953-2958, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.042

- Farnworth, R.K., Thompson, E.S., Peck, E.L. (1982) “Evaporation Atlas for the contiguous 48 United States”, *Report for the National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Washington, USA*, 41 p.
- Faber, P., Drewnick, F., Borrmann, S. (2015) “Aerosol particle and trace gas emissions from earthworks, road construction and asphalt paving in Germany: Emission factors and influence on local air quality”, *Atmospheric Environment* **122**:662-671, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.036.
- Fécan, F., Marticorena, B., Bergametti, G. (1999) “Parametrization of the increase of the Aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas”, *Annales Geophysicae* **17**(1)149-157, doi: 10.1007/s00585-999-0149-7
- Fisher, R. A. (1926) “On the capillary forces in an ideal soil: Correction of formulae given by W. B. Haines”, *J. Agric. Sci.* **16**(3): 492-505, doi: 10.1017/S0021859600007838
- Flocchini, R.G., Cahill, T.A., Matsumura, R.T., Carvacho, O., Lu, Z. (1994) “Evaluation of the emission of PM₁₀ particulates from unpaved roads in the San Joaquin Valley. *California Air Resources Board, Sacramento, USA*.
- Flores-Márquez, J.P., Shukla, M.K., Deb, S. (2014) “Mapping of airborne particulate matter collected using two sensors along US-Mexico border”, *Journal of Environmental & Analytical Toxicology* **4**(2):1-10, doi: 10.4172/2161-0525.1000206
- Flörke, M., Schneider, C. and McDonald, R. I. (2018). “Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth”, *Nature Sustainability* **1**:51-58, doi:10.1038/s41893-017-0006-8
- Foley, G., Cropley, S., Giummarra, G. (1996) “Road Dust Control Techniques: Evaluation of chemical dust suppressants’ performance”, *Special Report No. 54. Victoria: ARRB Transport Research Ltd.*, 143 p.
- Foucaut, J.-M. (1994) “Etude théorique et expérimentale des phénomènes d’envol et de saltation de particules dans une couche limite turbulente”, *Thèse de doctorat, Université de Lille*. 252 p.
- Gabet, T., Di Benedetto, H., Perraton, D., De Visscher, J., Gallet, T., Bankowski, W., Olard, F., Grenfell, J., Bodin, D., Sauzéat, C. (2011) “French wheel tracking round robin test on a polymer modified bitumen mixture”, *Materials and Structures* **44**:1031-1046, doi: 10.1617/s11527-011-9733-x
- Gagneux, G., Millet, O. (2016) “An analytical framework for evaluating the cohesion effects of coalescence between capillary bridges”, *Granular Matter*, **18**(2), doi : 10.1007/s10035-016-0613-5
- Gambatese, J.A., James, D.E. (2001) “Dust suppression using truck-mounted water spray system”, *Journal of Construction Engineering and Management* **127**(1):53-59, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:1(53)
- Gentilini, M. (2009). “2^{ème} Plan National Santé Environnement 2009-2013. ” <http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnse2.pdf> (consulté le 29/01/2019)
- Gérardin, F. (2009) “Étude expérimentale et numérique de la dispersion des aérosols dans le sillage d’une roue de véhicule”, *Thèse de doctorat, Université de Lorraine*, 238 p.

- Gérardin, F., Gentric, C., Midoux, N. (2014) “Particle dispersion in the near-wake of an isolated rotating wheel: Experimental and CFD study”, *Journal of Aerosol Science* **76**:56-71, doi:10.1016/j.jaerosci.2014.05.008
- Gérardin, F., Midoux, N. (2015) “Attenuation of road dust emissions caused by industrial vehicle traffic”, *Atmospheric Environment* **127**:46-54, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.12.006
- Gillette, D.A., Adams, J.B., Endo, A., Smith, D., Kihl, R. (1980) “Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils”, *Journal of Geophysical Research* **85**:5621-5630, doi:10.1029/JC085iC10p05621
- Gillette, D.A., Adams, J.B., Muhs, D., Kihl, R. (1982) “Threshold Friction Velocities and Rupture Moduli for Crusted Desert Soils for the Input of Soil Particles into the Air”, *Journal of Geophysical Research* **87**(C11):9003-9015, doi: 10.1029/JC087iC11p09003
- Gilliéron, P., Kourta, A. (2013) “*Aérodynamique automobile pour l’environnement, le design et la sécurité*”, Cépaduès, 2^{ème} édition
- Gillies, J.A., Watson, J.G., Rogers, C.F., DuBois, D., Chow, J.C., Langston, R., Sweet, J. (1999) “Long-Term Efficiencies of Dust Suppressants to Reduce PM10 Emissions from Unpaved Roads”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.* **49**(1):3-16, doi: 10.1080/10473289.1999.10463779
- Gillies, J.A., Etyemezian, V., Kuhns, H., Nikolic, D., Gillette, D.A. (2005) “Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions”, *Atmospheric Environment* **39**(13):2341-2347, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.05.064
- Giunta, M., Lo Bosco, D., Leonardi, G., Scopelliti, F. (2019) “Estimation of gas and dust emissions in construction sites of a motorway project”, *Sustainability* **11**(24):7218, doi:10.3390/su11247218
- Govers, G., Takken, I., Helming, K. (2000) “Soil roughness and overland flow”, *Agronomie* **20**(2):131-146, doi: 10.1051/agro:2000114
- Gras, J.-P. (2011) “Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires : rétention d’eau et comportement mécanique”, *Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2*, 189 p.
- Greeley, R., Balme, M.R., Iversen, J.D., Metzger, S., Mickelson, R., Phoreman, J., White, B. (2003) “Martian dust devils: laboratory simulations of particle threshold”, *J. Geophys. Res.* **108**(E5)5041, doi :10.1029/2002JE001987.
- GTR (2000) “*Guide français pour la Réalisation des remblais et des couches de forme*”, IFSTTAR-CEREMA, Ministère de l’Écologie, du Développement durable et de l’Aménagement du territoire, 2^{ème} édition
- Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., Brookes, M.H. (2001) “Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information”, *Portland, Oregon : U.S. Department of Agriculture, General Technical Report PNW-GTR-509*, 120 p.
- Hagen, L.J., Skidmore, E.L., Layton, J.B. (1988) “Wind erosion abrasion: effects of aggregate moisture”, *Transactions of the ASAE* **31**(3):725-728, doi: 10.13031/2013.30774

