



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche Scientifique**  
**Université de Tissemsilt**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences et de la Technologie**



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique en

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : **Installations énergétiques et turbomachines**

Présentée par : SAFIR M'hamed

**Thème**

---

**SIMULATION AERODYNAMIQUE D'UNE VOITURE**  
**AVEC PLUSIEURS D'ANGLE D'ATTAQUE**

---

Soutenu le, .....

**Devant le Jury :**

TRARI tayeb	Président	M.A.A	Univ-Tissemsilt
FERNINI Brahim	Encadreur	M.C.A	Univ-Tissemsilt
KAHIL Yacine	Examineur	M.C.B	Univ-Tissemsilt

**Année universitaire : 2020-2021**



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche Scientifique**  
**Université de Tissemsilt**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences et de la Technologie**



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme

de Master académique en

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : *Installations énergétiques et turbomachines*

Présentée par : SAFIR M'hamed

**Thème**

---

**SIMULATION AERODYNAMIQUE D'UNE VOITURE**  
**AVEC PLUSIEURS D'ANGLE D'ATTAQUE**

---

Soutenu le, .....

**Devant le Jury :**

TRARI tayeb	Président	M.A.A	Univ-Tissemsilt
FERNINI Brahim	Encadreur	M.C.A	Univ-Tissemsilt
KAHIL Yacine	Examineur	M.C.B	Univ-Tissemsilt

**Année universitaire : 2020-2021**

## **Remerciements**

Je tiens à remercier Mr. Brahim Fernini pour m'avoir offert la chance de travailler sur ce sujet intéressant ainsi que pour toute son aide le long du travail. Un grand merci à Mr. Zakaria Rahmani pour son aide précieuse et son accompagnement. Je remercie aussi les membres du jury pour avoir pris le temps d'examiner ce travail.

Merci à toute ma famille et spécialement à mes parents qui se sont démenés comme ils ont pu pour mettre à ma disposition les moyens nécessaires pour travailler et réussir.

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère et mon honorable père pour leur soutien, leur aide,

Leur patience et leur amour.

Mes sœurs

A tous mes enseignants chacun par son nom

Toute ma famille

Tous mes amis

A tous mes collègues chacun par son nom

A chaque personne qui m'a aidée.

التصميم الصناعي وتصميم السيارة بدءًا من احتياجات أولية معينة وباستخدام البيانات الإحصائية مع احترام المعيار في ال Solidworks.

لقد صممنا التكوين الديناميكي الهوائي النهائي الذي فرضته القيود الديناميكية الهوائية والهيكلية وقيود الاستقرار. هذه متناقضة بشكل عام ، ومن هنا تأتي الحاجة إلى حل وسط بين المعلمات المختلفة. يحتوي تكوين السيارة الذي تم تحقيقه على هامش ثابت مرادف للاستقرار الجيد. أتاح حساب ومحاكاة الأداء النهائي تحديد موقع التصميم ضمن هوامش مقبولة وفقًا للبيانات الإحصائية.

### Résumé :

Dans ce projet, nous avons proposé une méthode de conception industrielle et de conception automobile, partant de certaines exigences initiales, utilisant des données statistiques, tout en respectant les normes correspondantes de SolidWorks.

Nous avons conçu la configuration aérodynamique finale imposée par les contraintes aérodynamiques, structurelles et de stabilité. Ceux-ci sont généralement contradictoires les uns aux autres, il y a donc un compromis entre différents paramètres.

La configuration de voiture obtenue présente une marge statique synonyme de bonne stabilité. Le calcul et la simulation des performances finales permettent de situer la conception dans une fourchette acceptable basée sur des données statistiques.

### Abstract :

In this project, we have presented a method of industrial design and the design of a car starting from some initial needs and using statistical data while respecting the corresponding solidworks standard.

We designed the final aerodynamic configuration imposed by aerodynamic, structural and stability constraints. The latter are generally contradictory, hence the need for a compromise between the different parameters.

The realized car configuration has a static margin of one synonymous with good stability. The calculation and simulation of the final performances allowed to locate the design in acceptable margins according to the statistical data.

## SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

### CHAPITRE I : Introduction générale

Introduction générale .....1

### CHAPITRE II: Généralité sur l'aérodynamique des voitures

II.1- Généralité sur l'aérodynamique des voitures .....4

II.2- Objectif de l'aérodynamique.....4

II.3- Historique de l'aérodynamique et l'évolution de l'automobile .....5

II.4- Historique des coefficients de traînée aérodynamique .....5

### CHAPITRE III : RAPPEL THEORIQUE SUR L'AERODYNAMIQUE

DES VOITURE

III.1- Introduction sur l'aérodynamique de la voiture .....11

III.2-Différents type d'écoulements . .....11

III.2.1- Écoulement laminaire .....11

III.2.2- Écoulement turbulent . .....12

III.2.3- Écoulement tourbillonnaire .....12

III.3 - Les forces aérodynamiques sur une voiture.....14

III.3 - 1- La force de portance : .....15

III.3 - 2- La force de traînée ..... 15

III.3 - 3- La forme de force de traînée et leur composante .....16

III.4- Les différent effet qui affecté sur l'aérodynamique sur une voiture .....16

III.4- 1- L'évolution de la mesure de  $C_x$  .....16

III.4 -2- les points critiques qui exerce une pression sur la carrosserie du  
véhicule .....17

III.4 -3- Propriété physiques de l'air .....18

III. 4.3.1- L'air est compressible .....18

III.4.3.2- L'air est expansible .....18

III.4.3.3- L'air est élastique ..... 18

III.4.3.4- L'air est pesant..... 18

III.4 -4- les différents types de traînées ..... 20

III.5- Bases théoriques de la mécanique des fluides ..... 20

III.5-1- La loi de Bernoulli.....	20
III.5-2-les efforts et les moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule .....	21
III.5-3- Comparaison entre les Classements du meilleur SCx .....	22
III.6- Résumé.....	23

#### CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION

IV.1- Introduction .....	25
IV.2 - L’outil éteule pour la simulation .....	25
IV .2.1- les différents D'angle utilisé pour approfondir les notions évoquées .....	25
IV.3 - Les étapes de la conception d’une voiture avec solidworks .....	26
IV.3.1- Tableau 1 - Les paramètres de simulation .....	26
IV.3.2 - Les étapes de la conception .....	27
IV.4 - Les défirent d’angle d’attaque -37°-24°-15.55°-10° .....	35
IV.4.1- Forme d’un Angle -37° .....	35
IV.4.2- Forme d’un Angle -24° : H=1430mm.....	42
IV.4.3- Forme d’un Angle -15.55° : H=1220mm.....	49
IV.4.4- Forme d’un Angle -10° :1185mm .....	56
Conclusion Générale .....	64
Bibliographie.....	66

## LISTES DES FIGURES

Figure 2.1- Représentation les forces l'aérodynamique des voitures (à droite) Source, (course en cours). .....	4
Figure 2.2 - 1769 Le Fardier de Cugnot . .....	6
Figure 2.3 - 1854 La diligence à vapeur.....	6
Figure 2.4 - L'industrialisation (1908 – 1941).....	7
Figure 2.5 - 1997 Le SUV.....	7
Figure 2.6 - 2012 La Renault Zoé.....	8
Figure 2.7 - 2015 La Toyota Mirai.....	8
Figure 2.8 - Evolution du coefficient de traînée au fil des années passés . .....	9
Figure 2.9 - Evolution du coefficient de traînée en fonction de 3 formes de calandre.....	9
Figure 3.1 - Écoulement laminaire.....	11
Figure 3.2 - Écoulement turbulent.....	12
Figure 3.3 - Écoulement tourbillonnaire. ....	12
Figure 3.4 - Résistance de l'air. ....	12
Figure 3.5 - Résistance quasi nulle.....	13
Figure 3.6 - Résistance 100 % .....	14
Figure 3.7 - Résistance 75 %.....	14
Figure 3.8 - Forces aérodynamiques sur une voiture .....	14
Figure 3.9 –Le Facteur influente.....	15
Figure 3.10 - Schéma des forces s'opposant au mouvement d'un véhicule .....	16
Figure 3.11 - ordre de grandeurs de Cx pour des formes classique. ....	17
Figure 3.12 - Distribution typique de pression autour d'un véhicule d'après Happian..	17
Figure 3.13 - pression statique PS .....	18
Figure 3.14 - pression dynamique PD.....	19
Figure 3.15- les vitesse relatifs .....	19
Figure 3.16-les couches du fluide. ....	19
Figure 3.17 - Relation entre la section et la vitesse d'un fluide en mouvement .....	20
Figure 3.18 : Définition des efforts et moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule .....	21
Figure 4.1 – la forme 1 cas $37^0$ .....	26
Figure 4.2 – la forme 1 cas $24^0$ .....	26
Figure 4.3 – la forme 1 cas $15.55^0$ .....	26
Figure 4.4 – la forme 1 cas $10^0$ .....	26
Figure 4.5 - dessin technique de voiture .....	27

