

Aérodynamique d'une voiture transportant un vélo muni d'une housse de protection

Mémoire présenté par
Cyril DE WALQUE

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur civil mécanicien

Promoteur(s)
Hervé JEANMART, Matthieu DUPONCHEEL

Lecteur(s)
Vincent LEGAT, Bruno DEHEZ

Année académique 2016-2017

Remerciements

Ce travail conclut mes études d'ingénierie civile, et il me paraît important de remercier les personnes qui ont permis son aboutissement.

Tout d'abord je tiens à remercier M. Jeanmart (TFL, IMMC, EPL, UCL), qui m'a aidé à mener à bien ce projet depuis le début de l'année. Ses conseils et ses remarques sur mon travail se sont toujours révélés pertinents, ce qui m'a permis de ne pas avancer à l'aveugle dans mon mémoire.

Ensuite je voudrais remercier M. Duponcheel (TFL, IMMC, EPL, UCL), pour le temps qu'il m'a accordé tout au long de l'année afin de répondre à mes questions techniques sur les simulations numériques. Son expérience en la matière, ainsi que ses conseils m'ont permis un gain de temps considérable.

Merci aussi à M. Floymont et M. Theate (SnakeSkin), qui ont proposé ce sujet de mémoire à mes promoteurs.

Les moyens de calcul ont été fournis par le Consortium des Équipements de Calcul Intensif (CÉCI), financé par le Fonds de la Recherche Scientifique de Belgique (F.R.S.-FNRS) sous la convention n°2.5020.11. Je tiens donc à les remercier pour m'avoir accordé leur confiance.

Merci aussi à M. Berger (TFL, IMMC, EPL, UCL) pour sa gestion des licences Fluent sur les clusters du CÉCI. Il s'est en effet assuré que chacun puisse avoir à sa disposition le nombre de licences désiré, ce qui n'était pas chose aisée.

Enfin, un merci tout particulier à ma famille pour son soutien et son travail de relecture.

Table des matières

Introduction	1
1 Outils	3
1.1 ANSYS Fluent	3
1.1.1 Équations de Navier-Stokes	3
1.1.2 Turbulence	4
1.1.3 Modèle $k - \omega$ standard	5
2 Étude de l'écoulement en 2D	7
2.1 Modélisation des corps	7
2.2 Domaine de simulation et maillage	7
2.3 Simulation	10
2.4 Résultats	11
2.4.1 Influence de la position du porte-vélo	11
2.4.2 Influence de la vitesse de la voiture	17
2.5 Convergence spatiale	19
2.6 Analyse des couches limites	20
2.7 Investigation de la traînée totale en 2D	22
3 Étude de l'écoulement en 3D	26
3.1 Modélisation des corps	26
3.2 Domaine de simulation et maillage	27
3.3 Simulation	28
3.4 Résultats	29
3.4.1 Comparaison	32
3.5 Analyse des couches limites	35
3.6 Convergence spatiale	36
4 Comparaison entre 2D et 3D	37
Conclusion	40
Bibliographie	41

Introduction

Le transport de vélos par des particuliers sur de longues distances se fait actuellement principalement en voiture. De nombreux systèmes permettant d'attacher des vélos à l'extérieur d'un véhicule existent sur le marché, ainsi que des housses de protection pour préserver ceux-ci des intempéries.

La société SnakeSkin, fondée par M. Floymont et M. Théate, prévoit de concevoir et produire des housses de protection de vélo haut de gamme pour leur transport en voiture. Ayant déjà un prototype (figure 1), ils sont intéressés à l'étude du transport d'un vélo de course muni d'une de leurs bâches, attaché à un porte-vélo venant se fixer sur le dispositif d'attelage de la voiture. Leur but est de pouvoir quantifier les efforts que subit le porte-vélo, ainsi que d'avoir une estimation de la traînée additionnelle que provoque le transport de ce vélo bâché.

Ce mémoire vise donc à calculer les forces et moments en jeu, et à analyser l'influence qu'ont plusieurs paramètres choisis sur ces efforts.

Premièrement la distance entre le vélo et la voiture. Les porte-vélos sur le marché ont souvent plusieurs positions disponibles pour fixer le vélo. Quel impact la distance entre la voiture et le vélo a-t-elle ? Trois positions sur le porte-vélo ont été mesurées sur un modèle existant et sont étudiées.

Ensuite la vitesse de la voiture : Comment la diminution de celle-ci impacte-t-elle les forces subies par le vélo et la voiture ?

Enfin à quel point le modèle de la voiture influence-t-il les résultats ? L'étude s'est penchée sur trois types de véhicules différents :

- Un SUV¹ (Audi SQ5 2013).
- Une citadine (VW Golf 2016)
- Une berline (Toyota Corolla 2016)

Afin d'étudier l'écoulement autour des corps que sont la voiture et la housse de protection, des simulations en deux dimensions ont tout d'abord été réalisées avec le logiciel ANSYS Fluent. Peu chères en temps de calcul, elles permettent une première étude des efforts en jeu par unité de profondeur.

Des simulations en trois dimensions ont ensuite été produites avec le même logiciel. Celles-ci sont beaucoup plus coûteuses mais elles produisent des résultats beaucoup plus réalistes.

1. Sport Utility Vehicle

**SNAKE
SKIN**
—
YOUR BIKE PROTECTOR



FIGURE 1 – Prototype de housse de protection SnakeSkin

Chapitre 1

Outils

Tous les calculs numériques de ce mémoire ont été réalisés via les outils proposés dans "ANSYS Workbench 2016" pour la simulation de fluides. Les programmes utilisés sont :

- DesignModeler pour définir la géométrie du domaine de simulation
- ANSYS Meshing pour mailler le domaine par éléments finis
- ANSYS Fluent pour effectuer le calcul
- CFX-Post pour la visualisation des résultats (post-processing)

1.1 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent est un logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics), applicable à de nombreux problèmes différents de la mécanique des fluides.

Il permet de résoudre sur un maillage l'évolution temporelle de l'écoulement du fluide étudié.

1.1.1 Équations de Navier-Stokes

Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement de Navier-Stokes s'écrivent en toute généralité (l'équation de la température n'intervient pas dans cette étude) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}$$

ρ étant la densité du fluide, \mathbf{u} le vecteur la vitesse, p la pression, $\boldsymbol{\sigma}$ le tenseur des contraintes déviatoires et \mathbf{f} les forces extérieures.

Ces équations peuvent être simplifiées par différentes hypothèses :

- Écoulement incompressible ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} = 0$)
- L'air est considéré comme un fluide newtonien
- Les effets de la gravité ou d'autres forces externes sur l'écoulement sont négligeables ($\mathbf{f} = \mathbf{0}$)
- La viscosité cinématique ν est constante

Cela donne les équations de Navier-Stokes incompressibles, écrites sous la forme convective, avec $P = \frac{p}{\rho}$ et ν la viscosité cinématique :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

Cela fait 4 équations (une pour la conservation de la masse et trois pour la quantité de mouvement) pour 4 inconnues (P et $\mathbf{u} = (u, v, w)$). Le problème est donc solvable directement. Un programme intégrant directement ces équations fait de la "DNS" (Direct Numerical Simulation).

1.1.2 Turbulence

Faire de la DNS demande de résoudre toutes les échelles de l'écoulement, jusqu'à l'échelle de Kolmogorov (l'échelle à laquelle les plus petits vortex dissipent leur énergie cinétique en chaleur). Au vu de la taille du domaine simulé et de la puissance de calcul disponible, les maillages générés sont trop grossiers pour résoudre celles-ci.

Fluent résout donc l'écoulement avec les équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Celles-ci permettent de résoudre l'écoulement sur de plus grosses mailles en modélisant la turbulence qui n'est pas capturée par le maillage.

L'idée est de moyenner temporellement les équations de Navier-Stokes sur un intervalle de temps T (proche de l'échelle temporelle des turbulences), puis de remplacer chaque variable par sa moyenne et sa partie variatoire $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$, $\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$ et $\bar{P} = \bar{P}(\mathbf{x}, t)$.

$$\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) dt$$

Cela donne les équations RANS instationnaires :

$$\nabla \bar{\mathbf{u}} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \cdot \bar{\mathbf{u}} = -\nabla \bar{P} + \nu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{R}(\mathbf{u}', \mathbf{u}')$$

Avec, si $\mathbf{u} = (u, v, w)$

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}', \mathbf{u}') = \nabla \cdot \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

L'argument principal [1] de la présence du terme $\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t}$ est l'existence d'échelles de temps différentes dans l'écoulement.

La première échelle de temps (T_1) rend compte de la turbulence et la deuxième (T_2), beaucoup plus grande, des mouvements macroscopiques de l'écoulement.

La moyenne temporelle de l'écoulement se fait donc sur une échelle temporelle comprise entre ces deux-ci ($T_1 \ll T \ll T_2$). Les équations agissent donc comme un filtre passe-bas de l'écoulement réel, comme le montre la figure 1.1.

En pratique, les écoulements ont un spectre de fréquence très large, il est donc très difficile de séparer distinctement deux échelles de temps. Le temps T est donc un temps virtuel, qui n'est pas contrôlable, ce qui peut avoir un effet sur la solution.

Ces équations ont quand même été utilisées car elles permettent un maillage bien plus grossier que d'autres méthodes plus précises (comme les LES par exemple), et donc un gain de temps de calcul considérable pour les nombreuses simulations à effectuer.

Réécrites sous forme indicielle les équations deviennent donc :

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j}$$

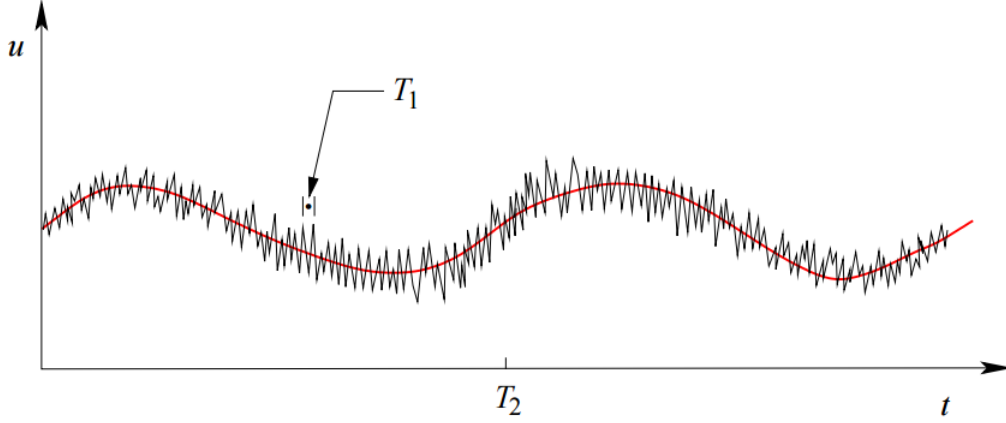


FIGURE 1.1 – Représentation des différentes échelles de temps d'un écoulement

Par cette démarche de moyennisation, tous les effets de la turbulence sont repris dans le terme $\mathbf{R}(\mathbf{u}', \mathbf{u}') = \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j}$, le tenseur de contrainte de Reynolds. L'hypothèse de Boussinesq[2] est appliquée pour relier ce terme au champ de vitesse $\bar{\mathbf{u}}$, à une viscosité turbulente μ_t et à l'énergie cinétique spécifique de la turbulence $k = \frac{\overline{u'^2}}{2} + \frac{\overline{v'^2}}{2} + \frac{\overline{w'^2}}{2}$.

$$\overline{u'_i u'_j} = -\frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Ce problème possède donc 4 équations pour 6 inconnues (\bar{P} , $\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$, k et μ_t). Deux équations doivent donc être ajoutées pour clore le problème.

1.1.3 Modèle $k - \omega$ standard

Plusieurs modèles existent pour clore le problème, avec chacun ses applications. Le plus connu est le modèle $k - \epsilon$. Le modèle $k - \omega$ standard a cependant été choisi car il est plus robuste pour des problèmes dépendant des couches limites, ce qui est le cas de nos simulations. Il faut cependant une résolution très fine près des murs afin que la solution soit correcte.

Le modèle $k - \omega$ (basé sur les travaux de Wilcox [3]) ajoute deux équations supplémentaires pour l'énergie cinétique de la turbulence k et son taux de dissipation spécifique $\omega [s^{-1}]$, aussi appelé la fréquence de la turbulence [2]. :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \end{aligned}$$

Avec :

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$$

Le changement temporel de l'énergie cinétique de turbulence k ($\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)$) est donc du à la convection de celle-ci ($\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)$), sa diffusion ($\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$), sa génération (G_k) et sa dissipation (Y_k).

L'hypothèse du modèle $k - \omega$ est que le taux de dissipation spécifique ω de la turbulence se comporte de manière similaire, avec le même type de termes. Les différents termes de l'équation ont été multipliés par des variables de l'écoulement choisies pour que les unités correspondent et des constantes adimensionnelles, qui sont réglées pour que les résultats soient au plus proche de la réalité.

Le terme de génération de k se calcule comme suit :

$$G_k = \mu_t S^2$$

Avec $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, et $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$ le tenseur des contraintes du fluide.

La dissipation de k , pour un écoulement incompressible, est calculée par :

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega$$

Avec $\beta^* = 0.09$ et

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \text{si } \chi_k \leq 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & \text{si } \chi_k > 0 \end{cases}$$

Où $\chi_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$

Le terme de production de ω se calcule ainsi :

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$$

Avec $\alpha = 1.0$. Le lien entre les termes de génération de k et de ω est très clair ici, le rapport $\frac{\omega}{k}$ entre les deux est juste là pour assurer la concordance des unités.

La dissipation de ω est égale à (forme très similaire à la dissipation de k aussi) :

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2$$

Avec $\beta = 0.072$, et

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega}$$

Où $\chi_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta^*\omega)^3} \right|$, avec S_{ij} défini plus tôt et $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ la vorticité de flux moyen.

Fluent résout donc les 4 équations RANS et les deux équations du modèle $k - \omega$, pour les 6 inconnues (\bar{P} , $\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$, k et ω). Le problème est donc clos.

Chapitre 2

Étude de l'écoulement en 2D

2.1 Modélisation des corps

Les dimensions exactes n'étant pas publiques, la modélisation des voitures en 2D s'est faite à partir d'images ([4], [5] et [6]) de leur profil, décalquées en respectant les mesures principales de chaque modèle données par leur constructeur. Le contour du profil des trois modèles est composé de droites, d'arcs et de splines (figure 2.1).

La plus grande partie de la bâche de vélo est fine, seule l'avant est plus élargi à cause du guidon. La housse de protection du vélo en 2D a donc été choisie comme la coupe de celle-ci au niveau de la selle.

La structure du porte-vélo a été négligée. L'impact de la géométrie de celui-ci sur les efforts calculés n'est pas assez grand pour justifier le paiement d'un maillage beaucoup plus fin autour de celui-ci. Les roues ont aussi été négligées, car leur présence en 2D impliquerait l'absence d'écoulement en dessous de la voiture.

La housse de protection est considérée dans tous les simulations comme une paroi rigide, car la prise en compte de son battement impliquerait de générer un nouveau maillage à chaque pas de temps de simulation, ce qui augmenterait énormément le temps de calcul. En effet sur un seul processeur il faut un peu plus de 2 minutes pour générer un maillage d'environ 60 000 éléments, alors qu'un pas de temps sur ce maillage est calculé toutes les 0.25 secondes.

2.2 Domaine de simulation et maillage

L'écoulement se passe à l'extérieur des voitures et du vélo. Le domaine de simulation choisi est donc un rectangle dont la voiture et le vélo ont été retirés (figure 2.2). Ceux-ci deviennent donc des frontières du domaine, où une vitesse nulle est imposée.

La hauteur du domaine, ainsi que la distance devant et derrière la voiture ont été trouvées de manière itérative afin de s'assurer qu'elles n'interfèrent pas dans le résultat final. Le domaine a donc été agrandi jusqu'à ce que les résultats (les efforts calculés sur la voiture et le porte-vélo) convergent. Cette démarche est développée dans la section 2.5.

La hauteur est de 27m (16.5 fois la hauteur du SUV) et les distances devant et derrière la voiture sont respectivement de 13.5m et 45m (2.9 et 9.7 fois la longueur du SUV).

