

Revue de littérature portant sur  
la problématique de perte de contrôle  
des véhicules lourds causée par la présence  
de vents latéraux

## Rapport de contrat 3503-10-QG01

Présenté à

Monsieur Sébastien Bédard  
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

Septembre 2010

# Avant-propos

L'auteur aimerait ici remercier Monsieur Sébastien Bédard du MTQ pour l'intérêt manifesté envers notre équipe.

L'auteur est aussi grandement reconnaissant envers Madame Véronique Laterreur, étudiante au doctorat au département de génie mécanique de l'Université Laval. Sa contribution à la cueillette d'informations et sa participation à la synthèse de la revue de littérature a été essentielle et très appréciée.



# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>i</b>
<b>Table des matières</b>	<b>ii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Revue de littérature</b>	<b>3</b>
<b>2 Synthèse de la revue et analyse critique</b>	<b>39</b>
2.1 Classement des références selon leur pertinence . . . . .	39
2.2 Synthèse de la revue . . . . .	43
2.3 Analyse . . . . .	53
<b>3 Conclusions et recommandations</b>	<b>61</b>
3.1 Atteinte des objectifs . . . . .	61
3.2 Rappel de quelques éléments importants . . . . .	61
3.3 Recommandations . . . . .	63
<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>



# Introduction

Ce document constitue le rapport final du contrat 3503-10-QG01, "*Produire une revue de littérature portant sur la problématique de perte de contrôle des véhicules lourds causée par la présence de vents latéraux*", résultant de l'entente signée entre l'Université Laval et le Ministère des transports du Québec (MTQ) en mai 2010.

## Problématique

Lorsqu'un véhicule lourd circule sur une route à une vitesse  $V$  et qu'un vent d'intensité  $U$  souffle dans une direction perpendiculaire à l'axe de la route, le véhicule subit des efforts additionnels dus à la présence de ce vent. En effet, il subit une force latérale, une force de portance et un moment de roulis. Selon leur intensité, ces efforts peuvent provoquer le renversement (roulis), le glissement (dérapage latéral) ou le pivot (lacet) du véhicule. Il s'agit donc d'un facteur de risque non négligeable pouvant être à l'origine de graves accidents de la route.

Une première analyse de la problématique effectuée par le MTQ a permis de constater que des informations et des modèles contradictoires se retrouvent dans la littérature. À l'issue de cette première phase d'analyse, deux constats sont ressortis: *i*) l'aérodynamique des véhicules lourds est un domaine très spécialisé et, *ii*) la problématique de l'influence des vents latéraux sur la perte de contrôle des véhicules lourds est peu connue à l'interne du Ministère. Ainsi, le Ministère a jugé nécessaire de faire appel à un spécialiste du domaine en confiant à l'auteur de ce rapport le mandat d'entreprendre une recherche bibliographique permettant de constituer une revue de littérature sur le sujet.

## Objectifs

Le travail effectué visait les objectifs suivants:

1. Effectuer une recherche bibliographique ayant pour but de constituer une revue de littérature portant sur la problématique de perte de contrôle des véhicules lourds causée par la présence de vents latéraux.

2. Faire une synthèse et une analyse critique de la revue de littérature afin d'en ressortir les différents éléments permettant de modéliser la force résultante et le moment pouvant provoquer le renversement, le glissement ou le pivot d'un véhicule type, soit un camion semi-remorque de 53 pieds de type fourgon.

### **Structure du rapport**

Le premier chapitre présente la revue de littérature effectuée. On y retrouve un résumé des articles répertoriés lors de la recherche bibliographique. Le chapitre 2 présente en premier lieu une synthèse de la revue de littérature. On y fait ressortir les principales contributions des articles et rapports les plus pertinents en regard du mandat confié par le Ministère. Ensuite, le chapitre 2 présente une analyse critique de la problématique. Finalement, les conclusions et recommandations se retrouvent au chapitre 3.

# Chapitre 1

## Revue de littérature

Ce chapitre présente le résumé de chacune des références présentes dans la bibliographie en suivant le même ordre que dans cette dernière, c'est-à-dire en ordre alphabétique du premier auteur. Pour chacune des références, on rappelle le numéro l'identifiant, le titre, les auteurs et l'année de publication. Ensuite, un bref résumé de l'article ou du rapport est présenté. Le niveau de détails de ce résumé dépendra de la pertinence de la référence en regard du mandat confié par le MTQ.

### **Résumé de la référence [1]**

Robust Steering Control for Active Rollover Avoidance of Vehicles with Elevated Center of Gravity

ACKERMANN, J. ODENTHAL, D., 1998

Cet article présente un contrôleur ayant pour but d'assister le conducteur afin de diminuer le risque de renversement.

### **Résumé de la référence [2]**

Aerodynamics of Road and Rail Vehicles

AHMED, S.R.; GAWTHORPE, R.G.; MACKRODT, P.-A., 1985

Cet article ne présente rien de spécifique aux vents latéraux ou à la réponse d'un camion aux vents latéraux. Il s'agit d'une revue de principes aérodynamiques tels la définition des forces et moments aérodynamiques et la présentation des méthodes de calcul et de tests en soufflerie.

### **Résumé de la référence [3]**

Effects of Crosswinds on Double Stacked Container Wagons

ALAM, F.; WATKINS, S., 2007

Cet article présente des tests en soufflerie sur un wagon de train et se concentre sur l'analyse des mesures de coefficients de moment de roulis, de force portance et de force latérale.

#### Conclusion

Les auteurs concluent qu'il y a une possibilité de renversement à faible vitesse du vent pour un grand angle d'incidence (75° à 90°) du vecteur de vitesse résultant mais que ces conditions sont presque impossibles à la vitesse de déplacement usuelle des trains (plus de 115 km/h).

### **Résumé de la référence [4]**

Crosswind Effect on Road and Rail Vehicles

BAKER, C.J.; CHELI, F.; ORELLANO, A.; PARADOT, N.; PROPP, C.; ROCCHI, D., 2009

Cet article présente une revue de littérature portant sur les modèles et les techniques de mesure existants qui concerne l'évaluation du risque, les coefficients aérodynamique et la dynamique du véhicule.

#### Méthodes d'analyse du risque

- La méthode analytique est basée sur les statistiques de valeurs extrêmes.
- La méthode semi-analytique est utilisée lorsque le nombre de variables aléatoires est faible.
- Des méthodes numériques sont citées telles la simulation de Monte Carlo, les approches stochastiques, et le « line sampling ».
- L'analyse de sensibilité est une analyse par composantes principales sur la matrice de corrélation (méthode de Morris).

#### Méthodes expérimentales - Coefficients aérodynamiques

- L'article présente une description de tests en soufflerie sur les trains.
- L'article présente une description de tests en soufflerie sur les véhicules routiers.

- Il existe une soufflerie importante à La polytecnico di Milano en Italie.
- Les tests en soufflerie sont effectués en mouvement ou de façon stationnaire et plus souvent dans un écoulement laminaire que dans un écoulement turbulent.
- L'article réfère au projet WEATHER (voir la référence [22]).
- Les résultats des tests en soufflerie présentés sont comparés à des simulations numériques plus loin dans le document.
- Tests pleine échelle.
  - Ce type de test est difficile à effectuer. Il demande de l'instrumentation sensible mais solide, il dépend des conditions naturelles de vent et présente une grande variabilité dans les résultats.

### Méthodes numériques - Coefficients aérodynamiques

- Le choix de la méthode dépend de la configuration et de la géométrie du véhicule, des conditions limites choisies et du but de la recherche.
- La méthode du « Potential theory » n'est pas utilisée pour les vents latéraux car elle ne peut gérer la grande proportion de l'écoulement étant décroché.
- La méthode du Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) est correcte pour de petites échelles de turbulence spatiale, soit pour des corps profilés soumis à des écoulements à petit angle d'incidence. Cette méthode est la plus utilisée dans l'industrie pour la prédiction des coefficients aérodynamiques des véhicules sous des vents latéraux.
- La méthode du Large-Eddy Simulation (LES) est bonne pour des vents latéraux à grand angle d'incidence avec un écoulement détaché. Elle demande un grand nombre de points de calcul.
- La méthode du DES est une combinaison des méthodes RANS et LES.
- La méthode Lattice-Boltzmann et une méthode de calcul discrète basée sur l'équation de Boltzmann.

### Distribution de pression et écoulement autour des véhicules routiers

- Les champs de vitesse sont beaucoup moins étudiés pour les véhicules routiers que pour les trains. Comme il s'agit de corps peu profilés, on s'attend à ce que l'écoulement soit désordonné. Une étude de visualisation de l'écoulement a démontré la présence de vortex en aile delta près des coins au vent du véhicule. De tels vortex génèrent beaucoup de portance.

- Pour la distribution de pression, l'article réfère à la référence [43] pour une comparaison entre des tests en soufflerie, des tests grandeur nature et des analyses numérique (CFD) avec la méthode de RANS.

### Forces et moments aérodynamiques

- Pour les véhicules routiers, les six forces et moments aérodynamiques sont requis.
- La forme des coefficients dépend du domaine dans lequel les calculs sont faits.
  - Dans le domaine de l'amplitude, une valeur moyenne des forces et du vent et une valeur extrême des rafales de vent sont utilisées. Ce domaine est approprié pour un véhicule à très haute vitesse. Pour un véhicule à plus basse vitesse, les valeurs extrêmes de forces et de vitesse du vent sont utilisées uniquement.
  - Dans le domaine fréquentiel, le spectre des forces et des moments (admittance aérodynamique) est utilisé.
  - Dans le domaine temporel, les valeurs moyennes des forces et des vitesses et un paramètre appelé « weighting fonction », qui est la transformée de Fourier de l'admittance aérodynamique, sont utilisés.
- L'article réfère à la référence [43] pour les résultats des mesures des coefficients de force moyens sur des camions.

### Interaction entre les forces aérodynamiques et la dynamique du véhicule

- L'approche quasi-permanente permet de résoudre les équations du mouvement (équilibre statique) pour trouver les conditions d'accidents en fonction de certains critères. Toutes les méthodes quasi-permanentes se ressemblent sauf au niveau de la définition des coefficients aérodynamiques. Certains utilisent des coefficients moyens, d'autre utilisent des coefficients basés sur les valeurs extrêmes. Cette dernière méthode est beaucoup plus complexe. Plusieurs pays utilisent la méthode simplifiée pour des systèmes d'alarme sur les trains (Japon ([25] et [29]), Allemagne et UK).
- L'approche dans le domaine temporel demande quatre étapes soit:
  - Déterminer les conditions de vents.
  - Déterminer les coefficients aérodynamiques.
  - Déterminer la réponse du véhicule.
  - Déterminer l'indice de sécurité.

- Types de conditions de vent pouvant être simulées:
  - La reconstruction d’un signal de vent turbulent réaliste selon certaines propriétés stochastiques.
  - La représentation d’une rafale idéalisée.
- Chargement aérodynamique
  - L’approche stationnaire consiste à déterminer la force en fonction du coefficient aérodynamique et de la vitesse relative du vent par rapport au véhicule.
  - L’approche quasi-permanente corrigée implique une correction par l’admittance aérodynamique (domaine fréquentiel) ou par la « weighting fonction » (domaine temporel).
- Les modèles de véhicule et les indices de sécurité sont moins développés pour les véhicules routiers et il existe des problèmes dans la définition d’un modèle pour le conducteur.

### Systemes d’alarme

- L’article ne réfère qu’à des systèmes d’alarme pour les trains en France, au Japon et en Allemagne.

### Conclusions

- Des tests en soufflerie sont en cours sur des modèles mobiles pour étudier l’effet du mouvement du véhicule par rapport à la route.
- Des modèles par éléments finis sont de plus en plus abordables et sont bons pour des écoulements à faible angle d’incidence. Des modèles plus sophistiqués sont requis pour les écoulements à grand angle d’incidence où une large portion de l’écoulement est décroché.
- Au niveau du modèle du véhicule, on doit considérer certaines incertitudes, surtout au niveau du modèle du conducteur, dans l’évaluation du risque.
- Les modèles de définition du risque devraient être simplifiés par des analyses de sensibilité.

### Commentaire

L’article est plus axé sur les études effectuées sur les trains car elles sont plus nombreuses dans la littérature.

## Résumé de la référence [5]

A Simplified Analysis of Various Types of Wind-Induced Road Vehicle Accidents

BAKER, C.J., 1986

L'article présente le modèle de Baker. Ce modèle permet de déterminer la vitesse de vent correspondant à un accident en fonction des équations du mouvement sur le modèle du véhicule établi.

### Description du modèle

- Le modèle est basé sur la résolution des équations du mouvement (somme des forces et somme des moments) pour les forces agissant sur le véhicule soit:
  - Le poids du véhicule.
  - Les réactions des pneus (verticales, de frottement et latérales).
  - Les forces de traction sur les roues arrières.
  - Les forces et les moments aérodynamiques.
- Les coefficients aérodynamiques, exprimés en fonction de l'angle d'incidence, proviennent de tests en soufflerie. Ces coefficients ne sont pas considérés comme bons mais ils sont utilisés car ce sont les seules données disponibles.

### Type de véhicule

Un autobus voyageur (Leyland Atlantean), qui est considéré comme une masse simple rigide à quatre roues.

### Conditions de vent

Un échelon de vent sur une route droite et au niveau.

### Conditions pour accidents

Si, dans le premier 0.5s de la rafale de vent:

- La réaction verticale sur une roue devient nulle.
- La déflexion latérale est de plus de 0.5 m.
- La déflexion angulaire est de plus de 0.2 radians.

### Hypothèses

- L'angle du volant ne change pas, l'effet du conducteur n'est donc pas considéré.

- L'effet des turbulences et du mouvement relatif du véhicule sur les forces aérodynamiques n'est pas considéré.
- L'angle d'incidence reste constant (échelon de vent). Cette analyse ne serait pas valide pour un autre type de condition de vent. Une résolution numérique serait alors requise.

### Équations

La relation entre la vitesse relative du vent, l'angle d'incidence, la vitesse absolue du vent et la direction absolue du vent par rapport à la trajectoire initiale du véhicule est décrite de la façon suivante:

$$V^2 = (W \sin \beta)^2 + (u + W \cos \beta)^2$$

$$\tan \psi = W \sin \beta / (u + W \cos \beta)$$

Les résultats adimensionnels (en fonction de plusieurs autres termes adimensionnels) suite à la résolution des équations sont:

- Réactions aux roues:

$$C_{V_1} = [C_P(-\beta_1) + C_R(\beta_2) + C_L^1(-\beta_3 + \beta_2 m \gamma)] / (2\beta_1 \beta_2)$$

$$C_{V_2} = [C_P(-\beta_1) + C_R(-\beta_2) + C_L^1(-\beta_3 - \beta_2 m \gamma)] / (2\beta_1 \beta_2)$$

$$C_{V_3} = [C_P(\beta_1) + C_R(\beta_2) + C_L^1(\beta_3 - \beta_1 \beta_2 + \beta_2 m \gamma)] / (2\beta_1 \beta_2)$$

$$C_{V_4} = [C_P(\beta_1) + C_R(-\beta_2) + C_L^1(\beta_3 - \beta_1 \beta_2 - \beta_2 m \gamma)] / (2\beta_1 \beta_2)$$

- Déplacement latéral:

$$\bar{y} = e^{-\bar{t}} + \bar{t} - 1$$

- Angle de rotation du véhicule:

$$\bar{\phi} = \frac{\bar{t}^2}{2} + \alpha \left( \frac{\bar{t}^2}{2} - \bar{t} + 1 - e^{-\bar{t}} \right)$$

### Conclusions

- Plus d'études et de mesures des coefficients aérodynamiques sont requises.
- Un accident de type renversement est le plus susceptible de survenir pour ce type de véhicule.
- La valeur calculée de la vitesse du vent requise pour un accident est plus faible que celle observée lors de tests pleine échelle.

## Résumé de la référence [6]

Measures to Control Vehicle Movement at Exposed Sites During Windy Periods  
BAKER, C.J., 1987

L'auteur utilise le modèle présenté à la référence [5] pour l'appliquer à d'autres types de véhicules et établir un système d'avertissement à 2 niveaux.

### Description du modèle

- Même modèle que celui présenté à la référence [5].
- Les coefficients aérodynamiques utilisés sont encore douteux puisqu'il est difficile de reproduire les bonnes conditions en soufflerie.
- Base du système d'avertissement:
  - Une diminution de la vitesse du véhicule ne correspond pas nécessairement à une diminution de la vitesse du vent causant un accident (surtout pour les autos).
  - Une basse vitesse du vent causant un accident survient autant quand le vent est à  $90^\circ$  par rapport à la direction du véhicule que pour un angle de  $\pm 30^\circ$ . La direction du vent n'est donc pas considérée dans le système d'avertissement.
- Système d'avertissement à 2 niveaux:
  - *Niveau 1*: Pour des rafales à 40 mph, une limite de vitesse à 22 mph pour les camions est suggérée.
  - *Niveau 2*: Pour des rafales à 50 mph, la fermeture de la route pour tous les véhicules est suggérée.

### Types de véhicule

Automobiles, autobus voyageur, camions, camions semi-remorques.

### Conditions de vent

Les mêmes conditions qu'à la référence [5].

### Conditions pour accidents

Les mêmes conditions qu'à la référence [5].

### Hypothèse

L'hypothèse de la référence [5] qui veut que le véhicule soit rigide avec deux axes de

roues n'est plus valide pour le quatrième type de véhicule (camions semi-remorques).

