

Évaluation de différents équipements sur
des tracteurs semi-remorques dans le but
d'évaluer la création d'éclaboussures

Rapport de contrat 4502-06-RG02 Activité R598.2

Présenté à

Monsieur Mario Bussières
Service de la normalisation technique
Direction du transport routier des marchandises

Ministère des transports du Québec



Jean LEMAY, ing., Ph.D.
Département de génie mécanique

Décembre 2006

Avant-propos

Plusieurs intervenants ont été impliqués dans ce projet et l’auteur aimerait ici leur témoigner sa gratitude. Premièrement, nous remercions Monsieur Mario Bussières du MTQ pour le support et l’intérêt manifest es envers notre équipe. Son aide et son dynamisme lors de la réalisation des essais ont été grandement appr eci es.

Nous désirons de plus remercier vivement tout le personnel du Centre de Formation en Transport de Charlesbourg (CFTC), notamment son Directeur, Monsieur Eddy Vallières, ainsi que son adjoint administratif, Monsieur Louis T. Blais pour leur collaboration extraordinaire. Des remerciements spéciaux s’adressent à Robert, ainsi qu’à Messieurs Pierre Coulombe et Richard Harvey. Sans l’accueil et le support inconditionnel du CFTC, ce projet n’aurait pu avoir lieu.

Nos remerciements s’adressent également à Messieurs Christian Cantin et Martin Labbé du Service des travaux publiques de la ville de Québec. La consommation d’eau potable reli e à ce travail a été considérable et sans le support de la ville de Québec, Arrondissement de Charlesbourg, le projet n’aurait pu être r ealis e.

Il convient aussi de remercier Messieurs Claude Robert et Réjean Laflamme, respectivement Président et ingénieur de la compagnie Transport Robert. Pour réaliser les essais, ils ont gracieusement mis à notre disposition un véhicule semi-remorque ainsi que son chauffeur/mécanicien, Monsieur Guy Vertefeuille, dont nous avons appr eci e les services.

Finalement nous sommes grandement reconnaissants envers le personnel technique et les étudiants du département de génie mécanique de l’Université Laval qui ont participé au projet. La contribution des étudiants Louis-Alexis Allen-Demers, Jean-Frédéric Faure et Rémy Guillet a été essentielle. Enfin, l’implication du professeur Jean Ruel a grandement été appr eci e.

Table des matières

Avant-propos	i
Table des matières	ii
Liste des symboles	iv
Introduction	1
1 Montage expérimental et instrumentation	3
1.1 Montage expérimental	3
1.1.1 Site d'essais	3
1.1.2 Distributeur d'eau	4
1.1.3 Véhicule de base	6
1.2 Instrumentation	7
1.2.1 Épaisseur du film d'eau	7
1.2.2 Position latérale du camion	7
1.2.3 Direction et intensité du vent	8
1.2.4 Prise de photo systématique	10
1.2.5 Vitesse du camion, détection du passage	11
1.2.6 Mesure d'opacité du nuage	11
1.2.7 Système d'acquisition de données	11
1.3 Procédures expérimentales	12
1.3.1 Procédure de préparation de la séance d'essais	12
1.3.2 Procédure d'essai	13
2 Méthodologie	14
2.1 Traitement des données	14
2.1.1 Données brutes	14
2.1.2 Calculs : opacité du nuage, vitesse du camion, vitesse du vent	14
2.1.3 Statistiques, présentation des résultats	16

3	Campagne d'essai et résultats	19
3.1	Description des essais	19
3.1.1	Généralités	19
3.1.2	Configurations testées	21
3.1.3	Critères de sélection des essais	28
3.2	Résultats	29
3.2.1	Configurations avec pneus jumelés	29
3.2.2	Configurations avec pneus simples	33
4	Conclusions et recommandations	37
4.1	Atteinte des objectifs	37
4.2	Rappel des principaux résultats et discussion	38
4.3	Recommandations	40

Liste des symboles

IO : indice d'opacité (%)

N : nombre d'essais utilisés pour calculer l' IO moyen

T : tension de l'anémomètre en sortie du DSP (V)

V : module de la vitesse du vent (m/s)

V_0 : tension d'offset de la photodiode mesurée avant le passage du camion

V_{ae} : tension moyenne de la photodiode calculée dans la fenêtre "avant entrée"

V_{cam} : vitesse du camion

V_{nb} : tension moyenne de la photodiode calculée dans la fenêtre "nuage de brouillard"

V_{vl} : vitesse du vent latérale (m/s), projection du vecteur vent perpendiculairement à la trajectoire du camion

ε : efficacité d'une configuration par rapport à la configuration de référence

θ : Angle du vent ($^\circ$)

σ : écart type de la population d'essais

σ_m : écart type de la moyenne d'essais

Introduction

Ce document constitue le rapport final du contrat 4502-06-RG2, “*Évaluation de différents équipements sur des tracteurs semi-remorques dans le but d’évaluer la création d’éclaboussures*”, résultant de l’entente signée entre l’Université Laval et le Ministère des transports du Québec (MTQ) en octobre 2006.

Les essais routiers effectués dans le cadre de ce contrat ont été réalisés le 20 septembre 2006 au Centre de Formation en Transport de Charlesbourg (CFTC). Le projet fut conduit par l’équipe du professeur Jean Lemay du Laboratoire de Mécanique des Fluides du département de génie mécanique de l’Université Laval.

Contexte

L’intérêt du MTQ quant à la problématique émergeant du phénomène d’éclaboussures des véhicules lourds remonte à la fin des années 90. La motivation est simple à définir, puisque toute personne circulant sur la route a un jour constaté combien il peut être stressant, voire dangereux, de croiser ou de doubler un véhicule lourd dans des conditions pluvieuses. En effet, lorsqu’un véhicule circule sur une chaussée mouillée, il soulève une certaine quantité d’eau sous la forme d’un nuage d’éclaboussures et de brouillard. Dans de telles conditions, la visibilité des automobilistes évoluant dans le voisinage d’un camion semi-remorque se trouve gravement réduite. Avec l’appui du MTQ, le groupe de recherche du professeur Lemay, de l’Université Laval, s’est intéressé à cette question depuis 1997. Les différents projets réalisés par cette équipe avaient pour but principal d’élaborer, puis de tester en laboratoire et sur piste d’essais routiers, des stratégies de réduction du phénomène d’éclaboussures. Ils avaient également pour objectif de concevoir une méthodologie de mesure de l’opacité du nuage d’éclaboussures. Cette méthodologie de mesure repose sur l’utilisation de six ensembles lasers/photodiodes situés sur une piste d’essais routiers, de chaque côté du véhicule. Les résultats ont montré que la méthodologie de mesure développée est très performante. Parmi les paramètres ayant une influence sur la mesure d’opacité du nuage de brouillard, l’intensité du vent latéral par rapport à la direction du véhicule constitue celui qui mérite le plus d’attention.

D'autre part, au cours des dernières années, dans le cadre du *NRC/NRCan Greenhouse Gas Program*, le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) a entrepris une étude visant à déterminer l'efficacité de différents dispositifs de réduction de traînée aérodynamique conçus pour les véhicules semi-remorques [9, 10]. Au printemps 2006, le CNRC a effectué des essais en soufflerie sur un véhicule en grandeur réelle. Leurs travaux ont permis d'identifier un certain nombre de dispositifs ayant la capacité de réduire la traînée aérodynamique du véhicule. Cette réduction de traînée pourrait ainsi engendrer une économie substantielle de carburant. Cependant, le CNRC n'a pas étudié l'influence que peuvent avoir les dispositifs testés sur la création d'éclaboussures lorsque le véhicule circule sur une chaussée mouillée. Cette question demeure pertinente si on considère tous les aspects reliés à la sécurité routière.

Considérant les efforts de recherche investis par le MTQ depuis 1997 [1, 2, 3, 8] ainsi que l'expertise reconnue de l'équipe de l'Université Laval dans ce domaine [4, 5, 7], il était parfaitement indiqué de vouloir évaluer l'impact que les nouveaux dispositifs de réduction de traînée proposés par le CNRC peuvent avoir sur le phénomène d'éclaboussures d'un véhicule semi-remorque.

Objectifs

Le travail de recherche visait les objectifs suivants:

1. Mesurer les indices d'opacité des nuages d'éclaboussures générés par le passage des véhicules lourds circulant sur une chaussée mouillée, ces derniers étant équipés de différents dispositifs de réduction de traînée aérodynamique. Aux fins de comparaisons, effectuer aussi les mesures d'indices d'opacité avec le véhicule en configuration de base, c'est-à-dire sans aucun ajout de dispositifs de réduction de traînée aérodynamique.
2. À partir des résultats des deux premiers objectifs, évaluer l'impact qu'ont les dispositifs de réduction de traînée aérodynamique sur le phénomène d'éclaboussures des véhicules lourds.

Le premier chapitre présente le montage expérimental, l'instrumentation développée et la procédure expérimentale. Le chapitre 2 présente la méthode de traitement de données et d'analyse des résultats. Le chapitre 3 décrit les différents dispositifs testés ainsi que les résultats obtenus lors des essais routiers. Le chapitre 4 présente les conclusions et recommandations.

Chapitre 1

Montage expérimental et instrumentation

Le montage expérimental est présenté en détails dans le rapport [8]. Une brève description des éléments essentiels constituant le montage est fournie dans le présent chapitre.

1.1 Montage expérimental

1.1.1 Site d'essais

Les essais ont été effectués au Centre de formation en transport de Charlesbourg (CFTC) sur une portion droite de la piste de pratique. La figure 1.1 montre une vue aérienne du site d'essais et la disposition du site d'essai est détaillée sur la figure 1.2.



Figure 1.1: Photographie aérienne du Centre de formation en transport de Charlesbourg.

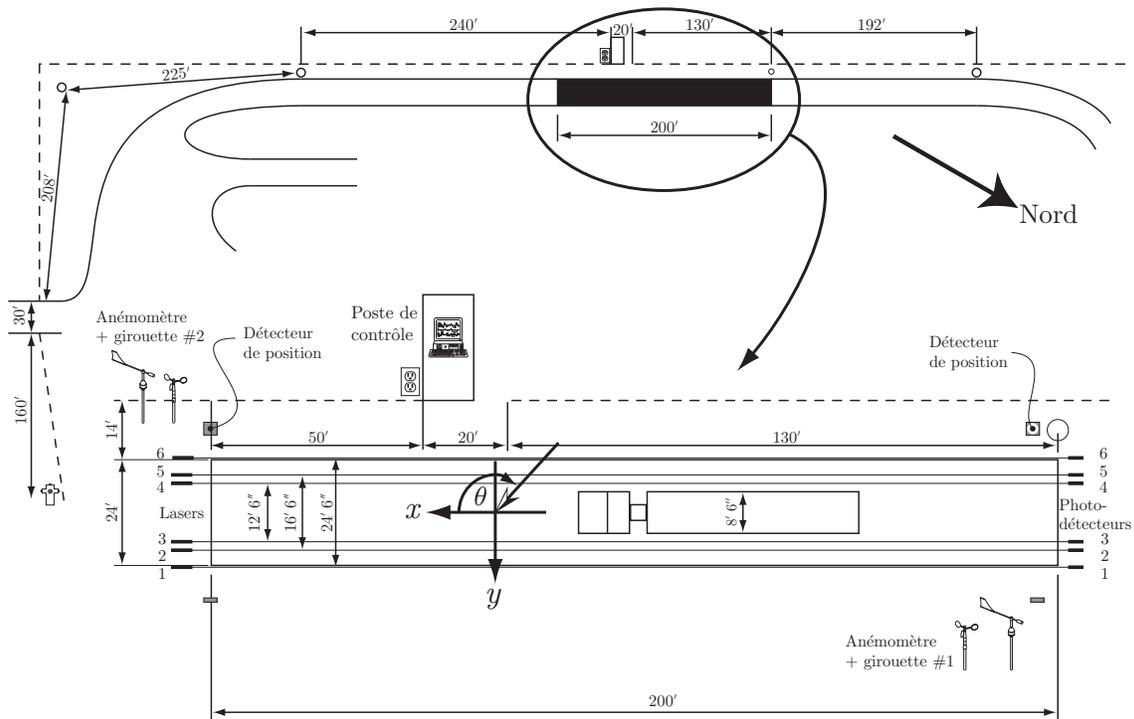


Figure 1.2: Schéma de la piste d'essais.