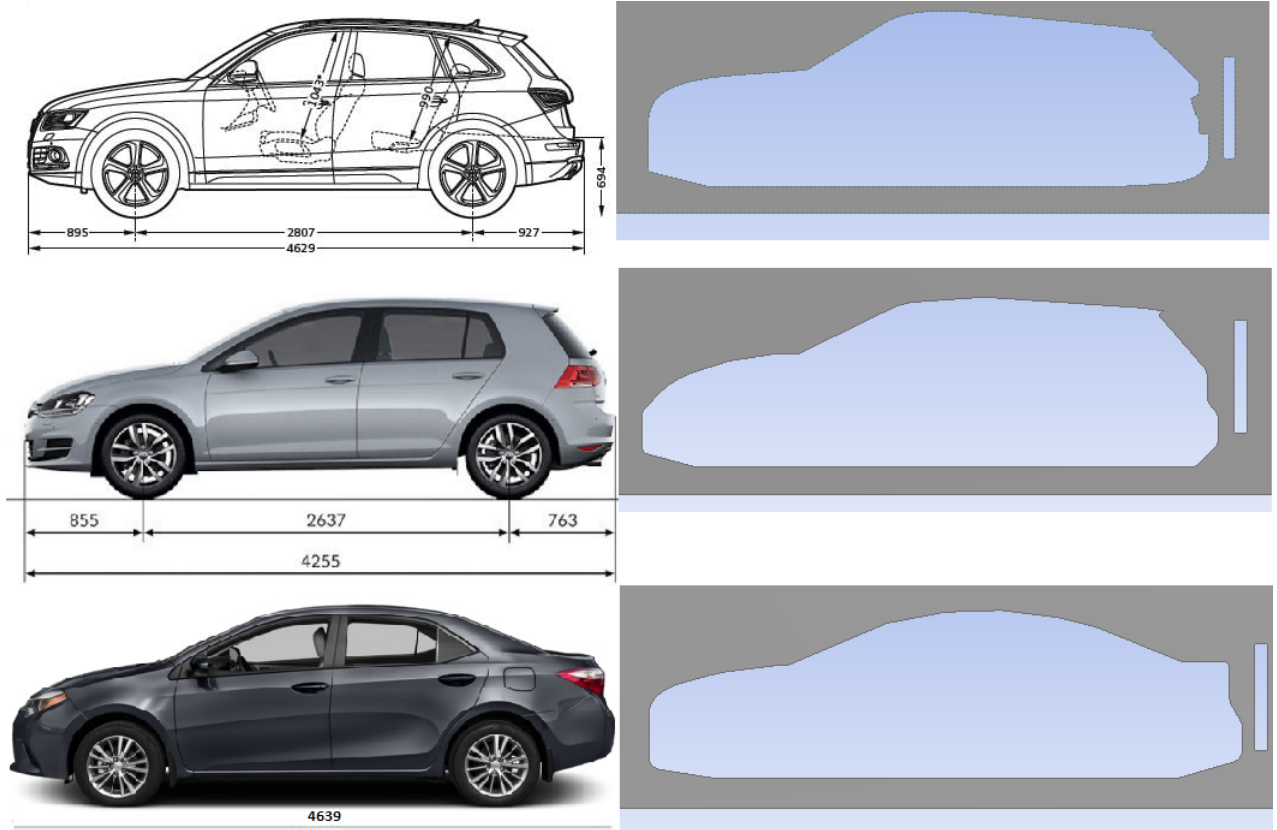


FIGURE 2.1 – Profils utilisés et géométries 2D décalquées

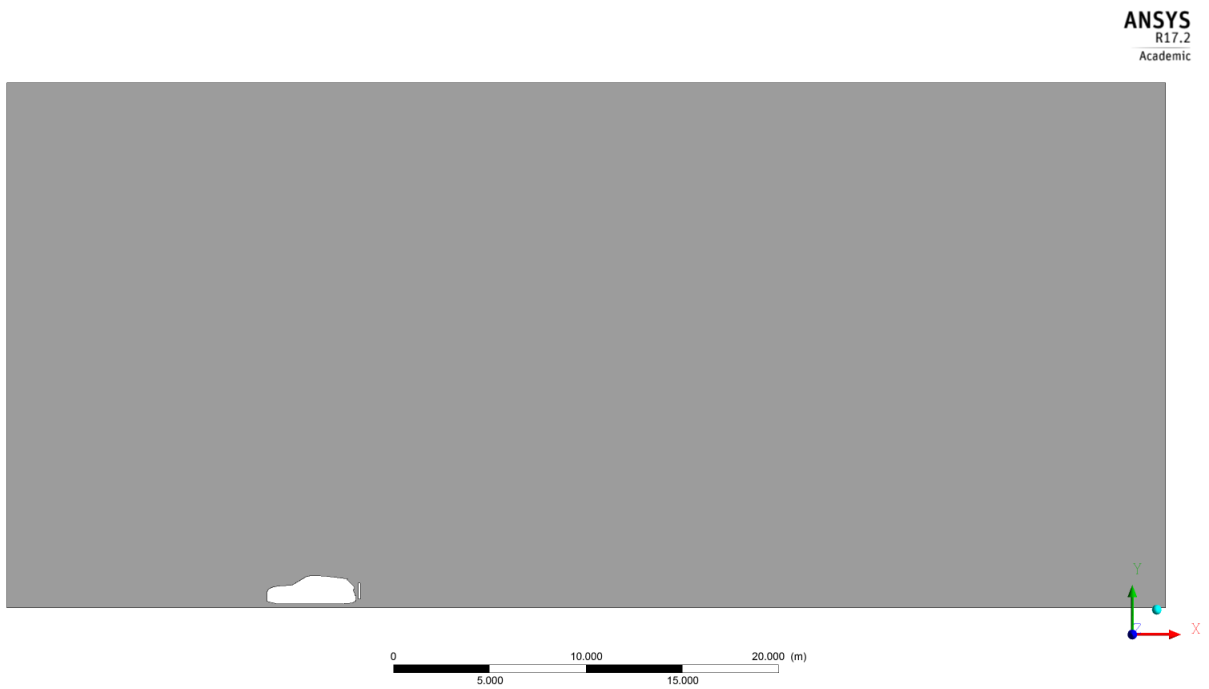


FIGURE 2.2 – Domaine de simulation 2D

Un maillage type est visible sur les figures 2.3 et 2.4. Premièrement, les éléments s'agrandissent progressivement lorsqu'ils s'éloignent de la voiture. Les variables de l'écoulement sont en effet bien plus importantes à capturer précisément près des corps, où les forces calculées agissent, que près des bords du domaine. Ensuite, une couche d'inflation est imposée près du vélo et de la voiture (figure 2.4). Des mailles régulières suivant avec précision les corps sont très importantes pour bien capturer les couches limites qui vont se développer dans cette zone. La taille des mailles sur la limite des corps, ainsi que l'agrandissement progressif de celles-ci lorsqu'elles s'éloignent de la voiture a été trouvé de manière itérative, afin que la solution converge (développé dans la section 2.5).

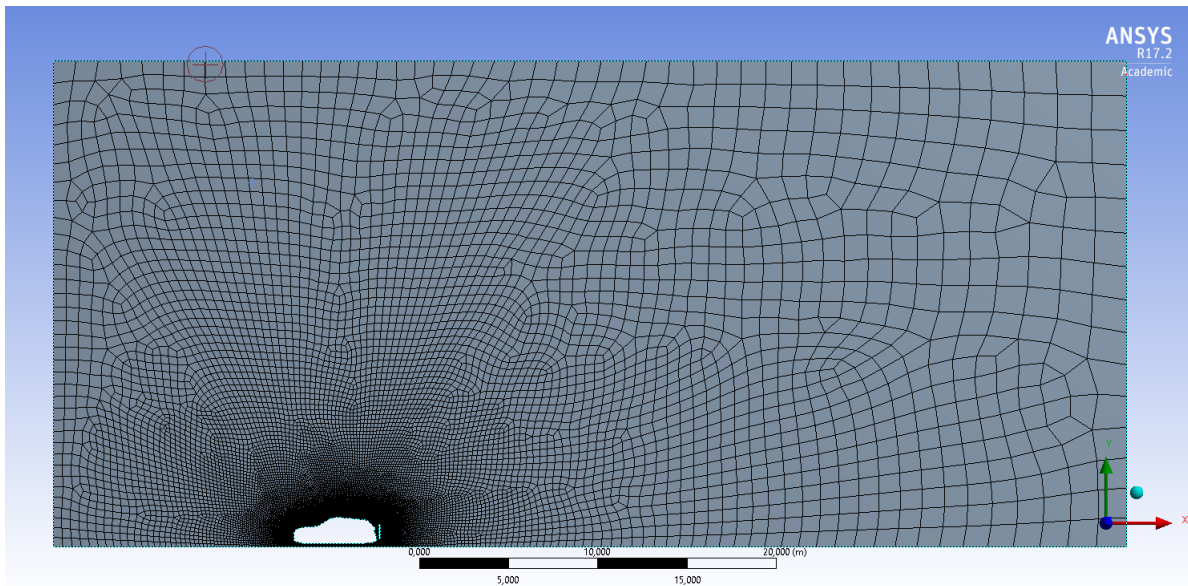


FIGURE 2.3 – Maillage 2D

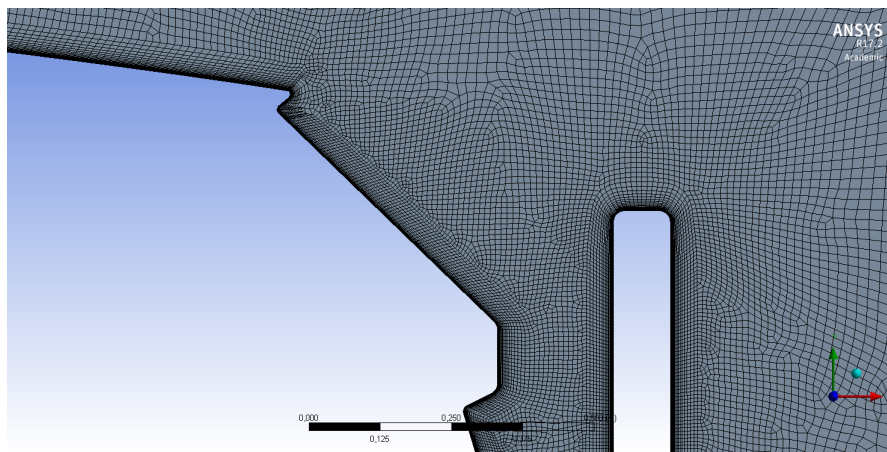


FIGURE 2.4 – Zoom sur le maillage 2D

2.3 Simulation

Le vélo bâché a été placé derrière chaque voiture à trois distances différentes, qui représentent de manière réaliste les trois positions possibles du vélo sur le porte-vélo. Elles sont respectivement à 245, 425 et 605 mm du coffre de la voiture. Les voitures sans vélo ont aussi été simulées, afin de mesurer l'ajout de traînée qu'entraîne la présence du vélo bâché.

Les simulations sont nommées selon le modèle de la voiture et la distance entre le coffre de celle-ci et la bâche du vélo.

Une simulation nommée dans les résultats "SUV 245" est donc le cas du vélo derrière le SUV, à une distance de 245mm de celui-ci.

Pour toutes les simulations, la vitesse de l'écoulement est fixée à l'entrée de l'écoulement, ainsi que sur le haut et le bas du domaine, et la pression est fixée à la sortie de l'écoulement.

L'écoulement de l'air ($\mu = 1.7894 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$, $\rho = 1.225 kg/m^3$) à la vitesse de 120km/h, pour une voiture faisant approximativement 4 m de long, fait que nos simulations ont un nombre de Reynolds de l'ordre de :

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \approx 9 \cdot 10^6$$

La valeur du pas de temps (Δt) dans les simulations instationnaires est un paramètre très important pour la justesse de la solution. Il a donc été choisi avec soin pour garantir que le nombre de courant respecte cette condition en tout point du maillage (avec Δx la largeur d'une maille) :

$$CFL = \frac{V \Delta t}{\Delta x} < 1$$

Cette condition fait que le transport de l'information portée par l'écoulement ne dépasse par la grandeur d'une maille en un pas de temps.

Il apparaît après plusieurs tests que la vitesse maximale de l'écoulement se situe près de la liaison entre le pare-brise et le toit des voitures, où elle est égale à environ (selon les voitures) 76 m/s. À cet endroit les mailles de la simulation ont une largeur d'environ 6.25 mm, ce qui fait :

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{V} < 8.5 \cdot 10^{-5}$$

Un pas de temps de $7.5 \cdot 10^{-5}$ a donc été choisi pour toutes les simulations. Chaque simulation a été initialisée avec le domaine entier ayant une même vitesse horizontale de 120 km/h. Les variables de turbulences ont initialement des valeurs calculées grâce aux relations proposées par Fluent [7].

À chaque pas de temps, les forces horizontales (traînées) s'appliquant sur la voiture et sur la bâche de vélo, la force verticale (portance) sur la bâche, ainsi que le moment de force que doit soutenir le porte-vélo si le vélo est attaché au niveau de ses roues ont été sauvegardés.

La discrétisation spatiale de la pression et de la vitesse est faite avec un schéma du second ordre, tandis que les variables de la turbulence k et ω le sont avec un schéma d'ordre un. L'intégration temporelle se fait avec un schéma implicite d'ordre un, qui a la propriété d'être inconditionnellement stable au regard du pas de temps.

Comme il est implicite, le solveur itère donc à chaque pas de temps un certain nombre de fois, jusqu'à résoudre cette équation implicite, et donc converger vers la solution.

2.4 Résultats

2.4.1 Influence de la position du porte-vélo

SUV

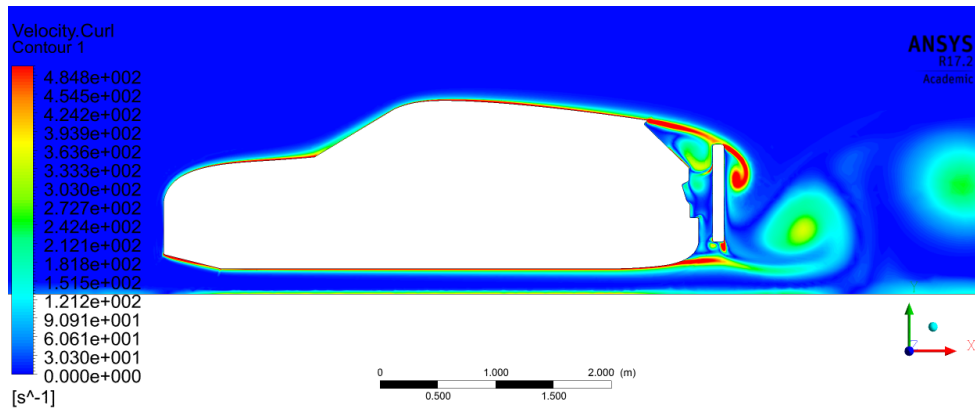


FIGURE 2.5 – Contours de vorticité pour $t = 3$ s

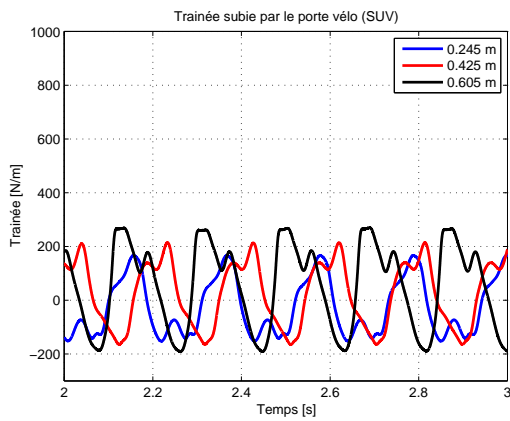


FIGURE 2.6 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière le SUV

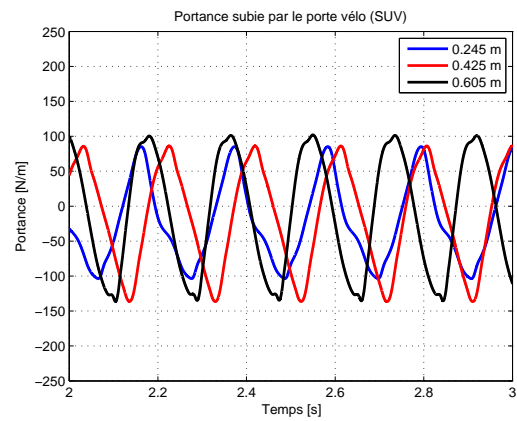


FIGURE 2.7 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière le SUV

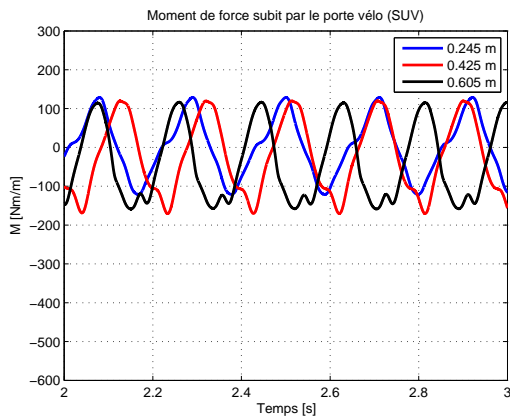


FIGURE 2.8 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière le SUV

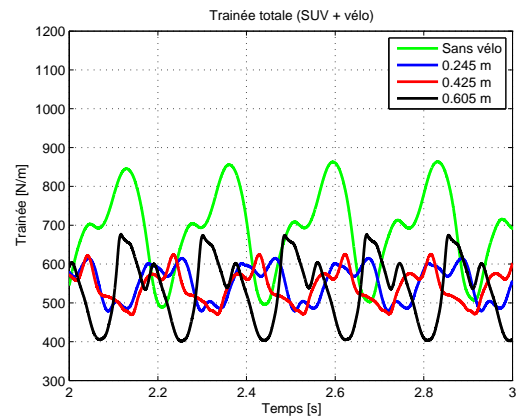


FIGURE 2.9 – Trainée totale du SUV

Citadine

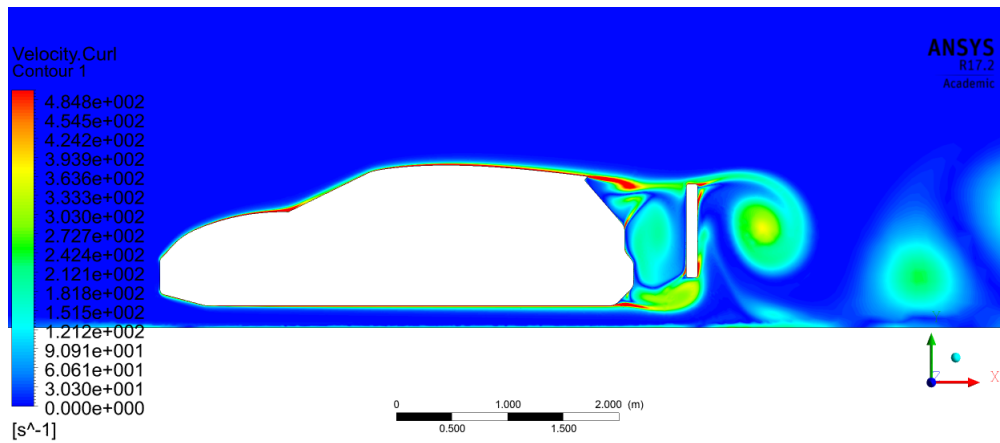


FIGURE 2.10 – Contours de vorticité pour $t = 3$ s

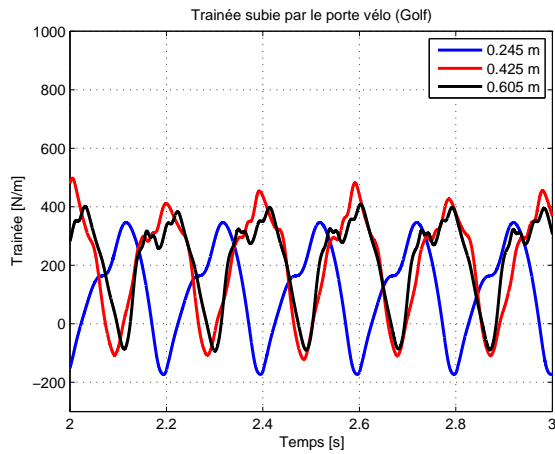


FIGURE 2.11 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière la citadine