### Équations

Les mêmes équations qu'à la référence [5].

### **Résumé de la référence [7]**

High Sided Articulated Road Vehicles in Strong Crosswinds

BAKER, C.J., 1988

Cet article présente une amélioration du modèle de la référence [5] en ajoutant l'interaction du chauffeur. Le modèle est appliqué aux camions articulés.

### Description du modèle

- Le modèle de la référence [5] est ajusté pour tenir compte d'une courbe et de l'inclinaison de la route.
- Le modèle pour le conducteur (position du volant en fonction du déplacement et du temps de réponse du conducteur) est défini de la façon suivante:

$$\delta = \lambda_1 Y(t - \epsilon) + \lambda_2 V(t - \epsilon)$$

- Les coefficients aérodynamiques sont mesurés en soufflerie par l'auteur sur un modèle 1:25 et sont exprimés en fonction de l'angle d'incidence. Les résultats sont utilisés même si le modèle n'était pas en mouvement dans la soufflerie. Cela donnera des résultats conservateurs.

### Type de véhicule

Camions articulés.

### Conditions de vent

Mêmes conditions qu'à la référence [5].

### Conditions pour accident

Mêmes conditions qu'à la référence [5].

### Équations

Les résultats adimensionnels (en fonction de plusieurs autres termes adimensionnels) obtenus suite à la résolution des équations sont:

- Réactions aux roues:

$$\begin{aligned}
C_{V_1} &= K_1 + K_2 + K_3 + \gamma(K_4 + K_5) + \delta(K_5) \\
C_{V_2} &= (-K_1 + K_2 + K_3) + \gamma(-K_4 - K_5) + \delta(-K_5) \\
C_{V_3} &= (K_1 - K_2 + K_6) + \gamma(K_4 + K_5) + \delta(K_5) \\
C_{V_4} &= (-K_1 - K_2 + K_6) + \gamma(-K_4 - K_5) + \delta(-K_5)
\end{aligned}$$

- Déplacement latéral:

$$Y = y - \int_0^t (u \sin \phi) dt - \frac{r}{r+s} \int_0^t (u \delta) dt$$

- Angle de rotation du véhicule:

$$\Phi = \phi - \frac{1}{r+s} \int_0^t (u \delta) dt$$

La probabilité que la vitesse du vent provenant d'un angle  $\beta + \delta\beta$  dépasse une valeur  $\omega_A(\beta)$  est:

$$p(\beta) = 1 - [\exp - (f_1(\beta) \omega_A(\beta)^{f_2(\beta)})]$$

Si des valeurs de  $\omega_{50}(\beta)$  (vitesse du vent n'étant pas dépassée 50% du temps) et de  $\omega_{99}(\beta)$  (vitesse du vent n'étant pas dépassée 99% du temps) sont posées, il est possible de définir les paramètres  $f_1$  et  $f_2$  et donc le temps dans l'année où les vents sont dangereux par:

$$T = \frac{8760}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 - p(\beta)) d\beta$$

## Conclusions

- Sans l'interaction du chauffeur:
  - Seulement des accidents de renversement sont prédits.
  - La vitesse du véhicule a peu d'influence sur la vitesse du vent causant un accident.
  - La vitesse du vent la plus faible causant un accident survient pour un angle de 70° entre la direction du vent et la trajectoire du véhicule.
- Analyse paramétrique des paramètres influençant l'arrivée d'un accident (sans l'interaction du chauffeur)
  - L'effet du coefficient de frottement latéral est plus important que celui du frottement longitudinal.
  - L'effet de la courbure de la route est important pour un petit rayon de courbure (<150m).

- Peu d'effet de la vitesse et de l'inertie du véhicule.
- Interaction du chauffeur:
  - L'analyse de la trajectoire du véhicule sous différentes conditions en incluant l'effet du chauffeur a été effectuée.
  - Le modèle du conducteur est rudimentaire mais donne des résultats qui semblent réalistes.

### Commentaires

- Des suggestions sont faites concernant le design des camions articulés.
- L'auteur prépare une étude sur l'effet de l'arrondissement des arrêtes de la boîte du camion et sur l'utilisation de panneaux troués le long des routes à risque qui pourrait diminuer le vent de 20%.

### **Résumé des références [8], [9] et [10]**

[8]: Ground Vehicles in High Cross Winds Part I: Steady Aerodynamic Forces

[9]: Ground Vehicles in High Cross Winds Part II: Unsteady Aerodynamic Forces

[10]: Ground Vehicles in High Cross Winds Part III: The Interaction of Aerodynamic Forces and the Vehicle System

BAKER, C.J., 1991

Il s'agit d'un résumé exhaustif du modèle de Baker et des campagnes de mesures des coefficients aérodynamiques.

### **Résumé de la référence [11]**

The Quantification of Accident Risk for Road Vehicles in Cross Winds

BAKER, C.J., 1994

Cet article présente une étude sur le risque d'accidents en fonction des paramètres du modèle du conducteur proposé. Le modèle vent/véhicule de Baker (voir les références [4] à [12]) est utilisé.

### Modèle du conducteur

Le modèle du conducteur pour lequel les paramètres  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont arbitraires est:

$$\delta = \lambda_1(t - \varepsilon)Y + \lambda_2(t - \varepsilon)dY/dt,$$

## Conditions de vent

Un échelon de vent.

## Méthode

Les situations d'accidents dans le plan  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour différentes vitesses du véhicule et caractéristiques du vent sont déterminées.

## Conclusion

L'article présente une méthode qui peut être appliquée à d'autres domaines.

## **Résumé de la référence [12]**

Wind Induced Accidents of Road Vehicles

BAKER, C.J.; REYNOLDS, S., 1992

Cet article présente l'analyse des données d'accidents survenus pendant un épisode de vents intenses au Royaume-Uni. Une vérification du modèle de Baker (voir les références [4] à [12]) en fonction de ces données est effectuée.

## Conclusions

- Le renversement est le type d'accident le plus fréquent.
- La majorité des accidents surviennent pour des camions (véhicules à hauts profils).
- Les auteurs suggèrent un seuil d'accident lorsque la vitesse d'une rafale de vent est supérieure à 17 à 20 m/s.
- Le modèle de Baker a tendance à surestimer la vitesse du vent pour laquelle un accident se produit à cause:
  - du manque de données aérodynamiques fiables pour le type de véhicule étudié. Des tests en soufflerie avec des modèles mobiles doivent être envisagés.
  - du fait que le modèle de Baker ne considère que les accidents survenant dans la première 0.5 seconde d'entrée dans la rafale de vent. Les accidents peuvent prendre plus de temps à survenir.

## **Résumé de la référence [13]**

Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability

BALSOM, M.; WILSON, F.R.; HILDEBRAND, E., 2006

Des mesures avec un camion instrumenté de l'accélération latérale du véhicule dans une rampe d'autoroute sous différentes conditions de vent et différentes vitesses du véhicule sont effectuées. Cet article cite certains modèles pour déterminer le seuil de renversement.

### Conclusion

Le vent augmente l'accélération latérale même s'il est de basse vitesse.

### **Résumé de la référence [14]**

Application of HVE SIMON to the Analysis of Lateral Wind Loadings on High-sided Vehicles

BLYTHE, W., 2008

Le HVE (Human-Vehicle-Environment) est un progiciel de simulation 3D utilisé par les ingénieurs et scientifiques du domaine de l'automobile et du transport routier. Il sert à la conception des véhicules, à l'analyse des problématiques liées à la sécurité, ainsi qu'à la reconstitution d'accidents. SIMON (SIMulation MOdel Non-linear) est un modèle mathématique faisant partie de l'environnement de simulation HVE. Cet article contient une annexe présentant de manière exhaustive des données techniques de base relatives à un véhicule semi-remorque de 45 ft.

### Description du modèle

SIMON permet de calculer les efforts dus aux vents latéraux lorsque l'utilisateur spécifie les courbes de coefficients de forces aérodynamiques. Le progiciel ne peut simuler les effets du vent (il ne fait pas de la CFD) mais il prend en compte les aspects physiques de la dynamique du véhicule (forces inertielles, élasticité des pneus, réaction de la suspension, réaction du chauffeur, etc.).

### Conclusions

- Les forces aérodynamiques ne sont pas bien prises en compte dans leur simulation. L'auteur suggère de se référer à l'aérodynamique des bâtiments de faible hauteur car ceux-ci ont été étudiés de manière approfondie. Faute de mieux, il suggère d'utiliser un coefficient de traînée (note: il confond force de traînée et force latérale) de l'ordre de 2 et un coefficient de portance de l'ordre de 1.
- Les calculs rigides qui ne prennent pas en compte la suspension et l'élasticité des pneus prédisent des vitesses de vent critiques influencées par le choix de l'axe de renversement (voir [40]). L'auteur considère ce choix arbitraire imposé par

l'approche rigide n'est pas réaliste et peut être évité par l'usage d'une simulation dynamique telle que celle qu'il utilise avec HVE-SIMON.

- En se basant sur son analyse limitée par les données aérodynamiques peu fiables, l'auteur fait la recommandation suivante: les autorités devraient fermer une route dont la vitesse limite est de 90 km/h lorsque des vents latéraux de plus de 65 km/h sont observés.

### Commentaire

Les conclusions de l'auteur sur les coefficients de forces aérodynamiques sont irréalistes.

### **Résumé de la référence [15]**

Numerical-Experimental Approach for Evaluating Cross-Wind Aerodynamic Effects on Heavy Vehicles

CHELI, F.; BELFORTE, P.; MELZI, S.; SABBIONI, E.; TOMASINI, G., 2006

L'article présente des tests en soufflerie pour la mesure des coefficients aérodynamiques et de la fonction d'admittance. Il présente aussi le calcul des charges aérodynamiques par la méthode quasi-statique corrigées par la fonction d'admittance.

### Description du modèle

Le modèle du véhicule possède 14 degrés de liberté et le schéma est le suivant:.

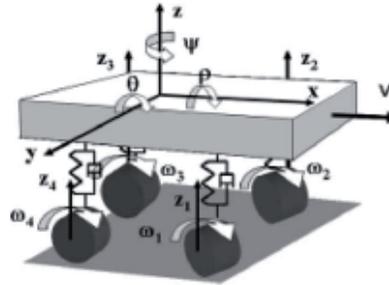


Figure 8. The 14 d.o.f. vehicle model.

Le modèle du véhicule inclut un modèle du conducteur qui permet de corriger l'angle des roues avant selon la trajectoire désirée (PID):

$$\delta = \sum_{i=1}^3 \left( P_i \cdot e_i + D_i \cdot \frac{de_i}{dt} + I_i \cdot \int e_i \cdot dt \right)$$

### Index de sécurité

L'index de sécurité pour le renversement est défini comme étant la différence entre la réaction verticale sur les roues gauches et droites divisée par la charge nominale:

$$\eta = \frac{F_{zleft} - F_{zright}}{F_{zaxis}} \geq 0.9$$

Cet indice n'implique pas nécessairement le renversement mais souligne des conditions dangereuses.

### Tests

Des tests sont effectués pour différents types de terrain (plat, viaduc et talus) et différentes intensités de turbulence du vent pour une trajectoire linéaire ou un virage en U de différents rayons de courbure.

### Conclusions

- La situation est plus critique pour une faible intensité de turbulence du vent car le vent moyen est plus élevé.
- La situation est plus critique pour un véhicule à haute vitesse sur un talus.
- Le rayon de courbure du virage en U a peu d'effet car le véhicule est déjà en position très critique dans ce type de virage.

### **Résumé de la référence [16]**

High-Sided Road Vehicles in Cross Winds

COLEMAN, S.A.; BAKER, C.J., 1990

Cet article présente la mesure des coefficients aérodynamiques en soufflerie plus adéquats qui seront utilisés dans le modèle de Baker (voir les références [4] à [12]). Une comparaison entre le risque d'accident pour un écoulement turbulent et un écoulement faiblement turbulent est aussi présentée.

### Modèle

Le modèle sert à décrire la réponse du véhicule à des vents latéraux.

### Description du modèle

- Le modèle utilisé est celui de Baker (voir les références [5], [6] et [7]).
- Les auteurs effectuent des mesures améliorées de la variation des coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'incidence. Ces données sont nécessaires pour utiliser le modèle et très peu de données sont disponibles dans la littérature.

### Type de véhicule

Modèle d'un camion-remorque à l'échelle 1:50.

### Conditions de vent

En soufflerie, un écoulement à faible turbulence et un écoulement turbulent sont générés. La turbulence est produite par une grille à l'entrée de la section d'essais, ce ne sont donc pas les conditions atmosphériques réelles de turbulence qui sont recréées.

### Conditions pour accidents

Les mêmes conditions que pour la référence [5].

### Conclusion

Le risque d'accident calculé est supérieur lorsque l'écoulement est turbulent.

### **Résumé de la référence [17]**

An Experimental Study of the Aerodynamic Behaviour of High Sided Lorries in Cross Winds

COLEMAN, S.A.; BAKER, C.J., 1994

L'article présente une campagne d'essais en soufflerie réalisée pour mesurer toutes les caractéristiques aérodynamiques d'un camion articulé. Ces données sont nécessaires à l'utilisation du modèle de Baker (voir les références [4] à [12]).

### **Résumé de la référence [18]**

Bluff-Body Aerodynamics as Applied to Vehicles

COOPER, K.R., 1993

L'auteur présente un discussion sur l'aérodynamique des véhicules et sur la façon de procéder aux tests en soufflerie. Cet article n'est pas vraiment d'intérêt pour la problématique en jeu.

### **Résumé de la référence [19]**

The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles Part One: A Review of the On-Road Turbulent Wind Environment

COOPER, K.R.; WATKINS, S., 2007

Cet article présente des simulations et une analyse des effets de la turbulence sur l'aérodynamique des véhicules routiers. Les auteurs utilisent des modèles de couche lim-

ite en turbulence atmosphérique pour simuler les caractéristiques des écoulements réels observés autour d'un véhicule circulant sur la route en présence d'un vent latéral. Cependant, dans la littérature pouvant être utile à l'élaboration des modèles, on retrouve peu d'information concernant les profils de vitesse au sol (0-20 m). Les auteurs démontrent néanmoins que l'écoulement observé dans le repère du véhicule n'est pas homogène; en effet, une analyse simple du comportement de la couche limite permet de constater que la vitesse et l'angle de lacet (angle entre la projection du vecteur vitesse dans un plan horizontal et l'axe longitudinal du véhicule) augmentent avec la hauteur par rapport au sol. Ce comportement ne peut être reproduit en soufflerie et limite la portée de ce type d'étude.

### **Résumé de la référence [20]**

An Examination of the Effects of Wind Turbulence on the Aerodynamic Drag of Vehicles  
COOPER, K.R.; CAMPBELL, W.F., 1981

Cet article présente une étude sur l'effet de la turbulence sur le coefficient de traînée.

#### Description du modèle

- Les auteurs suggère le modèle suivant pour le profil de la vitesse du vent en fonction de la hauteur par rapport au sol (aucune source citée):

$$V(h) = 3(h/10)^{0.25}$$

- Afin d'évaluer l'effet de la turbulence par le biais d'une approche quasi-stationnaire, les auteurs analysent la moyenne temporelle des coefficients de traînée en leur accordant une certaine importance en fonction de leur probabilité d'occurrence.

#### Type de véhicule

Un camion-remorque est comparé à un camion-remorque avec un déflecteur.

#### Conditions de vent

Des mesures en soufflerie sur des modèles 1:10 sont effectuées sous des écoulements laminaires comparés à des écoulements turbulents.

#### Conclusion

La valeur du coefficient de traînée est influencée par les turbulences et la configuration du camion.

## Résumé des références [21], [46] et [47]

[21]: High Wind Warning System to Prevent Overturning Truck Crashes in Wyoming  
DAI, Q.; YOUNG, R.K., 2010

[46]: Estimating the Relationship between Measured Wind Speed and Overturning Truck Crashes Using a Binary Logit Model  
YOUNG, R.K.; LIESMAN, J., 2007

[47]: Intelligent Transportation Systems for Operation of Roadway Segments in High-Wind Conditions  
YOUNG, R.K.; LIESMAN, J., 2007

L'article présente une étude statistique de la probabilité de renversement des véhicules en fonction de données météorologiques enregistrées à proximité (mais pas localement) des sites d'accidents et des rapports d'accidents survenus sur certains tronçons d'autoroutes à risque dans le Wyoming. Les auteurs utilisent un « Binary logit model » de 1<sup>er</sup> ou de 2<sup>e</sup> ordre.

Chronologie: [46], [47] et [21].

- [46]: Cet article présente le processus de développement du modèle.
- [47]: Cet article présente entre autres une revue littérature sur ce qui se fait comme système (jusqu'à 2007).
- [21]: Cet article présente 3 niveaux opérationnels constituant la base d'un système d'avertissement à partir du modèle de 2<sup>e</sup> ordre. Le modèle est construit avec plus de données que dans la référence [46] mais la même méthode est utilisée.

### Modèle

- Le modèle est utilisé pour déterminer s'il y a un lien entre les accidents survenus et les mesures du vent effectués sur les RWIS (« Road weather information systems ») qui sont situés à proximité mais pas à côté des sites d'accidents.
- Le modèle est aussi utilisé pour déterminer des seuils de vitesse du vent pour une opération sécuritaire des routes. Trois niveaux opérationnels sont mis de l'avant.