La section droite sur laquelle le véhicule peut accélérer et décélérer a une longueur d'environ 226 m (740'). La zone de mesure a une longueur de 61 m (200'). La largeur de la piste d'essai est de 7.32 m (24'). La pente latérale moyenne de la piste est de 2.1% (1.2°) et la pente longitudinale est de 1.9% (1.1°). Cette légère dénivellation assure l'évacuation de l'eau ce qui permet de maintenir un film d'épaisseur assez uniforme (sur toute la piste) et constant durant toute la campagne d'essais.

1.1.2 Distributeur d'eau

L'alimentation en eau est obtenue à partir d'une borne-fontaine située à l'extérieure du site du CFTEC. Afin de réaliser le branchement, un té a été ajouté sous la borne-fontaine (voir figure 1.3). Une vanne à guillotine fixée sur le té permet de régler le débit d'eau durant les essais. L'eau est amenée jusqu'à la zone de mesure par des tuyaux d'aqueduc temporaire de 152 mm (6") de diamètre.

La zone mouillée se divise en deux parties: une zone de prémouillage située en amont de la zone d'essais et la zone d'essais elle-même. La zone de pré-mouillage a été aménagée pour s'assurer d'avoir un nuage stationnaire autour du camion à l'entrée de la zone d'essais [2, 8]. La chaussée est mouillée avec un distributeur d'eau constitué de 61



Figure 1.3: Photographie du montage sur la borne fontaine.

m (200') de tuyaux de PVC de 102 mm (4") de diamètre, percés de 508 trous d'éjection de 3.2 mm (1/8") de diamètre espacés également de 120 mm (4" $\frac{3}{4}$) entre eux. Le tuyau est alimenté à la suite du distributeur principal (voir figure 1.4) et fermé à son extrémité amont.

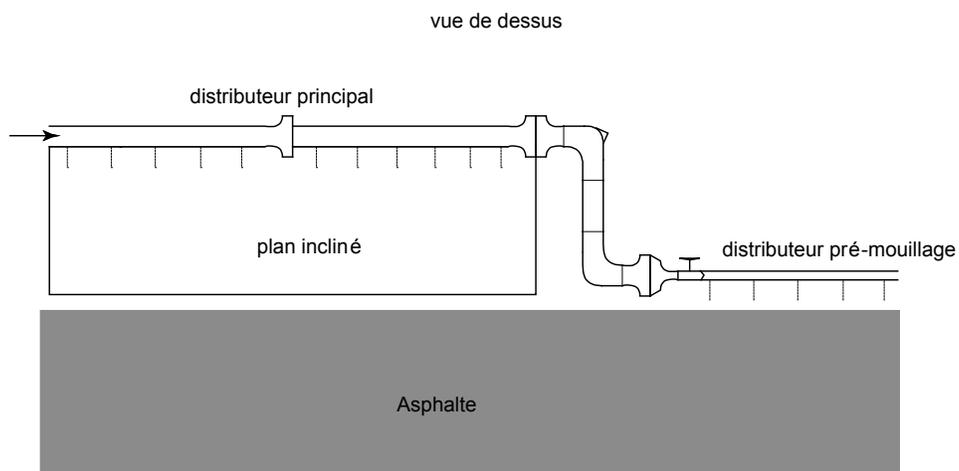


Figure 1.4: Jonction des distributeurs de pré-mouillage et principal.

La zone d'essais est mouillée grâce au distributeur principal conçu pour fournir un débit d'eau uniforme tout au long de la piste d'essai. Celui-ci est composé de tuyaux d'aqueduc temporaire de 6" de diamètre, similaires à ceux utilisés pour acheminer l'eau jusqu'à la zone d'essai. Il y a 500 trous d'éjection répartis uniformément sur les 200' du distributeur. Le distributeur principal est surélevé sur un système permettant le développement du film sur un plan incliné avant son arrivée sur la chaussée (voir figure 1.5).

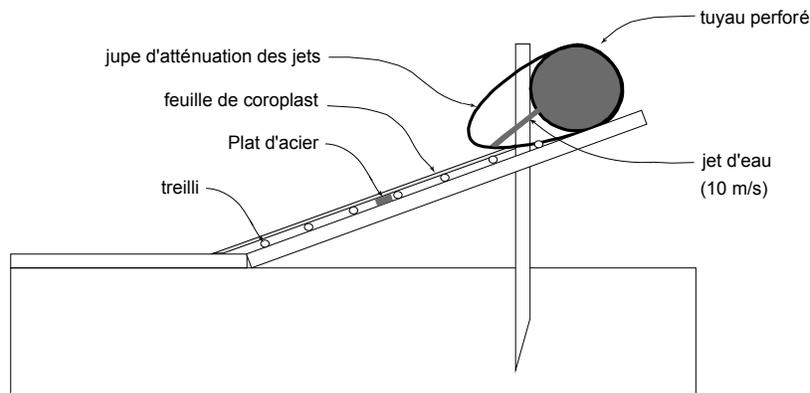


Figure 1.5: Schéma du plan incliné de distribution d'eau.

Cinq manomètres de marque Winters ont été utilisés pour vérifier la pression dans le distributeur, un à la sortie de la borne-fontaine et un à chaque extrémité des distributeurs d'eau (prémouillage et principal).

1.1.3 Véhicule de base

Le véhicule utilisé (figure 1.6) a été prêté par la compagnie *Transport Robert*. Il est composé d'un tracteur Volvo de type VNL64T 630, année 2005, muni d'une couchette et d'une remorque standard de 53 pieds. Cette configuration de base est légèrement différente de celle utilisée lors des campagnes précédentes [8] (remorque de 48 pieds et tracteur sans couchette). La largeur extérieure de la remorque est de 102" et la distance entre les faces internes des roues arrières de la remorque est de 53.5".



Figure 1.6: Véhicule utilisé pour les essais.

Afin de permettre au chauffeur du véhicule de s'aligner plus facilement, des marqueurs autocollants "TOMS" fournis par le ministère des Transports du Québec ont été placés sur la piste.

1.2 Instrumentation

1.2.1 Épaisseur du film d'eau

Afin de s'assurer d'une épaisseur constante du film d'eau tout au long de la piste ainsi que d'un essai à l'autre, un appareil spécialement conçu pour effectuer cette mesure est utilisé (figure 1.7). L'instrument est déposé sur la chaussée mouillée et les LED indiquent l'épaisseur du film d'eau avec une résolution de 0.25 mm.

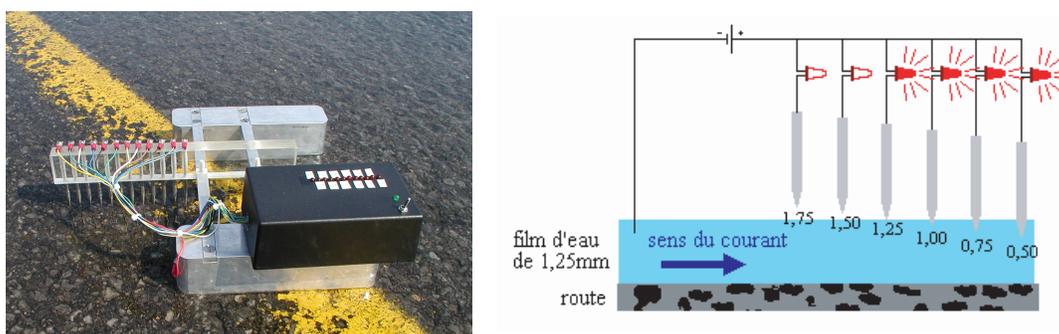


Figure 1.7: Instrument de mesure de l'épaisseur du film d'eau.

1.2.2 Position latérale du camion

Il est à noter que la distance de référence utilisée pour le positionnement du camion est la distance entre l'intérieur de la roue arrière gauche intérieure et le bord gauche de la ligne centrale de la piste d'essais (ligne jaune). Cette mesure est de 0.610 m si le camion est bien centré.

Un appareil à ultrasons (voir photo 1.8) sert à mesurer la distance latérale du véhicule lorsqu'il circule devant le poste de contrôle. La mesure de distance est déclenchée par le détecteur de passage amont (voir section 1.2.5). L'appareil à ultrason effectuant des mesures pendant deux secondes, on peut détecter le passage du camion en calculant la moyenne des valeurs renvoyées lorsque l'écho est répercuté par la remorque du camion. Il est nécessaire de faire une calibration de l'appareil au début de chaque séance d'essais pour établir la relation entre la mesure fournie et la distance de référence. La procédure est détaillée dans la partie 1.3.1.



Figure 1.8: Appareil de mesure à ultrasons de la position latérale du camion.

1.2.3 Direction et intensité du vent

Conformément aux recommandations des campagnes d'essais antérieures, une attention particulière a été portée à la mesure et à la prise en compte des conditions de vent. La mesure de la direction du vent est réalisée à l'aide d'une girouette et son intensité à l'aide d'un anémomètre à coupole (figure 1.9).



Figure 1.9: Anémomètre et girouette.

Étalonnage de la girouette

Deux girouettes disposées à l'entrée et à la sortie de la piste d'essai furent utilisées. La girouette de l'entrée a été conçue à l'Université Laval [8], alors que celle de la sortie provient de la compagnie Davis, modèle 7911. Les étalonnages des girouettes ont été réalisés le 18 septembre 2006 au laboratoire de mécanique des fluides de l'Université Laval. La loi d'étalonnage est du type :

$$\theta = a_2 \times E^2 + a_1 \times E + a_0 \quad (1.1)$$

où θ est l'angle de la girouette (compris entre 0 et 360°) et E la tension de sortie en Volts. Pour la girouette située à l'entrée de la piste, les coefficients sont $a_2 = -20.921$, $a_1 = 224.53$, alors que pour la girouette située à la sortie, les coefficients sont $a_2 = -17.929$, $a_1 = 216.38$. Le coefficient a_0 doit être déterminé lorsque la girouette est en place sur son support. Ceci est fait grâce au programme d'acquisition de données.

L'angle de la girouette est converti pour donner une indication de la direction du vent comprise entre -180° et $+180^\circ$ tel qu'indiqué sur le schéma de la figure 1.10 qui présente la convention de signe utilisée pour le vent. Lorsque le vent vient de la gauche pour le chauffeur du camion, il s'agit d'un vent négatif. Lorsqu'il vient de la droite, c'est un vent positif.

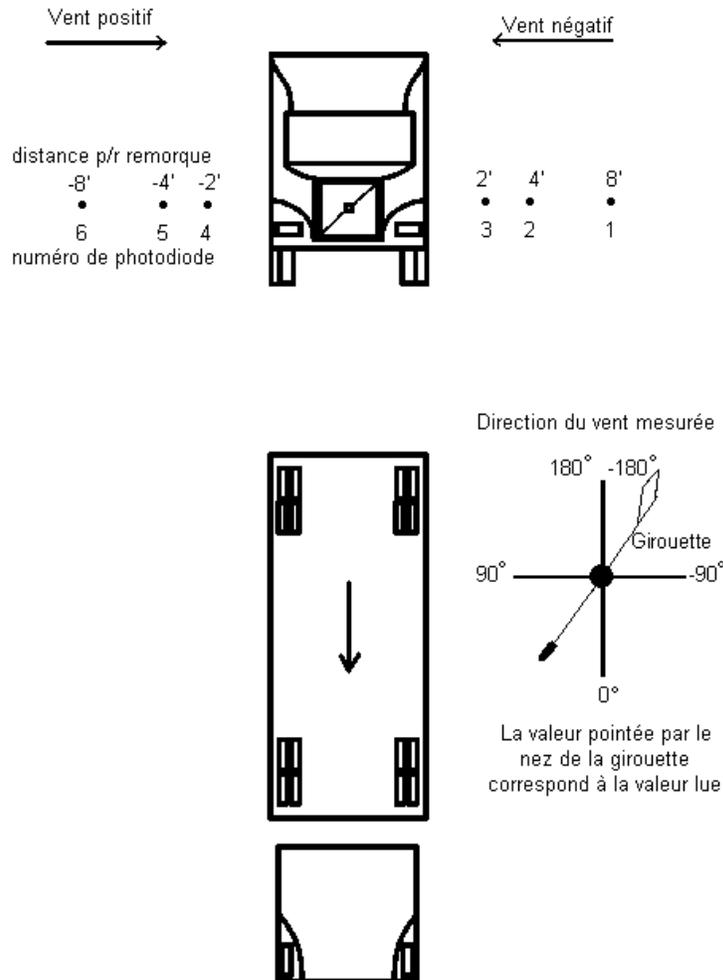


Figure 1.10: Convention de signe.