- Haines, W.B. (1925) “Studies of the physical properties of soils. II. A note on the cohesion developed by capillary forces in an ideal soil”, *J. Agric. Sci.* **15**(4):529-535, doi: 10.1017/S0021859600082460
- Hamm (2019) “Technical Data: HAMM H20i Compactor with smooth drum”, *Technical paper, HAMM, Wirtgen Group Company*. <https://www.hamm.eu/en/products/compactors/series-h/h-20i.172479.php> (consulté le 28 Janvier 2020).
- Hänel, D.E. (1976) “The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air”, *Advances in Geophysics* **19**:73-188, doi:10.1016/S0065-2687(08)60142-9
- Hangal, S., Willeke, K. (1990) “Overall efficiency of tubular inlets sampling at 0-90 degrees from horizontal aerosol flows”, *Atmospheric Environment* **24**(9):2379-2386, doi: 10.1016/0960-1686(90)90330-P
- Hichri, Y., Descartes, S., Cerezo, V., Do. M.-T. (2019) “Understanding the behavior of fine particles at the tire/road interface”, *Tribology International* **149**, 105635, doi: 10.1016/j.triboint.2019.02.043
- Huertas Cardozo, J.I., Prato Sanchez, D.F. (2017) “Air pollution near arterial roads: An experimental and modelling study”, *Atmospheric Chemistry and Physics* [preprint], doi: 10.5194/acp-2017-753
- Hufty, A. (2001) “*Introduction à la climatologie*”, Presses de l’Université Laval, Saint-Nicolas, Canada, 542 p.
- Hurther, D., Lemmin, U. (2003) “Turbulent particle and momentum flux statistics in suspension flow”, *Water Resources Research* **39**(5):1139-1150, doi: 10.1029/2001WR001113
- Hussein, T., Johansson, C., Karlsson, H., Hansson, H.C. (2008) “Factors affecting non-tailpipe aerosol particle emissions from paved roads: On-road measurements in Stockholm, Sweden”, *Atmospheric Environment* **42**(4):688-702, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.09.064.
- Ishizuka, M., Mikami, M., Yamada, Y., Zeng, F., Gao, W. (2005) “An observational study of soil moisture effects on wind erosion at a gobi site in the Taklimakan Desert”, *Journal of Geophysical Research* **110**:D18S03, doi:10.1029/2004JD004709
- Israelachvili, J.N. “*Intermolecular and Surface Forces*”, Elsevier Inc., Third Edition
- ISO (2009) “ISO 13320:2009 – Particle analysis – Laser diffraction methods”, *International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland*.
- ISO (2010) “ISO 9277:2010 – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method”, *International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland*.
- ISO (2014) “ISO 17892-1/2014 – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content”, *International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland*
- ISO (2018) “ISO 17892-12/2018 – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of liquid and plastic limits”, *International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland*
- Iversen, J., Pollack, J., Greeley, R., White, B. (1976) “Saltation threshold on Mars: the effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density”, *Icarus* **29**(3):381–393, doi:10.1016/0019-1035(76)90140-8.

- Jugder, D., Shinoda, M., Kimura, R., Batbold, A., Amarjargal, D. (2014) “Quantitative analysis on windblown dust concentrations of PM₁₀ (PM_{2.5}) during dust events in Mongolia”, *Aeolian Research*, **14**:3-13, doi: 10.1016/j.aeolia.2014.04.005
- 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
- Klose, M. (2014) “Convective Turbulent Dust Emission: Process, parametrization and relevance in the Earth system”, *Ph. D. Thesis, University of Cologne*, 129 p.
- Klose, M., Shao, Y. (2012) “Stochastic parametrization of dust emission and application to convective atmospheric conditions”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **12**(12):7309-7320, doi:10.5194/acp-12-7309-2012
- Klose, M., Shao, Y. (2013) “Large-eddy simulation of turbulent dust emission”, *Aeolian Research* **8**:49-58, doi: 10.1016/j.aeolia.2012.10.010
- Klose, M., Shao, Y., Li, X.L., Zhang, H.S., Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J.F. (2014) “Further development of a parameterization for convective turbulent dust emission and evaluation based on field observations”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**:10,441-10,457, doi:10.1002/2014JD021688.
- Kodikara, J. (2012) “New framework for volumetric constitutive behavior of compacted unsaturated soils”, *Can. Geotech. J.* **49**(11):1227-1243, doi: 10.1139/t2012-084
- Krämer, U., Behrendt, H., Dolgner, R., Ranft, U., Ring, J., Willer, H., Schlipkötter, H.W. (1999) “Airway diseases and allergies in East and West German children during the first 5 years after reunification: time trends and the impact of sulphur dioxide and total suspended particles”, *Int. J. Epidemiol.*, **28**(5):865-873, doi: 10.1093/ije/28.5.865
- Krogstad, P.A., Antonia, R.A., Browne, L.W.B. (1992) “Comparison between rough and smooth wall turbulent boundary layers”, *Journal of Fluid Mechanics* **245**:599-617, doi:10.1017/S0022112092000594
- Krogstad, P.A., Antonia, R.A. (1999) “Surface roughness effects in turbulent boundary layers”, *Experiments in Fluids* **27**(5):450-460, doi: 10.1007/s003480050370
- Kruyt, N.P., Millet, O. (2017) “An analytical theory for the capillary bridge force between spheres”, *Journal of Fluid Mechanics* **812**:129-151, doi: 10.1017/jfm.2016.790
- Kuhns, H.D., Etyemezian, V. (1999) “Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER): A new approach to infer silt loadings on roads in Clark County, Nevada. *Desert Research Institute, Las Vegas, Nevada*.
- Kuhns, H.D., Etyemezian, V., Landwehr, D., MacDougall, C., Pichford, M., Green, M. (2001) “Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from Roads (TRAKER): a new approach to infer silt loading on roadways”, *Atmospheric Environment* **35**(16):2815-2825, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00079-6