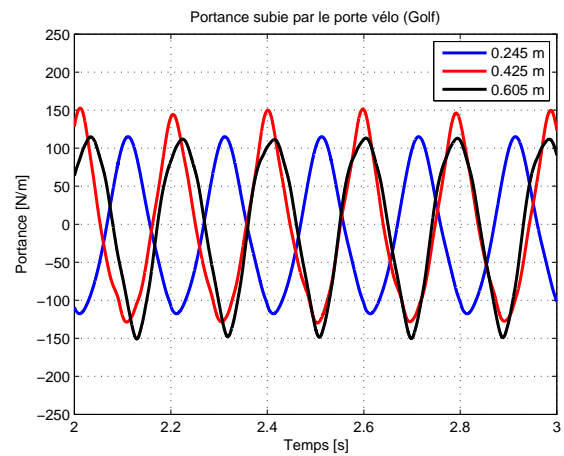


FIGURE 2.12 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière la citadine

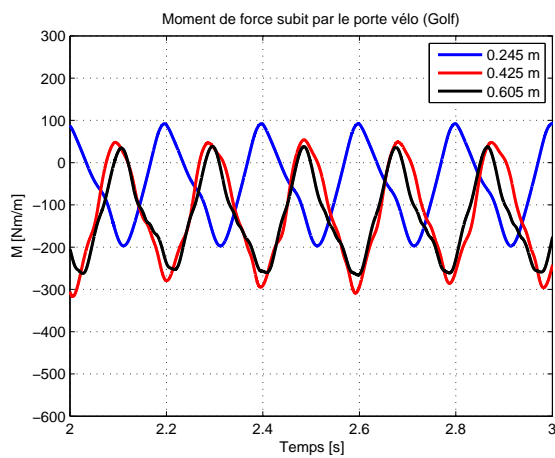


FIGURE 2.13 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière la citadine

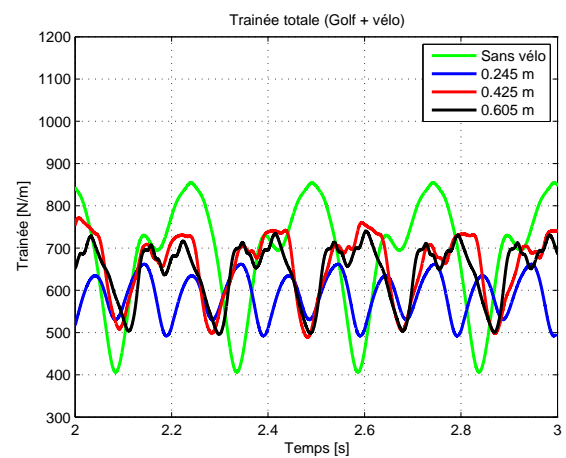


FIGURE 2.14 – Trainée totale de la citadine

Berline

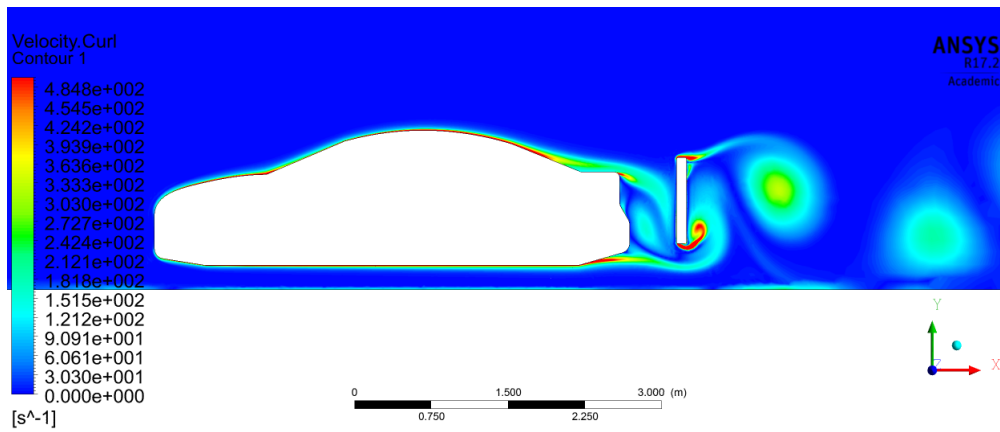


FIGURE 2.15 – Contours de vorticité pour $t = 3$ s

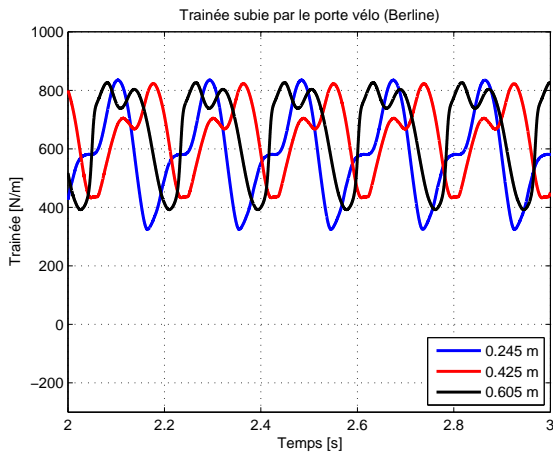


FIGURE 2.16 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière la berline

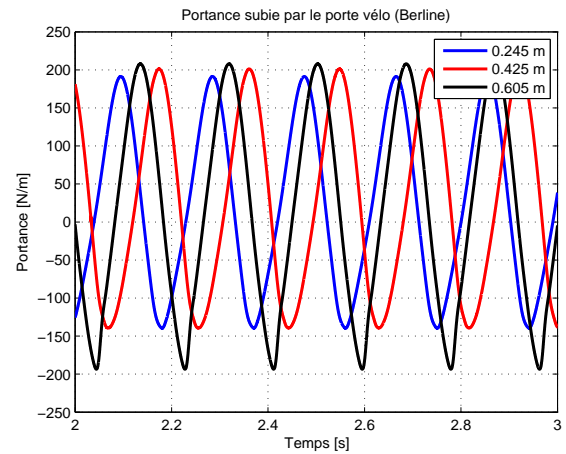


FIGURE 2.17 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière la berline

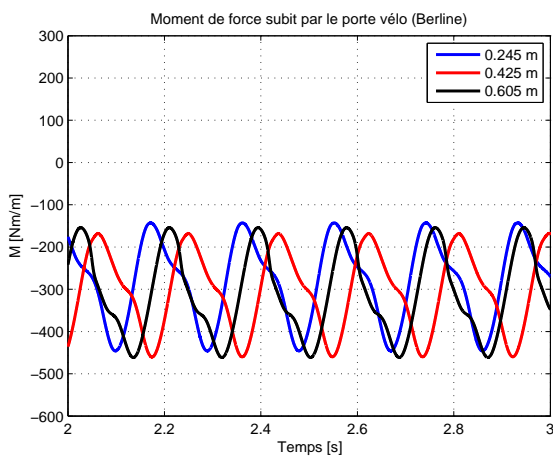


FIGURE 2.18 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière la berline

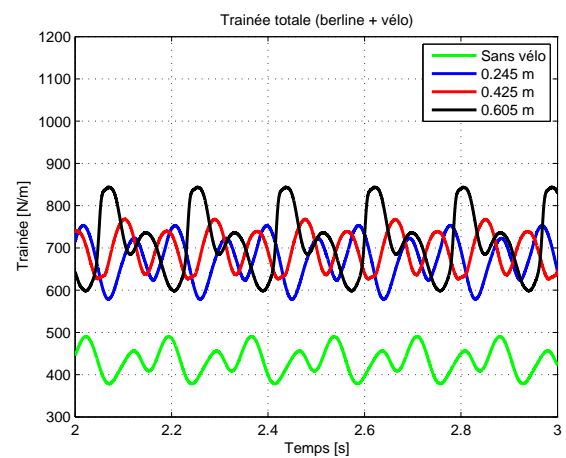


FIGURE 2.19 – Trainée totale de la berline

Comparaison

Tous les efforts mesurés sur les écoulement 2D sont à multiplier par la profondeur des corps.

Voici (figures 2.5, 2.10 et 2.15) les contours de vorticit e apr es trois secondes de simulation des voitures à 120km/h, où l'écoulement a un comportement oscillatoire régulier. Comme attendu, la vorticit e est la plus grande dans les couches limites. Cette couche de vorticit e se détache ensuite de la voiture, vient heurter le porte-vélo et forme ensuite les vortex de Von Karman dans son sillage.

Les figures 2.6, 2.11 et 2.16 représentent le comportement temporel de la force horizontale subie par le porte-vélo (sa traînée). Les figures 2.7, 2.12 et 2.17 la force verticale (sa portance) et les figures 2.8, 2.13 et 2.18 le moment de force que subit le porte-vélo. L'évolution de la traînée totale, l'addition de celle de la voiture et du vélo, est présente sur les figures 2.9, 2.14 et 2.19. C'est cette force que la voiture devra contrer.

Tous les diagnostics sont périodiques. Toutes les simulations ont une fréquence comprise entre 5.1 Hz et 5.4 Hz, elle dépend très peu du cas simulé.

Les figures 2.20, 2.21, 2.22 et 2.23) comparent tous les résultats en 2D. Les différentes simulations se répartissent sur l'axe des abscisses, tandis que les résultats sont représentés sur l'axe des ordonnées. Pour tous les représenter sur la même figure, des "boxplots" ont été utilisés. La barre rouge est la moyenne du signal, qui oscille entre les extrémités des pointillés noirs. La boîte bleue représente les quartiles du signal, ce sont donc les valeurs dans lesquelles il reste 50% du temps (l'analyse des quartiles est moins intéressante que celle de l'amplitude et de la moyenne du signal).

Le comportement de la force verticale appliquée sur le vélo (figure 2.20) est similaire pour tous les cas, avec une moyenne proche de zéro (de -30 N/m   25 N/m). L'amplitude des oscillations dépend du modèle de la voiture. En effet, celle-ci est plus petite pour le SUV que pour la citadine, qui est elle-même plus petite que celle de la berline. L'amplitude de la portance augmente aussi avec la distance entre le vélo bâché et la voiture.

La force horizontale subie par le vélo (figure 2.21) est déjà plus intéressante. Elle est en effet beaucoup plus sensible au cas simulé.

Premièrement la traînée de la housse de protection du vélo augmente plus celle-ci est loin de la voiture. Cela paraît logique car plus le vélo est proche, plus il est englobé dans le sillage propre de la voiture, il rencontre donc des vitesses d'écoulement moindres, ce qui fait que la différence de pression entre la surface avant et arrière de la b che est plus petite.

Ensuite le modèle de la voiture influe grandement sur la force horizontale que va subir le porte-vélo. Derrière le SUV, la moyenne est proche de zéro (elle est même négative pour la position la plus proche, entraînant un effet d'aspiration de la voiture sur la bâche), alors que derrière la berline, le porte-vélo doit soutenir une force de l'ordre de 700 N/m. C'est d  à la forme spécifique de la berline, dont l'arrière est beaucoup plus bas que les deux autres modèles. L'écoulement vient donc heurter beaucoup plus violemment la bâche, augmentant donc la traînée de celle-ci.

La figure 2.22 compare le moment de force que subit le porte-vélo. Un moment négatif pousse le vélo bâché à s'écarter de la voiture, alors qu'un positif le rapproche de celle-ci. Le vélo tend à s'éloigner de la voiture dans toutes les simulations, sauf lorsqu'il est le plus proche du SUV, où l'effet d'aspiration discuté précédemment est présent.

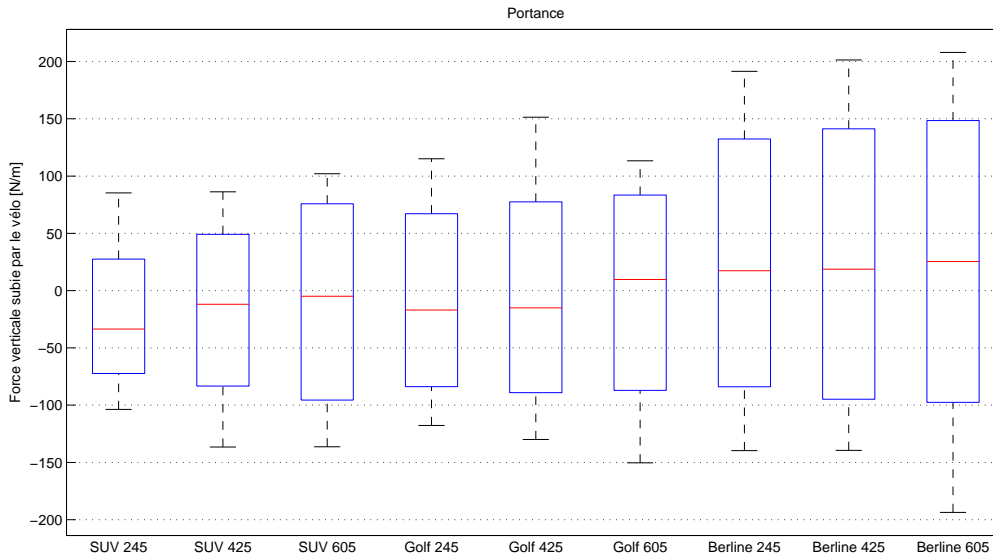


FIGURE 2.20 – Force verticale subie par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 2D

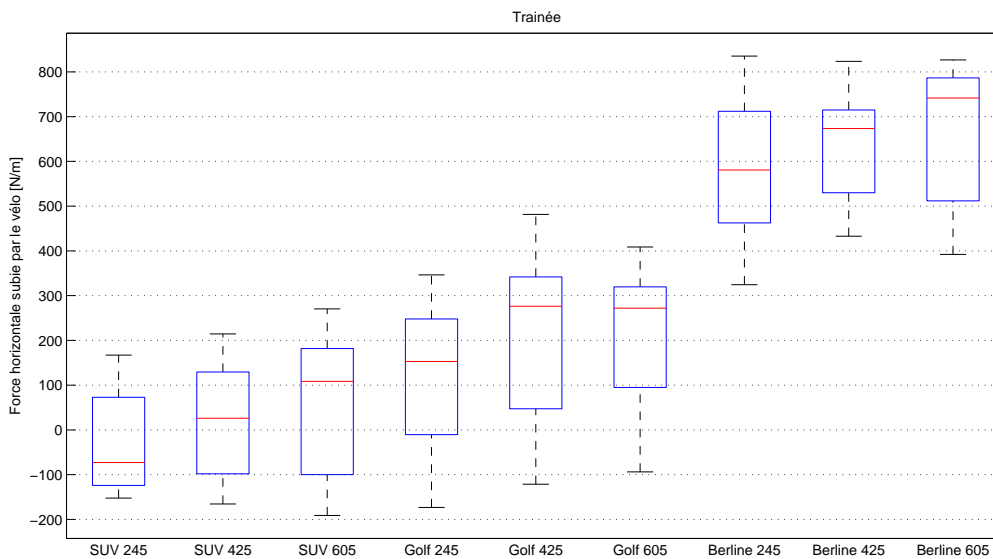


FIGURE 2.21 – Force horizontale subie par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 2D

Le moment, comme la traînée est de plus en plus fort au fur et à mesure que le vélo s'éloigne de la voiture. La traînée est en effet aussi plus grande, elle entraîne donc un moment de force supérieur. Le moment de force minimal à 120 km/h est de l'ordre de $5Nm/m$ derrière le SUV, $-53Nm/m$ derrière la citadine et $-264Nm/m$ derrière la berline. Les efforts que doit supporter le porte-vélo, autant en traînée qu'en moment de force, sont donc bien supérieurs pour la berline que pour les deux autres modèles.

La figure 2.23 compare la traînée totale de toutes les simulations. Pour la berline, l'ajout du vélo derrière la voiture est clairement très défavorable à son aérodynamisme, ce qui paraît logique. La présence de la bâche implique une augmentation de 56% de traînée pour la meilleure des

positions. Le haut de la bâche du vélo dépasse la hauteur du coffre, ce qui fait que sa surface normale équivalente dans l'écoulement est plus grande, ce qui entraîne une traînée supérieure. Pour le SUV et la citadine, les résultats sont surprenants. L'ajout d'un vélo bâché derrière ces voitures semble entraîner une diminution de la traînée de celles-ci. Le SUV passe d'une moyenne de 700 N/m à un moyenne proche de 550 N/m de force horizontale appliquée par l'écoulement, ce qui équivaut à une diminution de l'ordre de 21%! La citadine, elle, passe de 710 N/m à moins de 600 N/m si le vélo est placé proche du coffre, soit une diminution de 15%. Ces résultats surprenants sont discutés dans la section 2.7.