Étalonnage des anémomètres

Deux anémomètres à coupes sphériques ont été utilisés pour mesurer l'intensité du vent. Le premier, fabriqué à l'Université Laval [8], était disposé à l'entrée de la piste d'essai, alors que le second, bâti conçu à l'Université Laval et coupes de marque Davis 7911, était installé à la sortie. Les étalonnages ont été réalisés le 18 septembre 2006 dans la soufflerie à circuit fermé du laboratoire de mécanique des fluides de l'Université Laval. La vitesse de référence étant mesurée à l'aide d'un tube de Pitot statique et d'un capteur de pression MKS Baratron 120AD. La loi d'étalonnage pour les anémomètres est présentée à l'équation 1.2.

$$V = c_1 \times E + c_0 \quad (1.2)$$

où V représente la vitesse du vent en m/s et E la tension de sortie en Volts. Pour l'anémomètre situé à l'entrée de la piste, les coefficients sont $c_1 = 7.689$ et $c_0 = -2.166$, alors que pour celui de la sortie, les coefficients sont $c_1 = 6.382$ et $c_0 = -1.567$. Les anémomètres se mettent à tourner lorsque la vitesse est supérieure à 0.75 m/s. Les essais pour lesquels la vitesse indiquée est inférieure à ce seuil sont considérés comme ayant été réalisés à une vitesse de 0 m/s.

Acquisition des signaux

Une lecture en continu de la direction et de l'intensité du vent ainsi que de la composante de vent latéral est disponible dans l'onglet *Mesure* du programme d'acquisition pour permettre la surveillance des conditions et le lancement des essais. Lorsque l'acquisition des données est lancée, l'acquisition de la vitesse et de la direction du vent se fait de la même manière que l'acquisition des signaux des photodiodes. Ainsi, à chaque mesure de tension du signal des photodiodes correspond une mesure des conditions de vent.

1.2.4 Prise de photo systématique

Suivant la procédure établie dans les campagnes d'essais précédentes, nous avons eu recours à une prise de photo pour chacun des passages du véhicule. Un appareil photo Canon EOS 300D était placé en bout de piste. Un zoom Canon 70-300 mm permet d'avoir une vue suffisamment proche du camion et de son nuage. La prise de photo est déclenchée par le détecteur de passage du camion amont et un retardateur ajustable permet de faire la photo lorsque le camion est à peu près au milieu de la section d'essai. Les réglages utilisés pour les prises de vues sont les suivants, appareil photo en mode manuel : Vitesse 1/4000 sec, ouverture f/7.1, iso 400, balance des blancs selon le temps (nuage ou soleil).

1.2.5 Vitesse du camion, détection du passage

Le passage du camion à l'entrée et à la sortie de la section d'essai est détecté à l'aide d'interrupteurs photoélectriques Omron E3K-R10K4. Durant les essais, les signaux de ces détecteurs optiques sont enregistrés en continu par le système d'acquisition de données. La distance entre les deux détecteurs étant connue (62.255 m), il est facile de calculer la vitesse moyenne du camion lors de sa traversée de la section d'essai. Le détecteur amont permet également de déclencher le système de mesure à ultrasons de la position latérale du camion et la prise de photo par l'intermédiaire d'un retardateur ajustable.

1.2.6 Mesure d'opacité du nuage

La mesure de l'opacité du nuage est réalisée selon la même méthode que pour la campagne précédente à l'aide des mêmes lasers et photodiodes. Les lasers sont de type He-Ne de marque Uniphase. Les photodiodes de marque Optek (modele OP550A) sont montées dans un circuit électronique développé à l'Université Laval [8]. Les six photodiodes sont situées avant l'entrée de la section d'essai et les six lasers après la sortie, ils sont donc distants d'un peu plus de 61 m (200'). Leur hauteur a été fixée à 114 cm (45") comme dans la campagne précédente. La distance de chacun des faisceaux par rapport au côté de la remorque est de 0.61 m, 1.22 m et 2.44 m (2', 4' et 8') (figure 1.11).

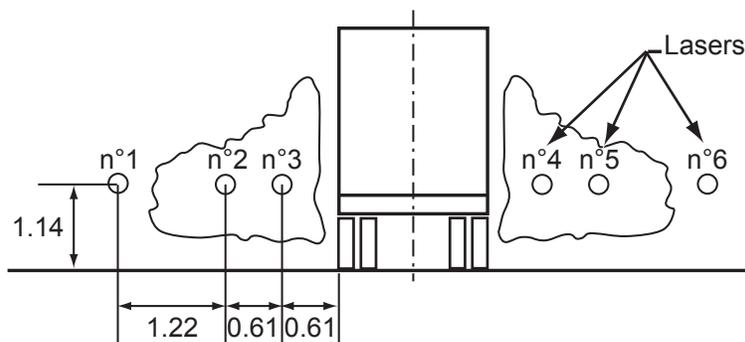


Figure 1.11: Positions et numéros des paires photodiodes/lasers. Dimensions en m.

1.2.7 Système d'acquisition de données

L'acquisition des signaux est réalisée avec un ordinateur portable Toshiba Tecra S1 situé dans le poste de contrôle. L'ordinateur est équipé d'un processeur Intel Centrino 1.5 GHz

et de 512 Mo de RAM. Il est muni d'une carte d'acquisition PCMCIA National Instrument DAQCard-6062. Cette carte possède 16 entrées analogiques avec une résolution de 12 bits. La fréquence maximale d'échantillonnage est de 500 kHz. Le programme d'acquisition de données utilisé (*essai_camion_MTQ.llb*) est réalisé avec le logiciel LabVIEW. Une capture d'écran du programme est montrée à la figure 1.12. Les signaux à acquérir sont au nombre de 12. Il s'agit des 6 signaux des photodiodes, des 2 signaux des détecteurs de passage du camion, des signaux des deux anémomètres et de ceux des deux girouettes.

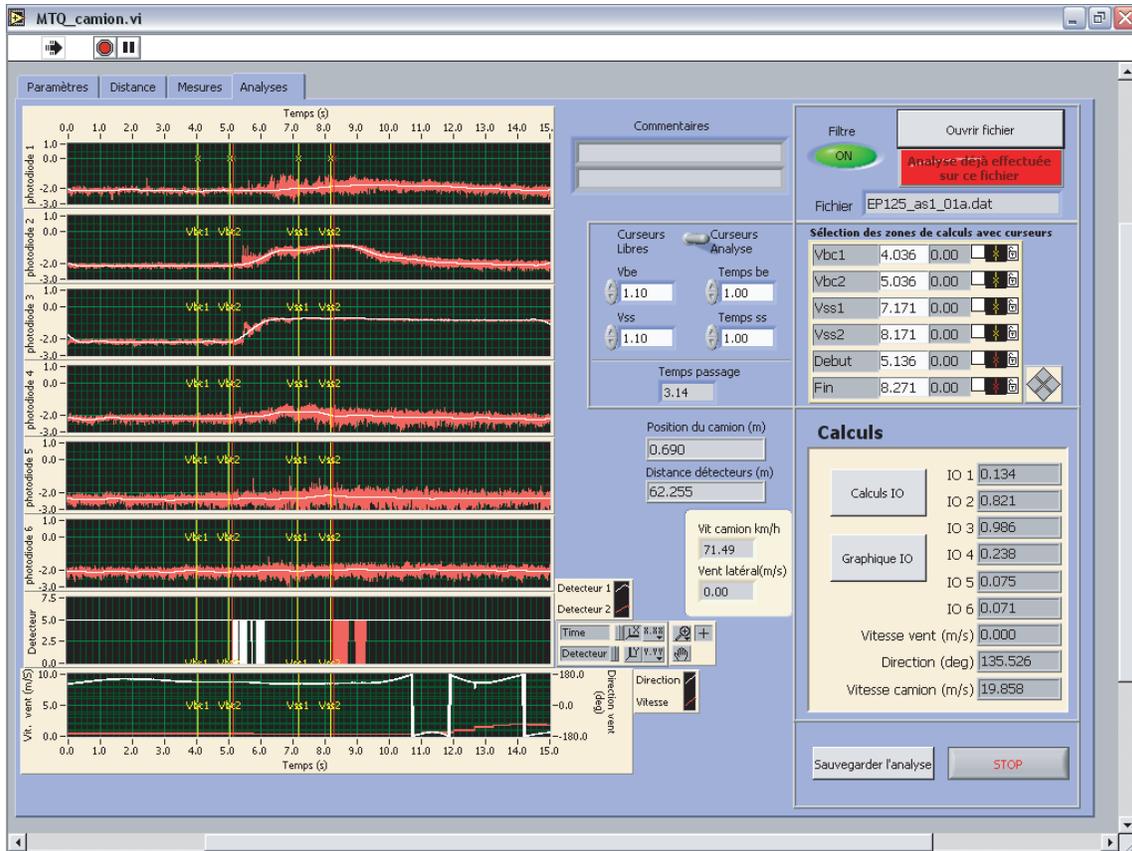


Figure 1.12: Capture d'écran de la page de traitement de données du programme.

1.3 Procédures expérimentales

1.3.1 Procédure de préparation de la séance d'essais

Les actions à effectuer au début de la séance d'essai sont brièvement décrits dans les paragraphes suivants. Pour avoir plus de détails, le lecteur est invité à consulter le rapport [8].

Installation et offset de la girouette

Lors de l'installation de la girouette, il faut veiller à calculer son offset. Ceci permet de caler l'indication de la girouette à 0° lorsque celle-ci est parallèle à la piste et le nez vers la fin de la section d'essais. Cette position correspond à un vent de face pour le camion.

Offset de la mesure de position latérale du camion

Le camion doit s'aligner sur la piste d'essais et s'arrêter, l'arrière de la remorque vis-à-vis du système de mesure de position. On mesure alors, à l'aide d'un ruban à mesurer la distance entre l'intérieur de la roue arrière gauche et le bord gauche de la ligne centrale de la piste d'essais (ligne jaune). Dans l'onglet *Distance* du programme d'acquisition, on déclenche la mesure de distance par le système à ultrasons puis on lit le résultat. On ajuste ensuite l'offset pour que la valeur lue corresponde à la valeur mesurée au ruban à mesurer.

Alignement des lasers

Les lasers situés à la fin de la section d'essais doivent être alignés afin que le maximum d'énergie du faisceau soit capté par les photodiodes situées au début de la section d'essais. Un premier alignement est effectué à l'œil. Puis on réalise un ajustement fin grâce au programme *Ajustement_laser* qui effectue une acquisition en direct des signaux des photodiodes et permet donc de trouver un maximum en faisant varier l'orientation des lasers.

1.3.2 Procédure d'essai

L'offset des photodiodes doit être acquis juste avant chaque passage du camion pour connaître la valeur du signal lorsque la photodiode ne reçoit aucune lumière en provenance du laser. Pour cela, un opérateur obstrue les faisceaux lasers à leur source pendant que l'opérateur du poste de contrôle lance l'acquisition des offsets dans l'onglet *Paramètres* du programme d'acquisition. Un opérateur à l'extérieur doit donner le signal de départ lorsque le camion sort du virage pour que l'opérateur du poste de contrôle lance l'acquisition dans l'onglet *Mesure* du programme.

Chapitre 2

Méthodologie

La méthodologie employée est la même que celle utilisée à la campagne d'essai [8]. Ce chapitre rappelle les grandes lignes de la méthode de traitement utilisée.