- Kuhns, H.D. (2003) “Vehicle based road dust emission measurements”, *12th International Emission Inventory Conference, USEPA, San Diego, USA*.
- Kuhns, H.D., Green, M., Etyemezian, V. (2003) “Big Bend Regional Aerosol and Visibility Observational (BRAVO) study emissions inventory”, *Desert Research Institute, Las Vegas, Nevada*.
- Kuhns, H., Knipping, E.M., Vukovich, J.M. (2005) Development of a United States-Mexico emission inventory for the big bend regional aerosol and visibility observational (BRAVO) study. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **55**(5) :677-692, doi : 10.1080/10473289.2005.10464648
- Kuhns, H.D., Gillies, J., Etyemezian, V., Nikolich, G., King, J., Zhu, D., Uppapalli, S., Engelbrecht, J., Kohl, S. (2010) “Effect of Soil Type and Momentum on Unpaved Road Particulate Matter Emissions from Wheeled and Tracked Vehicles”, *Aerosol Science and Technology* **44**(3):187-196, doi:10.1080/02786820903516844
- Kulkarni, P., Baron, P.A., Willeke, K. (2011) “*Aerosols Measurements: Principles, Techniques and Applications*”, Wiley-Blackwell, New-York, Third edition.
- Lahaye, A. (2014) “Caractérisation de l’écoulement autour d’un corps de Ahmed à culot droit”, *Thèse de doctorat, Université d’Orléans*, 159 p.
- Langlois, P. (2014) “Mécanique des sols”, *Notes de cours, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada*.
- Langston, R., Merle, R.S., Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Zhu, D., Fitz, D., Bumiller, K., James, D.E., Teng, H. (2008) “Clark County (Nevada) Paved road dust emission studies in support of mobile monitoring technologies”, *Report for Clark County Department of Air Quality and Environmental Management, Desert Research Institute, Nevada, USA*, 339 p.
- Lan Hoang, N. (2017) “Études des propriétés hydromécaniques d’un sable limoneux : de la saturation partielle à la saturation complète”, *Thèse de doctorat, ENTPE*, 251 p.
- Lankarani, K.B., Heydari, S.T., Aghabeigi, M.R., Moafian, G., Hoseinzadeh, A., Vossoughi, M. (2014). “The impact of environmental factors on traffic accidents in Iran”, *J. Inj. Violence Res.* **6**(2):64-71, doi:10.5249/jivr.v6i2.318
- Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O’Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M., Venter, O., Edwards, D.P., Phalan, B., Balmford, A., Van Der Ree, R., Arrea, I.B. (2014) “A global strategy for road building”, *Nature* **513**:229-232, doi:10.1038/nature13717
- Lavision (2018) “Flow Master”, *Notice d’utilisation du logiciel DaVis 10.0*, 186 p.
- Leclerc, C. (2008) “Réduction de la traînée d’un véhicule automobile simplifié à l’aide du contrôle actif par jet synthétique”, *Thèse de doctorat, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse*, 330 p.
- Légifrance (2018) “Code de la Route-Article R413-17 : Maîtrise de la vitesse”, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074228/LEGISCTA000006177129/#LEGIARTI000037411312 (consulté le 06/05/2021)

- Lekarp, F., Isacson, U., Dawson, A. (2000) “State of the art I: Resilient Response of unbound aggregates”, *Journal of Transportation Engineering* **126**(1):66-75, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66)
- Lelouvetel, J., Bigillon, F., Doppler, D., Vinkovic, I., Champagne, J.Y. (2009) “Experimental investigation of ejections and sweeps involved in particle suspension”, *Water Resources Research*, **45**, W02416, doi: 10.1029/2007WR006520
- Leroueil, S., Hight, D.W. (2013) “Compacted soils: From physics to hydraulic and mechanical behavior”, *Proceedings of the 1st Pan-American Conference on Unsaturated Soils, Cartagena, Colombia*, pp. 41-59, doi: 10.1201/b14393-6
- Le Vern, M. (2016) “Conception mécaniste-empirique des chaussées non revêtues”, *MSc Thesis, Université Laval, Québec*, 162 p.
- Le Vern, M. (2021) “Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d’envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement”, *Academic Journal of Civil Engineering*, **39**(1) :333-340, doi : 10.26168/ajce.39.1.55
- Le Vern, M., Doré, G., Bilodeau, J.P. (2016) “Mechanistic-empirical design of unpaved roads”, *2016 Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, Canada, 25-28 September 2016*
- Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F. (2020a) “Experimental study of particle lift initiation on roller compacted sand-clay mixtures”, *Environmental Geotechnics* doi:10.1680/jenge.19.00172
- Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F. (2020b) “Experimental assessment of dust emissions on compacted soils degraded by traffic”, *Atmosphere* **11**, 369, doi:10.3390/atmos11040369.
- Le Vern, M., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Cerezo, V. (2021a) “Study on a test track of dust resuspension induced by a vehicle”, *In Proceedings of the 24th Transport and Air Pollution Conference, Graz, Austria, 30 March – 01 April 2021*
- Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Insenga, P., Gotteland, P. (2021b) “Development of a model to quantify dust emissions from truck traffic on earthmoving sites: approach and preliminary results”, *In Proceedings of the 19th Global Joint Seminar on GeoEnvironmental Engineering, Caen, France, 20-21 May 2021*
- Le Vern, M., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Cerezo, V. (2021c) “Effect of soil surface degradation and vehicle momentum on unpaved road dust emission and visibility attenuation”, *Atmospheric Environment X* (en cours de review).
- Li, X.L., Klose, M., Shao, Y., Zhang, H.S. (2014) “Convective Turbulent Dust Emission (CTDE) observed over Horqin Sandy Land area and validation of a CTDE scheme”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**:9980-9992, doi: 10.1002/2014JD021572
- Li, X.L., Zhang, H.S. (2014) “Soil moisture effects on sand saltation and dust emission observed over the Horqin Sandy Land area in China”, *Journal of Meteorological Research* **28**:444-452, doi:10.1007/s13351-014-3053-3

- Li-Jones, X., Maring, H.B., Prospero, J.M. (1998) “Effect of relative humidity on light scattering by mineral dust aerosol as measured in the marine boundary layer over the tropical Atlantic Ocean”, *Journal of Geophysical Research* **103**(D23):31,113-31,121, doi:10.1029/98JD01800
- Liu, B.Y.H., Zhang, Z.Q., Kuehn, T.H. (1989) “A numerical study of inertial errors in anisokinetic sampling”, *Journal of Aerosol Science* **20**(3):367-380, doi: 10.1016/0021-8502(89)90012-8
- Liu, B., Qu, J., Ning, D., Han, Q., Yin, D., Du, P. (2019) “WECON: A model to estimate wind erosion from disturbed surfaces”, *Catena* **172**:266-273, doi: 10.1016/j.catena.2018.08.037
- Lo, K.H., Kontis, K. (2016) “Flow characteristics over a tracot-trailer model with and without vane-type vortex generator installed”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **159**:110-122, doi: 10.1016/j.jweia.2016.10.009
- Lo, K.H., Kontis, K. (2017) “Flow around an articulated lorry model”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **82**:58-74, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.11.003
- Lohnes, R.A., Coree, B.J. (2002) “Determination and evaluation of alternate methods for managing and controlling highway-related dust”, *Iowa Highway Research Board, Iowa Department of Transportation*
- Loizeau, J. L., Arbouille, D., Santiago, S., Vernet, J. P. (1994) “Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments”, *Sedimentology*, **41**(2):353-361, doi :10.1111/j.1365-3091.1994.tb01410.x
- Lu, S., Willmarth, W.W. (1973) “Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer”, *Journal of Fluid Mechanics*, **60**:481-511, doi: 10.1017/S0022112073000315
- Malm, W.C. (1999) “*Introduction to Visibility*”, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, National Park Service Visibility Program, Colorado State University.
- Marticorena, B., Bergametti, G. (1995) “Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme”, *Journal of Geophysical Research*, **100**(D8):16,415-16,430, doi:10.1029/95JD00690
- Mayaud, J.R., Wiggs, G.F.S., Bailey, R.M. (2016) “Dynamics of skimming flow in the wake of a vegetation patch”, *Aeolian Research*, **22**:141-151, doi: 10.1016/j.aeolia.2016.08.001
- Mbuyi, J.S. (2012) “Caractérisation et mise en œuvre des sols argileux destinés aux matériaux de construction cuits”, *Presses de l’Université de Louvain*, 314 p.
- McKenna-Neuman, C. (2003) “Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sedimentary particles by wind”, *Bound-Lay. Meteorol.* **108**(1):61–89, doi: 10.1023/A:102303520
- McKenna-Neuman, C., Nickling, W.G. (1989) “A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind”, *Can. J. Soil Sci.* **69**(1):79-96, doi:10.4141/cjss89-008
- Meeks, J.C., Wagner, L.E., Maghirang, R.G., Tatarko, J., Bloedow, N. (2013) “Fugitive dust emissions from off-road vehicle maneuvers on military training lands”, *American Society of Agricultural and Biological Engineers* **58**(1):49-60, doi: 10.13031/trans.58.10428