### Description du modèle

- Il s'agit de modèles statistiques qui donnent la probabilité d'un renversement en fonction des variables les plus significatives (vitesse du vent, état de la route).
- Les modèles sont différents pour les différents sites étudiés.

- Dans le modèle de 2<sup>e</sup> ordre de la référence [47], les paramètres retenus sont: la vitesse du vent, la vitesse du vent au carré et les conditions de la route (humide ou sèche).

### Type de véhicule

Camions.

### Système d'alarme

Un système d'alarme à trois niveaux est suggéré. Il est basé sur des conditions de pavé sec, ce qui permet d'obtenir des seuils conservateurs puisque lorsque la route est sèche, les conducteurs sont moins vigilants (voir la section des conclusions):

- *Niveau 1*: Vent de 30 mph
  - Action: Affichage de messages sur panneaux routiers.
  - Laisse 15% des crashes historiques se produire. Ce niveau est en fonction 12% du temps.
- *Niveau 2*: Vent de 40 mph
  - Action: Fermeture de la route pour les camions légers.
  - Ce niveau est en fonction 12% du temps.
- *Niveau 3*: Vent de 45 mph
  - Action: Fermeture de la route pour tous les camions.
  - Laisse 15% des crashes historiques où il y a eu plus de 2 crashes la même journée se produire. Ce niveau est en fonction 1.2% du temps.

### Équations

La probabilité d'un renversement selon les variables  $x_1 \dots x_k$  est exprimée par:

$$P = \frac{e^{\underline{\beta}}}{1 + e^{\underline{\beta}}}, \quad \underline{\beta} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Toutes les variables sont d'abord intégrées au modèle puis un processus d'itération est enclenché afin de ne conserver que les variables les plus significatives.

### Conclusions

- Il existe une corrélation entre les accidents de renversement et les mesures du vent effectuées à proximité mais pas à côté des sites d'accidents.
- Des conditions de route sèche sont plus propices au renversement car les conducteurs sont moins prudents.

## Résumé de la référence [22]

Development of Wind Alarm Systems for Road and Rail Vehicles: Presentation of the WEATHER project

DELAUNAY, D.; BAKER, C.J.; CHELI, F.; MORVAN, H.; BERGER, L.; CASAZZA, M.; GOMEZ, C.; LE CLEAC'H, C.; SAFFELL, R.; GRÉGOIRE, R.; VIÑUALES, A., 2006

L'article présente les différentes phases du projet WEATHER. Le but du projet est de mettre sur pied un système d'alarme qui avertit les conducteurs de 10 min à 2 h avant l'occurrence de vents dangereux. Le groupe devait installer un prototype à la fin 2006. Le projet de recherche du groupe s'étend sur plusieurs fronts (WEATHER PROJECT-Sixth framework program):

- La modélisation/prédiction des conditions de vent selon la topologie du terrain.
- La détermination des coefficients aérodynamiques par:
  - des tests en soufflerie (modèle 1 :10);
  - des simulations numériques (code CFX, Méthodes: « Detached Eddy Simulation » et « Unstationnary Reynolds Average »);
  - des tests pleine échelle pour lesquels sont installées des grilles de prise de pression sur le toit et sur un côté de la boîte du camion. Le véhicule étudié fait 6.1 mètres de long).
- La détermination du risque par la méthode de Monte-Carlo.
  - La modélisation de la dynamique du véhicule selon les efforts du vent en fonction de la modélisation des conditions de vent et la détermination des coefficients aérodynamiques mentionnés plus haut.
  - L'interaction pneu-route (modèle de Dugoff).
  - La suspension des véhicules. Différents modèles sont investigués dont celui de Ackermann's dans la référence [1].

## Commentaire

Un prototype devait être installé à la fin de 2006.

## Résumé des références [23] et [24]

[23]: Weather-Related Road Accidents in England and Wales: A Spatial Analysis

EDWARDS, J.B., 1996

[24]: The Relationship Between Road Accident Severity and Recorded Weather

EDWARDS, J.B., 1998

Ces articles présente une étude de l'effet des conditions météorologiques en général sur l'occurrence des accidents de la route. Il n'y a rien de spécifique ou d'utilisable sur les vents latéraux.

### **Résumé de la référence [25]**

Wind-Induced Accidents of Trains/Vehicles and their Measures in Japan

FUJII, T.; MAEDA, T.; ISHIDA, H.; IMAI, T.; TANEMOTO, K.; SUZUKI, M., 1999

Les auteurs effectuent une revue des études effectuées pour implanter des systèmes de réglementation des opérations des trains au Japon.

#### Type de véhicule

Les trains.

#### Études

- Des tests en soufflerie sont effectués pour déterminer les coefficients de force latérale pour différents modèles de wagon et différents types de talus.
- La vitesse critique induisant un renversement est déterminée mais la méthode de calcul n'est pas explicitée.
- Les caractéristiques des signaux de vent sont étudiés pour déterminer une procédure d'arrêt/reprise des opérations.
- Des tests sur des ponts reliant l'autoroute à un aéroport sont effectués. La vitesse et la direction du vent sont mesurées directement sur le pont.
- L'opération des trains est reprise lorsque la vitesse du vent suit une tendance descendante.
- Des tests avec des barrières anti-vent sont effectués. Elles permettent de réduire la force latérale de 60%.

#### Conclusions

- La vitesse du vent critique induisant un renversement dépend de l'orientation du vent et de la vitesse du véhicule.

- Le contrôle des opérations est basé sur la vitesse et la direction du vent mesurées directement sur le site. La reprise des opérations est basée sur un critère de vitesse moyenne du vent. Cette méthode s'est avérée réduire la fréquence des arrêts d'opération inutiles.

### **Résumé de la référence [26]**

Heavy Truck Dynamic Rollover: Effect of Load Distribution, Cargo Type and Road Design Characteristics

GARCIA, L.O.; WILSON, F.R; INNES, D., 2003

L'article présente les résultats de mesures effectuées sur un camion instrumenté (accélération latérale, longitudinale et verticale, vitesse du véhicule, angle de rotation). Des tests sont effectués sur des courbes d'autoroutes. Le but de l'étude est de déterminer l'effet du chargement et de la géométrie de la route sur le comportement du camion.

#### Type de véhicule

Camion-remorque.

#### Conditions de test

De mauvaises conditions météorologiques surviennent pendant les tests (pluie et vent).

#### Conditions pour accidents

Des seuils de renversement sont évalués pour les différents types de chargement. Ils sont dits similaires à ceux retrouvés dans la littérature:

- Véhicule vide : 0.54g;
- Véhicule chargé à moins que la charge maximale : 0.34g;
- Véhicule chargé avec bouteilles d'eau : 0.45g.

#### Commentaire

Il n'y a rien en lien direct avec le vent, mais les auteurs proposent des seuils de renversement selon le chargement du camion.

### **Résumé de la référence [27]**

Best Practices for Road Weather Management v.2.0

GOODWIN, L., 2003

Cet article constitue une revue de tous les systèmes d'avertissement météorologiques américains. Trois de ces systèmes concernent les vents latéraux ou dangereux.

*Californie:* Vent de plus de 35 mph. Action: message indiquant des vents dangereux. Il n'y a aucune indication sur la façon dont le seuil a été déterminé.

*Montana:* Voir le résumé de la référence [37].

*Nevada:* Voir le résumé de la référence [37].

### Commentaires

Il n'y a aucune indication portant sur la méthode utilisée pour déterminer les seuils de vitesse du vent ou sur l'efficacité des systèmes inventoriés.

### **Résumé des références [28] et [45]**

[28]: Safety Analysis of Moving Road Vehicles on a Long Bridge under Crosswind  
GUO, W.H.; XU, Y.L., 2006

[45]: Dynamic Analysis of Coupled Road Vehicle and Cable-Stayed Bridge Systems under Turbulent Wind XU, Y.L.; GUO, W.H., 2003

Une étude sur la sécurité des véhicules roulant sur un pont qui oscille sous un vent fluctuant est présentée. Le pont est modélisé par éléments finis, le véhicule par combinaison de corps rigides reliés par des ressorts et amortisseurs (suspension) et la rugosité de la route par un modèle de densité spectrale. Les modèles sont complexes. Les auteurs ne présentent aucune comparaison à des mesures sur le terrain.

### Modèle

Le modèle décrit la dynamique de l'ensemble véhicule/pont.

### Description du modèle du véhicule

- Le modèle est une combinaison de corps rigides reliés par de ressorts et des amortisseurs (suspension).
- Le modèle inclut la vibration verticale, latérale et rotationnelle.
- Les pneus sont modélisés comme un point et restent toujours en contact avec la route. Si la force de contact devient nulle: un accident se produit.

Voici un schéma du modèle du camion:

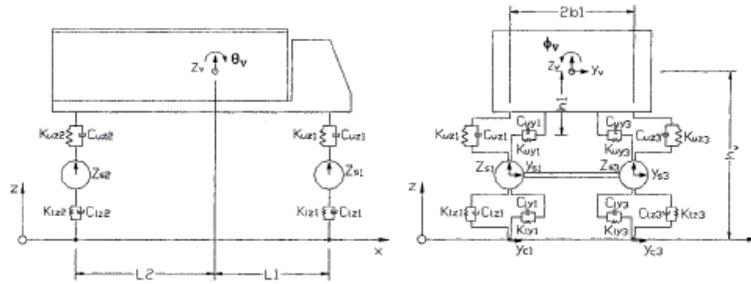


Fig. 3. Vehicle model used in case study

### Type de véhicule

Un camion de 43 pieds sans joint rotatif.

### Conditions de vent

Une rafale à la sortie d'un abri sur un pont est simulée. Les coefficients aérodynamiques utilisés proviennent de la référence [16].

### Conditions pour accidents

Les seuils pour les trois types d'accidents (renversement, glissement, rotation) sont déterminés selon la référence [6].

### Commentaire

Le modèle est décrit de façon détaillée dans [45].

### **Résumé de la référence [29]**

New Train Regulation Method Based on Wind Direction and Velocity of Natural Wind against Strong Winds

IMAI, T.; FUJII, T.; TANEMOTO, K.; SHIMAMURA, T.; MAEDA, T.; ISHIDA, H.; HIBINO, Y., 2002

Cet article est la continuité de la référence [25]. Le système de gestion des opérations des trains est appliqué sur un tronçon de rails où les vents sont importants (où un grave accident s'est produit).

- Une courbe déterminant l'arrêt des opérations (vitesse du vent en fonction de la direction du vent) est dérivée de la courbe déterminant la vitesse critique du vent produisant un renversement (la méthode de dérivation de cette courbe n'est pas explicitée) en la décalant selon un facteur de sécurité.
- Des tests en soufflerie sur l'utilisation de barrières contre le vent sont effectués. Des barrières anti-vent sont aussi installées sur le site étudié.

- La procédure de gestion des opérations est mise en fonction.

### Conclusion

Les mesures mises en place (barrières anti-vent et système de gestion) ont réduit le nombre de suspension inutile de l'opération des trains sur ce tronçon.

### **Résumé des références [30], [31] et [34]**

[30]: A Vehicle Parameter Study on Crosswind Sensitivity of Buses

JUHLIN, M.; ERICKSSON, P., 2004

[31]: A Generalised Crosswind Model for Vehicle Simulation Purposes

KLASSON, J., 2002

[34]: Directional Stability of Buses under Influence of Crosswind Gusts

MAGNUS, J., 2004

Une étude paramétrique sur l'influence de plusieurs paramètres (géométriques et aérodynamiques) sur la stabilité directionnelle d'un autobus soumis à des rafales de vent est présentée.

### Modèle

Un modèle pour la dynamique du véhicule est établi et est utilisé pour effectuer une étude de sensibilité des paramètres affectant sa stabilité directionnelle.

### Description du modèle

- Le modèle du véhicule est décrit et testé dans la référence [34]. Il s'agit d'un modèle pour la suspension où le reste du véhicule est considéré comme un corps rigide. Le schéma du modèle est le suivant:

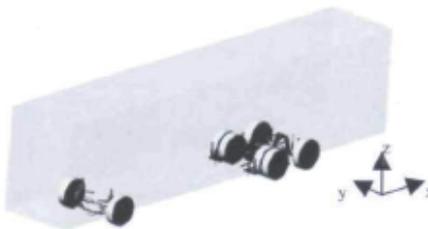


Fig. 1. Graphics of the vehicle model.

- L'étude de la sensibilité de la réponse du véhicule à chaque paramètre est effectuée à l'aide d'une méthode appelée « fractional factorial design » (dans Design and analyses of experiments par DC Montgomery) plutôt que par l'étude des gradients.

### Type de véhicule

Un autobus voyageur.

### Conditions de vent

- Des rafales de vent sont déterminées selon le modèle de la référence [31].
- Les coefficients aérodynamiques utilisés proviennent de mesures en soufflerie (Référence à un article en suédois).

### Objet de l'étude

La déviation angulaire du véhicule par rapport à la trajectoire désirée est étudiée.

### Conclusions

- La vitesse des vents latéraux est un des paramètres influençant le plus la stabilité directionnelle ainsi que la vitesse du véhicule.
- Au niveau du design du véhicule, il faudrait augmenter le poids et le moment d'inertie pour augmenter la stabilité. Ces suggestions entrent cependant en conflit avec, par exemple, la réduction désirée de la consommation d'essence.

### **Résumé de la référence [32]**

Idaho Storm Warning System Operational Test

KYTE, M.; SHONNON, P.; KITCHENER, F., 2000

Il n'y a rien de spécifique aux vents latéraux.

### **Résumé de la référence [33]**

Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers

LEUSCHEN, J.; COOPER, K.R., 2006

Des mesures en soufflerie sur un modèle de camion-remorque pleine échelle sont effectués dans le but de déterminer la réduction de traînée (donc la consommation d'essence) produite par des accessoires que l'on peut installer sur des camions.

### **Résumé de la référence [34]**

Directional Stability of Buses under Influence of Crosswind Gusts

MAGNUS, J., 2004

Voir le paragraphe: résumé des références [30], [31] et [34].

### Résumé de la référence [35]

Comparative Evaluation of Automated Wind Warning Systems

MANJUNATHAN, K.; STRONG, C., 2006

Une comparaison entre les systèmes d'avertissement pour les vents dangereux développés par la Californie et par l'Oregon est effectuée. Le système de la Californie n'était pas automatisé.

Étude de l'efficacité des deux systèmes retrouvés en Oregon:

- Premier système (Gold beach - Oregon):
  - *Niveau 1*: vent moyen  $> 35$  mph pendant 2 minutes. Actions: avertissement émis sur un panneau routier, incident de niveau 0 ou 1 déclaré, indication sur le site web.
  - *Niveau 2*: vent moyen  $> 80$  mph pendant 2 minutes. Actions: incident de niveau 2 déclaré, indication sur le site web OU fermeture de la route.
- Deuxième système (Yaquina bay bridge - Oregon): Un message d'avertissement est émis lorsque la vitesse des vents est supérieure à 30 mph.

### Commentaires

- Il n'y a pas de comparaison entre les accidents survenus avant et après la mise en place du système d'avertissement.
- Le titre de l'article semblait prometteur mais il y a finalement peu d'information utile dans le rapport.

### Résumé de la référence [36]

A Theoretical Study on the Stability of Car-Caravan Systems under Influence of Crosswind

MANTRIOTA, G., 2005

Cet article présente une analyse du système vibratoire composé d'une voiture tirant une caravane. L'auteur présente un modèle pour l'ensemble auto/caravane (système masse-ressort-amortisseur), un modèle du conducteur et trois modèles pour les rafales de vent (discret, sinusoïdal et turbulent). Des simulations numériques pour l'analyse de la trajectoire du véhicule sont effectuées.

## Modèle

La dynamique du véhicule est modélisée.

## Description du modèle

- Le modèle pour la dynamique du système auto/caravane est basé sur les équations de Lagrange en fonction de l'énergie cinétique et potentielle, de l'angle du véhicule par rapport à l'axe des  $x$  et de l'angle entre le véhicule et la caravane.
- Le modèle simulant le conducteur effectue une correction de la trajectoire proportionnelle à l'erreur par rapport à la trajectoire désirée.

## Type de véhicule

Un ensemble auto/caravane.

## Conditions de vent

Des rafales de vent discrètes, sinusoïdales et turbulentes.

## Conditions pour accidents

Un accident survient lorsqu'une instabilité des oscillations causées par les rafales de vent s'installe. Il y a un phénomène de résonance.

## Équations

Le modèle est décrit de la façon suivante:

$$[M]\{\ddot{z}\} + [M]\{\dot{z}\} + [M]z = \{F\}$$

Où  $z$  est la variable d'état du système incluant les positions du centre de masse en  $x$  et en  $y$  ainsi que l'angle du véhicule par rapport à l'axe des  $x$  et l'angle entre le véhicule et la caravane.

## Commentaire

Ce modèle est moins intéressant car il ne s'agit pas d'un camion.

## **Résumé de la référence [37]**

Evaluation of Intelligent Transportation System Alternatives for Reducing the Risks of Truck Rollover Crashes Due to High Winds

MCCARTHY, J., 2007

Ce rapport présente le processus de recherche de solutions concernant la problématique des vents latéraux dans l'état du Wyoming aux États-Unis.