Figure 4.6 - la forme d'une fonction volumique en extrudant .....	27
Figure 4.7 - la forme après la symétrie de volumique en extrudant .....	28
Figure 4.8 - la forme après enlève la matière de volumique en extrudant.....	28
Figure 4.9 - la forme après enlève la matière a cage roue de volumique en extrudant....	29
Figure 4.10 - la forme après enlève la matière a les feux du route de volumique en extrudant .....	29
Figure 4.11 - la forme d'une fonction volumique en extrudant de feux arrière .....	30
Figure 4.12 - la forme après enlève la matière a les calandres de volumique en extrudant .....	30
Figure 4.13 - la forme final .....	31
Figure 4.14 - dessin technique de roue avec la lancement de Bose avec révolution .....	31
Figure 4.15 - le perçage .....	32
Figure 4.16 - bossage extrudé a l'intérieur.....	32
Figure 4.17 - bossage extrudé a l'intérieur avec le perçage.....	33
Figure 4.18 - la forme final roue .....	33
Figure 4.19 - L'assemblage .....	34
Figure 4.20 - la forme final de la voiture .....	34
Figure 4.21 - Modèle d'un voiture avec Solidworks a un angle de 37° .....	35
Figure 4.22 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 37° .....	35
Figure 4.23 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....	36
Figure 4.24 - Résultat de calcule les objectif des équations .....	36
Figure 4.25 - Model des lignes de courant avec effet de pression .....	37
Figure 4.26 - Model des lignes de courant avec effet de vitesse axe(Y) .....	37
Figure 4.27 - Model des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z) .....	38
Figure 4.28 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d'itérations.....	38
Figure 4.29 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations.....	39
Figure 4.30 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....	39
Figure 4.31 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....	40
Figure 4.32 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....	40
Figure 4.33 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....	41
Figure 4.34 - Modèle d'un voiture avec Solidworks a un angle de 24°.....	42
Figure 4.35 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 24° .....	42

<b>Figure 4.36 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 4.37 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 4.38 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 4.39 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z) .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 4.40 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y) .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 4.41 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 4.42 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 4.43 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 4.44 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 4.45 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 4.46 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 4.47 - Modèle d'un voiture avec Solidworks a un angle de 15.55°.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 4.48 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 15.55° .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 4.49 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>50</b>
<b>Figure 4.50 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>50</b>
<b>Figure 4.51 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 4.52 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y) .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 4.53 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z) .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 4.54 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 4.55 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure 4.56 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure 4.57 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 4.58 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 4.59 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 4.60 - Modèle d'une voiture avec Solidworks a un angle de 10°.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 4.61 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 37° .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 4.62 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure 4.63 - Résultat de calcul des équations des objectifs .....</b>	<b>57</b>

<b>Figure 4.64 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure 4.65 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y) .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure 4.66 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z) .....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 4.67 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 4.68 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure 4.69 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations .....</b>	<b>60</b>
<b>Figure 4.70 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itération .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 4.71 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itération.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 4.72 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itération .....</b>	<b>62</b>