- Mercker, E., Berneburg, H. (1992) “On the simulation of road driving of a passenger car in a wind tunnel using a moving belt and rotating wheels”, *Proceedings of 3rd International Conference on Innovation and Reliability*, Florence, Italy
- Midwest Research Institute (1996) “Improvement of specific emission factors (BACM Project No. 1)”, *Technical report, Midwest Research Institute, Kansas City, USA*
- Mie, G. (1908) “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen”, *Annalen der Physik* **330**(3):377-445, doi: 10.1002/andp.19083300302 (in German)
- Mielniczuk, B., Millet, O., El Youssoufi, M.S. (2017) “Analysis of capillary bridges using imaging techniques and recent analytical model”, *35èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Mai 2017, Nantes*
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (2009) “Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain”, *Convention d'engagement volontaire signée le 25 mars 2009 entre l'État français et la Fédération Nationale des Travaux Publics, le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France, l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française et la Fédération Syntec-Ingénierie, disponible sur <https://www.routesdefrance.com/wp-content/uploads/convention-du-25-mars-N-et-B-signee-Meeddat-partenaires.pdf>* (consulté le 26/02/2020)
- Mohapatra, K., Biswal, S.K. (2014) “Effect of Particulate Matter on plants, climate, ecosystem and human health”, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, **2**(4):118-129
- Moosmüller, H., Gillies, J.A., Rogers, C.F., DuBois, D.W., Chow, J.C., Watson, J.G., Langston, R. (1998) “Particulate emission rates for unpaved shoulders along a paved road”, *Journal of Air and Waste Management Association* **48**(5):398-407, doi: 10.1080/10473289.1998.10463694
- Moosmüller, H., Varma, R., Arnott, W.P., Kuhns, H.D., Etyemezian, V., Gillies, J.A. (2005) “Scattering cross-section emission factors for visibility and radiative transfer applications: Military vehicles traveling on unpaved roads”, *Journal of the air & Waste Management Association* **55**(11):1743-1750, doi: 10.1080/10473289.2005.10464763
- Muleski, G.E., Cowherd, (2001) “Particulate emission measurements from controlled construction activities”, *Report, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Washington, USA*, 150 p.
- Muleski, G.E., Cowherd, C., Kinsey, J.S. (2005) “Particulate emissions from construction activities”, *Journal of Air and Waste Management Association*, **55**(6):772-783, doi:10.1080/10473289.2005.10464669
- Neakrase, L.D.V., Balme, M.R., Esposito, F., Kelling, T., Klose, M., Kok, J.F., Marticorena, B., Merrison, J., Patel, M., Wurm, G. (2016) “Particle lifting processes in dust devils”, *Space Science Reviews*, **203**(1):347–376, doi :10.1007/s11214-016-0296-6

- Neff, J.C., Reynolds, R.L., Munson, S.M., Fernandez, D., Belnap, J. (2013) “The role of dust storms in total atmospheric particle concentrations at two sites in the western U.S.”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**(11):201-212, doi:10.1002/jgrd.50855
- Ngezahayo, E., Ghataora, G.S., Burrow, M.P.N. (2019) “Factors affecting erosion in unpaved roads”, *Processings of the 4th International Conference on Geotechnical Research and Engineering, Rome, April 7-9 2019*, doi:10.11159/icgre19.108
- Nguyen, H.N.G., Zhao, C., Millet, O., Gagneux, G. (2019) “An original method for measuring liquid surface tension from capillary bridges between two equal-sized spherical particles”, *Powder Technology* **363**:349-359, doi : 10.1016/j.powtec.2019.12.049
- Nicholson, K.W., Branson, J.R., Geiss, P., Cannel, R.J. (1989) “The effects of vehicle activity on particle resuspension”, *Journal of Aerosol Science* **20**(8):1425-1428, doi: 10.1016/0021-8502(89)90853-7
- Nikuradse, J. (1933) “Laws of flow in rough pipes”, *Technical Memorandum, National Advisory Committee for Aeronautics*, 64 p.
- NIOSH (2012) “Dust control Handbook for industrial minerals mining and processing”, *Technical Report, Department of Health and Human Services, National Institute of Occupational Safety and Health, USA*, 315 p.
- Noh, H., Lee, S., Yu, J. (2018) “Identifying effective fugitive dust control measures for construction projects in Korea.”, *Sustainability* **2018**, *10*, 1206; doi: 10.3390/su10041206
- Okazaki, K., Wiener, R.W., Willeke, K. (1987) “The combined effect of aspiration and transmission on aerosol sampling accuracy for horizontal isoaxial sampling”, *Atmospheric Environment* **21**(5):1181-1185, doi: 10.1016/0004-6981(87)90245-9
- OMS. (2006) « Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide », *Rapport, Organisation Mondiale de la Santé*, 22 p., doi :10.1016/0004-6981(88)90109-6.
- Orfila, O. (2009) “Influence de l’infrastructure routière sur l’occurrence des pertes de contrôle de véhicules légers en virage : Modélisation et validation sur site expérimental”, *Thèse de doctorat, Université d’Evry Val d’Essonne*, 158 p.
- Organiscak, J.A., Reed, W.R. (2004) “Characteristics of fugitive dust generated from unpaved mine haulage roads”, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* **18**(4):239-252, doi:10.1080/1389526042000263333
- Orszag, S.A. (1969) “Numerical methods for the simulation of turbulence”, *The Physics of Fluids* **12**:II-250, doi: 10.1063/1.1692445
- Padgett, P.E., Meadows, D., Eubanks, E., Ryan, W.E. (2008) “Monitoring fugitive dust emissions from off-highway vehicles traveling on unpaved roads and trails using passive samplers”, *Environ. Monit. Assess.* **144**(1):93-103, doi: 10.1007/s10661-007-9948-z.
- Pagès, E. (2018) “Etude expérimentale en laboratoire des conditions d’envol de poussières présentes sur les chantiers de terrassement”, *MSc Thesis, Polytech Clermont Ferrand, France*, 54 p.