2.1 Traitement des données

2.1.1 Données brutes

L'acquisition des données est déclenchée par un opérateur lorsque le camion sort de la courbe avant le prémouillage. Le temps d'acquisition est de 15 secondes et la fréquence d'acquisition de 1000 Hz. La figure 2.1 présente un exemple de signaux bruts. Pour faciliter la visualisation des données, les signaux des photodiodes sont filtrés à l'aide d'un filtre FIR passe-bas avec une fréquence de coupure de 5 Hz. Le programme d'acquisition *essai camion MTQ.llb* permet à l'opérateur de choisir d'appliquer ou non le filtre aux données (la figure montre les signaux non filtrés en gris et les signaux filtrés en noir). La période identifiée "camion dans la section d'essai" commence lorsque l'avant du camion entre dans la section d'essai et se termine lorsque l'arrière en sort. Les lignes pointillées verticales illustrent les fenêtres utilisées pour le calcul (voir section 2.1.2). La présence du nuage est facilement remarquable sur les signaux des photodiodes 2 et 3. Les signaux 1 et 3 présentent seulement une petite variation de la différence de potentiel, traduisant une faible perte de visibilité vis-à-vis des lasers correspondants.

2.1.2 Calculs : opacité du nuage, vitesse du camion, vitesse du vent

Afin d'améliorer la convergence statistique des résultats sans pour autant augmenter le nombre d'essais, les valeurs utilisées pour les calculs sont des moyennes des signaux effectuées sur des fenêtres temporelles. La durée et la position de ces fenêtres sont identiques pour tous les essais afin de systématiser la procédure. Le calcul de la moyenne

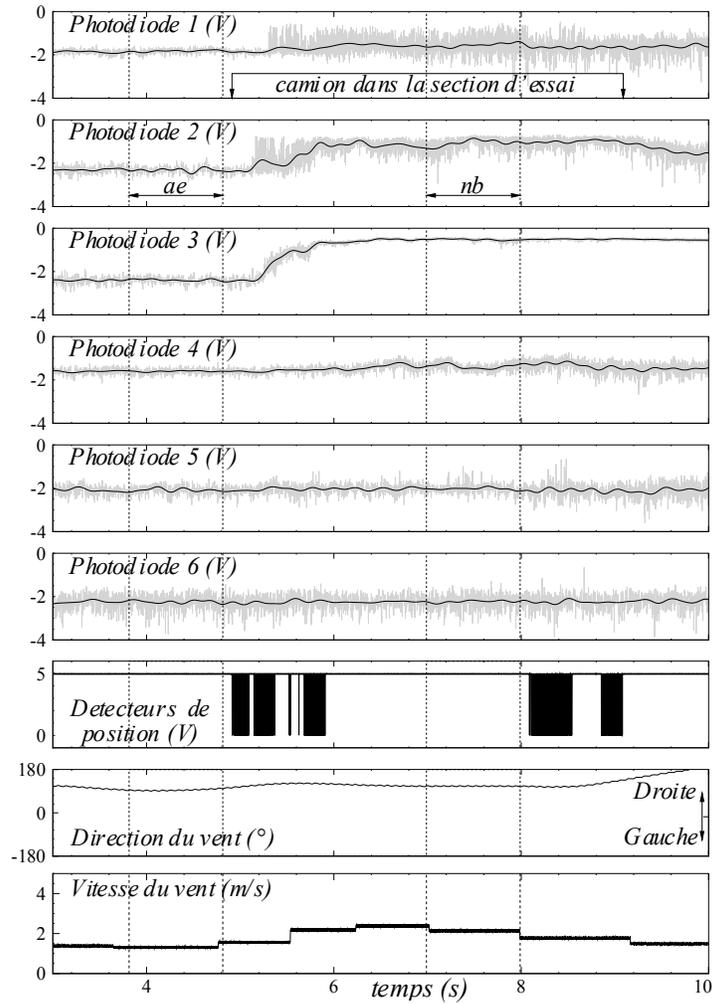


Figure 2.1: Données brutes. En gris : non filtrées; en noir : filtrées avec une fréquence de coupure $f_c = 5$ Hz. Les zones temporelles indiquées par les lignes verticales pointillées sont les fenêtres de moyennage utilisées pour le calcul. ae , avant l'entrée du camion; nb , nuage de brouillard. Le temps $t = 0$ s correspond au déclenchement de l'acquisition par l'opérateur.

est fait sur une durée de 1 seconde et les fenêtres sont placées 0.1 s avant le passage de l'avant du camion à l'entrée de la section d'essai pour la fenêtre ae (avant entrée) et 0.1 s avant le passage de l'avant du camion à la sortie de la section d'essai pour la fenêtre nb (nuage de brouillard).

Les conditions de vent de l'essai sont les moyennes des signaux de girouette et d'anémomètre calculées dans la fenêtre ae . Aux fins de classement des essais, la vitesse du vent latéral (V_{vl}) est calculée selon l'équation 2.1. Elle correspond à la projection du vecteur vent sur l'axe perpendiculaire à la trajectoire du camion. Une V_{vl} positive correspond à un vent de droite (venant de la droite du chauffeur) et une V_{vl} négative à

un vent de gauche.

$$V_{vl} = V \times \sin \theta \quad (2.1)$$

où V est la vitesse du vent et θ son angle variant de -180 à 180° tel qu'indiqué sur la figure 1.2.

La vitesse de référence du camion est obtenue en divisant la distance entre les deux détecteurs de passage optiques par le temps de passage du camion.

L'opacité du nuage vis-à-vis chaque paire laser/photodiode est quantifiée par l'indice d'opacité (IO) calculé selon l'équation 2.2. Un IO de 100% correspond à une visibilité nulle tandis qu'un IO de 0% correspond à une visibilité parfaite.

$$IO = 100 \times \frac{V_{ae} - V_{nb}}{V_{ae} - V_0} \quad (2.2)$$

où V_{ae} correspond à la tension moyenne calculée dans la fenêtre "avant entrée", V_{nb} à la tension moyenne calculée dans la fenêtre "nuage de brouillard" et V_0 est l'offset mesuré avant le passage du camion comme expliqué à la section 1.3.2.

Pour chaque essai, les résultats se présentent comme à la figure 2.2. Les indices d'opacité sont tracés en fonction de la distance latérale de la remorque où ils sont mesurés. Cette distance est ajustée en fonction de la mesure de position latérale du camion. La photographie de l'essai permet de vérifier les résultats et de se représenter l'opacité. Les indices d'opacité des photodiodes 2 et 3 (situé aux distances latérales d'environ 0.61 et 1.22 m) représentent bien la perte de visibilité qui était marquée par la chute de différence de potentiel. Les IO correspondant sont respectivement de 95% et 74%, traduisant une visibilité nulle dans le premier cas et très mauvaise dans le second. En revanche les IO des capteurs 1 et 4 (environ 7% et 17%) signifient une assez bonne visibilité. Ceci est bien illustré sur la photo par la facilité à voir les trépieds des photodiodes correspondantes.

2.1.3 Statistiques, présentation des résultats

Aux fins de statistiques, les essais sont regroupés par vitesse de vent latéral. Pour chaque groupe, les moyennes des IO et de la V_{vl} sont calculées ainsi que l'écart type sur la moyenne σ_m calculé selon l'équation 2.3.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.3)$$

où σ représente l'écart type de la population d'essais et N le nombre d'essais de cette population.

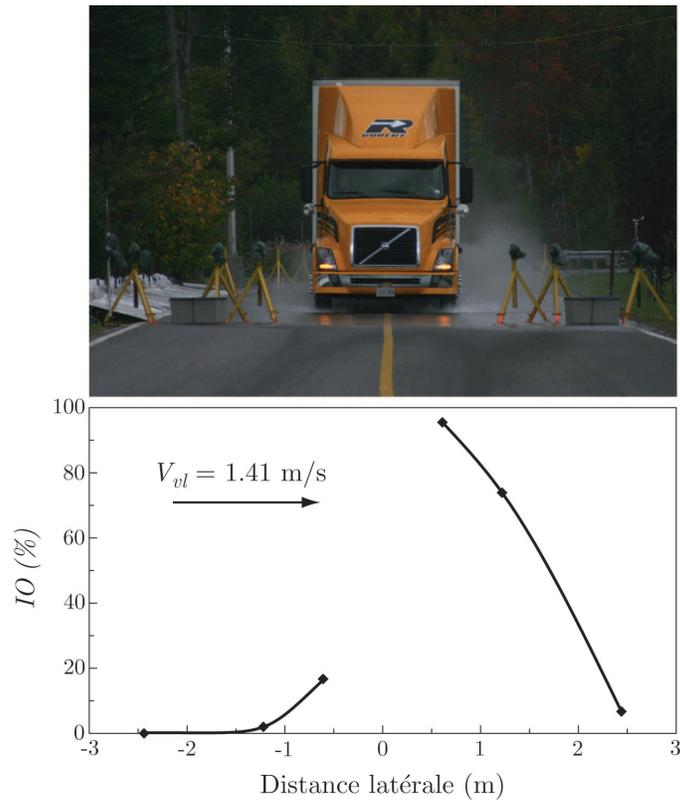


Figure 2.2: Présentation des résultats pour un essai.

Les statistiques sont présentées comme sur la figure 2.3. La moyenne des IO pour chaque position latérale est donnée avec un intervalle de confiance de $\pm 2\sigma_m$. Ce groupe d'essais est caractérisé par sa V_{vl} moyenne pour laquelle l'intervalle de confiance de $\pm 2\sigma_m$ est également calculé.

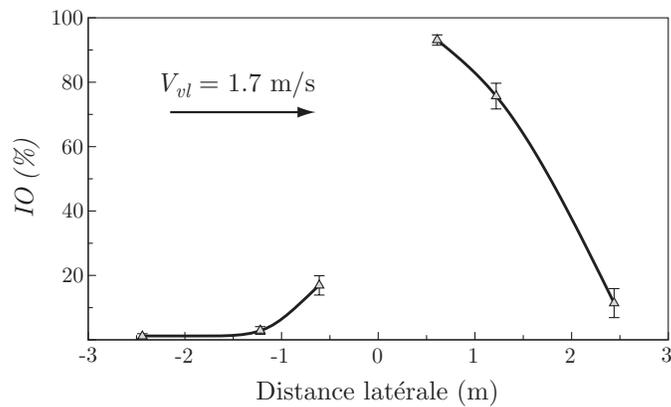


Figure 2.3: Présentations des résultats : statistiques sur un groupes d'essai de même gamme de vitesse de vent latéral (V_{vl}).

Pour permettre une comparaison aisée entre deux configurations, on peut calculer l'efficacité globale de la configuration testée par rapport à la configuration de référence. Celle-ci peut être calculée à partir des 6 *IO* ou des 3 *IO* sous le vent dans le cas où le vent est assez important car dans ce cas l'amélioration de visibilité du côté au vent n'est pas d'un grand intérêt celle-ci étant déjà bonne. L'efficacité est calculée selon l'équation 2.4.

$$\varepsilon = 100 \times \left(1 - \frac{(\sum^{3ou6} IO)_{testée}}{(\sum^{3ou6} IO)_{référence}} \right) \quad (2.4)$$

Chapitre 3

Campagne d'essai et résultats

3.1 Description des essais

3.1.1 Généralités

Les essais décrits dans ce chapitre ont tous été réalisés dans la journée du 20 septembre 2006. Pour obtenir une bonne convergence statistique et s'assurer d'une bonne répétabilité des résultats, il aurait fallu pouvoir faire des essais sur une plus longue période. La contrainte nous limitant à faire tous les essais en moins de 20 heures était imposée par le fournisseur du véhicule, *Transport Robert*. Il faut comprendre que ce fournisseur ne pouvait soustraire davantage le camion gracieusement prêté de sa flotte de véhicule. Bien que cette situation ait eu un certain nombre de conséquences, il faut préciser que l'ensemble des résultats et les conclusions qui en découlent demeurent parfaitement valables.

Au total, 58 essais ont été réalisés au cours de la journée. Tous les essais ont été réalisés avec une épaisseur du film d'eau de 1.25 mm et une vitesse du véhicule de 55 km/h (vitesse inférieure par rapports aux campagnes précédentes étant donné le chargement du véhicule).