## **LISTES DES TABLEAUX**

**Tableau IV .1- Les paramètres de simulation .....22**

**Tableau III .1 - Classement du meilleur .....23**

## NOMENCLATURE

$P_D$	Pression dynamique [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$F$	force [N]
$T$	température
$C_x$	Coefficient de traînée aérodynamique
$C_y$	Coefficient de dérive aérodynamique
$C_z$	Coefficient de portance aérodynamique
$V$	Vitesse (m .s)
$P$	Coefficient de pression statique
$S_\infty$	le maître couple
$G$	Centre de gravité du véhicule
$l_A$	Largeur du corps (mm)
$l_o$	Longueur de corps (mm)
$P_{i0}$	Pression totale de l'écoulement incident [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$P_i$	Pression totale de l'écoulement aérodynamique [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$P_0$	Pression statique de l'écoulement au repos (=101325 Pa)
$S$	Surface d'un objet
$\rho$	Masse volumique de l'air [=1.225 $\text{kg/m}^3$ ]
$P$	Préssion [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ]
$A$	le point d'application de la résultante
$M_x$	le roulis,
$M_y$	le tangage
$M_z$	le lacet.
$U_\infty$	la vitesse de déplacement du véhicule,

# **INTRODUCTION GENERAL**

## Introduction générale

L'aérodynamique est l'une des branches de la mécanique des fluides qui étudie l'action de l'air en mouvement sur un obstacle et qui intervient essentiellement dans la conception des objets en mouvement tels que les avions, les missiles, les voitures et les turbomachines.

En d'autres termes, tant que l'objet et l'air environnant se déplacent l'un par rapport à l'autre, ces phénomènes se produiront. Le corps peut se déplacer dans un fluide stationnaire (la voiture est sur la piste) ou bien le fluide non stationnaire entoure d'un corps fixe dans un soufflerie

Les phénomènes physiques, comme les écoulements transsoniques bien qu'ils ont toujours été un domaine fascinant et d'une importance capitale aussi bien en théorie que dans les domaines expérimentaux et industriels, posent des problèmes mathématiques complexes difficiles. Ainsi les résultats actuels ne concernent que des cas où de tels problèmes physiques sont modélisés de façon très simplifiée.

Mais les méthodes numériques développées à partir de ces analyses sont de plus en plus performantes et fournissent de nouveaux outils d'aide à la compréhension et à l'interprétation des différents phénomènes qui peuvent survenir dans les écoulements des fluides compressibles.

En générale, le comportement physique des écoulements de fluides compressibles est très complexe par rapport aux écoulements incompressibles. Ces écoulements peuvent se rapporter aussi bien aux fluides visqueux qu'aux fluides non visqueux.

L'écoulement compressible non visqueux est étudié par l'utilisation des équations de potentiel ou d'Euler, par contre les écoulements compressibles visqueux sont résolus par les équations de Navier Stokes.

La création de l'onde de choc dans les écoulements compressibles correspondant à une certaine valeur du nombre de Mach et elle exige une attention spéciale dans le choix de la méthode numérique qui converge vers une meilleure solution.

L'aérodynamique compressible se subdivise en aérodynamique subsonique à Mach compris entre 0.2 et 0.6, transsonique à Mach compris entre 0.7 et 1.2, supersonique à Mach entre 1.2 et 5 et hypersonique au-delà de la valeur de 5.

L'un des points essentiels dans l'aérodynamique, consiste à étudier les écoulements transsoniques, comme c'est le cas d'un écoulement autour d'un profil d'aile.

En régime transsonique, l'air est accéléré à une vitesse proche ou supérieure à la vitesse du son, (typiquement avec des nombres de Mach de  $M = 0.6$  ou  $0.7$  à  $1.2$ ) créant des ondes de choc au niveau de l'aile. Une onde de choc, est une zone très mince de compression, correspond à une brusque variation des paramètres physiques du système aile flux d'air, tels que la densité, la température, et surtout, pour notre étude, la pression.

L'interaction de l'onde de choc et la couche limite turbulent dans l'écoulement compressible visqueux constitue l'un des phénomènes physiques les plus importants. et qui ne considèrent la vitesse de l'air que dans l'intervalle de  $[100\text{m/s} - 1700\text{m/s}]$  ce qui corresponde au nombre de Mach allant de  $0.3$  à  $5$ . Dans cet intervalle le fluide peut être considéré comme fluide en écoulement compressible non visqueux. Cet intervalle est subdivisé en trois parties correspondant chacune un type d'écoulement bien spécifique à savoir

L'écoulement subsonique  $[0.3 < M < 0.8]$

L'écoulement transsonique  $[0.8 < M < 1.2]$

L'écoulement supersonique  $[1.2 < M < 5]$  et au-delà c'est l'écoulement hypersonique

Dans un écoulement transsonique, la vitesse du fluide est proche de la vitesse du son. L'objet se déplace presque à la même vitesse que celle des perturbations. A cette vitesse, des phénomènes aérodynamiques particuliers apparaissent telle que l'interaction d'une onde de choc local avec la couche limite, comme le cas des écoulements autour de profils. Les études de ce type d'écoulement s'avèrent d'une grande importance.