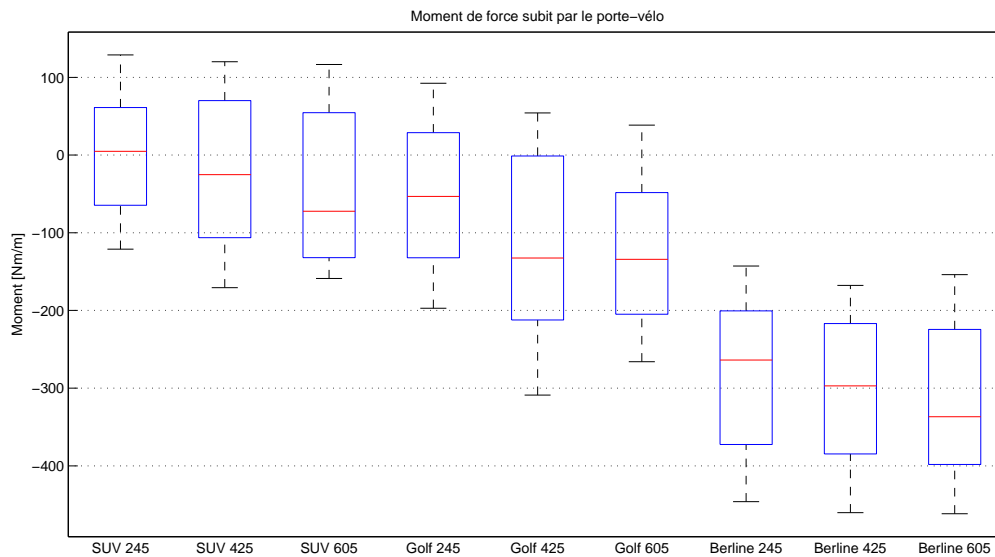


FIGURE 2.22 – Moment de force subi par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 2D

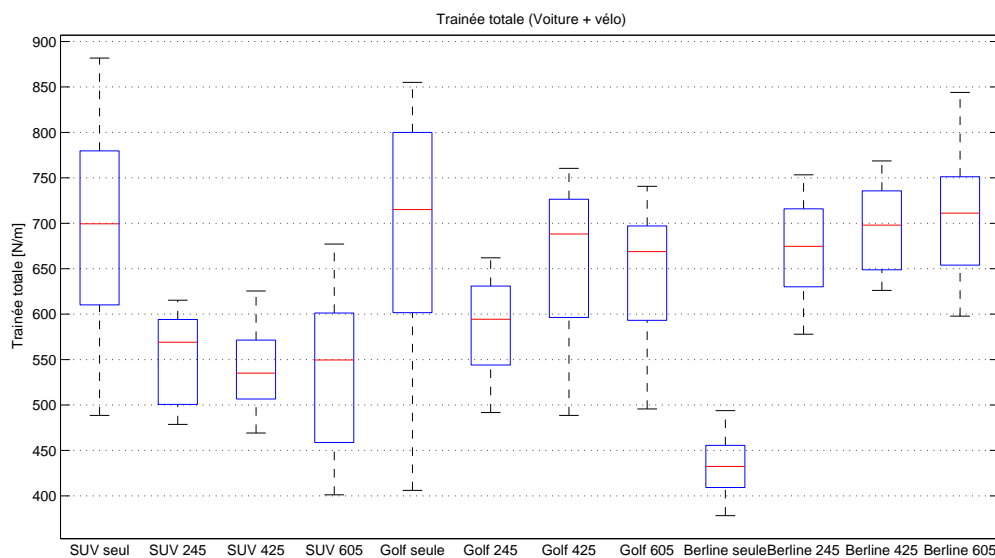


FIGURE 2.23 – Trainée totale du véhicule pour tous les cas simulés en 2D

2.4.2 Influence de la vitesse de la voiture

Selon la section précédente, les efforts les plus grands sont rencontrés lors du transport du vélo par une berline. Les résultats disent aussi qu'un conducteur voulant minimiser sa consommation, ainsi que réduire au maximum les efforts subis par le porte-vélo, placera le vélo dans la position la plus proche de la voiture. C'est donc le cas "berline 245" qui va être analysé. Est-il intéressant pour la berline d'aller moins vite afin de diminuer significativement sa traînée et les efforts repris par le porte-vélo ?

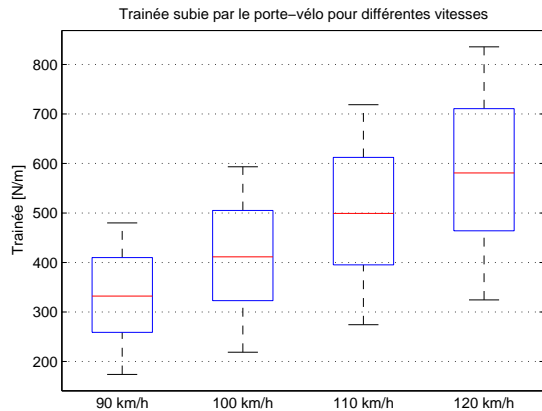


FIGURE 2.24 – Traînée du vélo pour différentes vitesses

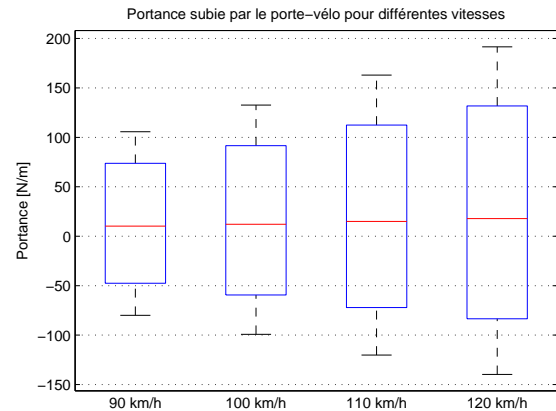


FIGURE 2.25 – Portance du vélo pour différentes vitesses

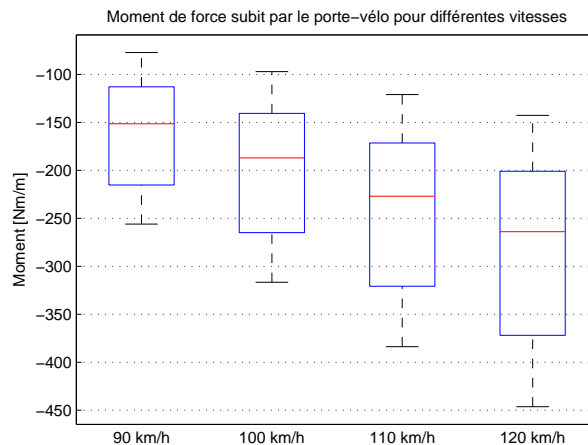


FIGURE 2.26 – Moment de force subi par le porte-vélo pour différentes vitesses

Tout d'abord la fréquence des efforts change en fonction de la vitesse. Plus celle-ci est grande, plus la fréquence augmente. A 90 km/h les efforts ont une fréquence de 4.43 Hz alors qu'à 120 km/h elle est à 5.40 Hz. En 30 km/h de différence, la fréquence a donc augmenté de 1 Hz environ. Ces valeurs peuvent être utiles dans le cadre d'études en fatigue du porte-vélo.

Ensuite, la vitesse influe très peu sur la moyenne des forces verticales (figure 2.25). Celle-ci reste toujours proche de zéro, mais l'amplitude de la force grandit. En effet elle double quasiment entre 90km/h et 120km/h. Cette amplitude reste cependant faible vis-à-vis des autres efforts que sont la traînée et le moment de force que subit le vélo.

La force horizontale (figure 2.24), elle, augmente clairement avec la vitesse. La force moyenne que doit contrer l'attache du porte-vélo est de 332 N/m à 90km/h, alors qu'elle atteint les 580 N/m à 120km/h, soit une augmentation de 74.7% en 30 km/h de différence. L'évolution de cette force est quasi linéaire entre ces vitesses. En toute généralité la traînée d'un objet évolue quadratiquement avec la vitesse de l'écoulement. Cette apparente linéarité peut être due au manque de points (seules 4 vitesses différentes ont été testées).

La moyenne du moment de force se comporte aussi assez linéairement avec la vitesse de la voiture comme la figure 2.26 le montre. En augmentant la vitesse de 90 km/h à 120 km/h le moment de force passe de 150 Nm/m à 264 Nm/m, il augmente donc de 76.0% !

La figure 2.27 représente la traînée totale du véhicule, qui est l'addition de la traînée de la voiture et du vélo. Pour chaque vitesse, la voiture sans et avec vélo derrière a été simulée, afin de comparer l'influence de la présence du vélo sur l'aérodynamisme de la voiture. Plus la berline va rapidement plus la valeur absolue de la traînée additionnelle due au vélo bâché est grande. Cependant l'addition relative (divisée par la traînée de la voiture seule à cette même vitesse) est quasi constante, allant de 52.6% à 55.3% pour les vitesses simulées.

Aller à une vitesse moindre réduit donc significativement les efforts que doit soutenir le porte-vélo, mais ne change quasi pas l'incrément en pourcentage que représente la présence du vélo sur la traînée totale, et donc la consommation du véhicule.

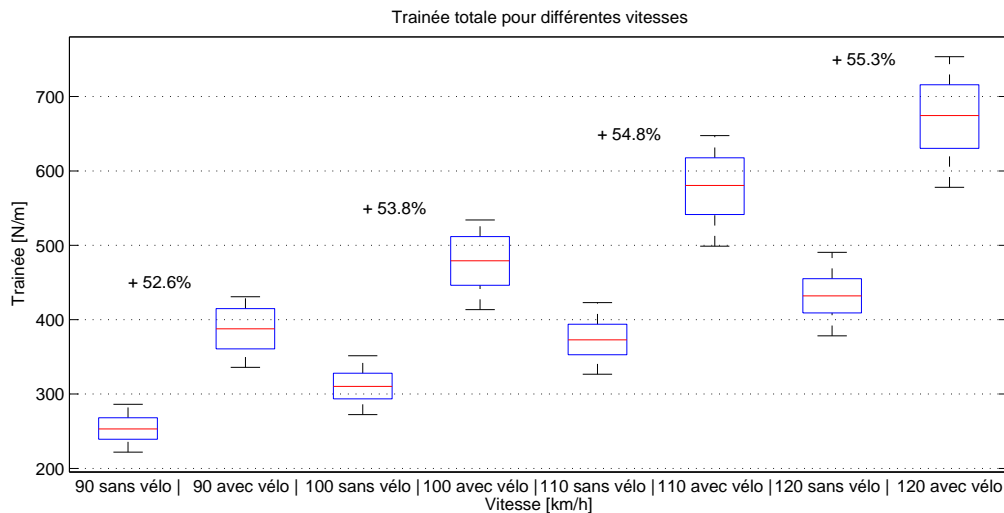


FIGURE 2.27 – Traînée totale pour différentes vitesses

2.5 Convergence spatiale

Les maillages des différentes simulations ont été affinés afin que la solution converge spatialement. Cela veut dire qu'elle ne change pas (avec une tolérance choisie) si le maillage est affiné. La solution devient donc indépendante de celui-ci.

Les tailles des éléments sur la voiture et la bache de vélo ont été progressivement affinées, ainsi que le taux d'accroissement des éléments lorsqu'ils s'éloignent de ces corps. Avec des éléments de 6 mm (0.13% de la longueur du SUV) sur la bache de vélo et l'arrière de la voiture, grandissant jusque 12.5 mm sur le capot, avec un taux de croissance de 1.04 pour les mailles s'éloignant des corps, les maillages produits font de 60 000 à 70 000 éléments. La figure 2.28 compare la solution sur ce maillage et sur un maillage dont la taille des éléments sur la voiture et le vélo ont tous été divisés par deux, ce qui conduit à un nombre bien plus élevé d'éléments (environ 120 000). Leurs moyennes (lorsque le signal devient périodique) diffèrent de 0.9 Nm/m et leur amplitude de 9 Nm/m, soit 0.6% et 6% de l'amplitude du moment, ce qui est acceptable pour une étude macroscopique comme celle-ci.

La taille du domaine (hauteur, longueur devant et derrière la voiture) a aussi été trouvée de manière itérative, jusqu'à ce que l'augmentation de ces distances ne change plus les résultats de manière significative. La figure 2.29 montre le moment de force appliqué sur le porte-vélo lorsque chaque distance est augmentée. La moyenne et l'amplitude du moment lorsque le domaine est agrandi varient de moins de 10 Nm/m par rapport au domaine choisi (qui est de 13.5m devant la voiture, 45m derrière et 27m de haut), ce qui équivaut à 7.7% de l'amplitude du moment.

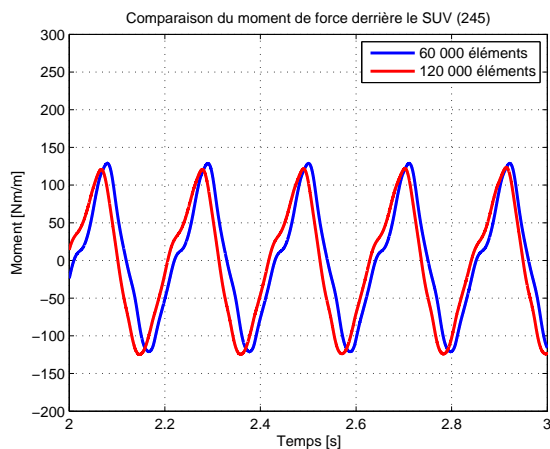


FIGURE 2.28 – Moment de force derrière le SUV (245) pour différents maillages

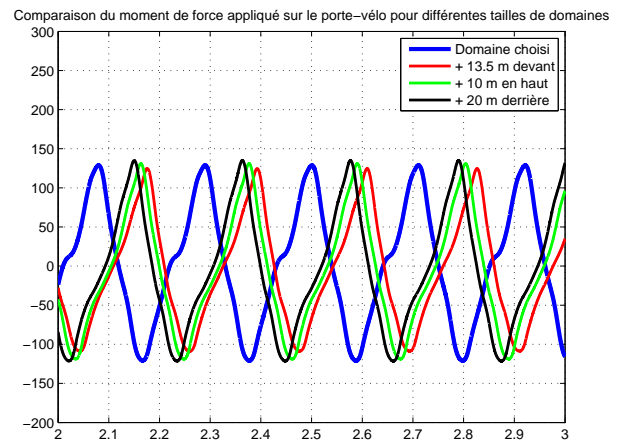


FIGURE 2.29 – Moment de force derrière le SUV (245) pour différentes tailles de domaine

2.6 Analyse des couches limites

Une couche limite se traite avec des variables spécifiques. Celles-ci permettent de percevoir le comportement de la couche limite à une très petite échelle, car les gradients sont très grands. Tout d'abord la force de cisaillement de l'écoulement sur la frontière (fixe) du domaine.

$$\tau_{wall} = \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

Ensuite une vitesse de frottement :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}$$

Les variables de la couche limite sont définies grâce à cette vitesse de frottement :

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad u^+ = \frac{u}{u_\tau}$$

y^+ représentant de manière adimensionnelle l'éloignement de la frontière et u^+ la vitesse de l'écoulement.

Le modèle $k - \omega$ utilisé requiert une capture fine des couches limites, car aucun traitement spécifique près du mur ("Wall functions") n'est utilisé. Selon le guide théorique de Fluent, [2], il est conseillé d'avoir un premier point de maillage dans la zone 1 (laminaire) de la couche limite, soit avec $y^+ < 5$. τ_{wall} étant un résultat de la simulation, des itérations ont été faites sur la hauteur de la première couche du maillage au dessus de chaque frontière afin de respecter cette condition. La figure 2.30 montre l'évolution du y^+ sur une frontière, avec un maximum proche de 2.8. Cela correspond à une hauteur de la première couche de maillage de $3 \cdot 10^{-5}m$, soit $7.5 \cdot 10^{-6}$ fois la longueur du SUV. L'épaisseur de la première couche est constante sur tout le toit de la voiture, les variations visibles sur cette figure sont donc dues à un τ_{wall} qui varie.

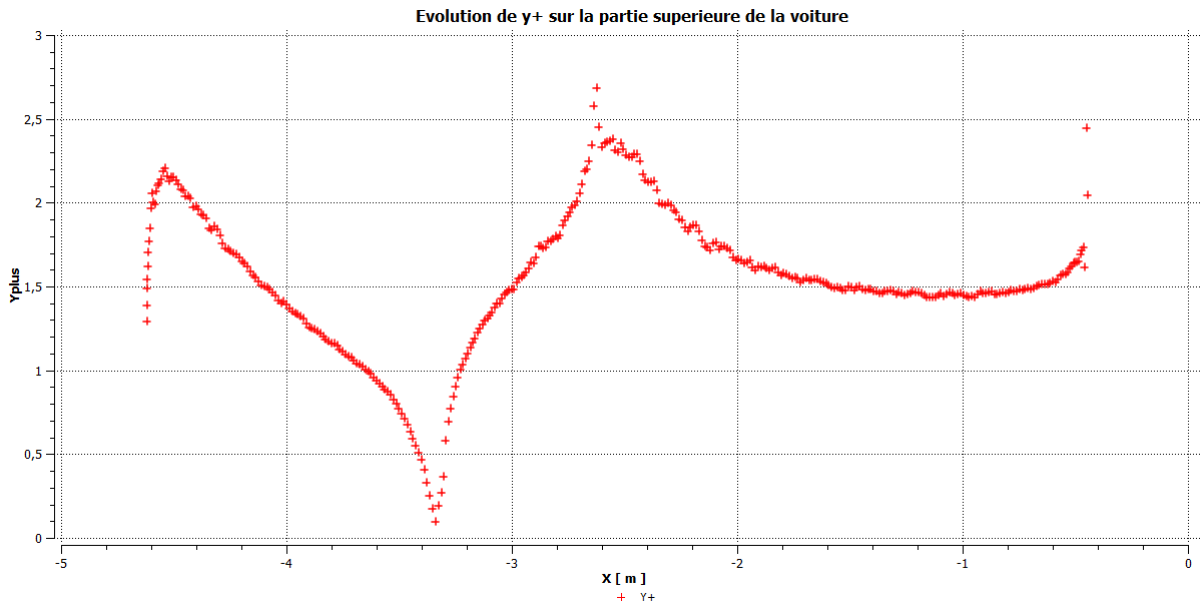


FIGURE 2.30 – Évolution de y^+ sur le toit de la voiture

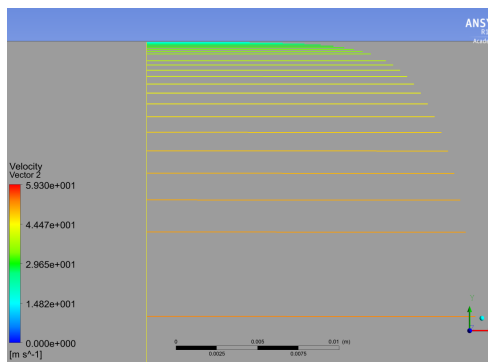


FIGURE 2.31 – Profil de vitesse dans la couche limite sous le SUV

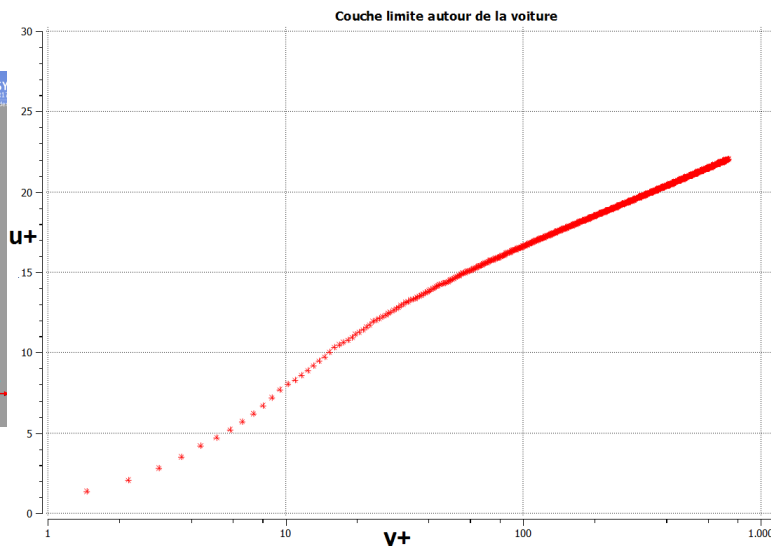


FIGURE 2.32 – Capture de la couche limite par le maillage

La figure 2.31 montre le champ de vitesse de l'écoulement au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la voiture. Pour pouvoir l'analyser de manière pertinente, il faut recourir aux variables des couches limites définies plus haut. La figure 2.32 montre l'évolution de la vitesse adimensionnelle u^+ en fonction de la distance au mur (adimensionnelle aussi). La couche laminaire est clairement visible pour $y^+ < 5$, où $u^+ = y^+$, et la couche logarithmique pour $y^+ > 30$, la ligne droite sur le graphe représentant bien l'évolution logarithmique de u^+ par rapport à y^+ , comme prédit par la théorie de Prandtl sur les couches limites turbulentes.