Pächt, T., Valyrakis, M., Zhao, X.H., Li, Z.S. (2018) “The critical role of the boundary layer thickness for the initiation of aeolian sediment transport”, *Geosciences* **8**(9):314, doi: 10.3390/geosciences8090314

PALAS (2016) “Operating Manual. Portable, battery operated real-time Fine Dust Monitor Fidas mobile”, *Notice d’utilisation*, 21 p.

Parlement Européen (2008) “DIRECTIVE 2008/50/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 21 mai 2008 concernant la qualité de l’air ambiant et un air pur pour l’Europe.”, *Journal officiel de l’Union européenne du 11 Juin 2008*.

Pascal, M., de Crouy Chanel, P., Corso, M., Medina, S., Wagner, V., Gorla, S., Beaudou, P., Bentayeb, M., Le Tertre, A., Ung, A., Chatignoux, E., Blanchard, M., Cochet, A., Pascal, L., Tillier, C., Host, S. (2016) “Impacts de l’exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique”, *Saint-Maurice : Santé publique France*, 158 p.

Paschkewitz, J.S. (2006) “Simulation of spray dispersion in a simplified heavy vehicle wake”, *Lawrence Livermore National Laboratory. Report No. UCRI-TR-218207*, 20 p.

Patterson, E.M., Gillette, D.A. (1977) “Measurements of visibility vs mass of airborne soil particles”, *Atmospheric Environment* **11** 193-196, doi: 10.1016/0004-6981(77)90226-8

Peichota, T., Van Ee, J., Batista, J., Stave, K., James, D. (2002) “Potential Environmental Impacts of Dust Suppressants: Avoiding Another Times Beach”, *Las Vegas: U.S. Environmental Protection Agency*, 97 p.

Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., De La Roche, C., Bankowski, W., Partl, M., Grenfell, J. (2011) “Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis”, *Materials and Structures* **44**:969-986, doi: 10.1617/s11527-010-9680-y

Petroff, A., Zhang, L. (2010) “Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models”, *Geoscientific Model Development* **3**:753-769, doi: 10.5194/gmd-3-753-2010

Ping, W.V., Xing, G., Leonard, M., Yang, Z. (2003) “Evaluation of laboratory compaction techniques for simulating field soil compaction”, *Report for the Florida Department of Transportation, Department of Civil & Environmental Engineering, Florida A&M University, Florida State University, College of Engineering, Tallahassee, FL 32310*.

Pinnick, R.G., Fernandez, G., Hinds, B.D., Bruce, C.W., Schaefer, R.W., Pendleton, J.D. (1985) “Dust generated by vehicular traffic on unpaved roadways: sizes and infrared extinction characteristics”, *Aerosol Science and Technology*, **4**(1):99-121, doi: 10.1080/02786828508959042

Piras, L., Dentoni, V., Massacci, G., Lowndes, I.S. (2014) “Dust dispersion from haul roads in complex terrain: the case of a mineral reclamation site located in Sardinia (Italy)”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* **28**(5):323-341, doi: 10.1080/17480930.2014.884269

Pirjola, L., Johansson, C., Kupiainen, K., Stojilkovic, A., Karlsson, H., Hussein, T. (1995) “Road Dust Emissions from Paved Roads Measured Using Different Mobile Systems”, *Journal of the Air & Waste Management Association* **60**(12):1422-1433, doi: 10.3155/1047-3289.60.12.1422.

- Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006). "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect", *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56**(6):709-742, doi:10.1080/10473289.2006.10464485
- Poulin, P. (2010) "Étude de la performance de chaussées non revêtues traitées par abat-poussière en context nordique canadien", *MSc Thesis, Université Laval, Québec*, 176 p.
- Prasad, A. K. (2000) "Stereoscopic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, **29**:103-116, doi: 10.1007/s003480000143
- Presley, D.R., Tatarko, J. (2009) "Principles of wind erosion and its control", *Kansas State University, disponible sur <https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF2860.pdf>* (consulté le 29/01/2019)
- Proctor, R.R. (1933) "Fundamental principles of soil compaction", *Engineering New-Record* **111**(9):55-58
- Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C.J., Wereley, S.T., Kompenhans, J. (2018) "*Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*", Springer, 3rd Edition
- Ranaivomanana, H., Razakamanantsoa, A., Amiri, O. (2017) "Permeability prediction of soils including degree of compaction and microstructure", *International Journal of Geomechanics* **17**(4):04016107, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000792
- Rasmussen, K.R., Merrison, J.P., Nornberg, P. (2011) "Wind Tunnels for the Study of Particle Transport", *Chapter 3 in book: Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, Intech*, doi:10.5772/22766
- Raupach, M.R., Gillette, D.A., Leys, J.F. (1993) "The effect of roughness elements on wind erosion threshold", *Journal of Geophysical Research* **98**(D2):3023-3029, doi: 10.1029/92JD01922
- Ravi, S., Zobeck, T.M., Over, T.M., Okin, G.S., D'Odorico, P. (2006) "On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion", *Sedimentology* **53**:597-609, doi: 10.1111/j.1365-3091.2006.00775.x
- Ravi, S., D'Odorico, P., Breshears, D.D., Field, J.P., Goudie, A.S., Huxman, T.E., Li, J., Okin, G.S., Swap, R.J., Thomas, A.D., Van Pelt, S., Whicker, J.J., Zobeck, T.M. (2011) "Aeolian processes and the biosphere", *Rev. Geophys.* **49**(3) doi :10.1029/2010RG000328.
- Razakamanantsoa, A. (2012). "Rapport : l'arrosage des pistes non revêtues", *Rapport d'étude SPTF, RA/1209/RAZ* (68 pages).
- Razakamanantsoa, A. (2017). "Brevet : Système de collecte de poussières, procédé de détermination d'au moins une propriété d'un matériau en matière de dégagement de poussières, et procédé d'arrosage d'un sol", INPI, FR3045400, BOPI 2017-25.
- Reed, W.R. (2003) "An improved model for prediction of PM10 from surface mining operations", *PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA*, 526 p.
- Reed, W.R., Organiscak, J.A. (2005) "Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck", *SME Annual Meeting, Salt Lake City, USA*