Du point de vue théorique, la résolution des problèmes qui sont dus à ce type d'écoulement transsonique est assez complexe à cause de la combinaison de plusieurs problèmes non-linéaires

Les difficultés essentielles proviennent du passage du régime subsonique, au régime supersonique avec leur frontière inconnue à priori, de la présence de l'onde de choc dont la position sensible reste à déterminer, et enfin la couche limite qui est aussi un phénomène non linéaire, dont l'étude de son interaction avec l'onde de choc est devenu un objectif de recherche majeur . En effet, en écoulement transsonique, l'interaction de l'onde de choc avec la couche limite turbulente et le décollement qui en découlent sur l'extrados d'une aile induisent d'instabilités provoquant des vibrations de l'aile Ce phénomène va influencer sur les performances aérodynamiques. L'investigation sur ces performances et l'efficacité d'un élément de machine conduit à la recherche d'une configuration géométrique performante telle que l'intérêt d'un profil aérodynamique optimisé pour les aubes d'une éolienne, d'une turbine ou d'ailes pour l'aéronautique ou d'ailes des voitures. Ce domaine d'étude est bien riche vue le nombre de travaux.

## **CHAPITRE II:**

# **Généralité sur l'aérodynamique des voitures**

## II.1- Généralité sur l'aérodynamique des voitures :

Aérodynamique automobile Il s'agit de la science la plus récente dans le domaine de la mécanique, car les premières recherches numériques et/ou expérimentales remontent au 21e siècle. L'aérodynamique du mouvement du profil du roulement par rapport à son environnement a longtemps suscité l'intérêt des chercheurs, tant en termes de bases et d'applications, que numériques et expérimentales

La motivation profonde de cette recherche découle de la connaissance et de la détermination des propriétés aérodynamiques numériques et expérimentales à différents angles d'incidence, ainsi que de leur application à un grand nombre de problèmes pratiques dans les domaines les plus importants. Issu des domaines techniques les plus avancés des industries aéronautique et automobile. Parce qu'elle est limitée au domaine de l'aérodynamique pure, cette dernière catégorie de phénomènes constitue l'un des thèmes de prédilection de la plupart des recherches actuelles et de certains pays industriels

## II.2- Objectif de l'aérodynamique:

Parmi les buts et objectifs de l'aérodynamique figurent la détermination des forces et des moments sur des objets en mouvement dans des fluides ( par exemple, l'air),pour générer des forces et des moments de portance et de traînée sur les courbes de niveau, les ailes et fuselages d'avions, les capots et les hélices.

On peut également calculer les forces qui s'exercent sur les pales d'hélicoptère ou sur les éoliennes (machine à vent) à axe horizontal ou à axe vertical. On pourrait aussi s'intéresser, aux détails de l'écoulement dans le sillage d'un corps en mouvement, de l'écoulement associé aux tourbillons libres qui se détachent aux bouts des ailes d'un avion.

L'aérodynamique automobile est un science qui étudie les phénomènes aérodynamiques reliper par l'écoulement de l'air autour d'un véhicule en mouvement. et pour connaître les comportement de ces phénomènes permet entre autres, de réduire la consommation des véhicules en diminuant leur traînée, d'améliorer leur comportement routier en influant sur leur portance (ou leur déportance) et de diminuer les phénomènes aéro acoustiques ainsi que les turbulences à haute vitesse

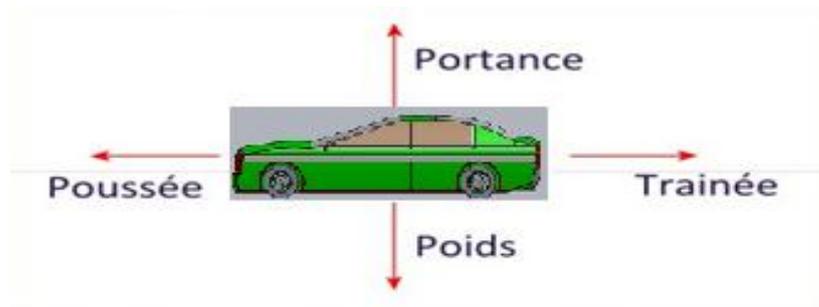


Figure 2.1- Représentation les forces l'aérodynamique des voitures (à droite).