Appareillage défectueux et conséquences

Au cours des premiers essais, le fil provenant du détecteur de position #1 a été branché par inadvertance dans le port d'entrée servant à déclencher l'appareil ultrasonique ainsi que le circuit de retard du module de déclenchement de l'appareil photo (entrée "trigger"). Comme ce fil est relié à l'alimentation 24 Volts du détecteur #1, le circuit *DSP* du détecteur ultrasonique et le circuit du déclencheur de l'appareil photo ont été endommagés. Cette maladresse a entraîné: *i)* la perte du déclenchement automatique de la prise de photo, *ii)* la perte de mesure systématique de la position latérale du

véhicule et, finalement, *iii*) la perte de mesure de la vitesse du véhicule (due à la perte de détection de l'arrivée du véhicule sur la section d'essai). Ainsi, pour la quasi-totalité des essais présentés, la prise de photo a été réalisée manuellement et la position latérale du véhicule a été contrôlée à partir des informations visuelles. Pour ce qui est de la vitesse du véhicule, la lecture de l'odomètre par le chauffeur constitue la seule information recueillie. Étant donné la contrainte de temps imposée pour réaliser les essais, aucune autre solution n'a pu être envisagée.

Qualité des photos en fonction de l'heure dans la journée

Tel que mentionné dans les paragraphes précédents, les essais ont dû être réalisés dans la même journée. Selon les données fournies par l'institut Herzberg d'astrophysique du Conseil National de Recherche du Canada, pour ville de Québec, le 20 septembre 2006, l'heure de coucher du soleil était de 17h47 (site http://www.hia-ihh.nrc-cnrc.gc.ca/sunrise_f.html). Les 38 premiers essais ayant été réalisés avant 17h40 et les 20 derniers essais ont été réalisés après 18h15. Ainsi, on peut dire que toutes les photos prises avant 16h10 correspondent à la période de plein jour, celles prises entre 17h00 et 17h40 correspondent à une période de soleil couchant et celles prises après 18h15 correspondent à une période de noirceur. La figure 3.1 illustre de quelle façon la qualité des photos varie en fonction de l'heure de la journée. Selon ces données, les configurations dont les photos ont été prises après 18h15 ne disposent d'aucun support visuel pour enrichir l'analyse (tel que présenté dans les paragraphes suivants, il s'agit des trois dernières configurations).



Figure 3.1: Comparaison entre des photos prises à différentes heures de la journée; à gauche 16h00, au centre 17h30, à droite 18h15.

Les différentes configurations testées sont présentées dans les paragraphes suivants. On y retrouve le tableau 3.2 dans lequel on indique les plages horaires associées aux tests de chacune des configurations.

3.1.2 Configurations testées

Sur un total de 58 essais, 10 ont été faits avec le véhicule de base et 48 avec le véhicule équipé de différents dispositifs de réduction de traînée aérodynamique. Les paragraphes suivants décrivent les configurations de véhicule testées.

Pneus jumelés et pneus simples

Un premier groupe d'essais a été réalisé avec des pneus standards que l'on dénomme *pneus jumelés*. Les pneus jumelés sont installés sur le double-essieu arrière du tracteur ainsi que sur le double-essieu de la remorque. On en dénombre un total de 16, soit 8 pneus Michelin XDN2 275/80 R22.5 pour le tracteur et 8 pneus Michelin XZE 275/80 R22.5 pour la remorque. La largeur de ces pneus est de 275 mm (environ 11").

Une seconde série d'essais a été réalisée avec des *pneus simples* qui sont plus larges que les pneus standards (445 mm *vs* 275 mm, voir la figure 3.2). Il s'agit d'un nouveau produit fourni par la compagnie Michelin qui, selon le fabricant, devrait permettre de réaliser des économies substantielles de carburant. Un pneu simple remplace deux pneus standards jumelés. Ainsi, 4 pneus Michelin XDA 445/50 R22.5 ont été installés sur le double-essieu du tracteur et 4 pneus Michelin XTE 445/50 R22.5 ont été installés sur le double-essieu de la remorque.



Figure 3.2: Comparaison entre un pneu standard (servant à faire une configuration de pneus jumelés) et un pneu simple.

Tous les dispositifs de réduction de traînée proposés par le CNRC ont été testés avec ces deux configurations de pneus.

Véhicule de base

Tel que décrit dans le Chapitre 1, le véhicule de base est un camion semi-remorque dont le tracteur est de marque Volvo. La remorque a une longueur de 53 pieds et le tracteur est équipé d'une couchette et d'un carénage anti-trainée (figure 3.3).



Figure 3.3: Configuration du véhicule de base monté sur pneus jumelés.

Le double-essieu du tracteur est muni de garde-boues standards de forme hémicylindrique et le double-essieu de la remorque est équipé d'un simple garde-boue plat en caoutchouc de type "mud flap". Ce véhicule est différent de ceux utilisés lors des essais

précédents [1, 2, 8] et il faudra donc éviter de comparer les résultats de la présente étude avec les résultats précédents.

Dans les paragraphes présentant les résultats, des codes seront utilisés pour identifier les différentes configurations de véhicule. Ainsi, le code *Base* servira à identifier le véhicule de base muni des pneus jumelés, alors que le code *BaseS* sera utilisé pour identifier le véhicule de base monté sur pneus simples.

Dispositifs de réduction de traînée aérodynamique

Les dispositifs de réduction de traînée proposés par le CNRC et testés dans la présente étude sont les suivants:

- Rallonge latérale

Ce dispositif, dénommé “Side extender” en anglais, sert à allonger le carénage latéral de l’habitacle du tracteur (figure 3.4). Le but visé par l’utilisation de cet équipement est de réduire l’influence néfaste de l’écoulement d’interstice (espace situé entre le tracteur et la remorque). Les essais en soufflerie effectués en grandeur réelle par l’équipe du CNRC [10] ont démontré qu’avec ce dispositif, on peut obtenir une réduction de traînée de l’ordre de 2% pour une vitesse de 107 km/h. Le code servant à identifier cette configuration est *Se* lorsque la rallonge latérale est utilisée avec des pneus jumelés (figure 3.4) et *SeS* lorsqu’elle est utilisée avec des pneus simples.



Figure 3.4: Configuration *Se* (“Side extender” avec pneus jumelés).

- Jupette de remorque

Cet équipement est dénommé “Side skirt” en anglais. Il sert à fermer le plus possible l’ouverture latérale permettant à l’air de circuler entre l’espace situé sous la remorque et l’environnement extérieur (figure 3.5).



Figure 3.5: Configuration *Sesk* (“Side extender + side skirt” avec pneus jumelés).

Selon les résultats publiés par le CNRC [10], ce dispositif offre un potentiel de réduction de traînée aérodynamique de l’ordre de 5% à une vitesse de 107 km/h. Lorsqu’on le combine à la rallonge latérale, les chercheurs du CNRC ont observé que l’effet de réduction de traînée s’additionne. On peut alors obtenir 7% de diminution de traînée

lorsqu'on compare à la configuration de base. Le code utilisé pour identifier la combinaison de la rallonge latérale et de la jupette de remorque est *Sesk* lorsque le véhicule est monté sur pneus jumelés (figure 3.5) et *SeskS* lorsqu'il est monté sur pneus simples.

- Carénage arrière

Ce dispositif bien connu est dénommé “boat tail” en anglais. Il consiste à réduire la section normale de l'arrière du véhicule, en allongeant la remorque avec un dispositif dont la forme reproduit grossièrement la queue d'un bateau. Le but visé est de réduire la traînée de pression imposée par la présence d'un large sillage produit par le décollement des couches limites. Ce genre de dispositif offre un grand potentiel de réduction de traînée, mais il doit être étudié et installé avec beaucoup de soins. Selon les essais en soufflerie, les chercheurs du CNRC ont obtenu une réduction de traînée de l'ordre de 8%. Ils ont aussi observé un effet additif lorsqu'on utilise le carénage arrière de concert avec la rallonge latérale et la jupette de remorque. Selon l'équipe du CNRC [10], la combinaison des ces trois dispositifs offre un potentiel de réduction de traînée de l'ordre de 15% à une vitesse de 107 km/h. Le code utilisé pour identifier la combinaison de la rallonge latérale avec la jupette de remorque et du carénage arrière est *Seskbt* lorsque le véhicule est monté sur pneus jumelés (figure 3.6) et *SeskbtS* lorsqu'il est monté sur pneus simples.



Figure 3.6: Configuration *Seskbt* (“Side extender + side skirt + boat tail” avec pneus jumelés).

Notons que le carénage arrière testé lors des présents essais n'était pas identique à celui testé en soufflerie. Selon le représentant du fabricant (TransTex Composite), l'angle des panneaux par rapport à la surface latérale de la remorque était plus grand dans le

cas présent que lors des essais en soufflerie. Ainsi, il est fort probable que le carénage testé dans la présente étude ne puisse offrir une performance comparable à celle obtenue en soufflerie.

- Volet latéral

Cet équipement est dénommé “Side flap” en anglais. Il s’agit d’un petit panneau disposé sur le côté de la remorque au niveau de ses roues arrières (figure 3.7).



Figure 3.7: Configuration *SeskbtstfS* (“Side extender + side skirt + boat tail + side flaps” avec pneus simples).

Le rôle du volet latéral est de bloquer l'écoulement d'air sortant de l'espace situé sous le véhicule au niveau du double-essieu de la remorque. Cet écoulement est pénalisant, car il contribue à l'élargissement le sillage du véhicule, ce qui tend à en augmenter la traînée. Nous avons déjà démontré ce phénomène dans un rapport précédent [3]. Les essais du CNRC [10] ont démontré que ce dispositif offre un potentiel de réduction de traînée de l'ordre de 2%. Ici encore, l'effet peut être combiné à celui des équipements précédents. On peut ainsi obtenir une réduction globale de traînée de 17% en combinant la rallonge latérale, la jupette de remorque, le carénage arrière et le volet latéral. Notons que cette configuration a seulement été testée avec les pneus simples, car le dispositif ne pouvait être installé sur le véhicule muni des pneus jumelés, ces derniers excédant très légèrement la largeur de la remorque. Le code utilisé pour identifier cette combinaison est *SeskbtS* (figure 3.7).

Le tableau 3.1 présente la liste des différentes configurations testées dans la présente étude ainsi que le nombre d'essais réalisés pour chacune des configurations. Notons qu'un code couleur est associé à chacune des configurations et que celui-ci sera utilisé dans les sections suivantes pour présenter les résultats sous forme graphique.

Code Config.	Nb essais	Dispositifs de réduction de traînée	Pneus
Base	10	Véhicule de Base	Jumelés
Se	5	Side extender	Jumelés
Sesk	6	Side extender + side skirt	Jumelés
Seskbt	6	Side extender + side skirt + boat tail	Jumelés
BaseS	6	Véhicule de base	Simple
SeS	6	Side extender	Simple
SeskS	7	Side extender + side skirt	Simple
SeskbtS	6	Side extender + side skirt + boat tail	Simple
SeskbtSfS	6	Side extender + side skirt + boat tail + side flaps	Simple

Tableau 3.1: Code utilisé pour identifier les configurations de véhicule testées.

Ainsi, 9 configurations de véhicule ont été testées. Afin de réduire le nombre d'opérations à effectuer au garage du CFTC, le véhicule de base monté sur pneus jumelés a été testé en premier. Par la suite, les différents dispositifs ont été installés un à un sur le véhicule, en suivant un ordre dicté par les performances observées par le CNRC au niveau de la réduction de traînée (ordre croissant de performance). Rendu à la configuration la plus performante, le changement de pneus a été réalisé. Dans la seconde partie de la campagne d'essai, les dispositifs ont été retirés un à un du véhicule, en suivant un ordre

inverse par rapport à la première partie. La chronologie des opérations est décrites dans le tableau 3.2.

Code Config.	Nb essais	Plage horaire
Base	10	12h20 à 12h40
Se	5	13h54 à 14h05
Sesk	6	14h48 à 15h04
Seskb	6	15h53 à 16h07
SeskbS	6	17h06 à 17h16
SeskbtsfS	6	17h31 à 17h41
SeskS	7	18h16 à 18h28
SeS	6	18h49 à 19h00
BaseS	6	19h17 à 19h30

Tableau 3.2: Ordre chronologique de réalisation des essais des différentes configurations.