Avoir un premier point de maillage si petit demande d'avoir énormément d'éléments dans la couche limite, car avoir des mailles voisines ayant des tailles trop différentes peut mener à des soucis numériques. Le y^+ du premier point de maillage a donc été augmenté tant que l'incidence de ce changement sur les efforts calculés reste faible. Les résultats sont quasi égaux (voir figure 2.33 pour la traînée de la voiture, mais c'est pareil pour tous les efforts) pour un premier point de maillage jusqu'à y^+ moyen aux environs de 10.

Toutes les simulations 2D ont donc un premier point de maillage à y^+ de 10 en moyenne car les différences des efforts que ressent la voiture ou le vélo est négligeable au niveau macroscopique. Cela entraîne un nombre de point de maillage bien inférieur, et donc une vitesse de calcul plus élevée.

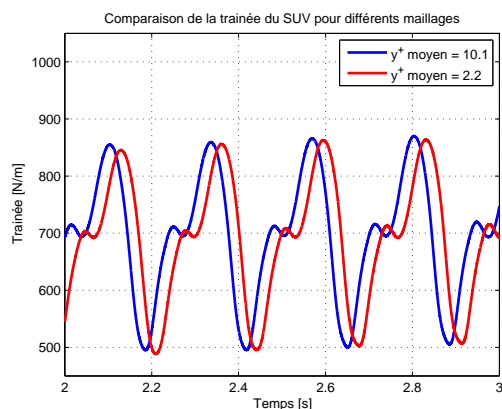


FIGURE 2.33 – Influence du premier point de maillage sur la traînée du SUV

2.7 Investigation de la traînée totale en 2D

Les résultats obtenus en 2D concernant la traînée totale du SUV et de la citadine paraissent fort étonnants. En effet ils laissent supposer qu'ajouter un vélo muni d'une housse de protection derrière ces voitures augmente leur aérodynamisme. Le cas du SUV avec le vélo à 245 mm de son coffre est ici investigué plus en profondeur.

Tout d'abord l'amplitude de la traînée totale est plus faible lorsqu'un vélo est placé à l'arrière. Cela s'explique par le fait qu'un écoulement oscille entre le coffre et le vélo (voir figures 2.37 et 2.38). Lorsque l'air a une vitesse très faible dans cette zone, une grande pression est présente entre le vélo et la voiture. Elle applique une force sur le vélo et la voiture, mais dans un sens opposé (figure 2.35), et vice-versa lorsqu'une dépression est entre les deux (figure 2.36), lorsque la vitesse de l'écoulement est maximale. Comme le montre la figure 2.34, chaque maximum de la traînée du vélo correspond à un minimum de la traînée de la voiture, et inversement. L'espace entre la voiture et le vélo joue donc un rôle de d'"amortisseur" au niveau de la traînée totale.

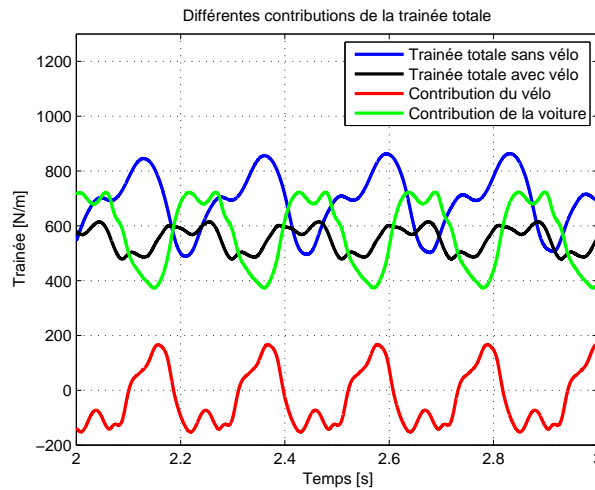


FIGURE 2.34 – Contributions à la traînée totale

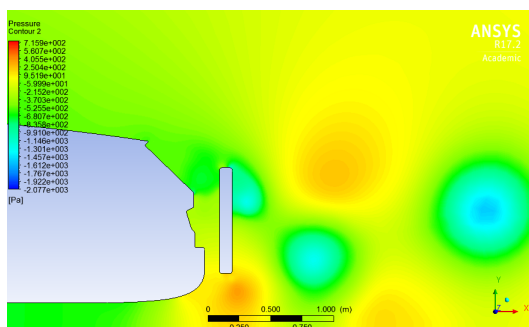


FIGURE 2.35 – Contours de pression : traînée minimum pour la voiture et maximum pour le vélo

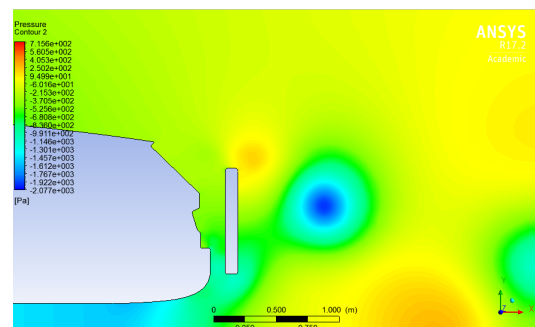


FIGURE 2.36 – Contours de pression : traînée maximum pour la voiture et minimum pour le vélo

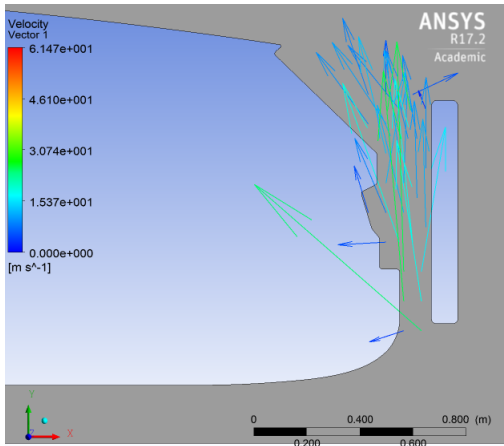


FIGURE 2.37 – Champ de vitesse entre le vélo et le coffre à $t = 2.06s$

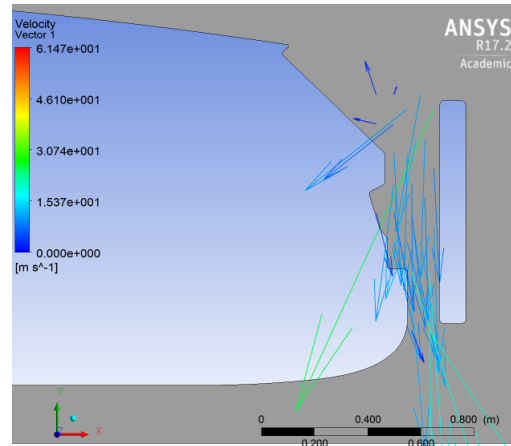


FIGURE 2.38 – Champ de vitesse entre le vélo et le coffre à $t = 3s$

Pour découvrir pourquoi la moyenne de la traînée totale en 2D est plus petite avec que sans vélo, la résultante de force horizontale appliquée sur la voiture a d'abord été séparée en deux parties (voir figure 2.39). Celle qui s'applique sur l'arrière de la voiture (en rouge) et celle qui s'applique sur tout le reste (en vert).

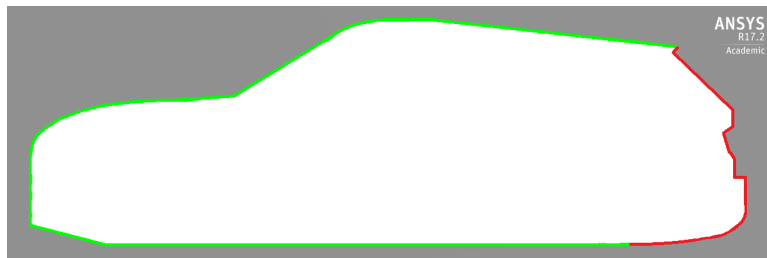


FIGURE 2.39 – Séparation des forces horizontales sur le SUV

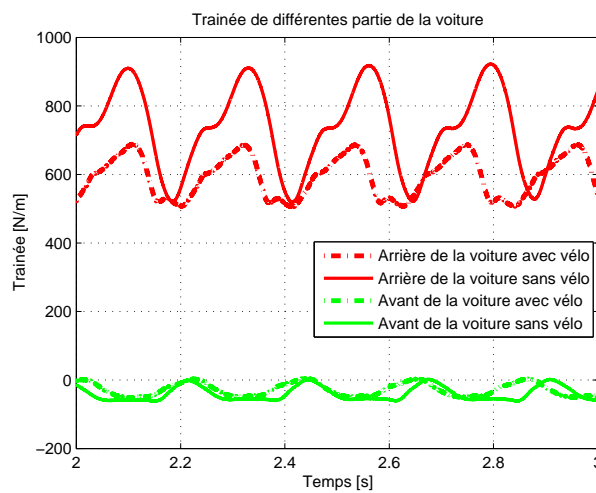


FIGURE 2.40 – Comparaison des forces horizontales sur le SUV

Voici la comparaison de la traînée de chaque partie, pour le cas avec et sans vélo (figure 2.40). La traînée de l'avant de la voiture est quasi identique pour les deux cas. La différence des traînées vient donc du comportement de l'écoulement à proximité du coffre. Celle-ci est bien moins grande lorsqu'un vélo est présent derrière la voiture, et cette différence n'est pas compensée par l'ajout de traînée sur le vélo (dont la moyenne est même négative pour ce cas, voir figure 2.21).

Le sillage de chaque simulation (figure 2.41 et 2.42) ont été analysés plus en profondeur. La zone de sillage considérée est limitée par le rectangle en transparence et la moyenne de la valeur absolue de la vorticité a été calculée dans celui-ci, afin d'avoir une idée de la force des vortex créés dans chaque sillage. Les vortex dans le sillage du SUV sans vélo sont plus intenses. L'énergie de ces vortex vient directement des forces de frottements du véhicule, car seuls la voiture et le vélo produisent de la vorticité dans leurs couches limites. Cela confirme donc le fait que la traînée est plus grande pour le SUV sans vélo qu'avec.

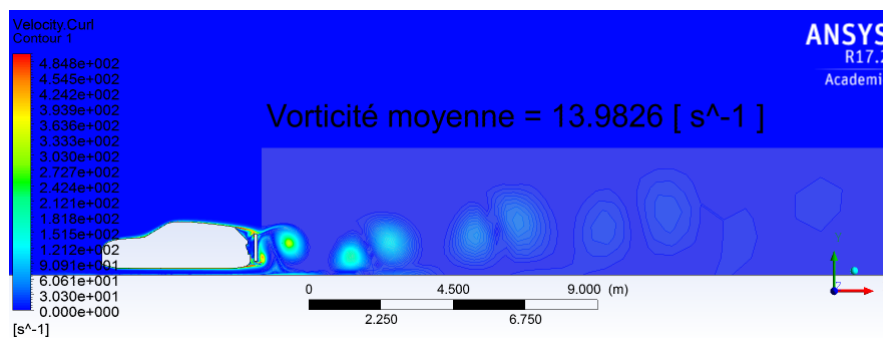


FIGURE 2.41 – Vorticité dans le sillage du SUV avec un vélo

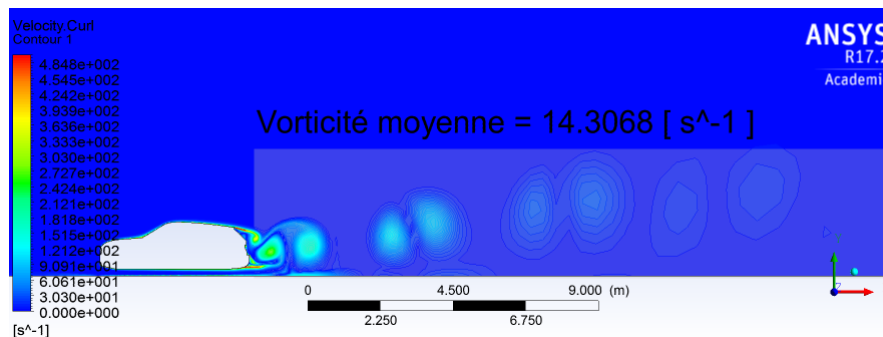


FIGURE 2.42 – Vorticité dans le sillage du SUV sans vélo

Une explication possible de ces résultats contre-intuitifs serait que la bâche de vélo en 2D agit sur l'écoulement d'une manière similaire au coffre de la berline. Celui-ci redescend en effet pour que l'air quitte moins abruptement la voiture, ce qui entraîne des vortex moins énergétiques dans le sillage et donc une meilleure pénétration dans l'air. En effet, les lignes de courant redescendent bien de manière continue entre le vélo et la voiture (voir figures 2.43 et 2.44), et quittent donc moins abruptement le véhicule.

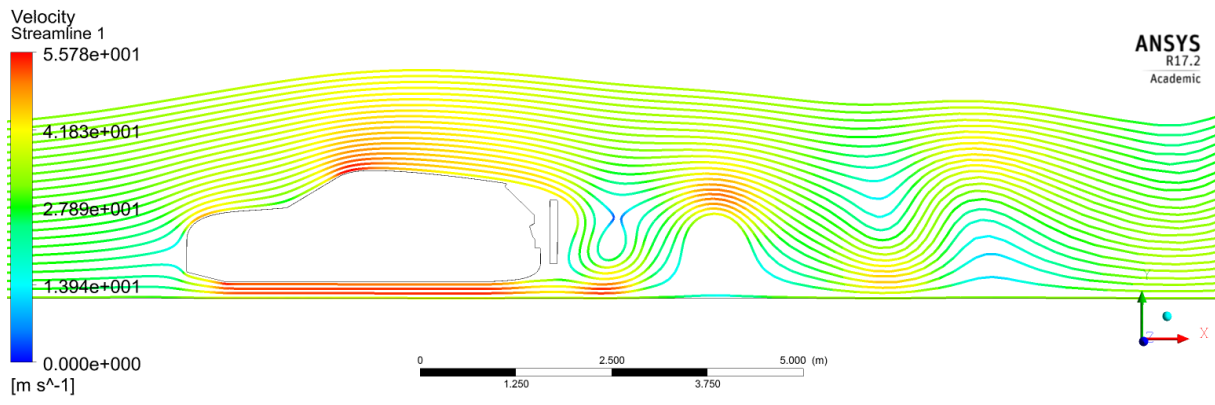


FIGURE 2.43 – Lignes de courant autour du SUV avec vélo

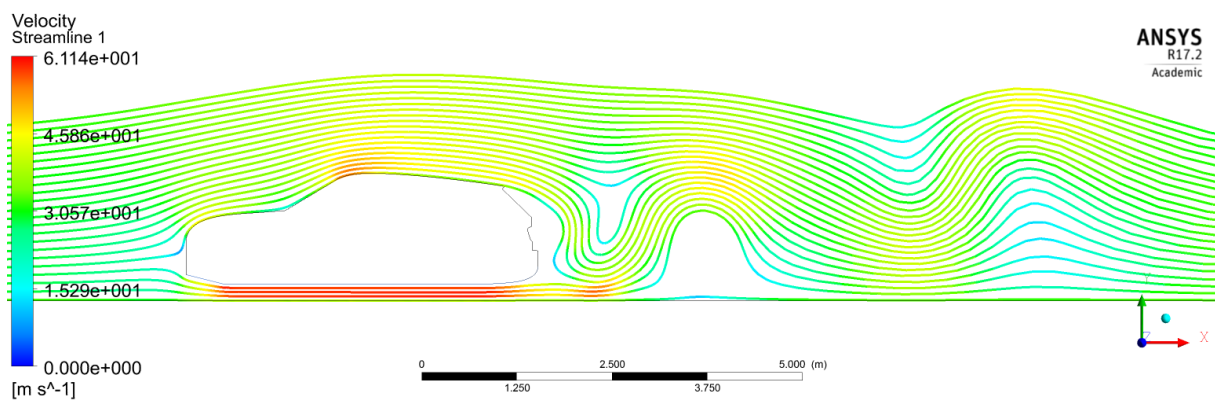


FIGURE 2.44 – Lignes de courant autour du SUV sans vélo

Chapitre 3

Étude de l'écoulement en 3D

3.1 Modélisation des corps

Pour modéliser avec le plus de réalisme possible la bâche de vélo, des mesures ont été prises sur la bâche prototype tendue. Celles-ci ont permis d'avoir des plans de section de la bâche assez précis, qui ont pu être reliés par une fonction "lissage" d'un logiciel de génération de pièces 3D (Solidworks). Comme en 2D et pour les mêmes raisons, celle-ci est considérée comme infiniment rigide.

Les différentes voitures ont été grossièrement modélisées sur base de l'extrusion des profils décalqués en 2D, retravaillés pour ressembler un maximum au modèle original en 3D. Les dimensions principales sont respectées, mais les détails (comme les rétroviseurs par exemple) ont été lissés. Une modélisation trop réaliste de la voiture aurait demandé un maillage très fin à des endroits sans intérêt dans le cadre de notre étude, augmentant ainsi énormément le temps de calcul. À titre d'exemple les roues ont été modélisées par des cylindres car l'écoulement complexe derrière chaque enjoliveur nécessiterait un maillage très fin à cet endroit, alors que l'impact de cet écoulement sur les efforts que subit le porte-vélo est négligeable. La géométrie du porte-vélo a aussi été négligée, pour les mêmes raisons qu'en 2D.