Source, (course en cours)

La poussée ou plus exactement la force de poussée est le résultat de l'éjection des particules de gaz.

Tout le temps, la forme géométrique du véhicule, similaire à une aile d'avion, engendre une force qui tire vers le haut le véhicule. A grande vitesse, cette force opposée au poids, nommée la portance pose des problèmes d'adhérence. Ainsi pour éviter que le véhicule ne "décolle", on y place à l'avant et l'arrière des ailerons, véritables ailes à l'envers, pour garantir les appuis sur la piste.

Le déplacement du véhicule produit également des turbulences qu'on appelle "sillage" pour un bateau. Leur forme engendre une dépression à l'arrière du véhicule qui, par conséquent, le freine. On nomme cette force opposée à la poussée, la trainée.

Plus la vitesse est élevée et les surfaces sont grandes et plus la portance et la trainée affecteront le comportement du véhicule. Afin de concevoir des véhicules performants, on réalise des maquettes de prototypes que l'on testera en soufflerie à des vitesses allant jusqu'à 1200 km/h afin de valider ou modifier le profil du véhicule (automobiles ou aéronautiques). Les filets d'air glissent le long de la carrosserie, et bien que l'air soit invisible et d'une masse faible (1 litre d'air = 1,3g), il peut grandement impacter les performances du véhicule si celui ne pénètre pas dans l'air avec efficacité, autrement dit, s'il n'est pas aérodynamique généralement référence au  $S_x$   $C_x$  des véhicules. Pour une même vitesse, compte tenu de la surface de projection, la valeur peut être directement liée à la résistance. Cette valeur peut varier de 0,6 pour les véhicules compacts à 0,8 pour les SUV ou monospaces. [2]

### **II.3- Historique de l'aérodynamique et l'évolution de l'automobile :**

La voiture est une grande invention qui a entraînée d'importants changements sociaux et économiques pour l'humanité. Découvre avec moi l'évolution de l'automobile. Les ancêtres à vapeur (1769 – 1860)

D'abord, l'histoire de l'automobile a bien débuté avec des moteurs à vapeur plutôt que des moteurs à pétrole. Les premiers à imaginer et à concevoir des véhicules "automobiles" se sont basés sur la machine à vapeur. Cette technologie se développe au 18<sup>ème</sup> siècle notamment grâce aux travaux de James Watt en Angleterre. [1]

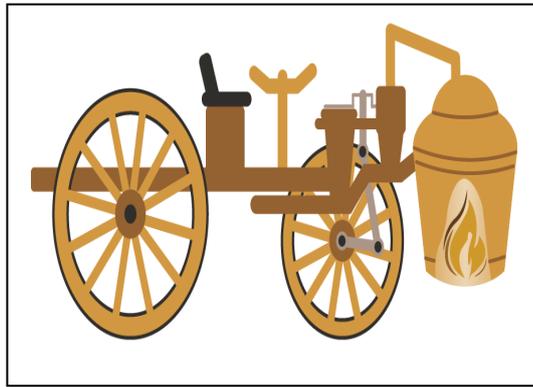


Figure 2.2 - 1769 Le Fardier de Cugnot :[1]

### 1769 Le Fardier de Cugnot :

L'ingénieur militaire français, Nicolas-Joseph Cugnot a créé en 1769 un engin destiné à remplacer les attelages de l'Artillerie en campagne. C'est le premier véhicule qui n'utilise pas l'énergie musculaire animale car on utilisait principalement les chevaux à cette époque. Comme les chariots destinés à porter de lourdes charges, on nomme cette machine "fardier". Il dispose de trois roues et d'une chaudière à charbon placée à l'avant de la roue motrice. Une deuxième version est réalisée en 1770 mais elle se heurte contre un mur lors de sa démonstration. On peut actuellement observer la troisième version au ([Conservatoire National des Arts et Métiers.](#))