### Chapitre 3 (p.28) Revue de littérature

- Revue de trois systèmes d'avertissement dans trois états américains (Oregon (x2), Nevada et Montana):
  - Oregon:
    - \* *Niveau 1*: vent moyen  $> 35$  mph pendant 2 minutes. Actions: avertissement émis sur un panneau routier, incident de niveau 0 ou 1 déclaré, indication sur le site web.
    - \* *Niveau 2*: vent moyen  $> 80$  mph pendant 2 minutes. Actions: incident de niveau 2 déclaré, indication sur le site web OU fermeture de la route.
  - Nevada:
    - \* *Niveau 1*: vent moyen entre 15 et 29 mph ou rafales entre 20 et 39 mph. Actions: message décourageant le passage des roulottes et des camions, indication sur le site web.
    - \* *Niveau 2*: vent moyen  $> 30$  mph ou rafales  $> 40$  mph. Actions: message fermant la route aux roulottes et aux camions, indication sur site web, envoi de patrouilles sur le site.
  - Montana:
    - \* *Niveau 1*: vent moyen entre 20 et 39 mph. Action: message d'avertissement pour vents latéraux.
    - \* *Niveau 2*: vent moyen  $> 39$  mph. Actions: message fermant la route aux camions, envoi de patrouilles sur le site.
- Aucune information n'est disponible (réduction des accidents etc.) sur l'efficacité de ces systèmes d'avertissements.
- Un seul modèle est recensé pour le calcul de la vitesse du vent produisant un accident de renversement. Il se retrouve à la référence [40].
- Le rapport cite le modèle statistique des références [46], [21] et [47] (même groupe de recherche).

### Chapitre 8 (conclusions p.94) Validation des modèles proposés

- Les modèles proposés pour les différents types d'accidents (entre autres pour le renversement, modèle de la référence [40]) sont testés en fonction des données historiques d'accidents qui se sont déjà produits.

- Conclusion: Les modèles ne permettent pas de prédire de façon efficace les accidents survenus. Des données plus précises sont entre autres requises.

### Chapitre 9 (p. 95) Scénario proposé

- Le système doit être complètement automatique.
- Le système doit utiliser des restrictions de circulation obligatoires.
- Le système doit être développé de façon incrémental.
- Le système doit être adapté à chaque site et des prévisions météorologiques doivent être utilisées dans le modèle.
- Les zones à haut risque doivent être priorisées.
- Comme les modèles recensés ne sont pas aptes à prédire les accidents historiques, une approche pour déterminer des seuils de la vitesse du vent est envisagée en analysant les données historiques.
- Le système d'avertissement proposé est le suivant:
  - *Niveau 0*: Rafales  $\leq 34$  mph pour une route sèche ou rafales  $\leq 29$  mph pour une route humide - Conditions normales.
  - *Niveau 1*: Rafales  $\geq 35$  mph pour une route sèche ou rafales  $\leq 30$  mph pour une route humide. Action: Avertissement.
  - *Niveau 2a*: Rafales  $\geq 45$  mph pour une route sèche ou rafales  $\geq 40$  mph pour une route humide. Action: Découragement/restriction du passage des camions à deux remorques, des maisons mobiles, des véhicule tirant une caravane, etc.
  - *Niveau 2b*: Rafales  $\geq 60$  mph pour une route sèche ou rafales  $\geq 45$  mph pour une route humide. Action: Découragement/restriction du passage des camions, des véhicules tirant une lourde charge, etc.
  - *Niveau 3*: Rafales  $\geq 70$  mph pour une route sèche ou rafales  $\geq 55$  mph pour une route humide. Action: Fermeture de la route pour tous les véhicules.
  - Commentaires: les limites établies sont similaires à celles des systèmes d'avertissement dans les autres états. Il se peut que les limites soit restrictives. Il faudrait avoir des données sur les véhicules qui ont réussi à passer au travers des épisodes de vents importants sans connaître d'accident.

### Commentaire

Le rapport présente beaucoup d'information sur la façon d'implanter le système d'avertissement. Cette information peut être intéressante pour le ministère mais sort du cadre de la présente mission.

### **Résumé de la référence [38]**

Aerodynamic Design of High-Sided Coaches to Reduce Crosswind Sensitivity, Based on Wind Tunnel Tests

PETZALL, J.; TORLUND, P.A.; FALKMER, T.; ALBERTSSON, P.; BJÖRNSTIG, U., 2008

Une étude aérodynamique (mesure des coefficients de portance, de traînée et de moment) pour évaluer la forme optimale d'un autobus afin réduire l'influence des vents latéraux sur la stabilité directionnelle du véhicule est présentée. Des tests en soufflerie sur des modèles 1:10 de différentes formes sont effectués. Le calcul du coefficient de friction nécessaire pour contrebalancer les forces aérodynamiques est aussi présenté.

### Conclusion

La sensibilité aux vents latéraux peut être diminuée avec une géométrie optimisée du véhicule.

### **Résumé de la référence [39]**

Intelligent Transportation Systems and Winter Operations in Japan

PISANO, P.; NELSON, R.; BLACKBURN, R.; BRANDAU, S.; CLONCH, D.; DOHERTY, J.; JONES, D.; KAIN, C.; LARIVIERE, P.; MANDT, G.; MCCARTHY, J.; NIXON, W.; ROOSEVELT, D., 2003

Les auteurs font une revue du système de gestion des routes en hiver au Japon. Cet article ne contient aucune information vraiment pertinente pour la problématique en jeu.

### **Résumé de la référence [40]**

Identification of Trigger Wind Velocities to Cause Vehicle Instability

SAIDI, M.; MARAGAKIS, E., 1995

Un modèle pour déterminer la vitesse d'un vent perpendiculaire à la direction du véhicule causant un renversement est développé.

## Modèle

L'équilibre statique des forces sur le véhicule constitue le modèle.

## Description du modèle

Le modèle est en fait la somme des forces générées par le vent et le poids du véhicule. Les auteurs utilisent un coefficient de pression fixe de 1.3 pour une surface rectangulaire (boîte du véhicule).

## Type de véhicule

Plusieurs configurations de camions et de véhicules récréatifs sont étudiées.

## Conditions de vent

Un vent perpendiculaire à la direction du véhicule.

## Conditions pour accidents

Un accident survient lorsque le moment créé par le vent est plus grand ou égal au moment créé par le poids du véhicule.

## Hypothèse

Les dimensions et le poids critiques des véhicules sont considérés.

## Conclusion

La vitesse du vent limite pour le renversement d'un camion est 40 mph.

## **Résumé des références [41] et [42]**

[41]: Probabilistic Assessment of Wind Related Accidents of Road Vehicles: A Reliability Approach

SIGBJÖRNSSON, R.; SNAEBJÖRNSSON, J.TH., 1998

[42]: Probabilistic Assessment of Road Vehicle Safety in Windy Environments

SNAEBJÖRNSSON, J.TH.; BAKER, C.J., SIGBJÖRNSSON, R., 2007

Les auteurs présentent un modèle probabiliste permettant de calculer un index d'accident.

## Modèle

Le modèle est utilisé pour déterminer le risque d'accident.

## Description du modèle

- Le modèle traite les paramètres des équations du mouvement comme des variables

aléatoires.

- Le modèle utilise les résultats de Baker (voir les référence [4] à [12]) pour la résolution des équations du mouvement et des coefficients aérodynamiques.
- Le modèle sépare l'espace des paramètres en deux sous-espaces soit un sous-espace sécuritaire et un sous-espace non-sécuritaire.

### Type de véhicule

Les véhicules routiers en général.

### Conditions de vent

La vitesse et la direction du vent sont considérées dans les variables aléatoire.

### Équations

L'équation développer pour l'index d'accident  $\beta$  (voir la référence [42] pour plus de détails) est la suivante:

$$\begin{aligned}\beta &= \text{sign}(\mathbf{n}_A \circ \mathbf{u}_A) \sqrt{\mathbf{u}_A \circ \mathbf{u}_A}, \\ \mathbf{u}_A &\in \{\mathbf{u} : f_g(\mathbf{u}) = 0\}, \\ \mathbf{n}_A &= \mathbf{n}(\mathbf{u}_A) \in \{\mathbf{n} : \mathbf{n} = -\nabla f_g(\mathbf{u})\},\end{aligned}$$

### Conclusion

Des résultats intéressants sur la relation entre les paramètres étudiés et l'index d'accident sont obtenus.

### **Résumé de la référence [43]**

A Comparison of Different Methods to Evaluate the Wind Induced Forces on a High Sided Lorry

STERLING, M.; QUINN, A.D.; HARGREAVES, D.M.; CHELI, F.; SABBIONI, E.; TOMASINI, G.; DELAUNAY, D.; BAKER, C.J.; MORVAN, H., 2010

Une comparaison est effectuée entre les résultats de tests pleine échelle, de tests en soufflerie et de modélisation par éléments finis pour l'évaluation des coefficients aérodynamiques sur un camion non-articulé. En général, un bon accord existe entre les méthodes sauf au niveau de la portance, à cause d'une différence entre les distributions de pression obtenues.

### **Résumé de la référence [44]**

Simulation of Heavy Trucks in Inclement Weather

SUMMERFIELD, S.; KOSIOR, J., 2001

Cet article présente une étude de la résonance du mouvement entre la remorque et la cabine d'un camion articulé.

### Modèle

Le modèle décrit le comportement du véhicule, soit la variation de l'angle entre la cabine et la remorque du camion.

### Description du modèle

- Les forces considérées comme créant un moment à l'articulation du véhicule sont la vitesse du véhicule, les forces du vent, le frottement latéral des pneus et l'effet de la turbulence (vortex derrière le camion).
- Le camion a plus tendance à être instable lorsqu'il est soumis à des rafales de vent qu'à un vent constant.
- Plusieurs combinaisons de paramètres (vitesse du vent, poids du camion, conditions de la route et vitesse du camion) sont étudiées.
- L'angle le plus élevé calculé pendant la période de simulation détermine l'état de stabilité du camion.

### Type de véhicule

Camion-remorque.

### Conditions de vent

La vitesse du vent varie aléatoirement à l'intérieure d'une certaine plage.

### Conditions pour accidents

Un angle entre la remorque et la cabine plus grand que  $5^\circ$  cause une instabilité.

### Commentaire

Aucune indication n'est présente en ce qui concerne le calcul des forces.

### Conclusions

- Il existe moins de risque d'instabilité pour les camions chargés lourdement.
- Il existe moins de risque d'instabilité sur une route sèche.

**Résumé de la référence [45]**

Dynamic Analysis of Coupled Road Vehicle and Cable-Stayed Bridge Systems under Turbulent Wind

XU, Y.L.; GUO, W.H., 2003

Voir le paragraphe: résumé des références [28] et [45].

**Résumé de la référence [46]**

Estimating the Relationship between Measured Wind Speed and Overturning Truck Crashes Using a Binary Logit Model

YOUNG, R.K.; LIESMAN, J., 2007

Voir le paragraphe: résumé des références [21], [46] et [47].

**Résumé de la référence [47]**

Intelligent Transportation Systems for Operation of Roadway Segments in High-Wind Conditions

YOUNG, R.K.; LIESMAN, J., 2007

Voir le paragraphe: résumé des références [21], [46] et [47].



# Chapitre 2

## Synthèse de la revue et analyse critique

### 2.1 Classement des références selon leur pertinence

En premier lieu, il est utile de mentionner que l'étude de la perte de contrôle des véhicules lourds causée par la présence de vents latéraux constitue une problématique multidisciplinaire. L'équipe idéale pour étudier cette question devrait être constituée au minimum d'un aérodynamicien, d'un expert en dynamique des véhicules et d'un statisticien. Un expert en météorologie serait aussi grandement utile. Plusieurs articles analysés durant ce travail présentent de sérieuses lacunes dans un domaine ou un autre. Par exemple, la référence [14] a été écrite par W. Blythe, un expert en dynamique des véhicules, et son article présente des lacunes en aérodynamique. Il utilise un outil de simulation très sophistiqué qui prend en compte l'élasticité des pneus, la dynamique de la suspension, les réactions possibles du chauffeur, etc. Cependant, il ne modélise pas correctement l'effet du vent, même si, selon ses propres commentaires, il s'agit d'un aspect essentiel du problème. En simplifiant, ce type de démarche se résume à l'étude de la réponse d'un système dynamique influencé par des excitations à l'entrée, le système étant le véhicule lourd, les excitations à l'entrée étant les forces et les moments induits par le vent et la réponse étant la stabilité, le renversement, le glissement ou le pivot du véhicule. Dans ce contexte, il est essentiel de bien connaître l'excitation, sinon on risque d'obtenir la réponse à la mauvaise question. En effet, est-ce vraiment utile de simuler dans les moindres détails un système dynamique si on ne sait pas quelles sont les excitations à l'entrée ?

Toutefois, malgré certaines lacunes aérodynamiques, d'excellentes contributions ont pu être apportées par différents auteurs. Notamment, si on revient à l'article [14], Blythe a pu mettre en évidence l'effet du choix de l'axe de renversement (simulation statique: véhicule rigide) *vs* l'effet de l'articulation (simulation dynamique: véhicule articulé) sur le renversement d'un véhicule semi-remorque de 45 ft.

Dans les paragraphes suivants, les références sont classées en cinq catégories selon leurs contributions principales: Système d'avertissement, Dynamique du véhicule, Aérodynamique, Statistiques, Générale. Certaines références sont classées dans la catégorie générale car elles traitent de domaines connexes sans toutefois être directement d'intérêt pour le présent mandat (*e.g.* renversement des trains, des autobus, perte de contrôle des voitures avec caravane, etc.).

## Références traitant des systèmes d'avertissement

### Références pertinentes

La référence [22] a été écrite par un groupe européen réunissant toutes les compétences énumérées au début de ce chapitre. Ce groupe multidisciplinaire (11 chercheurs provenant de 4 pays) a été formé en 2004 pour travailler sur le projet WEATHER (Wind Early Alarm system for Terrestrial transportation, Handling the Evaluation of Risks). Leur but est de développer un système d'alarme visant à prévenir les accidents dus aux effets du vent latéral sur les véhicules routiers et les trains. Le développement de ce système d'alarme est en principe basé sur des méthodes d'évaluation du risque, de prévisions météorologiques, de modélisation du vent, de modélisation des forces aérodynamiques et de modélisation dynamique du véhicule. Tous les thèmes nécessaires au développement d'un tel système sont réunis. Le problème est qu'un seul article [22] relate ces travaux et celui-ci est relativement peu détaillé. Il décrit l'étude comme étant en évolution et il prévoyait une implantation du système en 2006. L'approche semble idéale, mais il est difficile d'avoir des renseignements sur l'avancement des travaux. En fait, dans un article écrit en 2008 et publié en 2010 [43], les auteurs indiquent que le projet WEATHER a été financé sur une période de seulement deux ans. La référence demeure pertinente car il est intéressant de prendre connaissance des motivations à la base de leur projet et de l'articulation des différentes approches.

### Références moins pertinentes

La référence [37] analyse trois systèmes d'avertissement en vigueur dans trois États américains. Les auteurs utilisent le modèle simple proposé dans la référence [40] et conclut que les prédictions obtenues ne sont pas précises. De plus, les auteurs fournissent beaucoup d'informations pratiques sur l'implantation des systèmes d'alarme, ce est intéressant, sans être très pertinent pour le présent travail.

La référence [27] présente différents systèmes de signalisation météorologique en vigueur aux États-Unis (chaussée glacée, brouillard, inondation, vent, etc.). L'intérêt est marginal. Les références [32] et [35] présentent les systèmes d'avertissement météorologiques en place dans trois États américains. L'intérêt est marginal.

La référence [39] traite des systèmes d'avertissement météorologique en fonction l'hiver

au Japon. L'intérêt est marginal.

## Références traitant de la dynamique des véhicules lourds

### Références pertinentes

Les références [5], [6], [7], [8], [9] et [10] traitent de la dynamique des véhicules lourds en version simplifiée (modèle de Baker). En effet, que ce soit un camion simple ou un camion semi-remorque le modèle de Baker considère le véhicule comme un corps rigide, sans articulation, comportant seulement deux essieux. Ce modèle a été adopté par plusieurs autres auteurs. La forme d'interaction avec le vent suit une hypothèse de rafale sous la forme d'un échelon. Les forces aérodynamiques ont été obtenues par des mesures en soufflerie; ce point est très important, car il faut des mesures détaillées pour obtenir des entrées réalistes dans le modèle. Le modèle de Baker servira de référence principale dans la section 2.3.

La référence [40] est également intéressante, car elle propose un modèle très simple. Cet aspect de leur contribution est toutefois poussé trop loin car la modélisation aérodynamique est irréaliste. L'article demeure néanmoins pertinent et certains éléments seront repris dans la section 2.3.

La référence [14] traitant de la dynamique des véhicules lourds articulés est aussi pertinente quoiqu'elle se trouve entachée de graves lacunes aérodynamiques. Le travail de modélisation de la dynamique du véhicule semble être de première qualité.

### Références moins pertinentes

Les références [28] et [45] sont intéressantes, mais dans le présent contexte, le couplage avec la dynamique d'un pont en oscillation diminue leur pertinence.

La référence [13] présente des essais avec un camion instrumenté circulant dans une courbe en présence de vent. La référence [26] présente aussi des essais avec un camion instrumenté circulant dans une courbe (sans présence apparente de vent). Du point de vue modélisation et prédiction du renversement causé par le vent, l'intérêt de ces articles est très marginal.

La référence [44] présente une étude sur le phénomène de résonnance entre la remorque et le tracteur d'un véhicule semi-remorque en présence de vent. L'intérêt est marginal.