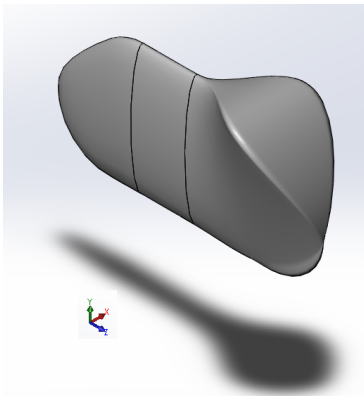


FIGURE 3.1 – Modélisation 3D de la housse de protection du vélo

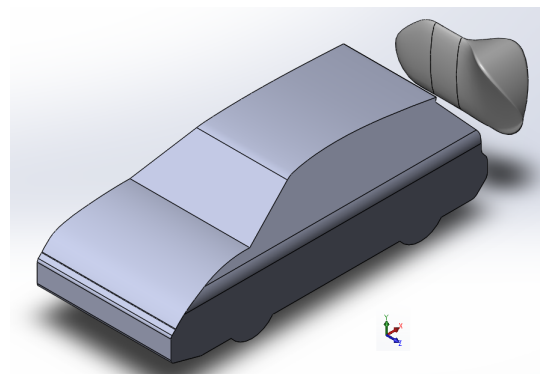


FIGURE 3.2 – Modélisation 3D de la citadine et du vélo

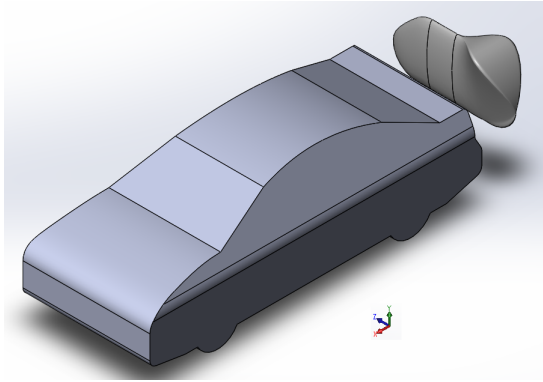


FIGURE 3.3 – Modélisation 3D de la berline et du vélo

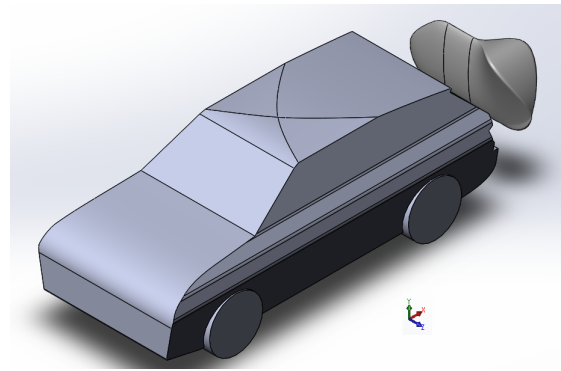


FIGURE 3.4 – Modélisation 3D du SUV et du vélo

3.2 Domaine de simulation et maillage

Le domaine de simulation est une boîte à laquelle ont été enlevées la voiture et la housse de protection du vélo. Cette boîte possède les mêmes dimensions que le domaine rectangulaire en 2D, avec une profondeur de 20 m (10.5 fois la largeur du SUV).

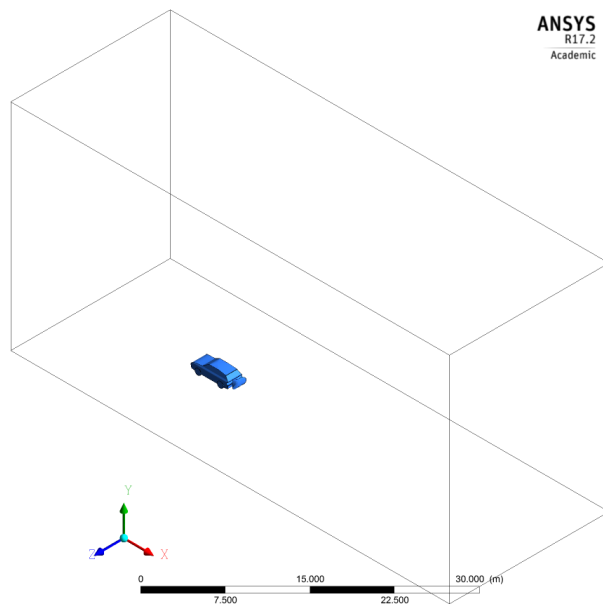


FIGURE 3.5 – Domaine de simulation 3D

En 3D, les maillages sont limités par le nombre d'éléments. Une simulation de 3 secondes d'écoulement à 5 millions d'éléments prend 3 jours et demi sur 8 processeurs du CÉCI, et 12 simulations sont à faire (sans compter les analyses de convergence). Si les tailles d'éléments de nos maillages 2D sont simplement reportées en 3D, les maillages atteignent de 20 à 40 millions d'éléments, ce qui représente un effort de calcul beaucoup trop grand. Les maillages 3D produits ont donc de 5 à 6 millions d'éléments, et sont donc beaucoup moins convergés spatialement (voir section 3.6). Les éléments ont des arêtes qui vont de 1 à 3 cm sur la voiture et la bâche de vélo (soit de 0.2% à 0.6% de la longueur du SUV), et leur taux d'accroissement est de 1.12. La première couche d'inflation, pour capturer la couche limite, est à 1.8 mm de frontière (soit $3.9 \cdot 10^{-4}$ fois la longueur du SUV).

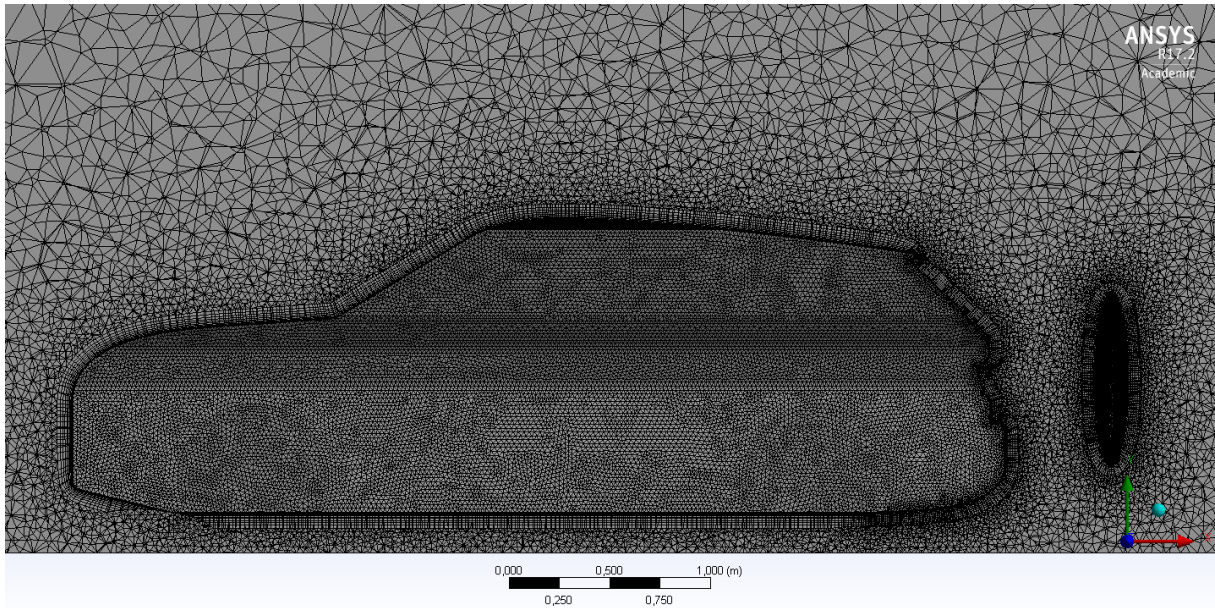


FIGURE 3.6 – Coupe longitudinale d'un maillage 3D

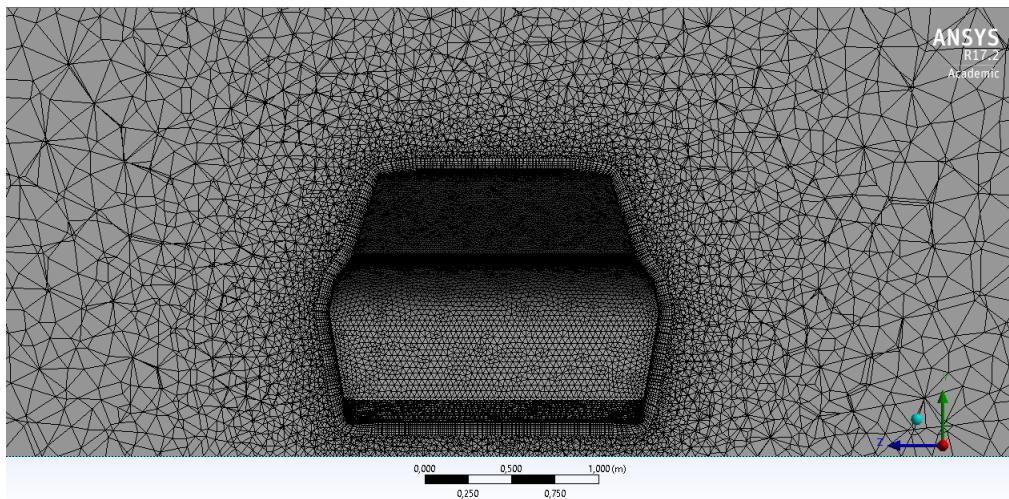


FIGURE 3.7 – Coupe transversale d'un maillage 3D

3.3 Simulation

Les mêmes paramètres de simulation ont été utilisés en 2D qu'en 3D, à l'exception du pas de temps qui est de $1.25 \cdot 10^{-4}$ s, car le maillage est plus grossier à l'endroit où la vitesse est maximale.

3.4 Résultats

SUV

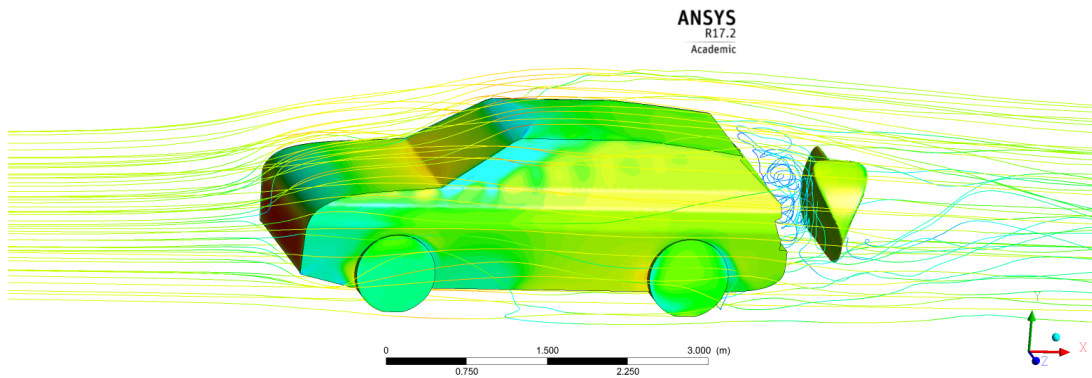


FIGURE 3.8 – Écoulement autour du SUV

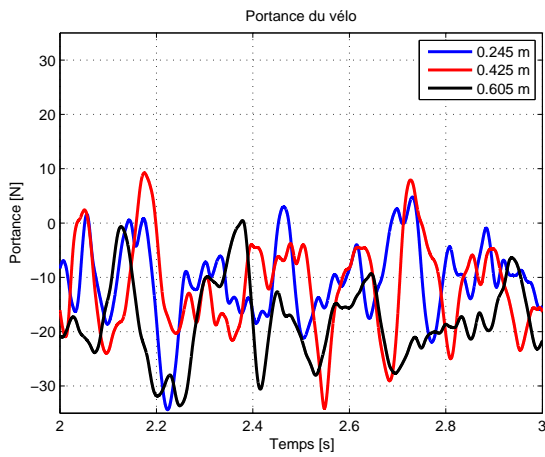


FIGURE 3.9 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière le SUV

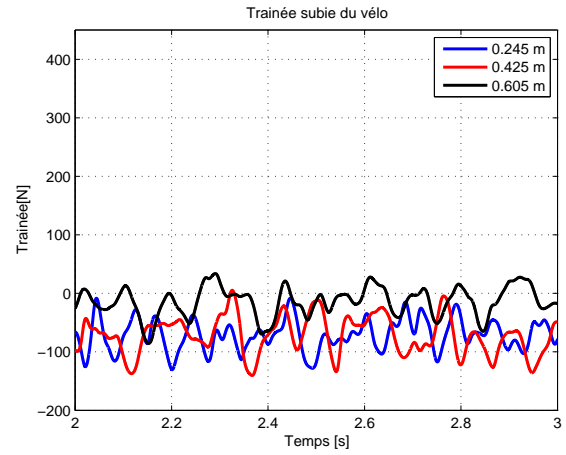


FIGURE 3.10 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière le SUV

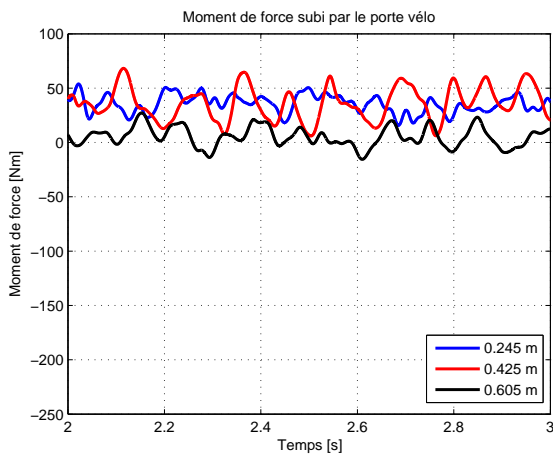


FIGURE 3.11 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière le SUV

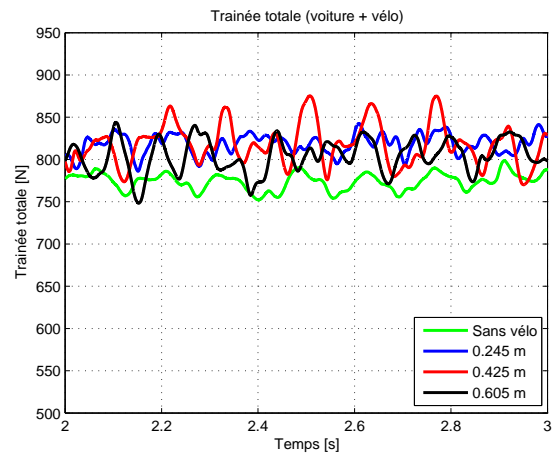


FIGURE 3.12 – Trainée totale du SUV

Citadine

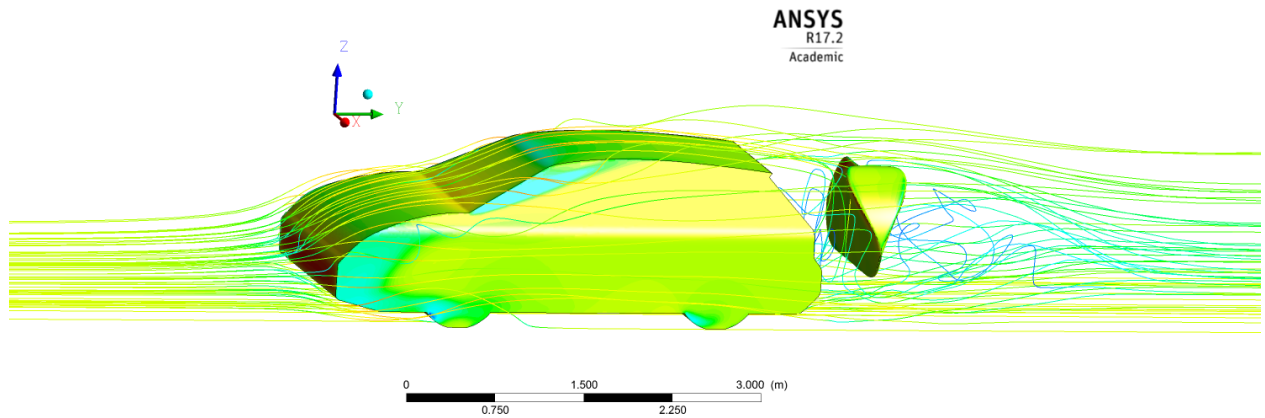


FIGURE 3.13 – Écoulement autour de la citadine

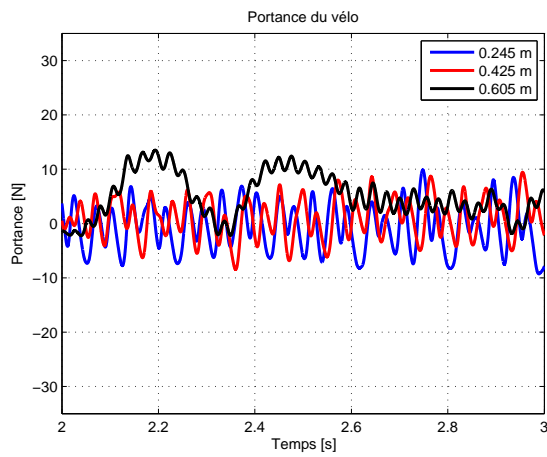


FIGURE 3.14 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière la citadine

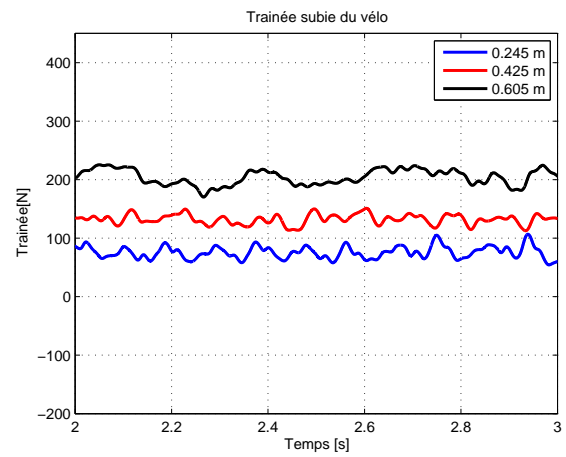


FIGURE 3.15 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière la citadine

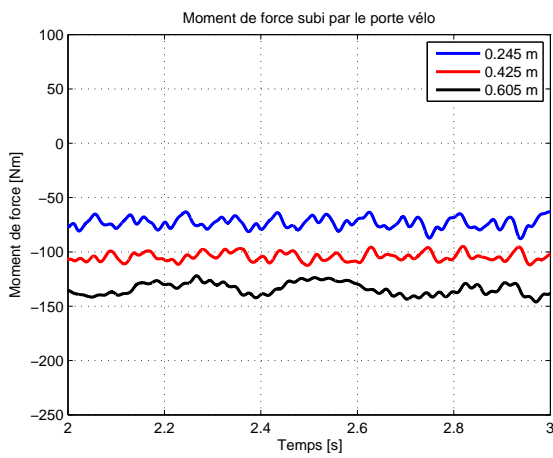


FIGURE 3.16 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière la citadine