- Reed, W.R., Organiscak, J.A. (2007) "Haul road dust control: Fugitive dust characteristics from surface mine haul roads and methods of control", *Coal Age* **112**:34-37.
- Rieux, A., Weill, P., Mouaze, D., Poirier, C., Nechenache, F., Perez, L., Tessier, B. (2018) "Threshold of motion and settling velocities of mollusk shell debris: Influence of faunal composition", *Sedimentology* **66**(3):895-916, doi: 10.1111/sed.12521
- Robinet, J.-C. (2013) "Aérodynamique fondamentale. Chapitre 3 : La Couche Limite en aérodynamique", *Notes de cours, Arts et Métiers ParisTech*. <https://docplayer.fr/23046196-Ue-aerodynamique-fondamentale.html>
- Rodriguez, R. (2018) "Étude expérimentale de la dispersion de particules ultrafines dans le sillage de modèles simplifiés de véhicules automobiles", *Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes*, 272 p.
- Rodriguez, R., Murzyn, F., Aubry, J., Mehel, A., Larrarte, F. (2018) "An innovative LDV data processing method for statistical error corrections. Application to homogeneous and non-homogeneous seeding", *Flow Measurement and Instrumentation* **60**:67-77, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.011
- Rodriguez, S. (2019) "Overview of fluid dynamics and turbulence", *Applied Computational Fluid Dynamics and turbulence Modelling, Springer, Cham*
- Rohatgi, V.K. (1976) "An Introduction to Probability Theory and Mathematical Statistics", Wiley Series in Probability and Statistics, New-York, doi:10.1002/9781118165676
- Romero, E., Simms, P.H. (2008) "Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy", *Geotech. Geol. Eng.* **26**(6):705-727, doi: 10.1007/s10706-008-9204-5
- Romero, E., Della Vecchia, D., Jommi, C. (2011) "An insight into the water retention properties of compacted clayed soils", *Géotechnique* **61**(4):313-328, doi: 10.1680/geot.2011.61.4.313
- Rossitto, G., Sicot, C., Ferrand, V., Borée, J., Harambat, F. (2016) "Influence of afterbody rounding on the pressure distribution over a fastback vehicle", *Experiments in Fluids* **57**(3):1-12, doi:10.1007/s00348-016-2120-1.
- RSD (1978) "Règlement Sanitaire Départemental Type", *Journal Officiel du 13 Septembre 1978*, disponible sur https://aida.ineris.fr/consultation_document/8513 (consulté le 26/03/2019)
- Saddington, A.J., Knowles, R.D., Knowles, K. (2007) "LDA measurements in the near wake of an isolated formula one wheel", *Experiments in Fluids* **42**(5):671-681, doi: 10.1007/s00348-007-0273-7
- Saffman, P. G. (1965). "The lift on a small sphere in a slow shear flow", *J. Fluid Mech.* **22**, 385-400, doi: 10.1017/S0022112065000824
- Schlichting, H. (1979) "Boundary Layer Theory", 7th edition, McGraw-Hill, New-York, NY, USA.
- 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.
- Sediki, O., Razakamanantsoa, A., Hattab, M, Le Borgne (2016) "Influence d'un compacteur roulant de laboratoire sur le compactage des sols fins", *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, Juillet 2016*

- Sediki, O., Razakamanantsoa, A., Rayssac, E., Bodenès, D. (2018a) “Procédé et dispositif de détermination du coefficient et du potentiel d’émission de particules d’un matériau, et procédé de gestion d’une voie de circulation”, *Brevet Français N° 18 55260*.
- Sediki, O., Razakamanantsoa, A., Hattab, M, Le Borgne, T., Fleureau, J.-M., Gotteland, P. (2018b) “Degradability of unpaved roads submitted to traffic and environmental solicitations: laboratory scale”, *7th International Conference of Unsaturated Soils, HKUST, Hong Kong*
- Serpell, A., Kort, J., Vera, S. (2013) “Awareness, actions, drivers and barriers of sustainable construction in Chile”, *Technological and Economic Development of Economy* **19**(2):272-288, doi:10.3846/20294913.2013.798597
- Sexton, W.R., Britcher, C.P., Demuren, A.O. (2014) “Experimental wake studies of a mining truck”, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, **1**(5):145-151
- Shao, Y. (2008) “*Physics and Modelling of Wind Erosion*”, Springer-Verlag, Berlin, Second edition.
- Shao, Y., Lu, H. (2000) “A simple expression for wind erosion threshold friction velocity”, *Journal of Geophysical Research* **105**(17):22,437-22,443, doi: 10.1029/2000JD900304
- Shao, Y., Raupach, M.R., Leys, J.F. (1996) “A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region”, *Australian Journal of Soil Research* **34**(3):309-342, doi:10.1071/SR9960309
- Shao, Y., Klose, M. (2016) “A note on the stochastic nature of particle cohesive force and implications to threshold friction velocity for aerodynamic dust entrainment”, *Aeolian Research* **22**:123-125, doi:10.1016/j.aeolia.2016.08.004
- Shojaeizadeh, A., Safaei, M.R., Alrashed, A.A.A.A., Ghodsian, M., Geza, M., Abbassi, M.A. (2018) “Bed roughness effects on characteristics of turbulent confined wall jets”, *Measurement* **122**:325-338, doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.033
- Skorseth, K., Selim, A.A. (2000) “Gravel roads. Maintenance and design manual”, *Report for the U.S. Department of Transportation, South Dakota, USA*, 104 p.
- Soil Survey Staff (1951) “Soil survey manual”, *U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Soil Conservation Service*
- SPTF (2011). “Intensifier l’engagement pour la route durable en 2012.”, *COTITA Sud-Ouest*, 3 Novembre 2011. http://cotita.fr/IMG/pdf/11_VINCI_pour_SPTF_COTITA_SO_111103.pdf (consulté le 29/01/2019)
- Sterck, G., Jacobs, A.F.G., Van Boxel, J.H. (1998) “The effect of turbulent flow structures on saltation sand transport in the atmospheric boundary layer”, *Earth Surface Processes and Landforms* **23**(10):877-887, doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199810)23:10<877::AID-ESP905>3.0.CO;2-R.
- Struss, S.R., Mikucki, W.J. (1977) “Fugitive dust emissions from construction haul roads”, *Report for the Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, USA*, 55 p.