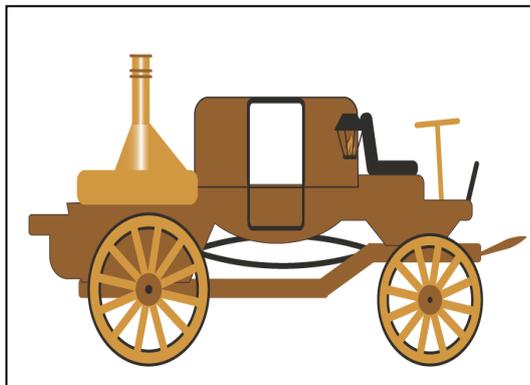


Figure 2.3 - 1854 La diligence à vapeur:[1]

### 1854 La diligence à vapeur :

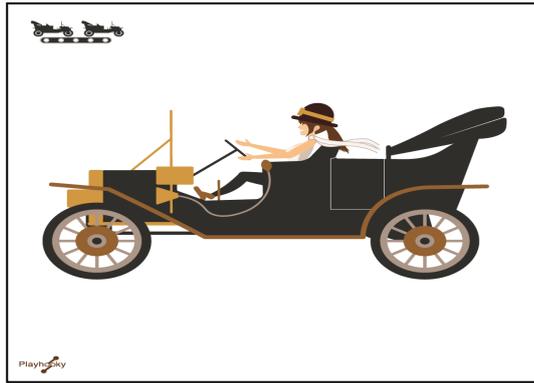
L'italien Virginio Bordino réalise ses premiers prototypes de voiture à vapeur entre 1835 et 1854.

À l'époque, les carrosses ou diligences s'appellent des "voitures".

Le troisième modèle de Bordino est présenté en 1854. Son autonomie avec 60 kg de charbon est de 2 heures tandis que sa vitesse peut atteindre 6 à 8 km/h.

Les nouvelles motorisations (1860 – 1900)

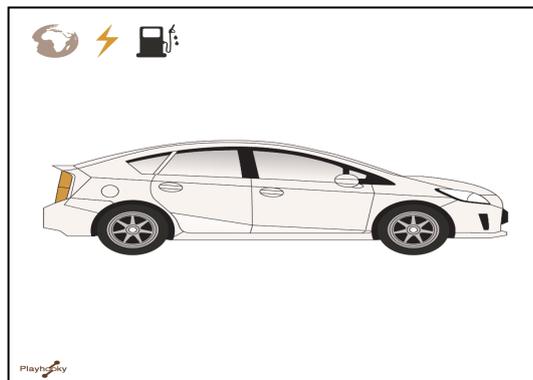
Les moteurs à vapeur ouvrent la voie mais finissent en échec car les "chaudières" sont trop lourdes et ont un faible rendement énergétique. À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les ingénieurs se lancent



**Figure 2.4 - L'industrialisation (1908 – 1941)**

### **L'industrialisation (1908 – 1941) :**

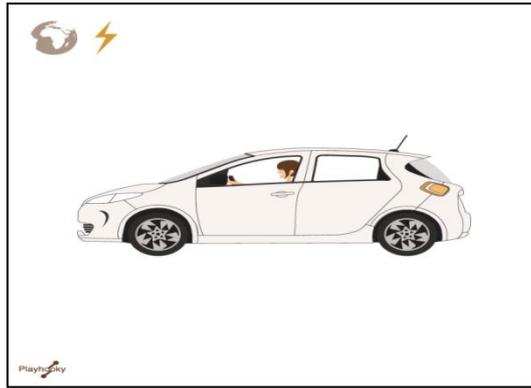
Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les véhicules à vapeur trop lourds sont peu à peu abandonnés au profit de nouveaux moteurs à essence et électrique. Malgré leur faible autonomie et leur coût, les voitures électriques semblent avoir du succès parce qu'elles sont faciles à démarrer et ne produisent pas de fumée. En 1900, une voiture sur trois ( $\frac{1}{3}$ ) dans le monde est propulsée par l'électricité. Pourtant, les moteurs à essence l'emporteront pour des raisons économiques et industrielles.