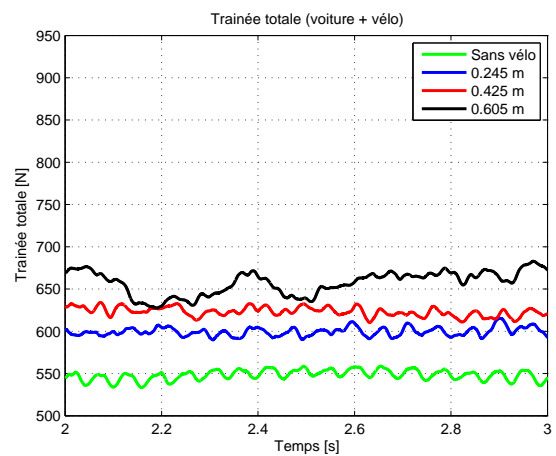


FIGURE 3.17 – Trainée totale de la citadine

Berline

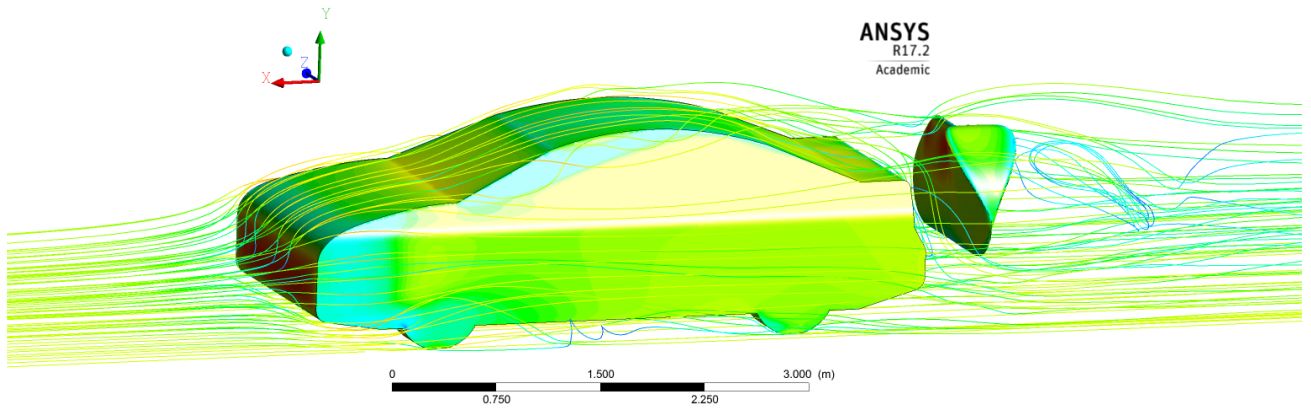


FIGURE 3.18 – Écoulement autour de la berline

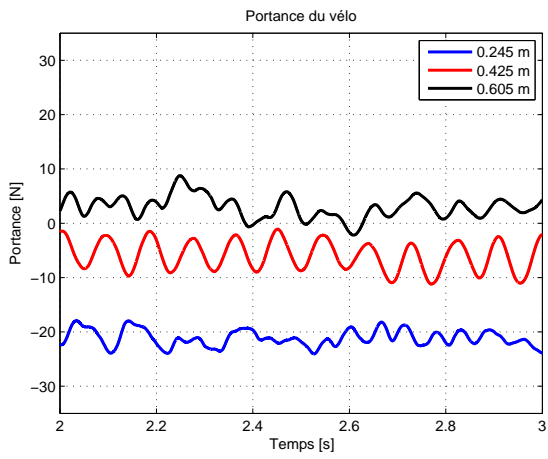


FIGURE 3.19 – Force verticale subie par le porte-vélo derrière la berline

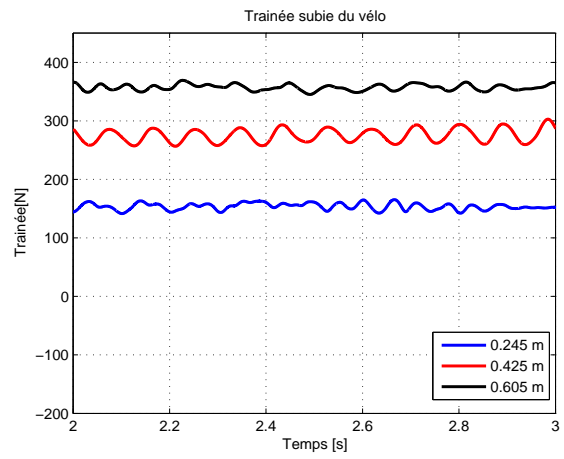


FIGURE 3.20 – Force horizontale subie par le porte-vélo derrière la berline

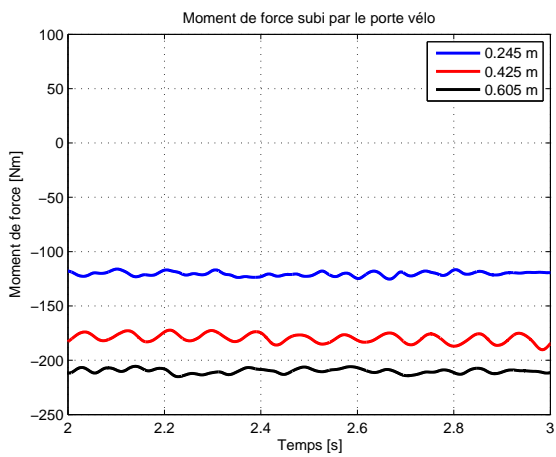


FIGURE 3.21 – Moment de force subi par le porte-vélo derrière la berline

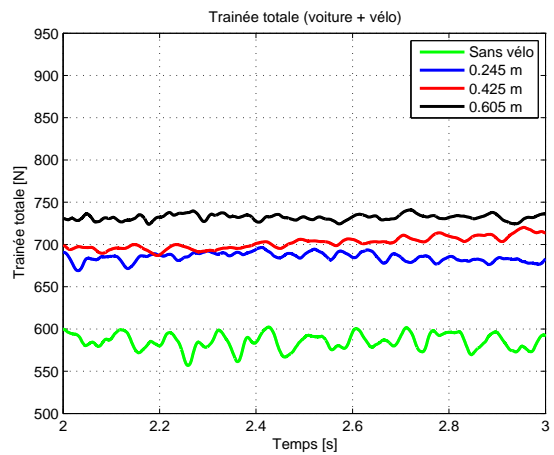


FIGURE 3.22 – Trainée totale de la berline

3.4.1 Comparaison

Les figures 3.8, 3.13 et 3.18 montrent l'écoulement autour des véhicules après 3 secondes, avec les lignes de courant colorées par la vitesse de l'air. Pour le SUV et la citadine, l'écoulement est très complexe entre la voiture et le vélo, ainsi que derrière celui-ci. Les lignes de courant forment à ces endroits des structures très complexes, des vortex. L'écoulement est moins complexe pour la berline, où un flux d'air s'installe entre la voiture et le vélo.

Les contours de pression sont aussi dessinés sur les corps. La pression est maximale sur le devant de la voiture, et minimale entre le toit et le pare-brise, où la vitesse est la plus grande. Sur le vélo derrière la berline, et dans une moindre mesure derrière la citadine, une grande pression en haut de la bâche est observable, car l'écoulement vient frapper le corps. Ce phénomène n'apparaît pas derrière le SUV, car celui-ci est beaucoup plus grand, protégeant donc mieux le vélo de l'air.

Les autres figures montrent l'évolution temporelle des efforts subis par le porte-vélo. Ceux-ci ont, pour toutes les simulations, un spectre fréquentiel beaucoup plus large que les efforts calculés en 2D. Ils sont en effet très "bruités", et ne convergent pas (en 3s de simulation) vers un signal périodique. Leur comportement est cependant devenu quasi indépendant de l'échantillon temporel pris après deux secondes, et peuvent donc être analysés de manière fiable.

De manière similaire à l'analyse 2D, des boxplots ont été utilisés (figures 3.23, 3.24, 3.25 et 3.26) pour pouvoir comparer les moyennes et amplitudes des efforts étudiés.

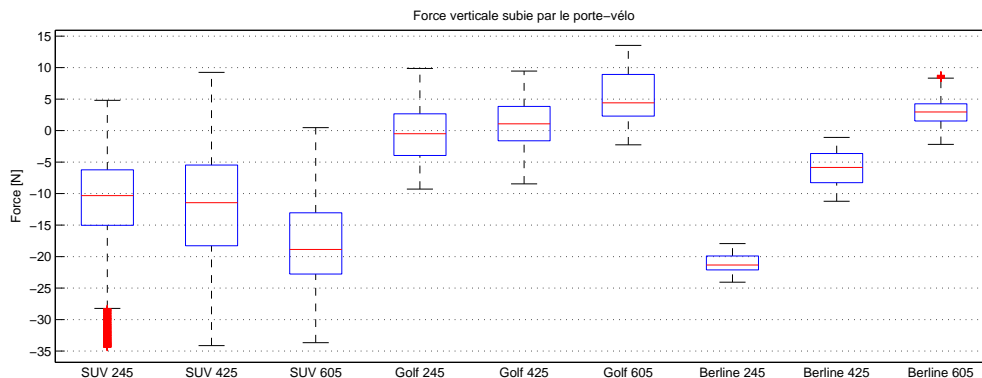


FIGURE 3.23 – Force verticale subie par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 3D

La moyenne de la portance du vélo (figure 3.23) est très faible, elle ne dépasse en effet les 22 N en valeur absolue pour aucun cas. L'amplitude de cette force dépend beaucoup du modèle de voiture. En effet, elle est quasi deux fois plus grande derrière le SUV que derrière la citadine, et quatre fois pour la berline. Contrairement aux simulations 2D, il n'est pas aussi évident que l'amplitude de la portance grandit avec la distance entre le vélo et la voiture.

La figure 3.24 compare la force horizontale (traînée) que subit le vélo pour les différents cas. Comme pour les simulations 2D la traînée augmente avec la distance entre le vélo et la voiture, et elle varie énormément avec le modèle choisi. Un effet d'aspiration est observable pour toutes les distances derrière le SUV, poussant le vélo vers le coffre avec jusque 70N de force. Cet effet d'aspiration semble s'annuler près des 605mm entre le coffre et le SUV.

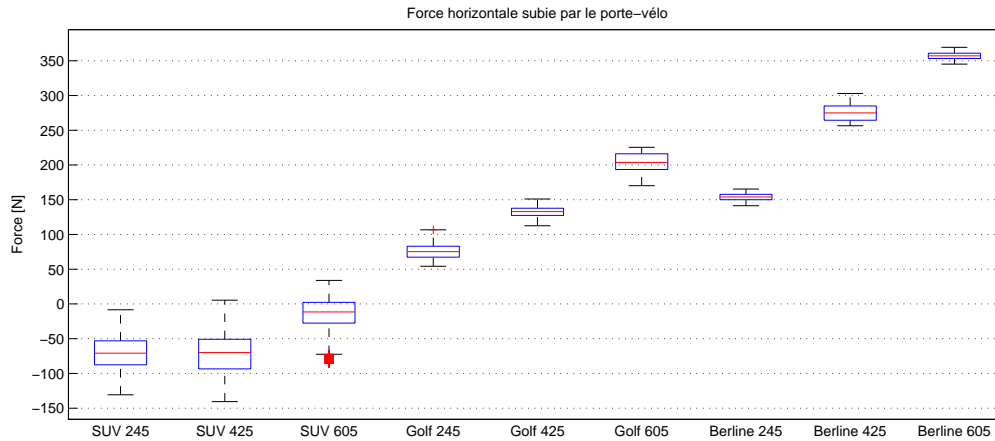


FIGURE 3.24 – Force horizontale subie par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 3D

Pour la citadine, le fait de placer son vélo sur la position la plus éloignée du coffre fait augmenter la traînée moyenne de 170% par rapport à la position la plus proche. Pour la berline, cette augmentation est de 132%. Pour la pire position derrière le SUV, la force horizontale subie par le vélo augmente de 516%. Elle reste cependant très faible.

À la position optimale, la force horizontale moyenne que doit compenser le porte-vélo est de -11.5 N derrière le SUV, 75.3 N derrière la citadine et 154.1 N derrière la berline.

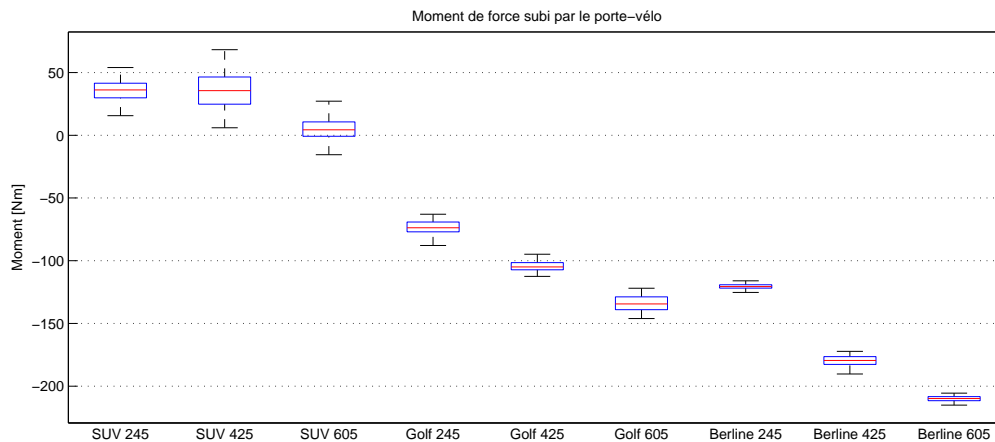


FIGURE 3.25 – Moment de force subi par le porte-vélo pour tous les cas simulés en 3D

Le moment de force (figure 3.25), comme dans les simulations 2D, diminue (et donc augmente la propulsion du vélo à s'écarter de la voiture) au plus la distance bache-coffre augmente. L'effet d'aspiration est toujours observable derrière le SUV, avec un moment moyen quasi nul à 605 mm de la voiture. Pour la citadine, le fait de mettre le vélo à 605 mm du coffre au lieu de 245 mm augmente le moment de force de 82%. Pour la berline, cette augmentation est de 74%. Mettre le vélo à la pire position derrière le SUV augmente le moment de force de 718% (il reste cependant très faible). Pour la meilleure position, le moment de force moyen que subit le porte-vélo est de 4.4 Nm derrière le SUV, -73.7 Nm derrière la citadine et -120.6 Nm derrière la berline.

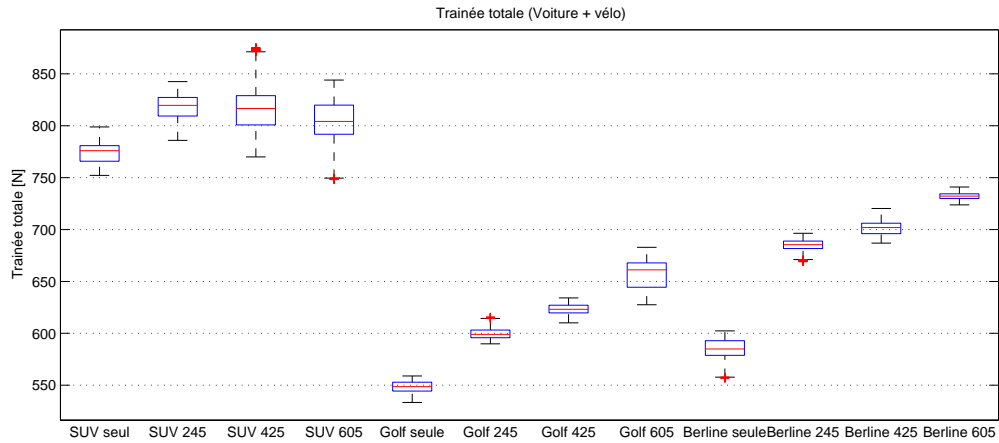


FIGURE 3.26 – Trainée totale du véhicule pour tous les cas simulés en 3D

La figure 3.26 compare la traînée totale des véhicules pour toutes les simulations 3D. L'ajout d'un vélo bâché à l'arrière entraîne pour toutes les voitures une traînée supérieure, contrairement aux résultats des simulations 2D, ce qui paraît plus réaliste.

Pour la citadine et la berline, placer le vélo au plus proche de la voiture minimise la traînée, alors que pour le SUV, la troisième position apparaît comme la plus aérodynamique.

Dans la meilleure des trois configurations, le SUV subit une traînée supplémentaire moyenne de 3.6% par rapport au cas sans vélo, la citadine de 9.2% et la berline de 17.2%, alors que dans la pire configuration, cette traînée supplémentaire est de 5.6% pour le SUV, 20.5% pour la citadine et 25.2% pour la berline.

Les résultats montrent donc que la distance coffre-vélo qui minimise les efforts repris par le porte-vélo maximise aussi l'aérodynamisme du véhicule dans son ensemble.

3.5 Analyse des couches limites

Le nombre d'éléments étant très fort limité, les simulations 3D ont un y^+ de l'ordre de 100 à leur premier point de maillage. La figure 3.27 montre l'évolution de la vitesse adimensionnelle en fonction de la distance de la frontière. Le maillage semble avoir capturé une couche limite laminaire jusqu'à $y^+ = 230$, et vient ensuite la zone logarithmique. Ces résultats sont étonnants car la zone laminaire est censée (comme en 2D) finir vers $y^+ = 5$, et la zone logarithmique commencer vers $y^+ = 30$, donc avant même le premier point de maillage. La couche limite n'est donc pas bien résolue, comme attendu. L'impact de cette non-résolution sur les efforts calculés est discuté dans la section 3.6.