## Références traitant de l'aérodynamique en lien avec le présent mandat

Le titre de ce paragraphe est relativement vague, car il vise à définir une catégorie regroupant les articles traitant d'aérodynamique générale (*e.g.* couche limite terrestre) ou appliquée (*e.g.* écoulement autour des camions semi-remorques). Les articles traitant d'aérodynamique montrant un faible lien avec le présent mandat sont classés dans la catégorie générale.

### Références pertinentes

La référence [2] présente une revue très intéressante sur l'aérodynamique des véhicules en général (voitures, camions, trains). On y présente la définition des forces et des moments aérodynamiques, les méthodes de calcul ainsi que les techniques expérimentales. Les références [7], [8] et [9] présentent des mesures effectuées en soufflerie et utilisées en paramètres d'entrée dans le modèle de Baker.

Les références [4] et [43] présente une étude comparative d'évaluation des forces aérodynamiques obtenues par différentes méthodes. Il semble que ce soit parmi les seules contributions ressortant du projet WEATHER. Il s'agit de références très pertinentes.

### Références moins pertinentes

La référence [19] est d'un certain intérêt car elle fait ressortir la différence qu'il peut y avoir entre le vent réel et ce qu'on peut simuler en soufflerie. Cependant, du point de vue de la sécurité des usagers du réseau routier et de l'établissement de critères de détection, l'intérêt de cet article demeure marginal.

Les références [15], [16] et [17] présentent des études aérodynamiques menées en soufflerie afin d'analyser l'effet de la turbulence sur les forces et moments aérodynamiques. Dans la référence [16], les auteurs observent que la force de portance augmente avec le niveau de turbulence, alors que la force latérale demeure peu affectée. Le modèle de Baker est ensuite utilisé pour déterminer que le risque d'accident est plus élevé en écoulement turbulent. La turbulence générée en soufflerie est de type grille et ceci n'est pas représentatif de la turbulence atmosphérique. L'intérêt de ces références est donc marginal.

La référence [18] traite de l'aérodynamique des véhicules en général et de techniques pour réaliser des essais en soufflerie. La référence [20] traite de l'effet de la turbulence sur la traînée aérodynamique de différents camions. L'intérêt des deux articles est marginal.

La référence [33] présente des essais en soufflerie en grandeur nature sur un camion semi-remorque. Les auteurs s'intéressent uniquement à la mesure de traînée aérodynamique et à l'étude de dispositifs de réduction de traînée. L'intérêt pour la présente étude est très marginal.

## **Références traitant de statistiques relatives aux accidents dus au vent**

### Références pertinentes

Les références [21], [46] et [47] sont d'un grand intérêt, car elles fournissent une base réelle de conditions de vent provoquant des accidents. Cependant, dans le présent contexte, ces articles ne servent que de référence pour baliser l'analyse des résultats de calcul des seuils critiques de vitesse du vent.

La référence [12] analyse les statistiques d'accidents survenus lors d'une tempête ayant eu lieu en janvier 1990 au Royaume-Uni. Les auteurs concluent que près de la moitié des accidents causés par le vent sont du type renversement. Le modèle de Baker est testé avec des données réelles et l'analyse suggère que le modèle donne des vitesses de vent critiques (seuil pouvant causer un accident) trop élevées.

Les références [41] et [42] présentent des études d'évaluation du risque d'accident causé par des vents latéraux en utilisant le modèle de dynamique du véhicule de Baker. Les articles sont intéressants, mais leurs résultats peuvent seulement être utiles comme référence.

#### Références moins pertinentes

Les références [23] et [24] traitent des statistiques des accidents causés par des phénomènes reliés à la météo.

#### **Références générales**

Les références suivantes sont d'un intérêt marginal pour la présente étude:

Aérodynamique des trains [3];

Simulation du renversement des trains [25], [29];

Aérodynamique et simulation du renversement des autobus [30], [34] et [38];

Simulation du renversement et tests sur piste avec une automobile [31];

Dynamique d'un ensemble automobile-caravane [36];

Système de contrôle de la direction visant à prévenir le renversement [1];

Modélisation du comportement d'un conducteur et évaluation du risque [11].

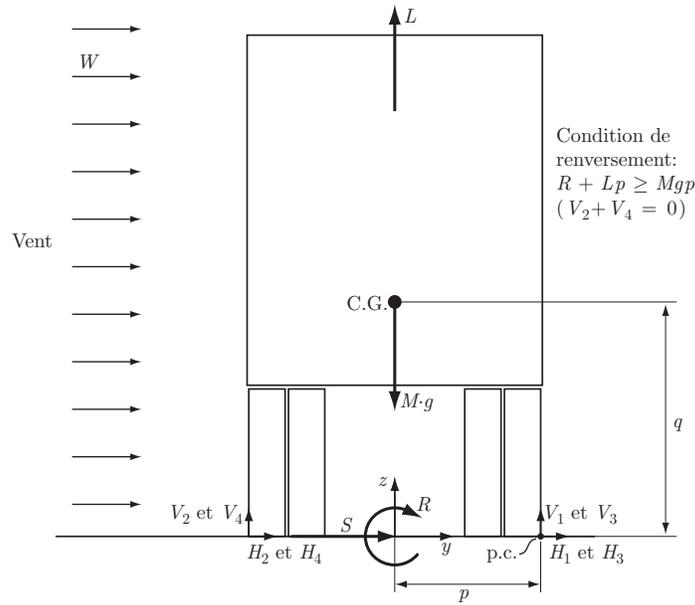
## **2.2 Synthèse de la revue**

Cette section présente une synthèse de la revue de littérature basée sur les éléments les plus pertinents répertoriés à la section 2.1. Elle est orientée vers l'atteinte du deuxième objectif, soit celui visant à faire ressortir les différents éléments permettant de modéliser la force résultante et le moment pouvant provoquer le renversement, le glissement ou le pivot d'un véhicule type (camion semi-remorque de 53 pieds de type fourgon). Dans un premier temps, l'attention sera portée uniquement sur le renversement, car sur chaussée sèche, c'est le type d'accident qui présente la plus grande occurrence.

De tous les articles répertoriés, on ressort trois types de modélisation des forces et moments aérodynamiques. 1- Le premier type fait appel à l'aérodynamique classique des véhicules routiers. 2- Le second fait appel à une version simplifiée du véhicule en considérant qu'il s'agit un prisme rectangulaire soumis uniquement à une force latérale. 3- Le troisième type est similaire au second, sauf qu'on ajoute une force de portance.

## Modélisation aérodynamique du premier type

Cette modélisation consiste à utiliser les définitions classiques des trois coefficients de force ( $S$ : latérale,  $L$ : portance et  $D$ : traînée) et des trois coefficients de moment ( $R$ : roulis,  $P$ : tangage et  $Y$ : lacet). Deux points sont à surveiller: *i*) de façon usuelle, la surface frontale  $A$  du véhicule est utilisée pour la normalisation et *ii*) tel qu'indiqué dans la référence [2], dans le cas des études aérodynamiques portant sur les véhicules routiers, le repère cartésien pour définir le point d'application des forces est situé au sol et non au centre de poussée (car celui-ci change de position en variant l'angle d'incidence). La figure 2.1 illustre de quelle manière les forces et moments aérodynamiques agissent.



**Figure 2.1:** Représentation schématique du camion semi-remorque de masse  $M$  vu de l'arrière. Le centre de gravité est indiqué par C.G., le point de contact p.c. indique l'axe longitudinal de renversement et le repère cartésien est défini au sol (selon le standard reconnu en aérodynamique des véhicules routiers). Modélisation du premier type avec  $H_i$  et  $V_i$  représentant les réactions aux pneus.

En observant le schéma de la figure 2.1, on constate facilement que la condition de renversement autour de l'axe longitudinal passant par le point de contact p.c. est  $R + Lp \geq Mgp$  (sachant qu'à l'occurrence d'un renversement, on obtient forcément  $V_2 + V_4 = 0$  puisque les roues sont soulevées). Comme il est rapporté plus loin, certains auteurs (*e.g.* Baker [5]) choisissent de définir les moments par rapport au centre de gravité du véhicule. Dans ce cas, on déplace le point d'application du moment de roulis selon la relation  $R_{C.G.} = R - S q$  et la condition de renversement s'écrit:

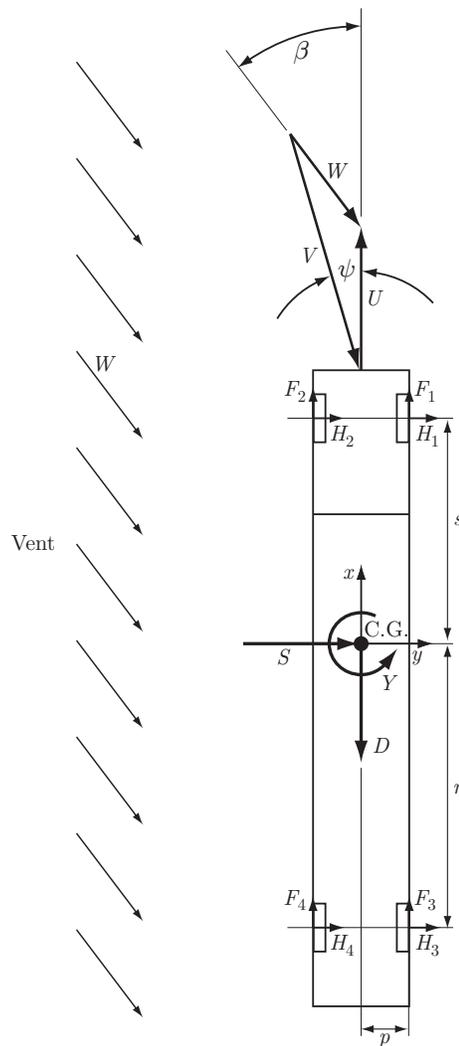
$$R_{C.G.} + S q + L p \geq M g p \quad (2.1)$$

La modélisation aérodynamique du premier type fait intervenir les coefficients aérodynamiques qui, à nombre de Reynolds élevé, sont considérés comme étant des fonctions de l'angle  $\psi$  uniquement (figure 2.2). Ils sont définis de la manière suivante:

$$C_S = \frac{S}{1/2 \rho V^2 A} \quad , \quad C_L = \frac{L}{1/2 \rho V^2 A} \quad , \quad C_D = \frac{D}{1/2 \rho V^2 A} \quad (2.2)$$

$$C_Y = \frac{Y}{1/2 \rho V^2 A q} \quad , \quad C_P = \frac{P}{1/2 \rho V^2 A q} \quad , \quad C_R = \frac{R}{1/2 \rho V^2 A q} \quad (2.3)$$

La vitesse  $V$  est la vitesse relative du vent établie dans le repère du véhicule circulant à vitesse  $U$  sur une chaussée droite située dans un plan horizontal. Le schéma de la figure 2.2 illustre la relation vectorielle définissant la vitesse  $V$ .



**Figure 2.2:** Représentation schématique du camion semi-remorque vu en plan (centre de gravité est indiqué par C.G.). Les forces  $H_i$  et  $F_i$  représentent les réactions aux pneus.

La vitesse du vent dans le repère fixe est notée  $W$  et son angle d'incidence par rapport à l'axe du véhicule est noté  $\beta$  (voir la figure 2.2). La vitesse relative du vent est obtenue par soustraction vectorielle  $\vec{V} = \vec{W} - \vec{U}$ . Ainsi, on peut écrire le module et l'angle du vecteur vitesse relative du vent:

$$V = \sqrt{(U + W \cos \beta)^2 + (W \sin \beta)^2} \quad (2.4)$$

$$\psi = \arctan \left( \frac{W \sin \beta}{U + W \cos \beta} \right) \quad (2.5)$$

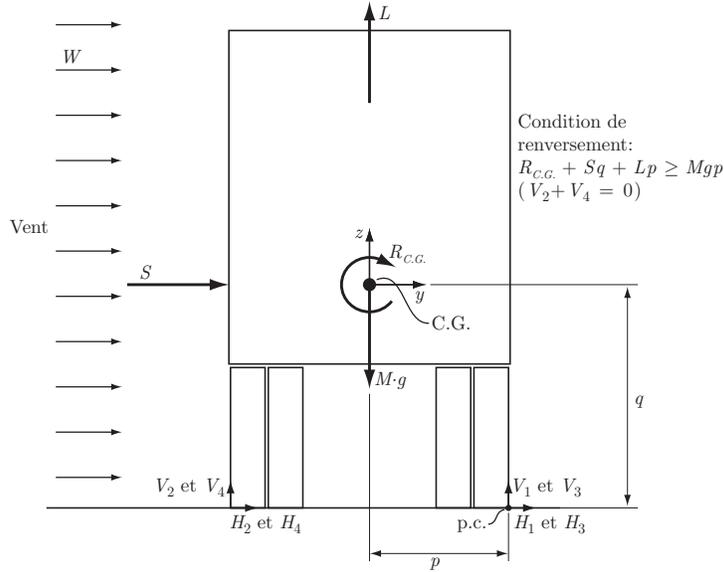
D'autre part, dans certaines publications, la surface de référence utilisée pour normaliser les forces et les moments est la surface frontale (tel que suggéré au début de cette section) [5], [6], [7], [8], [9], [10], alors que dans certaines autres, les auteurs utilisent la surface latérale du véhicule [43], [18].

### Simulation du renversement

La majorité des travaux consultés faisant appel à la modélisation aérodynamique du premier type utilisent le modèle de simulation dynamique de Baker [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] et [43]. Ce modèle fait appel aux hypothèses suivantes: le véhicule est considéré comme un corps rigide (sans articulation ni suspension), uniquement supporté par 4 roues. Les conditions de vent sont de type échelon et le modèle peut prendre en compte des réactions du chauffeur introduite par des changements de direction des roues avant. Mis à part la modélisation dynamique simpliste du véhicule, le modèle de Baker est relativement complet, puisqu'il peut simuler les conditions de renversement, de glissement et de pivot. Le modèle peut également prendre en compte l'inclinaison de la route et la courbure de la trajectoire. Dans le cas du présent rapport, les effets de la courbure et de l'inclinaison sont ignorés ainsi que la réaction du chauffeur; ainsi, selon la notation de Baker [10], on considère  $\eta = 0$  (angle d'inclinaison),  $c = 0$  (rayon de courbure de la trajectoire) et  $\delta = 0$  (angle du volant représentant la réaction du chauffeur). Pour ce qui est du renversement, le but du calcul est d'évaluer les réactions verticales aux 4 pneus. Baker considère qu'il y a risque d'accident dès lors qu'une réaction verticale nulle à l'un des pneus situé au vent est observée dans les 0.5 sec suivant le début de l'échelon de vent.

Le schéma de la figure 2.3 illustre de quelle manière les différentes forces et moments agissent pour provoquer le renversement du véhicule. Il faut d'abord noter que dans le modèle de Baker, le repère cartésien est défini au centre de gravité. Tel que mentionné précédemment, la condition de renversement s'écrit alors  $R_{C.G.} + S q + L p \geq M g p$ , puisque dans ce cas, la somme des réactions verticales aux pneus situés au vent doit être  $V_2 + V_4 = 0$ . Cependant, tel que mentionné précédemment, au lieu de ne considérer que

cette condition, Baker préfère calculer la réaction verticale aux pneus ( $V_i$ , pour  $i = 1, 2, 3$  et  $4$ ). Il considère qu'il y a risque de renversement lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil critique pour lequel la réaction verticale d'un des pneus est nulle.



**Figure 2.3:** Représentation schématique du camion semi-remorque vu de l'arrière. Le centre de gravité est indiqué par C.G., le point de contact p.c. indique l'axe longitudinal de renversement et le repère cartésien est défini au centre de gravité (modèle de Baker). Modélisation du premier type avec  $H_i$  et  $V_i$  représentant les réactions aux pneus. Les roues 1 et 3 sont situées sous le vent ("leeward"), les roues 2 et 4 sont situées au vent ("windward") et les roues 3 et 4 sont les roues arrières qui fournissent la force de traction.

Pour obtenir les réactions verticales aux pneus, Baker écrit les équations d'équilibre des forces et des moments ainsi qu'une équation de compatibilité géométrique (lien rigide des 4 roues dans un même plan). De plus, il utilise les formulations suivantes:

- Traction sur les 2 roues arrières:  $T_3 = k V_3$ ,  $T_4 = k V_4$ , le paramètre adimensionnel  $k$  étant un coefficient de traction.
- Résistance au roulement sur les 4 roues  $F_i = n V_i$  avec  $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ ,  $n$  étant un coefficient de frottement relié au roulement (sa valeur est négative pour que  $F_i$  soit orienté dans la direction opposée au déplacement du véhicule)
- Réactions latérales aux 4 roues dues au glissement latérale du véhicule  $H_i = m\gamma V_i$  avec  $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ ,  $m$  étant le coefficient de frottement de glissement latéral et  $\gamma = -v/U$  l'angle de glissement. On constate que Baker fait l'hypothèse que dès qu'il y a force latérale sur le véhicule, il y a déplacement latéral à vitesse  $v$  (vitesse latérale de glissement), hypothèse fort discutable dont la pertinence sera discutée un peu plus loin.