- Swet, N., Elperin, T., Kok, J.F., Martin, R.L., Yizhaq, H., Katra, I. (2019) “Can active sands generate dust particles by wind-induced processes?”, *Earth and Planetary Science Letters* **506**:371-380, doi:10.1016/j.epsl.2018.11.013
- Tagushi, G., Konishi, S. (1987) “*Tagushi methods. Orthogonal arrays and linear graphs. Tools for quality engineering*”, American Supplier Institute Inc., MI.
- Tanière, A., Oesterlé, B., Monnier, J.C. (1997) “On the behavior of solid particles in a horizontal boundary layer with turbulence and saltation effects”, *Experiments in Fluids* **23**:463-471, doi:10.1007/s003480050136
- Tarantino, A., De Col, E. (2008) “Compaction behavior of clay”, *Géotechnique* **58**(3):199-214, doi:10.1680/geot.2008.58.3.199.
- Thenoux, G., Bellolio, J.P., Halles, F. (2007) “Development of a methodology for measurement of vehicle dust generation on unpaved roads”, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board* 299-304, doi: 10.3141/1989-35
- UNICEM (2011) “Carrières, poussières et environnement”, *Rapport*, février 2011, 87 p.
- U.S. Department of Agriculture. (2017) “Soil Survey Manual”, *Soil Science Division Staff, Agricultural Handbook No. 18, March 2017*
- U.S. Environmental Protection Agency. (1974) “Development of Emission Factor for Fugitive Dust Sources.”, *Report, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Washington, USA*, 194 p.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1988) “Control of Open Fugitive Dust Sources.”, *Report, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Washington, USA*, 308 p.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1995) “Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition.”, *Report, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, Washington, USA*.
- 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*. (https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-10/documents/13.2.2_unpaved_roads.pdf)
- Vajanapoom, N., Shy, C.M., Neas, L.M., Loomis, D. (2001) “Estimation of particulate matter from visibility in Bangkok, Thailand”, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* **11**:97-102, doi: 10.1038/sj.jea.7500148
- Vardaka, E., Cook, C.M., Lanaras, T., Sgardelis, S.P., Pantis, J.D. (1995) “Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of *Quercus coccifera*, and evergreen sclerophyllous shrub.”, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **54**(3):414-419, doi:10.1007/bf00195114
- Veranth, J.M., Paradyjak, E.R., Seshadri, G. (2003) “Vehicle-generated fugitive dust transport: analytic models and field study”, *Atmospheric Environment* **37**:2295-2303, doi:10.1016/S1352-2310(03)00086-4

- Vinkovic, I. (2005) “Dispersion et mélange turbulents de particules solides et de gouttelettes par une simulation des grandes échelles et une modélisation stochastique lagrangienne. Application à la pollution de l’atmosphère. ”, *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon*, 227 p.
- Von Kármán, T. (1934) “Turbulence and skin friction”, *Journal of the Aeronautical Sciences* **1**(1):1-20, doi: 10.2514/8.5
- Walker, M.J. (2012) “Hot Deserts: Engineering, Geology and Geomorphology: Engineering Group Working Party Report”, *Geological Society Engineering Geology Special Publications, Volume 25*
- Wang, S., Ye, K. (2015) “Governmental dust control in construction industry: a study of policies”, *5th International / 11th Construction Specialty Conference*, doi: 10.14288/1.0076457
- Ware, J.H., Ferris, B.G., Dockery, D.W., Spengler, J.D., Stram, D.O., Speizer, F.E. (1986) “Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children”, *The American Review of Respiratory Disease*, 133(5):834-842
- Watson, J.G. (2002) “Visibility: Science and regulation”, *Journal of the Air & Waste Management Association* **52**:628-713, doi: 10.1080/10473289.2002.10470813
- Watson J.G., Rogers, C.F., Chow, J.C., DuBois, D., Gillies, J.A., Derby, J., Moosmüller, H. (1996) “Effectiveness demonstration of fugitive dust control methods for public unpaved roads and unpaved shoulders on unpaved roads”, *Report, Desert Research Institute, Prepared for California Regional Particulate Air Quality Study, Sacramento, California, USA*, 262 p.
- Watson, J.G., Chow, J.C. (2000) “Reconciling urban fugitive dust emissions inventory and ambient source contribution estimates: summary of current knowledge and needed research”, *Report for the Desert Research Institute*, 241p.
- Wei, X., Wang, G., Feng, S. (2008) “Aerodynamic characteristics about mining dump truck and the improvements of head shape”, *Journal of Hydrodynamics* **20**(6):713-718, doi: 10.1016/S1001-6058(09)60006-8
- Weill, P., Mouazé, D., Tessier, B., Brun-Cottan, J.C. (2010) “Hydrodynamic behaviour of coarse bioclastic sand from shelly cheniers”, *Earth Surface Processes and Landforms* **35**(14):1642-1654, doi:10.1002/esp.2004
- West, G. S. et C. J. Apelt. 1982, “The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10 000 and 100 000”, *Journal of Fluid Mechanics* **114**:361-377, doi :10.1017/S0022112082000202
- Western Regional Air Partnership (2006) “Fugitive Dust Handbook”, *Rapport*, 244 p.
- Wiggs, G.F.S., Weaver, C.M. (2012) “Turbulent flow structures and aeolian sediment transport over a barchan sand dune”, *Geophysical Research Letters*, **39**, L05404, doi: 10.1029/2012GL050847
- Wilcox, J.D. (1956) “Isokinetic flow and sampling”, *Journal of the Air Pollution Control Association*, **5**(4):226-245, doi:10.1080/00966665.1956.10467715
- Wilkinson, R.H. (1984) “A method for evaluating statistical errors associated with logarithmic velocity profiles”, *Geo-Marine Letters* **3**:49-52, doi: 10.1007/BF02463442

- Willeke, K., Baron, P.A. (2001) “*Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*”, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, doi:10.1002/9781118001684.
- Williams, J.J. (1986) “Aeolian entrainment thresholds in a developing boundary layer”, *Ph. D. Thesis, London University*. 527 p.
- Williams, J.J., Butterfield, G.R., Clark, D.G. (1994) “Aerodynamic entrainment threshold: effects of boundary layer flow conditions”, *Sedimentology* **41**(2):309-328, doi:10.1111/j.1365-3091.1994.tb01408.x
- Williams, D.S., Shukla, M.K., Ross, J. (2008) “Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road”, *Atmospheric Environment* **42**(16):3899-3905, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.003
- White, B.R. (1979) “Soil transport by winds on Mars”, *Journal of Geophysical Research* **84**(B9):4643-4651, doi: 10.1029/JB084iB09p04643
- Whitehouse, D. (2012) *Surfaces and their Measurement*. Boston: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0080972015
- Wong, J.Y. (2001) “*Theory of Ground Vehicles*”, John Wiley & Sons, Toronto, Canada, Third Edition
- WRAP (2006) “Fugitive dust handbook”, *Report prepared for the Western Regional Air Partnership’s (WRAP) Dust Emissions Joint Forum, Denver, Colorado*, 244 p.
- Xu, Y. (2014) “Dust emissions from undisturbed and disturbed soils: effects of off-road military vehicles”, *MSc Thesis, Kansas State University, USA*, 87 p.
- Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L.A., Prospero, J.M., Omar, A., Winker, D., Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zhao, C. (2015) “The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations”, *Advancing Earth and Space Science*, 42(6):1984-1991, doi: 10.1002/2015GL063040
- Yue, W., Meneveau, C., Parlange, M.B., Zhu, W., van Hout, R., Katz, J. (2007) “A comparative quadrant analysis of turbulence in a plant canopy”, *Water Resources Research*, **43**, W05422, doi: 10.1029/2006WR005583
- Zhang, X.Q., McMurry, P.H. (1993) “Evaporative losses of fine particulate nitrates during sampling”, *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* **26**(18):3305-3312, doi:10.1016/0960-1686(92)90347-N
- Zhou, J., Adrian, R.J., Balachandar, S., Kendall, T.M. (1999) “Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, **387**:353-396, doi: 10.1017/S002211209900467X
- Zieger, P., Fierz-Schmidhauser, R., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2013) “Effects of relative humidity on aerosol light scattering: Results from different European sites”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **13**(21):10609-10631, doi: 10.5194/acp-13-10609-2013
- Zimon, A.D. (1982) “*Adhesion of dust and powder*”, Consultant Bureau, New-York, USA.
- Zuo, J., Rameezdeen, R., Hagger, M., Zhou, Z., Ding, Z. (2017) “Dust pollution control on construction sites: Awareness and self-responsibility of managers”, *Journal of Cleaner Production* **166**:312-320, doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.027