3.1.3 Critères de sélection des essais

En suivant les recommandations du rapport de la campagne précédente [8], la classification des essais est faite en considérant la vitesse du vent latéral V_{vl} . Selon cette procédure, des essais seront comparables si la vitesse de vent latéral se trouve dans la même plage de valeurs. De plus, pour qu'un essai soit validé, il faut que la variation de vitesse de vent latéral entre l'entrée (Anémomètre #1) et la sortie de la piste (Anémomètre #2) soit inférieure à un certain seuil. Dans le cas des présents essais, ce seuil a été fixé à 1.2 m/s.

Selon les travaux précédents [8], on sait qu'il est préférable de tester toutes les configurations dans toutes les conditions de vent latéral afin de constituer une base de données fiable et complète. Dans le cas présent, les essais ayant été réalisés au cours d'une même journée, il est évidemment impossible de constituer une telle base de données. Les mesures effectuées ont plutôt permis de répertorier trois classes de valeurs de vent latéral. La première classe correspond à la plage de valeurs de V_{vl} observée durant la tranche horaire 12h00-16h00, soit $1.1 \leq V_{vl} \leq 1.7$ m/s ($V_{vl} = 1.4 \pm 0.3$ m/s). La seconde classe provient de la tranche horaire 17h00-17h45, soit $-0.4 \leq V_{vl} \leq 0.0$ m/s ($V_{vl} = -0.2 \pm 0.2$ m/s). La dernière classe a été observée durant la tranche horaire 18h15-20h00, soit $-1.3 \leq V_{vl} \leq -0.7$ m/s ($V_{vl} = -1.0 \pm 0.3$ m/s). Le tableau 3.3 indique la liste des essais appartenant à chacune des trois classes décrites.

Plage de valeurs de V_{vl} (m/s)	Configuration	Valeur moyenne de V_{vl} (m/s)	Nb essais valides	Nb essais réalisés
Classe 1 $1.1 \leq V_{vl} \leq 1.7$	Base	1.7	8	10
	Se	1.1	2	5
	Sesk	1.7	5	6
	Seskbt	1.3	2	6
Classe 2 $-0.4 \leq V_{vl} \leq 0.0$	BaseS	-0.4	2	6
	SeskbtS	-0.2	2	6
	SeskbtSfS	-0.1	3	6
Classe 3 $-1.3 \leq V_{vl} \leq -0.7$	BaseS (inv.)	-0.8	3	6
	SeS	-1.3	2	6
	SeskS	-1.0	2	7

Tableau 3.3: Plages de valeurs de vent latéral associées aux configurations testées.

Il faut noter que la configuration BaseS inscrite dans la classe 3 du tableau 3.3 a été constituée de manière hybride. En effet, pour les essais 1, 4 et 5 de la configuration BaseS, les valeurs respectives de V_{vl} étaient de 0.70, -0.80 et -0.92 m/s. À partir de ces trois essais, une moyenne d'ensemble a été constituée en inversant les positions des photomètres de l'essai 1 (ce qui permet de considérer $V_{vl_{inv.}} = -0.70$ m/s pour cet essai). Ainsi, la vitesse moyenne du vent latéral pour cette configuration de la classe 3 est de -0.8 m/s. Cette opération était nécessaire due au fait que le nombre d'essais est limité. Cependant, les résultats des campagnes précédentes [8] démontrent une bonne symétrie de la distribution des indices d'opacité lorsque le vent latéral est inversé. La configuration BaseS de la classe 3 doit donc être considérée comme étant valide.

3.2 Résultats

3.2.1 Configurations avec pneus jumelés

Les indices d'opacité IO sont calculés selon la relation 2.2. Les résultats des 8 essais valides obtenus pour le véhicule de base sont présentés sur la figure 3.8. La distribution moyenne est représentée par les symboles de plus grande taille et ceux-ci sont reliés par des traits. On retrouve également sur le graphique les barres d'incertitudes correspondant à $\pm 2\sigma_m$ (éq. 2.3).

Pour un vent latéral moyen de 1.7 m/s, les données des campagnes d'essai précédentes [8] indiquent qu'on doit s'attendre à observer un nuage d'éclaboussures fortement dissymétrique, avec la partie opaque du nuage concentrée du côté droit du graphique.

La distribution des IO de la figure 3.8 confirme parfaitement cette tendance, avec des valeurs moyennes d' IO très comparables à celles qui avaient été obtenues avec le véhicule de base – légèrement différent – de la campagne précédente [8].

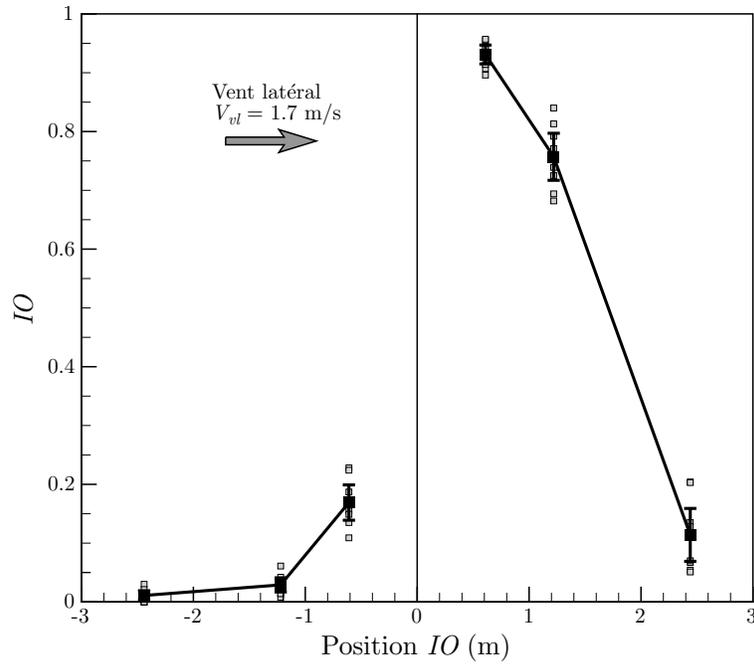


Figure 3.8: Distribution des Indices d’Opacité pour le véhicule de base monté sur pneus jumelés. Résultats des 8 essais valides et distribution moyenne avec barres d’incertitude.

De plus, la figure 3.8 indique que la dispersion de valeurs d' IO est relativement faible autour de la moyenne. Ceci démontre que lorsque l’on regroupe les données en respectant les classes de valeurs de vent latéral, tel que prescrit dans le rapport [8], les résultats présentent un très bon niveau de convergence statistique.

Le véhicule de base monté sur pneus jumelés est la configuration pour laquelle le plus grand nombre d’essais valides a été effectué (8/10). Tel que mentionné précédemment, les contraintes de temps n’ont pas permis de réaliser plus d’essais avec les autres configurations. De plus, comme l’indique le tableau 3.3, certaines configurations ont eu peu d’essais valides (*e.g.* Sesk avec 2/7) car elles ont été testées dans une période de la journée présentant une plus grande variation des conditions de vent. Ainsi, le niveau de convergence statistique obtenu pour ces configurations sera moins bon que pour le cas de base. Il faudra considérer les valeurs numériques obtenues comme étant indicatives de tendances plutôt que représentatives de résultats absolus et formels. Une campagne beaucoup plus élaborée serait nécessaire si on voulait obtenir des résultats plus précis.

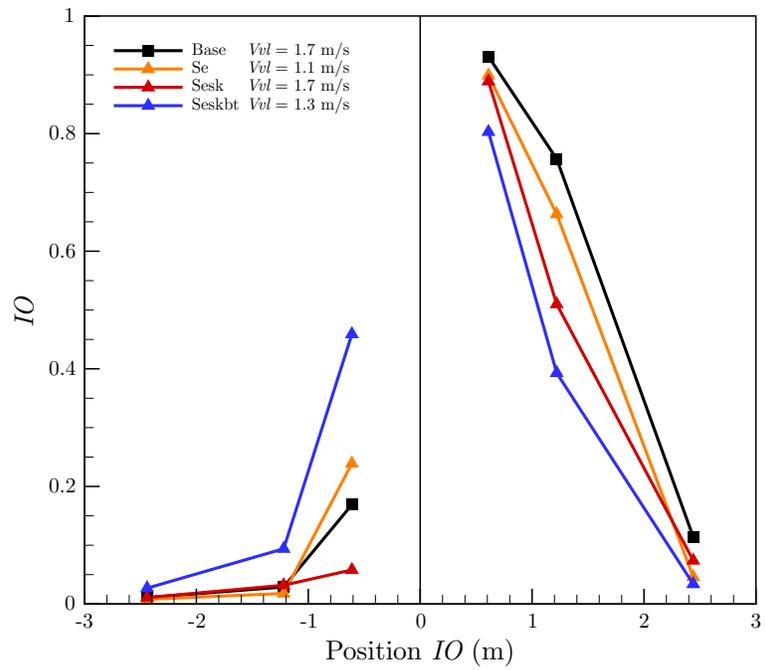


Figure 3.9: Distribution des Indices d'Opacité moyens pour la classe 1.

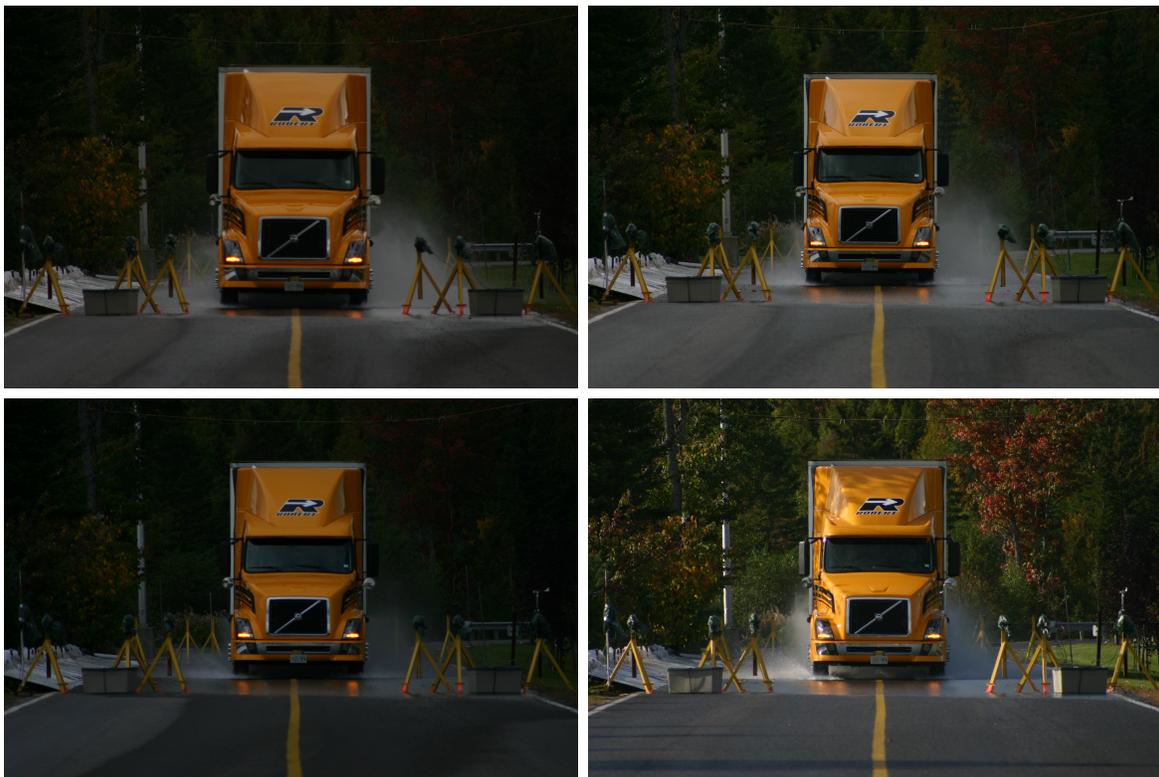


Figure 3.10: Photos des configurations de la classe 1; en haut, à gauche: Base; en haut, à droite: Se; en bas à gauche: Sesk; en bas, à droite: Seskbt.