Ainsi, en adoptant les notations des figures 2.2 et 2.3, les équations du modèle de Baker s'expriment de la manière suivante:

Forces en  $x$ :

$$n V_1 + n V_2 + (n + k) V_3 + (n + k) V_4 = -D \quad (2.6)$$

Forces en  $y$ :

$$m\gamma V_1 + m\gamma V_2 + m\gamma V_3 + m\gamma V_4 = -S + M \frac{dv}{dt} \quad (2.7)$$

Forces en  $z$ :

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = -L + Mg \quad (2.8)$$

Moments en  $x$  (sans accélération en roulis):

$$(-p - m\gamma q) V_1 + (p - m\gamma q) V_2 + (-p - m\gamma q) V_3 + (p - m\gamma q) V_4 = -R_{C.G.} \quad (2.9)$$

Moments en  $y$  (sans accélération en tangage):

$$(s + nq) V_1 + (s + nq) V_2 + (kq - r + nq) V_3 + (kq - r + nq) V_4 = -P \quad (2.10)$$

Moments en  $z$  (avec  $\phi$  l'angle de pivot et  $I$  le moment d'inertie en  $z$ ):

$$(np - m\gamma s) V_1 + (-np - m\gamma s) V_2 + (np + kp + m\gamma r) V_3 + (-np - kp + m\gamma r) V_4 = -Y + I \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (2.11)$$

Compatibilité géométrique:

$$V_1 - V_2 - V_3 + V_4 = 0 \quad (2.12)$$

Pour calculer les réactions verticales aux quatre roues, on doit utiliser un système de quatre équations, soit l'équilibre de  $F_x$  (2.6), de  $F_z$  (2.8), de  $M_x$  (2.9) et l'équation de compatibilité (2.12). Il s'agit d'un système de quatre équations à quatre inconnues ( $V_1, V_2, V_3$  et  $V_4$ ). Ces équations font aussi intervenir les variables  $k$  et  $\gamma$  mais celles-ci ne sont pas inconnues puisqu'elles peuvent être définies à partir des autres équations du modèle. Ainsi, l'équation d'équilibre des moments en  $y$  (2.10) permet de définir le coefficient de traction  $k$ . En effet, en insérant les équations (2.6) et (2.8) dans l'équation (2.10), on obtient:

$$k = \frac{(s + r) [D + n (Mg - L)]}{Dq - P - s (Mg - L)} \quad (2.13)$$

D'autre part, la définition de  $\gamma$  (selon Baker  $\gamma = -v/U$ ) fait intervenir la vitesse de glissement latéral du véhicule. L'intégration de l'équation d'équilibre  $F_y$  (2.7) permet

de calculer  $v$ . En effet, en y insérant la définition de  $\gamma$  ainsi que la somme des réactions verticales provenant de l'équation d'équilibre  $F_z$  (2.8), on obtient:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{S}{M} + \frac{m}{MU} (L - Mg) v \quad (2.14)$$

En intégrant avec  $v = 0$  pour  $t = 0$  (condition de vent définie comme un échelon), on écrit:

$$v = \frac{1}{m} \frac{S}{L - Mg} U \left( e^{\frac{m(L-Mg)}{MU} t} - 1 \right) \quad (2.15)$$

et on obtient:

$$m\gamma = -m \frac{v}{U} = \frac{-S}{L - Mg} \left( e^{\frac{m(L-Mg)}{MU} t} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Finalement, le modèle de Baker pour le renversement s'exprime comme un système linéaire que l'on peut écrire sous forme matricielle de la manière suivante:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{V} = \mathbf{B}$$

$$\begin{pmatrix} n & n & (n+k) & (n+k) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ (-p - m\gamma q) & (p - m\gamma q) & (-p - m\gamma q) & (p - m\gamma q) \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D \\ -L + Mg \\ -R_{C.G.} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Si on connaît la matrice  $\mathbf{A}$  et le vecteur  $\mathbf{B}$ , on constate que l'on peut facilement déterminer les éléments du vecteur  $\mathbf{V}$  représentant les réactions verticales aux quatre roues.

### Mise en œuvre du modèle de Baker

Pour un véhicule donné, les paramètres  $M$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $r$  et  $s$  sont constants. De plus, pour une vitesse du véhicule  $U$  donnée ainsi qu'une vitesse  $W$  et une orientation  $\beta$  du vent données, on calcule les valeurs de  $V$  et de  $\psi$  selon les équations (2.4) et (2.5). Avec les valeurs de  $V$  et de  $\psi$ , on détermine les forces et les moments aérodynamiques selon les relations (2.2) et (2.3) (connaissant la masse volumique de l'air, la distribution des coefficients aérodynamiques selon l'angle  $\psi$  ainsi que la surface frontale du véhicule). Ceci permet ensuite de calculer  $k$  par l'équation (2.13) et  $m\gamma$  par la relation (2.16). Ainsi, toutes les composantes de la matrice  $\mathbf{A}$  et du vecteur  $\mathbf{B}$  sont déterminées et on obtient le vecteur  $\mathbf{V}$  par simple inversion de la matrice  $\mathbf{A}$ , soit:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{B} \quad (2.18)$$

Étant donné que la variable  $\gamma$  intervenant dans la relation (2.16) est une fonction temporelle, les éléments du vecteur  $\mathbf{V}$  constituent les réactions verticales aux roues en fonction du temps. Le problème consiste donc à déterminer quelles valeurs de  $W$  et de  $\beta$  induisent des valeurs nulles des réactions verticales aux roues lorsque  $t \leq 0.5$  seconde.

### Modèle de Baker sous forme adimensionnelle

Dans le but de généraliser et de simplifier la mise en œuvre du modèle de Baker, il est utile de le présenter sous une forme adimensionnelle. Toutes les quantités physiques du problème seront écrites sous forme adimensionnelle (à partir du système FLT) en utilisant la hauteur du centre de masse  $q$  comme longueur de référence, le rapport  $q/V$  comme temps de référence (la vitesse relative du vent  $V$  étant la vitesse de référence) et la quantité  $\rho V^2 A/2$  comme force de référence. Ainsi, une force  $F$  sera exprimée sous la forme d'un coefficient  $C_F = 2F/(\rho V^2 A)$  et un moment  $\mathcal{M}$  sous la forme d'un coefficient  $C_{\mathcal{M}} = 2\mathcal{M}/(\rho V^2 A q)$ . En notant  $C'_L = 2(L - Mg)/(\rho V^2 A)$ , le système matriciel (2.17) s'écrit sous forme adimensionnelle:

$$\begin{pmatrix} n & n & (n+k) & (n+k) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ (-p/q - m\gamma) & (p/q - m\gamma) & (-p/q - m\gamma) & (p/q - m\gamma) \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_{V_1} \\ C_{V_2} \\ C_{V_3} \\ C_{V_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -C_D \\ -C'_L \\ -C_{R_{c.g.}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

De plus, même si le paramètre  $k$  est déjà sans dimension, il peut être utile de réécrire l'équation (2.13) en fonction des termes adimensionnels. On obtient ainsi:

$$k = \frac{s+r}{q} \frac{C_D - n C'_L}{C_D - C_P + C'_L s/q} \quad (2.20)$$

En ce qui concerne la vitesse latérale adimensionnelle du véhicule on utilise la notation  $\bar{v} = v/V$ . Pour le déplacement latéral adimensionnel du véhicule on note  $\bar{y} = y/q$  et pour le temps adimensionnel, on note  $\bar{t} = V t/q$ . En introduisant les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  on peut réécrire sous forme adimensionnelle les équations (2.15) et (2.16):

$$\bar{v} = \frac{v}{V} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left( e^{\alpha_2 \bar{t}} - 1 \right) \quad (2.21)$$

$$m\gamma = -m \frac{v}{U} = -m \frac{V \bar{v}}{U} = -m \frac{V}{U} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left( e^{\alpha_2 \bar{t}} - 1 \right) \quad (2.22)$$

Avec  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  définis par (le terme  $\rho A q/2$  représente une masse de référence):

$$\alpha_1 = \frac{\rho A q}{2M} C_S \quad \text{et} \quad \alpha_2 = m \frac{\rho A q}{2M} \frac{V}{U} C'_L \quad (2.23)$$

En résolvant le système matriciel (2.19), on obtient une forme simple impliquant les coefficients  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  et  $K_6$ :

$$\left. \begin{aligned} C_{V_1} &= K_1 + K_2 + K_3 + \gamma (K_4 + K_5) \\ C_{V_2} &= -K_1 + K_2 + K_3 + \gamma (-K_4 - K_5) \\ C_{V_3} &= K_1 - K_2 + K_6 + \gamma (K_4 + K_5) \\ C_{V_4} &= -K_1 - K_2 + K_6 + \gamma (-K_4 - K_5) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

avec les coefficients  $K_i$  définis de la manière suivante:

$$K_1 = \frac{q C_{R.C.G.}}{4p}, \quad K_2 = \frac{q (C_D - C_P)}{2(s+r)}, \quad K_3 = \frac{-r C'_L}{2(s+r)} \quad (2.25)$$

$$K_4 = \frac{qm [sC'_L + q(C_D - C_P)]}{4p(s+r)}, \quad K_5 = \frac{qm [rC'_L - q(C_D - C_P)]}{4p(s+r)}, \quad K_6 = \frac{-sC'_L}{2(s+r)} \quad (2.26)$$

Le modèle de Baker (sans intervention du chauffeur) tel que décrit par le système (2.24) est similaire à ce qui a été publié dans les références [7], [10] et [11]. De plus, on remarque que la somme des coefficients  $K_4$  et  $K_5$  se réduit à l'expression:

$$K_4 + K_5 = K_7 = \frac{qm C'_L}{4p} \quad (2.27)$$

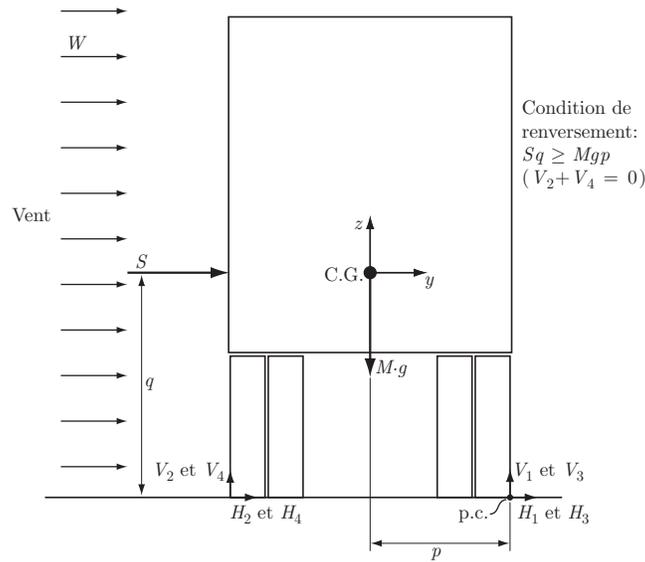
Ainsi, on peut écrire plus simplement le système d'équations (2.24):

$$\left. \begin{aligned} C_{V_1} &= K_1 + K_2 + K_3 + \gamma K_7 \\ C_{V_2} &= -K_1 + K_2 + K_3 - \gamma K_7 \\ C_{V_3} &= K_1 - K_2 + K_6 + \gamma K_7 \\ C_{V_4} &= -K_1 - K_2 + K_6 - \gamma K_7 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Pour étudier la problématique du renversement, Baker propose de trouver la vitesse de vent critique  $W_{cr}$  qui provoque une réaction verticale aux roues  $C_{V_i} = 0$  pour une vitesse de véhicule  $U$  donnée, un angle de vent  $\beta$  donné et un temps  $t \leq 0.5$  seconde.

## Modélisation aérodynamique du deuxième type

Le modèle de Saiidi et Maragakis [40](dénommé modèle de Saiidi dans ce qui suit), illustré sur la figure 2.4, est le plus simple des modèles répertoriés dans la littérature consultée. Il semble que plusieurs groupes américains l'aient utilisé ou testé (les chercheurs européens semble préférer le modèle de Baker). Dans le modèle de Saiidi, on utilise un version simplifiée du véhicule en considérant qu'il s'agit un prisme rectangulaire soumis uniquement à une force latérale. De plus, la vitesse du véhicule est ignorée et seul le cas du vent latéral est considéré ( $U = 0$  et  $\beta = 90^\circ$ ). Cela permet aux utilisateurs du modèle de considérer plusieurs configurations de véhicule [40].



**Figure 2.4:** Représentation schématique du camion semi-remorque vu de l'arrière. Le centre de gravité est indiqué par C.G. et le point de contact p.c. indique l'axe longitudinal de renversement. Modélisation du deuxième type.

Le modèle Saiidi considère un coefficient de force latérale d'une valeur unique de 1.3 (coefficient normalisé avec la surface latérale). La condition de renversement sur l'axe du point de contact est  $Sq \geq Mgp$ . Les auteurs de la référence [40] ont innové en introduisant le concept de point de contact effectif pour les camions semi-remorque. En effet, pour ces véhicules, ils suggèrent d'utiliser une longueur  $p_{eff} < p$  afin de prendre en compte le joint articulé de la remorque avec le tracteur.

## Modélisation aérodynamique du troisième type

Ce modèle aérodynamique proposé par Blythe [14] est similaire à celui de Saiidi, sauf que l'on ajoute une force de portance prenant en compte la vitesse du véhicule. La condition de renversement du véhicule rigide est alors  $Sq \geq (Mg - L)p$ . L'auteur suggère des

valeurs fixes de  $C_S = 2$  et  $C_L = 1$ . L'auteur simule aussi la dynamique complète du véhicule articulé en conservant toutefois la même approche aérodynamique.

## 2.3 Analyse

### Simulation du renversement

En considérant la synthèse de la revue de littérature, on peut conclure que le modèle de Baker est le plus largement utilisé. Il est celui qui permet le mieux de prendre en compte le comportement aérodynamique du véhicule. Les modèles de Saïdi et de Blythe sont trop simplistes, car ils ignorent l'importance que peut avoir le moment de roulis. De plus, le modèle de Saïdi ne tient pas compte de la vitesse du véhicule, ce qui est irréaliste.

Le modèle de Baker n'est cependant pas très simple d'utilisation. Il nécessite des courbes précises des coefficients de force latérale, de force de portance et de moment de roulis. Une des difficultés d'utilisation de ce modèle provient du fait que peu de résultats de ce type sont disponibles dans la littérature. De plus, il n'est pas certain qu'une simulation du vent en forme d'échelon soit nécessaire. D'ailleurs, l'utilisation des coefficients de forces et moments aérodynamiques moyens est valable en régime permanent et non en régime instationnaire. On pourrait cependant avoir recours à la théorie quasi-stationnaire qui pourrait donner des résultats intéressants du point de vue théorique, mais il ne semble pas essentiel d'explorer cette avenue d'un point de vue pratique (dans l'immédiat). Un vent constant imposé au modèle devrait pouvoir fournir les informations pertinentes. De plus, pour un véhicule circulant à 70 km/h (19 m/s), une bourrasque d'une durée de 2.5 secondes couvre plus de deux fois l'étendue du véhicule (longueur totale d'environ 23 m). En d'autres termes, le véhicule entier se trouve à l'intérieur de la bourrasque. Ainsi, une simulation avec un vent constant pourrait fournir un seuil de vent critique et un monitoring repérant les bourrasques de durée supérieure à 2.5 secondes pourrait être suffisant.

Dans un contexte de vent en régime permanent, en absence de glissement latéral et de pivot, la condition de renversement (2.1) appliquée à un véhicule rigide s'écrit sous forme adimensionnelle:

$$C_{R.C.G.} q + C_S q + C_L p \geq \frac{2Mg}{\rho V^2 A} p \quad (2.29)$$

En isolant la vitesse relative du vent dans l'expression (2.29), on obtient la vitesse relative du vent provoquant le renversement:

$$V_{renv.}^2 = \frac{2Mg p}{\rho A [(C_{R.C.G.} + C_S) q + C_L p]} \quad (2.30)$$

La mise en œuvre de ce modèle est relativement simple. Pour une valeur donnée de la vitesse du véhicule  $U$  et une valeur donnée de l'angle du vecteur vent  $\beta$ , on constate que tous les termes de l'expression (2.30) deviennent des fonctions de  $W$ . En effet, par la relation (2.4) on constate que l'on a  $V(W)$  et par la relation (2.5), on a  $\psi(W)$ . Comme tous les coefficients aérodynamiques sont des fonctions de  $\psi$  (pour un nombre de Reynolds élevé), on a donc  $C_{R_{C.G.}}(W)$ ,  $C_S(W)$  et  $C_L(W)$ . L'équation (2.30) peut ainsi être résolu en fonction  $W$  afin de déterminer la valeur de  $W_{renv.}$ , la vitesse du vent provoquant le renversement. On peut aussi traiter le problème en posant une vitesse de vent  $W$  donnée et un angle  $\beta$  donné. On obtient alors des fonctions de  $U$ , la vitesse du véhicule:  $V(U)$ ,  $C_{R_{C.G.}}(U)$ ,  $C_S(U)$  et  $C_L(U)$ . La solution de l'équation (2.30) permet ainsi de déterminer la vitesse du véhicule  $U_{renv.}$  qui provoque le renversement

L'équation (2.30) est similaire à l'expression (7a) de l'article de Snaebjörnsson, Baker et Sigbjörnsson [42]. Notons que cet article est plus récent (2007) que l'ensemble de la production de Baker associée à l'exploitation de son modèle (période s'étalant de 1986 à 1994).