Annexe : Publications

Articles dans une revue à comité de lecture

Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F. (2020) “Experimental study of particle lift on compacted sand-clay mixtures”, *Environmental Geotechnics*, doi: 10.1680/jenge.19.00172

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/atmo11040369

Le Vern, M., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Cerezo, V. (2021) “Effect of unpaved road surface degradation on dust emission and visibility attenuation induced by vehicles”, *Atmospheric Environment X* (en cours de review)

Duran-Garcia, E.E., **Le Vern, M.**, Murzyn, F., Razakamanantsoa, A.R., Larrarte, F. (2021) “Comparative study of the flow in the wake of cab-over and articulated dump trucks: application to dust suspension”, *European Journal of Mechanics-B/Fluids* (en cours de review)

Communications orales avec actes dans un congrès international ou national

Le Vern, M. (2021) “Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d’envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement”, *Academic Journal of Civil Engineering*, **39**(1) :333-340, doi : 10.26168/ajce.39.1.55, **1er prix Jeunes Chercheurs « René Houpert » des 39èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil**

Le Vern, M., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Cerezo, V. (2021a) “Study on a test track of dust resuspension induced by a vehicle”, *In Proceedings of the 24th Transport and Air Pollution Conference, Graz, Austria, 30 March – 01 April 2021*

Le Vern, M., Sediki, O., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F., Insenga, P., Gotteland, P. (2021b) “Development of a model to quantify dust emissions from truck traffic on earthmoving sites: approach and preliminary results”, *In Proceedings of the 19th Global Joint Seminar on GeoEnvironmental Engineering, Caen, France, 20-21 May 2021*, **Prix de la meilleure présentation dans la catégorie “Environmental Risk Assessment Remediation Management”**

Communications par poster dans un congrès national

Le Vern, M., Razakamanantsoa, A.R., Murzyn, F., Larrarte, F. (2020) “Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d’envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement”, *Journées Techniques Route, 5 et 6 février 2020, Nantes*, **2ème prix des meilleurs posters**

Titre : Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement

Mots clés : Émissions de poussières, chantiers de terrassement, pistes non revêtues, mécanique des sols, mécanique des fluides, vélocimétrie LASER

Résumé : Les chantiers de génie civil sont fortement émetteurs de poussières. Ils représentaient 18% des émissions en France en 2018, soit environ 138 000 tonnes de particules mises en suspension. La circulation des engins lors de la phase des terrassements est la principale cause des émissions. Elle a lieu sur des pistes non revêtues construites à partir de sols compactés qui se dégradent progressivement. Cela génère des nuages de poussières qui peuvent avoir des impacts sanitaires, environnementaux et qui atténuent la visibilité. Pour limiter ces nuisances, les terrassiers arrosent abondamment les pistes de circulation, ce qui entraîne un gaspillage d'eau. A l'heure actuelle, les mécanismes d'apparition, d'envol et de transport des poussières sur les chantiers sont mal quantifiés. Cette thèse vise à étudier les processus qui entraînent des particules de sol, initialement liées entre elles au sein d'une matrice granulaire, à devenir des aérosols atmosphériques.

Dans un premier temps, le mécanisme d'apparition des poussières est étudié en simulant la circulation de pneus sur différents sols. Dans une seconde phase, le processus d'initiation de l'envol des particules est étudié en soufflerie en considérant les phénomènes aérodynamiques à l'interface sol-atmosphère. Un modèle basé sur la turbulence convective est mis en place pour quantifier la capacité des sols à émettre des poussières. Le transport des particules dans les écoulements de sillage est également étudié en soufflerie à l'aide de maquettes. Les essais en laboratoire sont complétés par des expérimentations in-situ sur piste d'essais avec différents véhicules. Ce travail met en évidence l'influence des paramètres géotechniques, environnementaux et aérodynamiques qui conduisent à une augmentation de la concentration des poussières en suspension lors de la circulation des engins de chantier.

Title: Experimental study of the mechanisms and conditions of dust emissions. Application to earthworks.

Keywords: Dust emissions, earthworks, unpaved roads, soil mechanics, fluid mechanics, LASER velocimetry

Abstract: Civil engineering activities are high emitters of dust. They accounted for 18% of emissions in France in 2018, i.e. about 138,000 tons of suspended particles. Truck traffic during the earthmoving phase is the main cause of emissions. It takes place on unpaved runways built from compacted soils that are gradually degrading. This generates dust plumes that can have health and environmental impacts and reduce visibility. To limit these nuisances, earthworkers water the runways extensively, which wastes water. To date, the mechanisms of appearance, lift and transport of dust particles on construction sites are poorly quantified. This thesis aims to study the processes that lead soil particles, initially bound together within a granular matrix, to become atmospheric aerosols.

First of all, the mechanism of dust appearance is studied by simulating the circulation of tires above different soils. In a second phase, the process of particle lift initiation is assessed in a wind tunnel by considering the aerodynamic phenomena at the soil-atmosphere interface. A model based on convective turbulence is implemented to quantify the capacity of soils to emit dust. The transport of dust particles by the trucks in circulation is also highlighted in wind tunnels with scale models. The laboratory tests are completed by in-situ experiments on a test track by measuring the dust emissions of different vehicles with optical particle counters. This work highlights the influence of geotechnical, environmental and aerodynamic parameters which lead to an increase in the concentration of suspended dust during the circulation of haul trucks.