Les distributions moyennes d' IO obtenues pour les configurations de la classe 1 sont présentées sur la figure 3.9. Ces essais ont été réalisés durant la tranche horaire 12h20-16h07 (tableau 3.2), période de la journée favorable à une bonne prise de photos. Les photos de la figure 3.10 sont très représentatives de l'ensemble de photos obtenu pour les configurations de la classe 1. Malheureusement, les photos correspondant à cette période de la journée sont les seules qui sont utilisables pour l'analyse des résultats. Toutes les autres prises de vue, soit celles correspondant aux essais des classes 2 et 3, sont beaucoup moins lumineuses et ne montrent rien de pertinent.

De manière générale, les distributions des IO des configurations de la classe 1 montrent que l'ajout de dispositifs de réduction de traînée diminue l'opacité du nuage d'éclaboussures. Rappelons qu'avec un vent latéral supérieur à 1 m/s, il faut analyser seulement le côté le plus opaque du nuage d'éclaboussures (côté droit). En observant la figure 3.10, on constate que les informations visuelles provenant des photographies corroborent les résultats des mesures.

Le calcul de l'efficacité pour chacune des configurations permet d'obtenir une valeur numérique facilitant la comparaison. Les valeurs d'efficacité sont calculées par rapport au véhicule de base. En se basant sur les conventions de la figure 1.10 et sur l'équation 2.4, les valeurs d'efficacité sont calculées de la manière suivante:

$$\varepsilon = 100 \times \left(1 - \frac{\left(\sum_{1,2,3} IO \right)_{testée}}{\left(\sum_{1,2,3} IO \right)_{Base}} \right) \quad (3.1)$$

On obtient ainsi $\varepsilon = 11\%$ pour la configuration Se, $\varepsilon = 18\%$ pour la configuration Sesk et $\varepsilon = 32\%$ pour la configuration Seskbt. On observe que les résultats d'efficacité de réduction d'opacité du nuage d'éclaboussures suivent le même ordre de progression que les résultats de réduction de traînée publiés par le groupe du CNRC [9, 10]. En effet, les configurations se classent dans l'ordre Se, Sesk, Seskbt (ordre croissant quant à l'efficacité de réduction d'opacité) de la même manière que ce qui est observé dans le cas de la réduction de traînée (voir la section 3.1.2).

Il est aussi utile de rappeler que tous les essais de la classe 1 se rapportent au véhicule chaussé sur pneus jumelés et que durant ces essais, les conditions de vent étaient relativement stables (V_{vl} systématiquement dans le sens positif). L'étude comparative des configurations avec pneus jumelés est donc considérée comme étant valide, même si certaines séries d'essais auraient pu bénéficier d'un plus grand nombre de répétitions afin d'obtenir un meilleur niveau de convergence statistique (Se 2/5 et Seskbt 2/6 notamment). Ainsi, les valeurs numériques des IO affichés et des efficacités calculées sont

peut être entachées d’une incertitude, mais les tendances observées sont certainement significatives.

Finalement, selon la discussion qui précède, on peut affirmer que les dispositifs de réduction de traînée proposés par l’équipe du CNRC ont un impact positif sur la réduction d’éclaboussures lorsqu’ils sont montés sur un véhicule chaussé de pneus jumelés. Les essais semblent aussi indiquer que plus les dispositifs sont performants pour réduire la traînée aérodynamique du véhicule, plus ils sont efficaces pour réduire l’opacité du nuage d’éclaboussures. Soulignons que cette observation est en parfait accord avec les conclusions du rapport [3] résultant de nos travaux effectués en soufflerie dans le cadre d’un contrat précédent.

3.2.2 Configurations avec pneus simples

La figure 3.11 montre les distributions d’ IO des configurations de la classe 2 qui se rapportent toutes au véhicule monté sur pneus simples. Ces essais ont été réalisés durant une période de la journée au cours de laquelle les conditions de vent étaient plus variables. Le niveau de convergence statistique est moins élevé que précédemment, mais les tendances qui se dégagent sont tout de même très cohérentes.

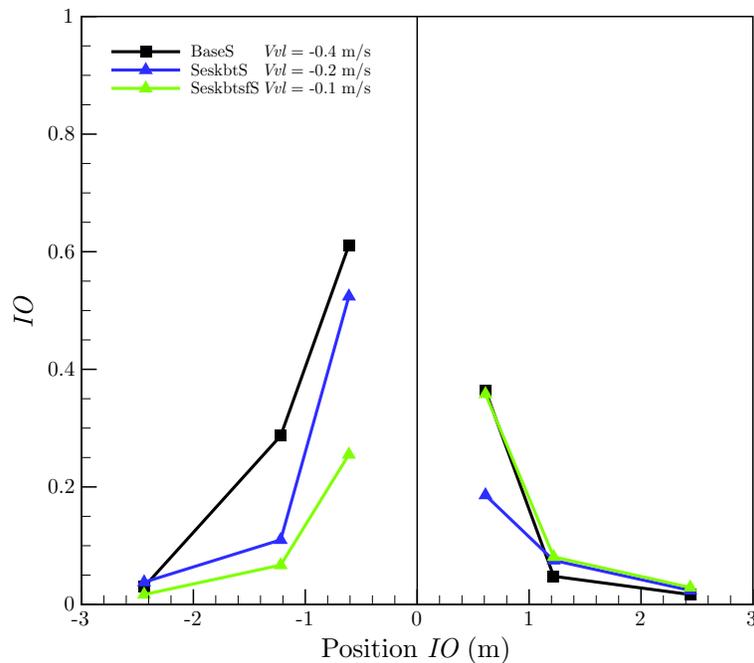


Figure 3.11: Distribution des Indices d’Opacité moyens pour la classe 2.

Premièrement, il faut noter qu'il s'agit d'une classe de vent latéral regroupant des valeurs voisines de $V_{vl} = 0$. Il faudra donc considérer les deux côtés du graphique de façon en prendre en compte les mesures faites par les six photodiodes. Ainsi, le calcul d'efficacité sera effectué selon la relation suivante:

$$\varepsilon = 100 \times \left(1 - \frac{\left(\sum_{1,2,3,4,5,6} IO \right)_{testée}}{\left(\sum_{1,2,3} IO \right)_{Base}} \right) \quad (3.2)$$

Notons que les valeurs d'efficacité sont calculées par rapport au véhicule de base de la classe 1. On peut ainsi comparer le véhicule de base chaussé avec des pneus simple à celui chaussé avec des pneus jumelés. L'efficacité de réduction d'éclaboussures du véhicule de base avec pneus simples est $\varepsilon = 25\%$ si on compare à la même configuration avec pneus jumelés. Ce résultat est très intéressant, car il indique l'importance du rôle joué par l'écoulement présent entre les deux pneus adjacents d'une paire de pneus jumelés. En effet, il s'agit d'une zone caractérisée par un très fort taux de turbulence ainsi qu'un cisaillement intense. On peut facilement imaginer que les grosses gouttelettes d'eau entraînées dans cette zone doivent inévitablement être étirées et brisées en gouttelettes plus fines. Il est plausible que ce phénomène puisse se poursuivre jusqu'à l'atomisation des gouttelettes de manière à former une portion non négligeable du nuage d'éclaboussures. Si ce scénario est à l'image de la réalité, il est alors parfaitement normal d'observer une telle efficacité des pneus simples. Une étude plus approfondie de la formation (à la source) du nuage d'éclaboussures est nécessaire si on désire agir de manière encore plus efficace.

Comme précédemment, le véhicule équipé des dispositifs de réduction de traînée proposés par le CNRC montre de meilleures efficacités que le véhicule de base. On obtient $\varepsilon = 47\%$ pour la configuration SeskbtS et $\varepsilon = 55\%$ pour la configuration SeskbtfsS.

Les autres configurations comportant des pneus simples sont analysées avec les essais de la classe 3 dont les distributions d' IO sont présentées sur la figure 3.12. Comme dans le cas de la classe 2, ces essais ont été réalisés durant une période de la journée au cours de laquelle les conditions de vent étaient plus variables. Le niveau de convergence statistique est aussi moins élevé que pour la classe 1, mais ici aussi, les tendances qui se dégagent sont cohérentes.

La vitesse de vent latéral propre à cette classe ($V_{vl} = -1.0 \pm 0.3$ m/s) indique que l'on doit seulement considérer la partie gauche du graphique de la figure 3.12. De plus, les valeurs d'efficacité pour les essais de la classe 3 sont calculées de la manière suivante:

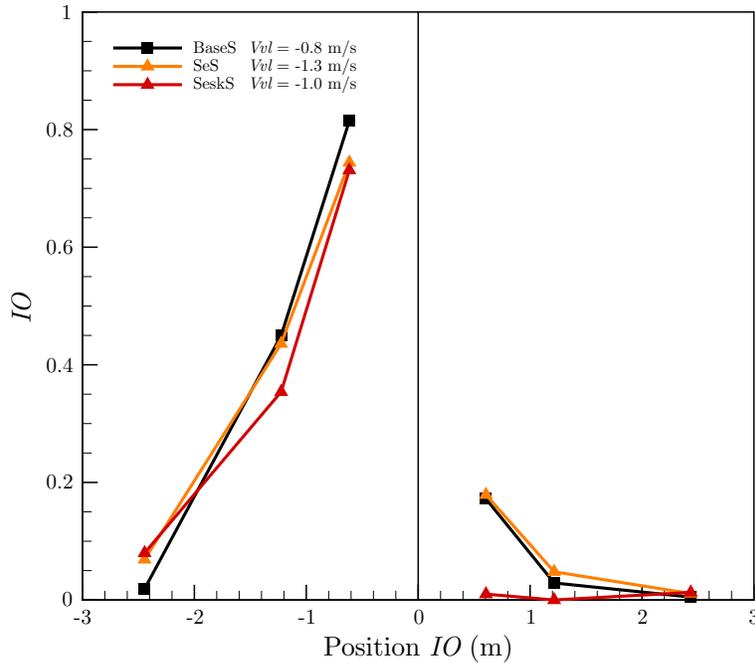


Figure 3.12: Distribution des Indices d'Opacité moyens pour la classe 3.

$$\varepsilon = 100 \times \left(1 - \frac{\left(\sum_{4,5,6} IO \right)_{testée}}{\left(\sum_{1,2,3} IO \right)_{Base}} \right) \quad (3.3)$$

L'efficacité de réduction d'éclaboussures du véhicule de base avec pneus simples est $\varepsilon = 29\%$ si on compare à la même configuration avec pneus jumelés. Ce résultat issu de la classe 3 combiné au résultat de la classe 2 (25%), on peut considérer une valeur moyenne $\varepsilon = 27\%$ pour ce qui est du véhicule de base monté sur pneus simples.

Les valeurs d'efficacité obtenues pour les configurations comportant des dispositifs de réduction de traînée sont les suivantes: $\varepsilon = 31\%$ pour la configuration SeS et $\varepsilon = 35\%$ pour la configuration SeskS. Tel qu'indiqué par les distributions d'IO, ces améliorations d'efficacité ne sont pas très grandes si on compare au véhicule de base monté sur pneus simple ($31 - 29 = 2\%$ et $35 - 29 = 6\%$). Il faudrait sans doute davantage d'essais pour conclure à une réelle amélioration. Cependant, la tendance est fort plausible; il semble qu'il y ait corrélation entre l'efficacité à réduire l'opacité du nuage d'éclaboussures et la performance au niveau de la réduction de traînée. Comme dans le cas des configurations avec pneus jumelés, les résultats d'efficacité des configurations avec pneus simples suivent le même ordre que celui imposé par les performances de réduction de traînée.

Finalement, on doit noter que les effets combinés des pneus simples et des différents

dispositifs de réduction de traînée, sans être parfaitement additifs, semblent montrer un certain degré de juxtaposition. On peut en effet admettre relativement facilement que les pneus simples puissent agir à la source, alors que les autres dispositifs doivent agir sur l'écoulement autour du véhicule, notamment sur l'étalement latéral de son sillage. Ce dernier point a déjà été ciblé dans le rapport [3] comme étant d'une grande importance dans toute tentative de réduction du phénomène d'éclaboussures des véhicules lourds.