#### Lacunes du modèle de Baker:

L'auteur du présent rapport considère que le modèle de Baker présente des lacunes. En premier lieu, Baker considère que les forces  $H_i$  ( $i = 1, 2, 3$  et  $4$ ) représentent les réactions latérales aux pneus uniquement dues au glissement latérale du véhicule et que celles-ci peuvent être modélisées par  $H_i = m\gamma V_i$  où  $m$  est le coefficient de frottement de glissement latéral et  $\gamma = -v/U$  est l'angle de glissement. Il est jugé ici que ce raisonnement est boiteux, puisqu'en absence de glissement ( $v = 0$ ), il en résulte une absence de force latérale ( $H_i = 0$ ), ce qui ne permet pas d'équilibrer la force latérale  $S$  due au vent (voir l'équation des forces en  $y$ ). En fait, selon l'équation (2.15) issue du modèle de Baker, dès qu'il y a présence d'une force latérale  $S$  due au vent, il en résulte un glissement et, évidemment, ceci est totalement erroné dans la réalité.

Une seconde lacune du modèle de Baker consiste à considérer un échelon de vitesse du vent. Dans ce cas, il s'agit donc d'un écoulement instationnaire et le modèle est en défaut car il fait appel aux coefficients de forces et de moments aérodynamiques statiques. Cependant, Baker propose dans un de ses articles [9] un modèle de force instationnaire basé sur l'utilisation d'une force stationnaire à laquelle on associe une fonction de pondération et une vitesse instationnaire. En fait, il applique un principe de développement au premier ordre similaire à ce qui se fait lorsqu'on utilise la théorie quasi-stationnaire pour aborder les problèmes d'aérodynamique instationnaire de faible amplitude. La lecture de la référence [9] est loin de convaincre l'auteur du présent rap-

port que l'approche est viable dans le cas d'un échelon de vitesse (il ne s'agit pas d'une variation de vitesse de faible amplitude). Plus précisément, l'équation (9) de l'article [9] de Baker semble trop limitative. Dans ce contexte, il semble plus simple d'utiliser le modèle de Baker dans des conditions stationnaires (c'est ce qu'il fait dans la section 3 de l'article [10] pour son analyse du renversement).

Modèle de Baker en régime permanent:

Dans le cas du régime permanent, on considère  $dv/dt = 0$  et l'équilibre des forces en  $y$  (2.7) du modèle de Baker impose la formulation suivante pour le coefficient  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{C_S}{m C'_L} \quad (2.31)$$

Selon la définition de  $\gamma$ , on obtient alors une vitesse latérale de glissement du véhicule qui est constante, soit:

$$\gamma = -\frac{v}{U} \Rightarrow v = -\frac{C_S}{m C'_L} U \quad (2.32)$$

On constate que le cas du régime permanent n'est pas d'intérêt pour étudier le phénomène de glissement, car le modèle de Baker impose un dérapage systématique du véhicule, dès qu'il y a présence d'un vent latéral. Le modèle présente cependant un intérêt pour le renversement, car en insérant l'expression (2.31) dans le système (2.28) et en imposant  $C_{V_2} + C_{V_4} = 0$  comme condition de renversement, on obtient:

$$\left. \begin{array}{l} \gamma = C_S/(m C'_L) \\ C_{V_2} + C_{V_4} = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{système (2.28)} \Rightarrow 2K_1 - K_3 - K_6 + 2\gamma K_7 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{2q}{4p} C_{R_{C.G.}} + \frac{r}{2(s+r)} C'_L + \frac{s}{2(s+r)} C'_L + \frac{2C_S}{m C'_L} \frac{m q}{4p} C'_L = 0$$

$$\Rightarrow (C_{R_{C.G.}} + C_S) q + C_L p = \frac{2Mg p}{\rho V^2 A} \quad (2.33)$$

On obtient finalement la même relation exprimant la vitesse relative du vent provoquant le renversement que celle obtenue précédemment lors du développement de l'équation (2.30), soit:

$$V_{renv.}^2 = \frac{2Mg p}{\rho A [(C_{R_{C.G.}} + C_S) q + C_L p]}$$

Ainsi, le modèle de Baker développé en régime permanent auquel on impose la contrainte  $C_{V_2} + C_{V_4} = 0$  exprime la condition de renversement (2.1) exposée au début de la présente section.

## Simulation du glissement et du pivot

Les modèles de Saiidi et de Blythe ayant été rejetés, la meilleure alternative demeure le modèle de Baker. Évidemment, les commentaires précédents relatifs au modèle de Baker sont toujours pertinents. On peut néanmoins faire des prédictions intéressantes du glissement et du pivot en mettant en œuvre ce modèle dans les cas particuliers de chaussées glissantes par exemple.

Pour ce qui est du glissement, le déplacement latéral du véhicule est obtenu en faisant l'intégrale de l'équation (2.21) décrivant l'évolution temporelle de la vitesse de glissement latéral. On obtient ainsi, sous forme adimensionnelle (en imposant  $\bar{y} = 0$  pour  $\bar{t} = 0$ ):

$$\bar{y} = \int_0^{\bar{t}} \bar{v} d\bar{t} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left( \frac{e^{\alpha_2 \bar{t}}}{\alpha_2} - \bar{t} - \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (2.34)$$

Les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont définis par les relations (2.23). De plus, si on développe l'expression (2.34) sous forme dimensionnelle, on obtient:

$$y = \frac{S}{M} \left( \frac{M U}{m (L - M g)} \right)^2 \left[ e^{m (L - M g) t / (M U)} - \frac{m (L - M g)}{M U} t - 1 \right] \quad (2.35)$$

Selon le modèle de Baker, il y a risque d'accident dès que la valeur de  $y \geq 0.5$  m pour  $t \leq 0.5$  seconde.

Notons enfin que dans un article plus récent (2007) Snaebjörnsson, Baker et Sigbjörnsson [42] ont retravaillé la problématique du glissement latéral. Ils ont considéré un critère basé sur la somme vectorielle des forces dans un plan horizontal, soit:

$$f_i = -\sqrt{S^2 + (D + \mathcal{R})^2} - \mu V_i \quad (2.36)$$

où  $\mathcal{R}$  est la force de résistance due au frottement roulement-essieux et  $\mu$  est un coefficient de friction statique de valeur négative. Ainsi, si la valeur de  $f_i$  est positive, le frottement entre un pneu  $i$  et la route est suffisant pour compenser les autres forces horizontales. Dans le cas inverse (valeur de  $f_i$  négative), le frottement est insuffisant et il y a alors possibilité de glissement pour la roue  $i$  en question.

En ce qui concerne le pivot, l'angle  $\phi$  est obtenu en intégrant deux fois l'équation (2.11) représentant l'équilibre des moments en  $z$ . En écrivant cette équation sous forme adimensionnelle avec les contraintes du modèle de Baker (en absence d'intervention du chauffeur), on obtient:

$$\frac{d^2\phi}{d\bar{t}^2} = \alpha_4 + \alpha_5\bar{v} \quad (2.37)$$

Avec les coefficients  $\alpha_4$  et  $\alpha_5$  définis de la manière suivante:

$$\alpha_4 = \frac{\rho A q^3}{2I} \left[ C_Y + \left( n + \frac{k}{2} \right) C_{R.C.G.} \right] \quad (2.38)$$

$$\alpha_5 = -m \frac{\rho A q^3}{2I} \frac{V}{U} \left[ \left( n + \frac{k}{2} \right) C'_L + C_P - C_D \right] \quad (2.39)$$

En utilisant l'équation (2.21) exprimant  $\bar{v}$  la vitesse latérale adimensionnelle du véhicule et en intégrant deux fois (avec  $\phi = 0$ ,  $\bar{v} = 0$  et  $\bar{y} = 0$  pour  $\bar{t} = 0$ ), on obtient:

$$\phi = \frac{\alpha_4}{2} \bar{t}^2 + \frac{\alpha_1 \alpha_5}{\alpha_2^2} \left( \frac{e^{\alpha_2 \bar{t}}}{\alpha_2} - \frac{\alpha_2}{2} \bar{t}^2 - \bar{t} - \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (2.40)$$

Finalement, selon la préférence du lecteur, l'équation (2.40) peut être réécrite sous forme dimensionnelle de la manière suivante:

$$\phi = \frac{1}{2I} \left\{ \left[ S q \left( n + \frac{k}{2} + \frac{P - D}{L - Mg} \right) + Y + \left( n + \frac{k}{2} \right) R_{C.G.} \right] t^2 - 2S q \left( \frac{M U}{m (L - Mg)} \right)^2 \left[ e^{m (L - Mg) t / (M U)} - \frac{m (L - Mg)}{M U} t - 1 \right] \right\} \quad (2.41)$$

Selon le modèle de Baker, il y a risque d'accident dès que la valeur de  $\phi \geq 0.2$  rad pour  $t \leq 0.5$  seconde.

### Incohérences et erreurs relevées dans la littérature

Il est utile de présenter ici une liste d'incohérences et d'erreurs relevées dans les divers articles utilisés comme références. En effet, le lecteur du présent rapport sera potentiellement amené à consulter ces articles et il pourra être induit en erreur s'il n'a pas suffisamment de recul et de connaissances de base en aérodynamique. En effet, ce n'est qu'en consultant plusieurs articles et en s'appuyant sur un certain bagage de connaissances que l'on peut avoir une vue d'ensemble suffisante pour constater certaines contradictions. Dans ce contexte, la liste suivante est pertinente et sert de mise en garde visant à guider le lecteur désirant aborder la littérature traitant de la présente problématique.

- Dans la référence [5], Baker dispose les roues 1 et 3 sous le vent (“leeward”) et les roues 2 et 4 au vent (“windward”). Ainsi, sous l’effet du vent, les roues 2 et 4 sont celles qui ont tendance à être soulevées lorsque le véhicule est sujet au renversement. La même nomenclature a été adoptée dans le présent rapport. En fait, la règle est simple, on doit systématiquement obtenir  $C_{V_{\text{roue au vent}}} < C_{V_{\text{roue sous le vent}}}$  et toute définition donnant des résultats inverses sera erronée.

C’est ce qu’on retrouve dans plusieurs publications postérieures à l’article [5]. Pour une raison inexplicée, Baker situe les roues à l’inverse dans les articles [7], [10] et [11], soit les roues 2 et 4 sous le vent (“leeward”) et les roues 1 et 3 au vent (“windward”). Ayant fait cela, les équations du modèle sont demeurées les mêmes avec les conventions adoptées dans l’article [5], ce qui constitue une erreur. Par exemple, dans l’article [10], les équations (10a), (10b), (11a) et (11b) ne représentent pas  $C_{V_1}$ ,  $C_{V_2}$ ,  $C_{V_3}$  et  $C_{V_4}$  tel que mentionné par Baker en page 228 de l’article, mais plutôt  $C_{V_2}$ ,  $C_{V_1}$ ,  $C_{V_4}$  et  $C_{V_3}$  sachant qu’il a défini les roues 2 et 4 sous le vent. Afin de le démontrer, considérons les réactions des roues avant représentées par les équations (10a) et (10b) de l’article [10] de Baker (sans réaction du chauffeur):

$$\text{Réf. [10]} \Rightarrow \text{roue 1 au vent et \u00e9q. (10a): } C_{V_1} = K_1 + K_2 + K_3 + \gamma K_7$$

$$\text{Réf. [10]} \Rightarrow \text{roue 2 sous le vent et \u00e9q. (10b): } C_{V_2} = -K_1 + K_2 + K_3 - \gamma K_7$$

Or, pour le r\u00e9gime permanent, en utilisant les d\u00e9finitions de  $K_1$  (2.25) et de  $K_7$  (2.27), on obtient:

$$C_{V_1} = (C_{R.C.G.} + C_S) + K_2 + K_3 \quad \text{et} \quad C_{V_2} = -(C_{R.C.G.} + C_S) + K_2 + K_3$$

On constate clairement que  $C_{V_2} < C_{V_1}$  et que la roue 2 est forc\u00e9ment au vent et non sous le vent comme le pr\u00e9cise Baker dans l’article [10].

- En lien avec la probl\u00e9matique pr\u00e9c\u00e9dente, les \u00e9quations (18) et (19) de la r\u00e9f\u00e9rence [10] ne peuvent provenir des \u00e9quations (17 a, b) tel que mentionn\u00e9 par Baker. En effet, les \u00e9quations (17 a, b) concernent les roues sous le vent (2 et 4 selon la nomenclature de l’article) et les \u00e9quations (18) et (19) ne peuvent \u00eatre obtenues que pour les roues au vent (1 et 3 selon la nomenclature de l’article).
- Il y a une erreur de signe devant le terme  $K_4$  de \u00e9quation d\u00e9crivant  $C_{V_3}$  dans les r\u00e9f\u00e9rences [10] et [11], alors que le signe est bien d\u00e9fini dans la r\u00e9f\u00e9rence [7].
- Il faut ajouter le terme  $W$  dans la d\u00e9finition du coefficient  $\alpha_2$  en page 85 de la r\u00e9f\u00e9rence [7], sinon ce coefficient n’est pas adimensionnel tel que requis. Cette erreur a \u00e9t\u00e9 corrig\u00e9e dans la r\u00e9f\u00e9rence [10].

- Dans les références [7] et [10], il faut enlever le terme  $q/(s+r)$  dans la définition de  $\alpha_5$ .
- Dans la référence [5], il y a une erreur de signe devant le terme  $C_D$  dans l'équation (35) définissant  $k$ . Cette erreur a été corrigée dans les références [7] et [10].
- Des mêmes symboles ont des usages différents d'un article à l'autre et ce choix peu judicieux peut porter à confusion. Le tableau suivant, non exhaustif, fournit une liste démontrant le bien fondé de cette préoccupation.

	réf. [5]	réf. [7]	réf. [10]	réf. [42]	présent rapport
Vitesse longitudinale du véhicule	$u$	$u$	$v$	$R$	$U$
Vitesse latérale de glissement du véhicule	$v$	$v$	$v_y$	–	$v$
Vitesse latérale globale du véhicule (effets du vent, du pivot et de la réaction du chauffeur)	–	$V$	$V$	–	–
Vitesse du vent	$W$	$w$	$\bar{u}$	$U$	$W$
Vitesse relative du vent	$V$	$W$	$\bar{V}$ et $V$	$V$	$V$



# Chapitre 3

## Conclusions et recommandations

### 3.1 Atteinte des objectifs

Le premier objectif de ce travail de recherche consistait à effectuer une recherche bibliographique afin de constituer une revue de littérature portant sur la problématique de perte de contrôle des véhicules lourds causée par la présence de vents latéraux. Le chapitre 1 de ce rapport constitue la revue de littérature qui comporte des résumés de 47 articles et rapports scientifiques.

Le second objectif consistait à faire une synthèse et une analyse critique de la revue de littérature afin d'en ressortir les différents éléments permettant de modéliser la force résultante et le moment pouvant provoquer le renversement, le glissement ou le pivot d'un véhicule type, soit un camion semi-remorque de 53 pieds de type fourgon. Le chapitre 2 de ce rapport constitue cette synthèse. L'analyse qui s'en suit présente les éléments permettant de modéliser les forces et moments provoquant le renversement, le glissement et le pivot.

### 3.2 Rappel de quelques éléments importants

Parmi les éléments les plus importants ressortant de cette analyse il faut noter le rôle joué par l'ensemble des forces et moments aérodynamiques ainsi que le rôle joué par la vitesse du véhicule. La modélisation aérodynamique du premier type constitue l'approche la plus adaptée à l'étude de la problématique du renversement, du glissement et du pivot. Cette modélisation fait intervenir les coefficients aérodynamiques qui, pour une gamme de nombre de Reynolds élevée (c'est le cas en aérodynamique des véhicules), sont des fonctions de l'angle  $\psi$  seulement. On a ainsi pu écrire dans le chapitre 2 les équations (2.2), (2.3), (2.4) et (2.5) que l'on réécrit ici en guise de rappel:

$$C_S = \frac{S}{1/2 \rho V^2 A} \quad , \quad C_L = \frac{L}{1/2 \rho V^2 A} \quad , \quad C_D = \frac{D}{1/2 \rho V^2 A}$$

$$C_Y = \frac{Y}{1/2 \rho V^2 A q} \quad , \quad C_P = \frac{P}{1/2 \rho V^2 A q} \quad , \quad C_R = \frac{R}{1/2 \rho V^2 A q}$$

$$V = \sqrt{(U + W \cos \beta)^2 + (W \sin \beta)^2} \quad \text{et} \quad \psi = \arctan \left( \frac{W \sin \beta}{U + W \cos \beta} \right)$$

### Renversement

Le modèle de Baker modifié pour l'adapter au cas du régime permanent est conseillé. Lorsque  $C_{V_2} + C_{V_4} = 0$  (les roues 2 et 4 étant situées au vent) le modèle se réduit à la solution de l'équation (2.30).

$$V_{renv.}^2 = \frac{2Mg p}{\rho A [(C_{R_{C.G.}} + C_S) q + C_L p]}$$

Pour une vitesse de vent  $W$  donnée et un angle du vent  $\beta$  donné, on obtient  $V(U)$  et  $\psi(U)$ , ce qui résulte en des fonctions  $C_{R_{C.G.}}(U)$ ,  $C_S(U)$  et  $C_L(U)$ . La solution de l'équation (2.30) pour  $U$  permet alors de déterminer la vitesse  $U_{renv.}$  provoquant le renversement. On peut aussi fixer des valeurs de  $U$  et de  $\beta$  afin de déterminer  $W_{renv.}$ , la vitesse du vent de renversement.