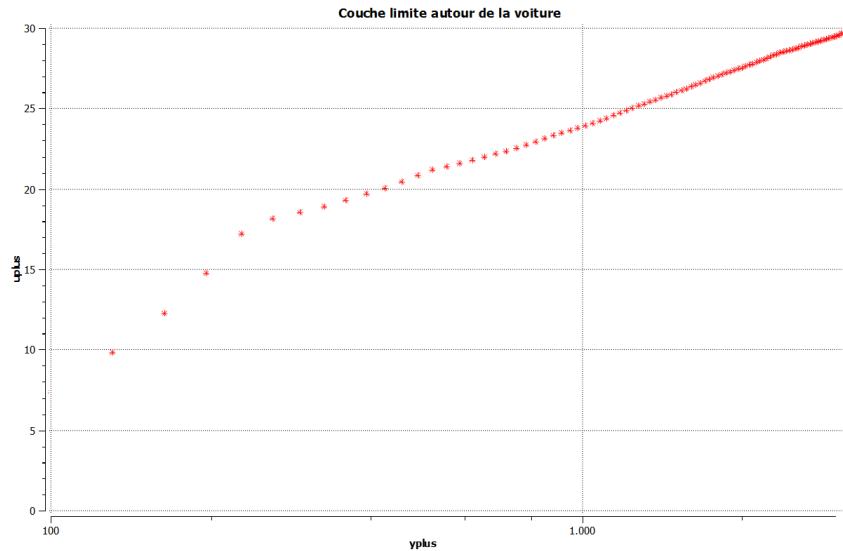


FIGURE 3.27 – Capture de la couche limite par le maillage

3.6 Convergence spatiale

Comme expliqué dans la section 3.2, la puissance de calcul limite le nombre d'élément du maillage 3D à des valeurs entre 5 et 6 millions. Une simulation avec plus d'éléments a cependant été faite pour voir l'impact qu'un raffinement du maillage a sur les résultats obtenus. La couche limite, ainsi que le maillage surfacique de la voiture et de la bâche ont donc été raffinés, menant à un maillage quasiment deux fois plus dense.

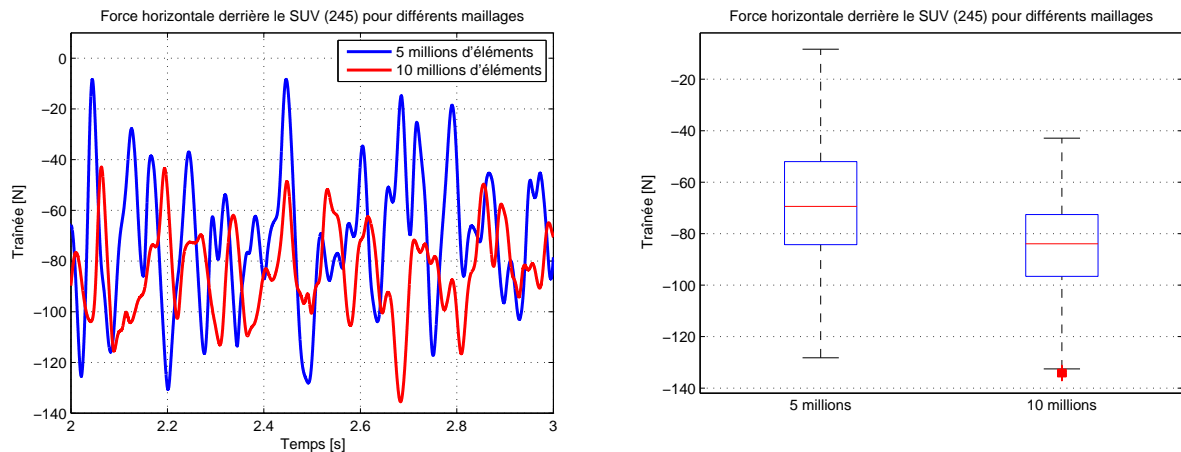


FIGURE 3.28 – Comparaison de la traînée du vélo pour les deux maillages

Contrairement aux analyses 2D, les efforts calculés ont des différences notables lorsque le maillage est raffiné (figure 3.28). Cependant le comportement des efforts calculés est similaire. La moyenne de la traînée est plus petite d'environ 14 N (-16%) pour le maillage plus fin. Des valeurs d'erreurs relatives très similaires sont trouvées pour la portance (-18%) et le moment de force (-16%). L'ajout relatif de traînée totale est de $+2.9\%$ lorsque le maillage est raffiné, comparé à $+3.6\%$ obtenus avant, soit une erreur de -0.7% .

Des différences similaires sont donc très probables dans les autres simulations.

Chapitre 4

Comparaison entre 2D et 3D

Les efforts calculés dans une simulation en deux dimensions sont par mètres de profondeur. Multiplier les forces et moments calculés en 2D sur le vélo par sa longueur (1.71m), ainsi que la traînée de chaque voiture par sa propre largeur devrait donc produire des résultats proches de ceux calculés en 3D. La figure 4.1 compare les traînées calculées du SUV (seul) à titre d'exemple, mais les autres efforts produisent des graphes très similaires à celui-ci.

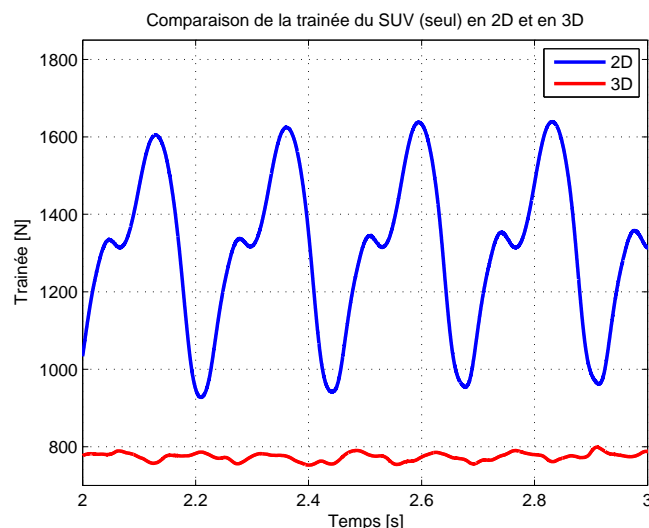


FIGURE 4.1 – Force horizontale subie par le SUV, en 2D et 3D

La première chose qui saute aux yeux est la différence d'amplitude des efforts entre les résultats 2D et 3D. La traînée calculée en 2D varie entre 930 et 1640 N quatre fois par seconde, alors que celui calculé en 3D, qui oscille entre 750 et 800 N, est beaucoup plus stable. Cette différence énorme entre amplitudes calculées en 2D et en 3D se retrouve dans toutes les simulations, pour tous les efforts calculés. Mais qu'en est-il des moyennes de ces signaux ? Les figures 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5 les comparent, et les différences ne sont pas négligeables.

En ce qui concerne la portance moyenne du vélo, l'erreur entre les simulations 2D et 3D va de 10^{-2} à 26 N pour le SUV, de 8 à 14 N pour la citadine et de 33 à 60 N pour la berline. Pour le SUV la différence entre les deux moments de force calculés va de 35 à 75 Nm, pour la citadine de 16 à 96 Nm, et pour la berline de 330 à 365 Nm. Pour la traînée moyenne du vélo, l'erreur se situe entre 31 et 116 N pour le SUV, entre 125 et 218 N pour la citadine et entre 777 et 846 N pour la berline. La force horizontale et le moment de force sont toujours, et en particulier pour la berline, surestimés par les simulations 2D.

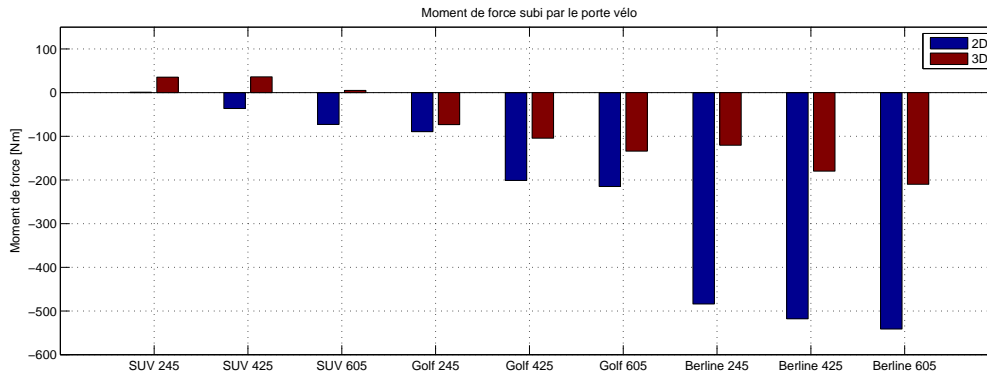


FIGURE 4.2 – Comparaison du moment de force moyen en 2D et 3D pour tous les cas

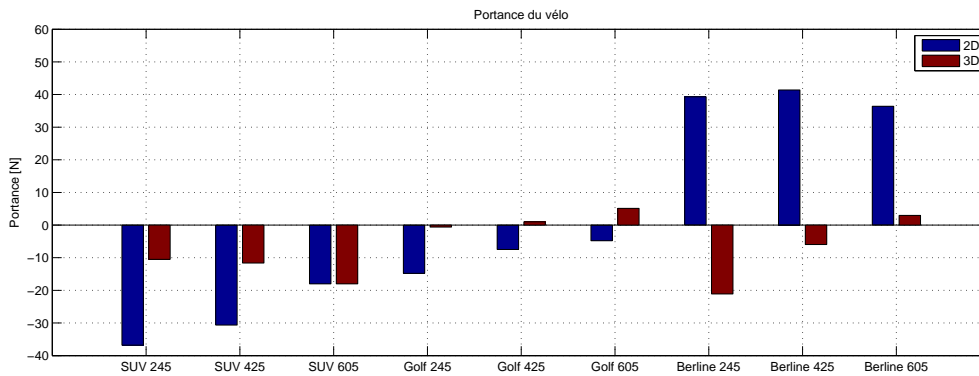


FIGURE 4.3 – Comparaison de la portance moyenne en 2D et 3D pour tous les cas

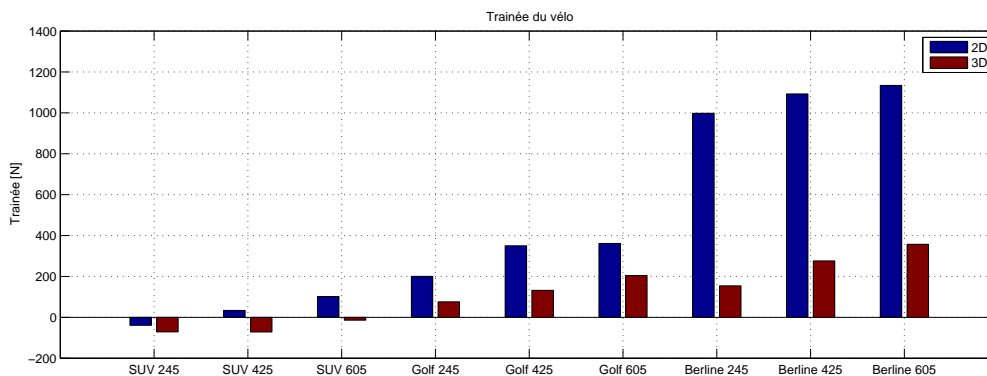


FIGURE 4.4 – Comparaison de la traînée moyenne du vélo en 2D et 3D pour tous les cas

Comme mentionné dans la section 3.4.1, la traînée totale du véhicule est bien plus réaliste en 3D qu'en 2D. Il paraît en effet peu réaliste que l'ajout d'un vélo muni d'une housse de protection derrière un SUV ou une citadine augmente sa pénétration dans l'air, et donc diminue sa traînée. De plus, les simulations en deux dimensions semblent toujours surestimer cette traînée totale, comme la figure 4.5.

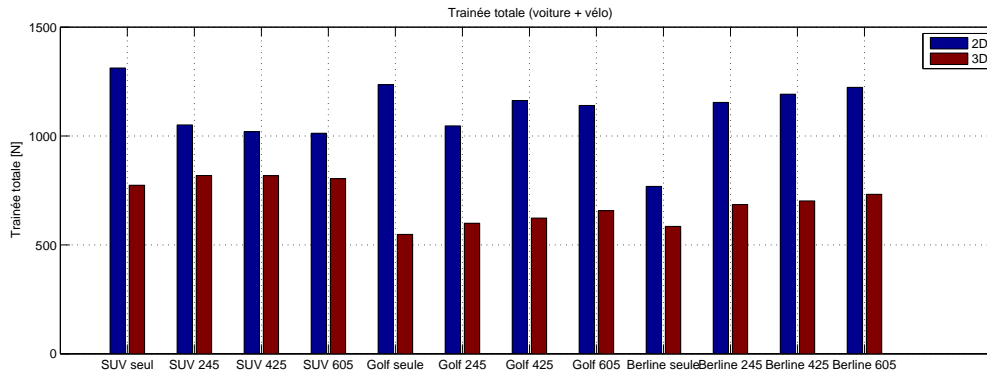


FIGURE 4.5 – Comparaison de la traînée totale moyenne en 2D et 3D pour tous les cas

Cette comparaison permet de dégager plusieurs résultats.

Premièrement les simulations d'écoulement en deux dimensions surestiment énormément le caractère oscillatoire des efforts en jeu, comme le montre la figure 4.1. Une oscillation pareille de la traînée de la voiture, dont l'amplitude "peak to peak" vaut 54.2% de sa moyenne, paraît irréaliste. Cette amplitude calculée en 3D ne vaut que 6.5% de sa moyenne, ce qui est bien plus concevable.

Ensuite les moyennes des efforts calculés sont très différentes en 2D et en 3D. Si pour le SUV les valeurs restent relativement proches, pour la citadine et surtout pour la berline les moyennes des efforts divergent, allant jusqu'à tripler entre les deux types de simulations.

Seules les évolutions de ces moyennes en regard des paramètres semblent justes, comme la traînée et le moment de force sur le porte-vélo augmentant avec la distance coffre-vélo. Cependant toutes les tendances ne sont pas justes. En effet l'intuition veut que l'ajout d'un vélo derrière n'importe quel modèle de voiture augmente sa traînée totale. Ce résultat est obtenu avec les simulations 3D mais pas 2D.

Il peut donc être conclu que l'écoulement étudié, pour tous les cas simulés, est trop complexe que pour être approximé à un écoulement en deux dimensions. Les géométries des voitures et de la housse de protection du vélo ne sont pas assez larges et ne permettent donc pas l'hypothèse d'une profondeur infinie. En deux dimensions, l'air entre la voiture est contraint à sortir vers le haut ou le bas, alors qu'en trois dimensions il peut contourner la bache par tous ses côtés, ce qui limite énormément les efforts que subit le porte-vélo.

Conclusion

Lors du transport d'un vélo muni d'une housse de protection derrière une voiture, un écoulement instationnaire se forme. Celui-ci applique une force verticale (portance), horizontale (traînée) et un moment de force sur le porte-vélo. La présence du vélo augmente aussi la traînée totale du véhicule.

	SUV		Citadine		Berline	
	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude
Moment [Nm]	4.4	≈ 23	-73.7	≈ 14	-120.6	≈ 5
Traînée [N]	-11.5	≈ 60	75.3	≈ 31	154.1	≈ 13
Portance [N]	-18.9	≈ 19	-0.5	≈ 10	-21.3	≈ 4
Traînée totale	+3.6%		+9.2%		+17.2%	

Voici un tableau quantifiant ces différents efforts lorsque le vélo est mis à la position optimale (minimisant les forces et moments) derrière chaque voiture. Un moment positif ayant tendance à rapprocher le vélo de la voiture et un moment négatif à l'en éloigner, une traînée positive tire le vélo en arrière et une portance positive pousse celui-ci vers le haut.

Premièrement, le modèle de la voiture influe énormément sur les efforts en jeu, comme le montre ce tableau. Les efforts sont les plus faibles derrière le SUV, qui est plus grand. Un effet d'aspiration est même observable derrière celui-ci, contrairement à la citadine et la berline.

La présence du vélo derrière chaque voiture diminue toujours son aérodynamisme, allant d'un impact très modéré pour le SUV à une traînée supplémentaire conséquente pour la berline.

La berline semble donc la moins adaptée au transport d'un vélo bâché. En plus d'avoir de gros efforts à soutenir par le porte-vélo, son ajout relatif de traînée totale la fera consommer plus.

Ensuite, les différentes positions proposées sur les porte-vélos ont une grande incidence sur les efforts que doit soutenir le porte-vélo. Pour la berline et la citadine la position optimale est celle qui est la plus proche du coffre de la voiture, alors que pour le SUV c'est la plus éloignée. Le fait de mettre le vélo à la position la plus éloignée au lieu de la plus proche fait augmenter la force horizontale et le moment de force que subit le porte-vélo de respectivement 170% et 82% pour la citadine, ainsi que 132% et 74% pour la berline. Mettre le vélo au plus proche du SUV fait augmenter la force horizontale de 516% et le moment de 718%, ces efforts restant très faibles. Pour ces "pires" positions, l'ajout relatif de traînée totale du véhicule monte à 5.6% pour le SUV, 20.5% pour la citadine et 25.2% pour la berline.

Ces résultats sont le fruit de simulations qui ne sont pas parfaitement convergées spatialement, ce qui fait qu'une erreur de plus de 18% est possible sur les efforts, et 0.7% sur l'ajout relatif de traînée totale. Cette erreur ne prend pas en compte les approximations engendrées par les géométries approximatives des véhicules et l'hypothèse de la bâche rigide.

Dans un autre registre, ce travail a permis de se rendre compte qu'un écoulement aussi complexe que celui-ci ne peut être étudié uniquement avec des simulations en deux dimensions. Celles-ci, même si elles permettent des résultats rapides, ne produisent pas de résultats assez réalistes.

Bibliographie

- [1] JM McDonough. Introductory lectures on turbulence physics, mathematics and modeling. 2004.
- [2] Ansys Fluent. 12.0 theory guide. *Ansys Inc*, 5, 2009.
- [3] David C Wilcox. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA journal*, 26(11) :1299–1310, 1988.
- [4] Fiche technique : Toyota corolla le eco cvt 2016. <https://www.auto123.com/fr/vehicules-neufs/caracteristiques/toyota/corolla/2016/base/le-eco-cvt/>.
- [5] Galerie images audi sq5 tdi (2013) dimensions. http://audi.q5.free.fr/FR/AUDI_SQ5_TDI_2013/Galerie_FR_Audi_SQ5_TDI_2013_Dimensions_.php.
- [6] Vw golf sizes and dimensions guide. <https://www.carwow.co.uk/blog/vw-golf-dimensions-334>.
- [7] Ansys Fluent. 12.0 user’s guide. *Ansys Inc*, 6, 2009.