Chapitre 4

Conclusions et recommandations

4.1 Atteinte des objectifs

Le premier objectif de ce travail de recherche consistait à mesurer les indices d'opacité d'un nuage d'éclaboussures généré par le passage d'un véhicule lourd circulant sur une chaussée mouillée. Le véhicule devait être équipé de différents dispositifs de réduction de traînée aérodynamique. Afin d'obtenir des données de référence, des mesures d'indices d'opacité devaient également être effectuées avec le véhicule en configuration de base, c'est-à-dire sans aucun ajout de dispositifs de réduction de traînée aérodynamique. Cet objectif a été atteint: au total, 58 essais ont été réalisés et 9 configurations de véhicules ont été testés.

Le second objectif consistait à évaluer l'impact qu'ont les dispositifs de réduction de traînée aérodynamique sur le phénomène d'éclaboussures des véhicules lourds. Cet objectif a également été atteint. Les distributions d'indices d'opacité ont été analysées pour chacune des configurations et les valeurs d'efficacité de réduction de l'opacité du nuage d'éclaboussures ont été calculées.

Tous les essais ont été réalisés dans la même journée, soit le 20 septembre 2006. Il s'agit d'une importante contrainte imposée par un des collaborateurs au projet et ceci a causé un certain nombre de problèmes. Notamment, il n'y avait pas de marge de manœuvre permettant de corriger un bris d'équipement et les essais n'ont pu être réalisés de la meilleure façon (voir la section 3.1.1). De plus, cette contrainte a fortement limité la possibilité d'obtenir un échantillonnage complet au niveau de la direction et de l'intensité du vent. Ceci engendre certaines difficultés lorsque l'on désire comparer des configurations de véhicules et que celles-ci ont été testées dans des conditions de vent différentes. Finalement, la contrainte de temps a aussi imposé une cadence de mesure limitant le nombre d'essais que l'on peut réaliser pour une même configuration

de véhicule. Il en résulte un certain manque au niveau de la convergence statistique des valeurs moyennes présentées. Malgré ces trois points, l'ensemble des résultats est satisfaisant. Suite à cette campagne d'essais, d'importantes observations ont été réalisées et d'intéressantes conclusions peuvent en être tirées.

4.2 Rappel des principaux résultats et discussion

Tous les dispositifs de réduction de traînée aérodynamique ont été préalablement testés par une équipe du CNRC [9, 10]. Les performances aérodynamiques de ces dispositifs ont été étudiées en soufflerie, en grandeur réelle, et des tests de consommation de carburant ont été réalisés à la fin de l'été 2006.

Le premier dispositif, dénommé "Rallonge latérale" (code Se), sert à allonger le carénage latéral de l'habitacle du tracteur. Selon l'équipe du CNRC, l'ajout de ce dispositif permet d'obtenir une réduction de traînée de l'ordre de 2% à une vitesse de 107 km/h. Le second dispositif, dénommé "jupette de remorque", sert à fermer le plus possible l'ouverture latérale permettant à l'air de circuler entre l'espace situé sous la remorque et l'environnement extérieur. Selon l'équipe du CNRC l'ajout de ce dispositif combiné à la rallonge latérale (code Sesk) permet de réduire globalement la traînée aérodynamique du véhicule de l'ordre de 7% à une vitesse de 107 km/h. Le troisième dispositif est dénommé "carénage arrière" (*boat tail*). Ce dispositif vise à réduire la traînée de pression imposée par la présence d'un large sillage produit par le décollement des couches limites évoluant sur les surfaces du véhicule. Selon l'équipe du CNRC, la combinaison des ces trois dispositifs (code Seskbt) offre un potentiel de réduction de traînée de l'ordre de 15% à une vitesse de 107 km/h. Le dernier dispositif, testé seulement sur pneus simples, est dénommé "volet latéral". Il s'agit d'un petit panneau disposé sur le côté de la remorque au niveau de ses roues arrières. Son rôle est de bloquer l'écoulement d'air sortant de l'espace situé sous le véhicule au niveau du double-essieu de la remorque. Ici encore, l'effet peut être combiné à celui des équipements précédents. On peut ainsi obtenir une réduction globale de traînée de 17% en combinant la rallonge latérale, la jupette de remorque, le carénage arrière et le volet latéral.

Dans le cadre du présent travail portant sur l'étude du phénomène d'éclaboussures, une première série d'essais a été réalisée avec des configurations composées du véhicule monté sur des pneus jumelés et équipé de différents dispositifs de réduction de traînée. Une seconde série d'essais a été réalisée avec le véhicule monté sur pneus simples et aussi équipé de différents dispositifs de réduction de traînée.

Le tableau 4.1 présente l'ensemble des résultats d'efficacité obtenus pour les différentes configurations.

Configuration	ε_{Base}
Se	11 %
Sesk	18 %
Seskb	32 %
BaseS	27 %
SeS	31 %
SeskS	35 %
SeskbS	47 %
SeskbtsfS	55 %

Tableau 4.1: Efficacité des différentes configurations testées par rapport au véhicule de base monté sur pneus jumelés. Les codes servant à identifier les configurations sont décrits dans le tableau 3.1.

À l'étude du tableau 4.1, on observe que les résultats d'efficacité de réduction d'opacité du nuage d'éclaboussures suivent le même ordre de progression que les résultats de réduction de traînée publiés par le groupe du CNRC [9, 10]. En effet, les configurations se classent dans l'ordre Se, Sesk, Seskb et SeS, SeskS, SeskbS, SeskbtsfS (ordre croissant quant à l'efficacité de réduction d'opacité) de la même manière que ce qui est observé dans le cas de la réduction de traînée.

De plus, en comparant les résultats d'efficacité du véhicule de base chaussé sur des pneus simple à ceux du véhicule chaussé sur des pneus jumelés, on constate qu'il y a réduction systématique du niveau d'opacité. Ce résultat est très intéressant, car il indique l'importance du rôle joué par l'écoulement présent entre les deux pneus adjacents d'une paire de pneus jumelés. En effet, il s'agit d'une zone caractérisée par un très fort taux de turbulence ainsi qu'un cisaillement intense. On peut facilement imaginer que les grosses gouttelettes d'eau entraînées dans cette zone doivent inévitablement être étirées et brisées en gouttelettes plus fines. Il est plausible que ce phénomène puisse se poursuivre jusqu'à l'atomisation des gouttelettes de manière à former une portion non négligeable du nuage d'éclaboussures. Si ce scénario est à l'image de la réalité, il est alors parfaitement normal d'observer une telle efficacité des pneus simples. Une étude plus approfondie de la formation (à la source) du nuage d'éclaboussures est nécessaire si on désire agir de manière encore plus efficace.

Rappelons que les valeurs d'efficacité calculées sont peut être entachées d'une incertitude, mais les tendances observées sont certainement significatives.

On peut finalement affirmer que les dispositifs de réduction de traînée proposés par l'équipe du CNRC ont un impact positif sur la réduction d'éclaboussures lorsqu'ils sont montés sur un véhicule chaussé de pneus jumelés ou de pneus simples. Les essais semblent aussi indiquer que plus les dispositifs sont performants pour réduire la traînée aérodynamique du véhicule, plus ils sont efficaces pour réduire l'opacité du nuage d'éclaboussures. Soulignons que cette observation est en parfait accord avec les conclusions du rapport [3] résultant de nos travaux effectués en soufflerie dans le cadre d'un contrat précédent.

4.3 Recommandations

Les dossiers environnementaux, notamment ceux touchant l'économie de carburant et la réduction des gaz à effet de serre sont, à juste titre, au cœur de nos préoccupations actuelles. Ainsi, il ne fait aucun doute que l'on doit accorder une grande attention au développement de nouvelles techniques de réduction de traînée aérodynamique des véhicules lourds. D'autre part, ce développement doit s'harmoniser avec les efforts déployés au cours des dernières années dans le domaine de la sécurité des utilisateurs des réseaux routiers. La banque de données recueillie au cours des essais présentés dans ce rapport est donc très utile et les conclusions qui en sont ressorties sont importantes. Notamment, il semble qu'il y ait corrélation entre l'efficacité à réduire l'opacité du nuage d'éclaboussures et la performance au niveau de la réduction de traînée.

Cependant, tel que mentionné dans les sections précédentes, la contrainte de temps imposée pour réaliser les essais a eu un certain nombre de conséquences. Étant donné l'importance accordée au domaine de la sécurité routière il est recommandé d'entreprendre une campagne d'essai permettant de constituer une banque de données plus complète. Cette dernière devrait comprendre suffisamment d'essais dans plusieurs classes de valeurs de vent latéral (surtout pour la configuration de base), de manière à pouvoir faire des comparaisons basées sur des résultats plus précis.

Il est aussi recommandé de poursuivre les essais sur les configurations de pneus. En effet, les présents résultats semblent très prometteurs, mais le niveau de confiance basé sur la convergence statistique n'est pas suffisant pour porter un jugement définitif. Il serait aussi pertinent de remettre à l'essai les pneus Michelin XZA-2 Antisplash déjà brièvement testés lors d'essais précédents [8]. Rappelons que ces pneus étaient montés sur les roues directrices du tracteur. Une combinaison avec les pneus simples montés sur les double-essieux n'a jamais été rapportée dans la littérature.

Bibliographie

- [1] DUMAS, G., LEMAY, J., BIBEAU, L.P. ET LAMONTAGNE, L. 1998: Évaluation comparative des systèmes anti-éclaboussure pour véhicules lourds. *Rapport de contrat MTQ 1220-97-RG01 (Ministère des Transports du Québec)*, Québec, Canada.
- [2] DUMAS G. ET LEMAY J. 2000: Étude de la réduction de l'éclaboussure des véhicules lourds par contrôle aérodynamique. Rapport volet 1: Essais routiers. *Rapport de contrat MTQ 1220-98-RG02 (Ministère des Transports du Québec)*, Québec, Canada.
- [3] DUMAS, G. ET LEMAY, J. 2002: Étude de la réduction de l'éclaboussure des véhicules lourds par contrôle aérodynamique. Rapport final, volet 2: Essais en soufflerie. *Rapport de contrat MTQ 1220-98-RG02 (Ministère des Transports du Québec)*, Québec, Canada.
- [4] DUMAS, G. & LEMAY, J. 2002: Splash and Spray Measurement and Control: Recent Progress in Quebec. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Busses and Trains*, UEF Conf., Monterey-Pacific Grove, USA, 2-6 December 02.
- [5] DUMAS G. & LEMAY J. 2004: Splash and Spray Measurement and Control: Recent Progress in Quebec. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Series: Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics* **19**, R. McCallen, F. Browand & J. Ross Eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (ISBN: 3-540-22088-7), pp. 533-547.
- [6] JOHNSON W.A., WEIR D.H. 1994: Recommended Practice for Splash and Spray Evaluation. *SAE Recommended Practice J2245*, Reaffirmed in 2002.
- [7] LEMAY, J. & DUMAS, G. 2003: Spray and Splash Generated by Heavy Vehicles: Road Test Measurements and Wind-Tunnel Modelling. *Proc. FLUCOME 2003*, G.M. Carlomagno, I. Grant Eds. (ISBN 0-9533991-4-1), pp. Two Phase Flows III/1-14, Sorrento, Italy, 25-28 August 03.
- [8] LEMAY, J., DUMAS, G., VÉNISSE, A. ET GIRARD, F. 2005: Conception et évaluation par essais routiers de prototypes de systèmes anti-éclaboussures pour

véhicules lourds. *Rapport final, Action concertée Fonds Nature et Technologies - MTQ - SAAQ, Programme de recherche universitaire en sécurité routière.*

- [9] LEUSCHEN J., COOPER, K.R. 2005: Early Wind Tunnel Test Results from The NRC/NRCan Greenhouse Gas Program. *Proc. DOE Heavy Vehicle Aerodynamics Meeting*, Oakland, CA, May 05.
- [10] LEUSCHEN J., COOPER, K.R. 2006: Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. *Proc. SAE 2006 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition*, Rosemont, IL, October 06.