Cette modélisation indique que pour des angles de vent  $\beta < 90^\circ$ , la vitesse du vent provoquant le renversement diminue lorsque la vitesse du véhicule augmente. En d'autres termes, pour une vitesse du vent donnée se situant au voisinage de  $W_{renv.}$ , le seuil de renversement, une diminution de la vitesse  $U$  du véhicule ramènera ce dernier dans une zone sécuritaire, c'est-à-dire dans une plage de vitesse du véhicule permettant d'obtenir une réduction du risque de renversement. Il apparait donc clairement que la vitesse du véhicule affecte le risque de renversement.

### Glissement

Selon le modèle de Baker, il y a risque d'accident dès que la valeur de  $y \geq 0.5$  m pour  $t \leq 0.5$  seconde. Le glissement  $y$  est défini par l'expression (2.35) que l'on réécrit ici:

$$y = \frac{S}{M} \left( \frac{M U}{m (L - M g)} \right)^2 \left[ e^{m (L - M g) t / (M U)} - \frac{m (L - M g)}{M U} t - 1 \right]$$

Le modèle de Baker s'applique davantage aux chaussées glissantes, car il considère qu'il y a glissement dès qu'une force latérale est appliquée. Un autre modèle, plus cohérent avec le fait que le véhicule ne devrait pas glisser sous un certain seuil de force

latérale, a été proposé en introduisant un coefficient de frottement statique dans la relation (2.36).

$$f_i = -\sqrt{S^2 + (D + \mathcal{R})^2} - \mu V_i$$

D'après la référence [42], si la valeur de  $f_i$  est négative, le frottement est insuffisant et il y a alors possibilité de glissement pour la roue  $i$  en question.

### Pivot

Selon le modèle de Baker, il y a risque d'accident dès que la valeur de  $\phi \geq 0.2$  rad pour  $t \leq 0.5$  seconde. L'angle  $\phi$  est défini par l'expression (2.41) que l'on réécrit ici:

$$\phi = \frac{1}{2I} \left\{ \left[ S q \left( n + \frac{k}{2} + \frac{P - D}{L - Mg} \right) + Y + \left( n + \frac{k}{2} \right) R_{C.G.} \right] t^2 - 2S q \left( \frac{MU}{m(L - Mg)} \right)^2 \left[ e^{m(L - Mg)t/(MU)} - \frac{m(L - Mg)}{MU} t - 1 \right] \right\}$$

## 3.3 Recommandations

À l'issue de l'analyse effectuée, quatre recommandations sont formulées:

**1-** Il est recommandé de poursuivre en priorité l'étude du renversement, car il s'agit du phénomène présentant la plus grande occurrence lorsque l'on analyse les trois problématiques d'accidents – renversement, glissement, pivot – dans le monde réel. Dans ce cadre, tel que stipulé à la section 3.2, il est recommandé d'utiliser le modèle de Baker adapté au cas du régime permanent.

Pour appliquer ce modèle de renversement aux camions semi-remorques de 53', il est impératif de connaître l'évolution des coefficients de forces et de moments aérodynamiques propres à ce type de véhicule en fonction de l'angle de lacet  $\psi$ . À la connaissance de l'auteur du présent rapport, à l'heure actuelle il n'existe aucune base de données de ce type concernant un camion semi-remorque de 53'. Il est donc fortement recommandé d'en constituer une. La première étape de cette opération consisterait à effectuer une campagne d'essais en soufflerie sur modèle réduit (échelle 1:10 par exemple). Cette campagne devrait être conduite dans une soufflerie de section d'essai relativement grande et munie d'une balance aérodynamique comportant un plateau tournant. Ceci permettrait d'obtenir les trois forces et les trois moments aérodynamiques en fonction de l'angle de lacet  $\psi$  du véhicule dans la gamme  $0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ . Par exemple, une soufflerie

telle que celle du CNRC à Ottawa (section de 2 m × 3 m) constituerait une installation adéquate.

En deuxième étape de cette recommandation, il serait pertinent d'effectuer une série d'essais sur véhicule en grandeur réelle dans une soufflerie de grande dimension (la soufflerie de 9 m du CNRC à Ottawa constitue un exemple de soufflerie adéquate pour cette tâche). Pour un tel véhicule en vraie grandeur, aucune soufflerie dans le monde ne permet d'explorer la gamme d'angle  $0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ ; cependant, l'étude d'une gamme d'angle réduite telle que  $0^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$  serait très pertinente. Cette campagne d'essais permettrait de confirmer la justesse des essais effectués sur modèle réduit.

En dernière étape de cette recommandation, il serait également pertinent d'effectuer des simulations numériques de type *CFD*. La dynamique des fluides numérique constitue une approche intéressante permettant d'évaluer les forces et moments aérodynamiques sur le véhicule avec une précision acceptable (ceci dépend évidemment des modèles de turbulence utilisés). En comparant les résultats *CFD* aux résultats expérimentaux obtenus lors des campagnes d'essais en soufflerie, il sera possible d'établir le potentiel d'extrapolation de cette approche vers l'étude d'autres types de véhicules.

**2-** Il est aussi recommandé d'étudier les phénomènes de glissement et de pivot, en orientant toutefois l'étude vers la problématique des chaussées glissantes. Pour réaliser cette étude, il est non seulement nécessaire de connaître le comportement aérodynamique du véhicule, mais aussi d'étudier la variation des coefficients de frottement statiques et dynamiques de différents pneus soumis à différentes conditions (chaussée glacée, enneigée, humide, chaussée en présence de flaques d'eau, etc.). Ceci étant fait, il sera alors possible de modifier le modèle de Baker pour permettre une étude plus rigoureuse de cette problématique.

**3-** Une autre recommandation concerne la simulation de la dynamique du véhicule. Il serait en effet pertinent de considérer une modélisation plus complète de la dynamique du véhicule au lieu de se limiter à un modèle de véhicule rigide tel que proposé par Baker. Ceci semble encore plus approprié lorsque la problématique du pivot est étudiée et lorsque l'on désire ajouter au modèle une réaction du chauffeur.

**4-** En dernier lieu, il est recommandé de s'appuyer sur la réalisation des trois recommandations précédentes pour réaliser un système d'alarme automatisé visant à prévenir les accidents causés par la présence de vents latéraux. Ce système devra intégrer des stations de mesure des conditions de vent (intensité et direction du vent, durée des bourrasques,

etc.), des systèmes d'évaluation de l'état de la chaussée (glacée, enneigée, humide, etc.) ainsi qu'un outil d'analyse des conditions critiques relatives au camion semi-remorque de 53'. Le système devra enfin avoir la capacité de générer des messages clairs et précis permettant aux chauffeurs de réduire leur vitesse et d'adopter un comportement sécuritaire.

Toutes ces recommandations ont été formulées dans le cadre de l'étude de la problématique de perte de contrôle des véhicules lourds – notamment les camions semi-remorques de 53' – causée par la présence de vents latéraux. Il faut mentionner en terminant que les mêmes recommandations peuvent évidemment s'appliquer à l'étude d'autres types de véhicules (camions citernes, autobus, etc.).



# Bibliographie

- [1] ACKERMANN, J. ODENTHAL, D. 1998: Robust Steering Control for Active Rollover Avoidance of Vehicles with Elevated Center of Gravity. *Proc. International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety*, Amiens, France, juillet 1998, pp. 118-123.
- [2] AHMED, S.R.; GAWTHORPE, R.G.; MACKRODT, P.-A. 1985: Aerodynamics of Road and Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics* **14**, pp. 319-392.
- [3] ALAM, F.; WATKINS, S. 2007: Effects of Crosswinds on Double Stacked Container Wagons. *16th Australian Fluid Mechanics Conference*, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, décembre 2007, pp. 758-761.
- [4] BAKER, C.J.; CHELI, F.; ORELLANO, A.; PARADOT, N.; PROPP, C.; ROCCHI, D. 2009: Crosswind Effect on Road and Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics* **47**, No. 8, pp. 983-1022.
- [5] BAKER, C.J. 1986: A Simplified Analysis of Various Types of Wind-Induced Road Vehicle Accidents. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **22**, No. 1, pp. 69-85.
- [6] BAKER, C.J. 1987: Measures to Control Vehicle Movement at Exposed Sites During Windy Periods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **25**, No. 2, pp. 151-161.
- [7] BAKER, C.J. 1988: High Sided Articulated Road Vehicles in Strong Crosswinds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **31**, No. 1, pp. 67-85.
- [8] BAKER, C.J. 1991: Ground Vehicles in High Cross Winds Part I: Steady Aerodynamic Forces. *Journal of Fluids and Structures* **5**, No. 1, pp. 69-90.
- [9] BAKER, C.J. 1991: Ground Vehicles in High Cross Winds Part II: Unsteady Aerodynamic Forces. *Journal of Fluids and Structures* **5**, No. 1, pp. 91-111.

- [10] BAKER, C.J. 1991: Ground Vehicles in High Cross Winds Part III: The Interaction of Aerodynamic Forces and the Vehicle System. *Journal of Fluids and Structures* **5**, No. 2, pp. 221-241.
- [11] BAKER, C.J. 1994: The Quantification of Accident Risk for Road Vehicles in Cross Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **52**, pp. 93-107.
- [12] BAKER, C.J.; REYNOLDS, S. 1992: Wind Induced Accidents of Road Vehicles. *Accid. Anal. & Prev.* **24**, No. 6, pp. 559-575.
- [13] BALSOM, M.; WILSON, F.R.; HILDEBRAND, E. 2006: Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1969**, pp. 115-120.
- [14] BLYTHE, W. 2008: Application of HVE SIMON to the Analysis of Lateral Wind Loadings on High-sided Vehicles. *HVE White papers*. Article HVE-WP2008-1 publié sur le site internet [www.edccorp.com](http://www.edccorp.com) de la compagnie Engineering Dynamics Corporation, pp. 1-16.
- [15] CHELI, F.; BELFORTE, P.; MELZI, S.; SABBIONI, E.; TOMASINI, G. 2006: Numerical-Experimental Approach for Evaluating Cross-Wind Aerodynamic Effects on Heavy Vehicles. *Vehicle System Dynamics* **44**, Sup. 1, pp. 791-804.
- [16] COLEMAN, S.A.; BAKER, C.J. 1990: High-Sided Road Vehicles in Cross Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **36**, Part 2, pp. 1383-1392.
- [17] COLEMAN, S.A.; BAKER, C.J. 1994: An Experimental Study of the Aerodynamic Behaviour of High Sided Lorries in Cross Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **53**, No. 3, pp. 401-429.
- [18] COOPER, K.R. 1993: Bluff-Body Aerodynamics as Applied to Vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **49**, No. 1-3, pp. 1-22.
- [19] COOPER, K.R.; WATKINS, S. 2007: The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles Part One: A Review of the On-Road Turbulent Wind Environment. *SAE technical papers series 2007-01-1236*.
- [20] COOPER, K.R.; CAMPBELL, W.F. 1981: An Examination of the Effects of Wind Turbulence on the Aerodynamic Drag of Vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **9**, No. 1-2, pp. 167-180.

- [21] DAI, Q.; YOUNG, R.K. 2010: High Wind Warning System to Prevent Overturning Truck Crashes in Wyoming. *Transportation Research Board 2010 Annual Meeting*, Washington, D.C., janvier 2010.
- [22] DELAUNAY, D.; BAKER, C.J.; CHELI, F.; MORVAN, H.; BERGER, L.; CASAZZA, M.; GOMEZ, C.; LE CLEAC'H, C.; SAFFELL, R.; GRÉGOIRE, R.; VIÑUALES, A. 2006: Development of Wind Alarm Systems for Road and Rail Vehicles: Presentation of the WEATHER project. *Proceedings of the Standing International Road Weather Commission (SIRWEC)*, Turin, Italie, mars 2006.
- [23] EDWARDS, J.B. 1996: Weather-Related Road Accidents in England and Wales: A Spatial Analysis. *Journal of Transport Geography* **4**, No. 3, pp. 201-212.
- [24] EDWARDS, J.B. 1998: The Relationship Between Road Accident Severity and Recorded Weather. *Journal of Safety Research* **29**, No. 4, pp. 249-262.
- [25] FUJII, T.; MAEDA, T.; ISHIDA, H.; IMAI, T.; TANEMOTO, K.; SUZUKI, M. 1999: Wind-Induced Accidents of Trains/Vehicles and their Measures in Japan. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute (RTRI)* **40**, No. 1, pp. 50-55.
- [26] GARCIA, L.O.; WILSON, F.R.; INNES, D. 2003: Heavy Truck Dynamic Rollover: Effect of Load Distribution, Cargo Type and Road Design Characteristics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1851**, pp. 25-31.
- [27] GOODWIN, L. 2003: Best Practices for Road Weather Management v.2.0. *Report FHWA-OP-03-081 (US Department of Transportation, Federal Highway Administration)*.
- [28] GUO, W.H.; XU, Y.L. 2006: Safety Analysis of Moving Road Vehicles on a Long Bridge under Crosswind. *Journal of Engineering Mechanics* **132**, No. 4, pp. 438-446.
- [29] IMAI, T.; FUJII, T.; TANEMOTO, K.; SHIMAMURA, T.; MAEDA, T.; ISHIDA, H.; HIBINO, Y. 2002: New Train Regulation Method Based on Wind Direction and Velocity of Natural Wind against Strong Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **90**, No. 12-15, pp. 1601-1610.
- [30] JUHLIN, M.; ERICKSSON, P. 2004: A Vehicle Parameter Study on Crosswind Sensitivity of Buses. *SAE technical papers series 2004-01-2612*.
- [31] KLASSON, J. 2002: A Generalised Crosswind Model for Vehicle Simulation Purposes. *Vehicle System Dynamics* **37**, Sup., pp. 350-359.

- [32] KYTE, M.; SHONNON, P.; KITCHENER, F. 2000: Idaho Storm Warning System Operational Test. *Report N00-04 (University of Idaho National Institute for Advanced Transport Technology (NIATT))*.
- [33] LEUSCHEN, J.; COOPER, K.R. 2006: Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. *SAE technical papers series 2006-01-3456*.
- [34] MAGNUS, J. 2004: Directional Stability of Buses under Influence of Crosswind Gusts. *Vehicle System Dynamics* **41**, Sup., pp. 93-102.
- [35] MANJUNATHAN, K.; STRONG, C. 2006: Comparative Evaluation of Automated Wind Warning Systems. *Showcase Evaluation #15 (Western transportation institute)*.
- [36] MANTRIOTA, G. 2005: A Theoretical Study on the Stability of Car-Caravan Systems under Influence of Crosswind. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* **1**, No. 1/2/3, pp. 168-191.
- [37] MCCARTHY, J. 2007: Evaluation of Intelligent Transportation System Alternatives for Reducing the Risks of Truck Rollover Crashes Due to High Winds. *Final report FHWA-WY-07/01F (US Department of Transportation, Federal Highway Administration)*.
- [38] PETZALL, J.; TORLUND, P.A.; FALKMER, T.; ALBERTSSON, P.; BJÖRNSTIG, U. 2008: Aerodynamic Design of High-Sided Coaches to Reduce Crosswind Sensitivity, Based on Wind Tunnel Tests. *International Journal of Crashworthiness* **13**, No. 2, pp. 185-194.
- [39] PISANO, P.; NELSON, R.; BLACKBURN, R.; BRANDAU, S.; CLONCH, D.; DOHERTY, J.; JONES, D.; KAIN, C.; LARIVIERE, P.; MANDT, G.; MCCARTHY, J.; NIXON, W.; ROOSEVELT, D. 2003: Intelligent Transportation Systems and Winter Operations in Japan. *Report FHWA-PL-03-016 (U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration)*.
- [40] SAIIDI, M.; MARAGAKIS, E. 1995: Identification of Trigger Wind Velocities to Cause Vehicle Instability. *Agreement No P206-95-201 (Nevada department of transportation)*.
- [41] SIGBJÖRNSSON, R.; SNAEBJÖRNSSON, J.TH. 1998: Probabilistic Assessment of Wind Related Accidents of Road Vehicles: A Reliability Approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **74-76**, pp. 1079-1090.

- [42] SNAEBJÖRNSSON, J.TH.; BAKER, C.J., SIGBJÖRNSSON, R. 2007: Probabilistic Assessment of Road Vehicle Safety in Windy Environments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **95**, No. 9-11, pp. 1445-1462.
- [43] STERLING, M.; QUINN, A.D.; HARGREAVES, D.M.; CHELI, F.; SABBIONI, E.; TOMASINI, G.; DELAUNAY, D.; BAKER, C.J.; MORVAN, H. 2010: A Comparison of Different Methods to Evaluate the Wind Induced Forces on a High Sided Lorry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **98**, No. 1, pp. 10-20.
- [44] SUMMERFIELD, S.; KOSIOR, J. 2001: Simaultion of Heavy Trucks in Inclement Weather. *University of Manitoba Transport Institute*.
- [45] XU, Y.L.; GUO, W.H. 2003: Dynamic Analysis of Coupled Road Vehicle and Cable-Stayed Bridge Systems under Turbulent Wind. *Engineering Structures* **25**, No. 4, pp. 473-486.
- [46] YOUNG, R.K.; LIESMAN, J. 2007: Estimating the Relationship between Measured Wind Speed and Overturning Truck Crashes Using a Binary Logit Model. *Accident analysis and prevention* **39**, No.3, pp. 574-580.
- [47] YOUNG, R.K.; LIESMAN, J. 2007: Intelligent Transportation Systems for Operation of Roadway Segments in High-Wind Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2000**, pp. 1-7.