**Figure 2.5 - 1997 La Toyota Prius:[1]**

### **1997 La Toyota Prius :**

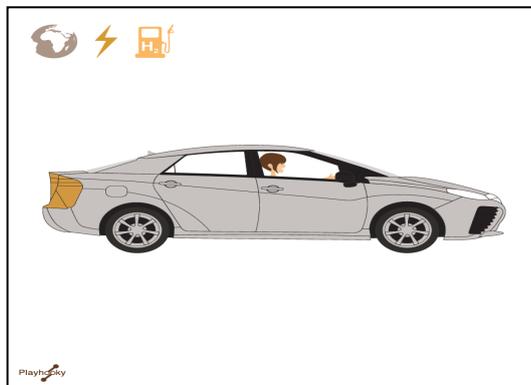
Déjà consciente des enjeux environnementaux (épuisement du pétrole, réchauffement climatique), l'entreprise japonaise Toyota commercialise son premier modèle hybride : la Prius. C'est une automobile qui possède deux moteurs (thermique et électrique). L'intérêt repose dans la récupération de l'énergie mécanique lors des freinages pour recharger la batterie. Le moteur électrique est seulement utilisé à moins de 50 km/h. Même si l'énergie reste de l'essence, les véhicules hybrides en ont une faible consommation. Il existe aussi une version rechargeable sur prise électrique.



**Figure 2.6 - 2012 La Renault Zoé:[1]**

### **2012 La Renault Zoé :**

La Renault Zoé est également présentée dès 2009 comme concept-car au Salon de l'Automobile de Francfort. Sa commercialisation débute en 2012. Il s'agit d'une petite berline compacte à traction 100% électrique. Elle est équipée d'une batterie offrant une autonomie allant de 100 à 150 km. Son moteur électrique est une machine synchrone à rotor bobiné d'une puissance de 65 kW soit 88 chevaux. La Zoé évolue en 2019 afin d'améliorer son autonomie (390 km) et sa puissance (100 kW).



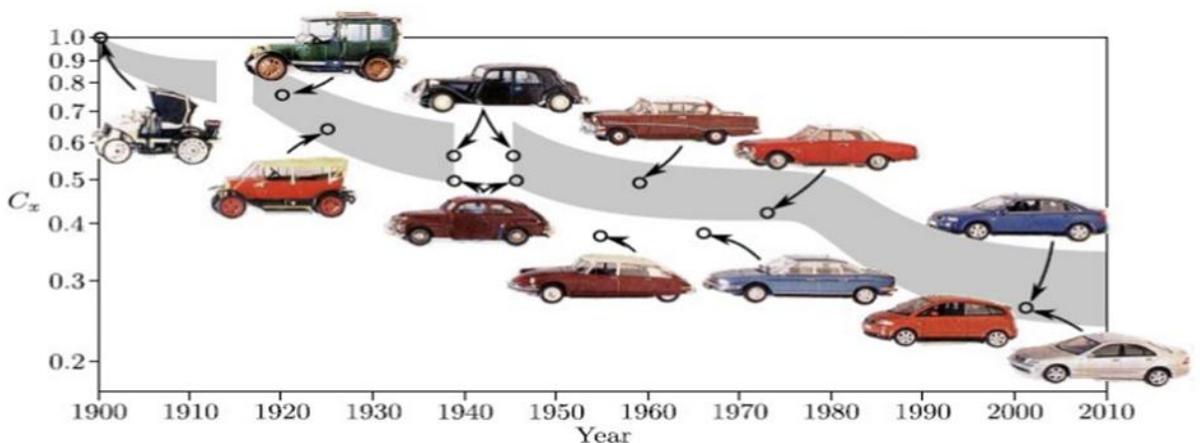
**Figure 2.7 -2010 La Toyota Mirai:[1]**

### **2015 La Toyota Mirai :**

Enfin, la Mirai est la première voiture à hydrogène ( $H_2$ ) de Toyota mais est surtout le premier véhicule à hydrogène produit à grande échelle. Elle est équipée d'une pile à combustible de 114 kW (soit 155 chevaux) permettant de transformer l'hydrogène en électricité et d'une batterie électrique de 1,6 kWh. Son moteur électrique offre une puissance de 113 kW (soit 154 chevaux) et 335 Nm de couple. La Mirai a besoin de stations à hydrogène pour être ravitaillée et n'émet pas de  $CO_2$ .

**II.4- Historique des coefficients de traînée aérodynamique :**

En France, la volonté de développer un savoir-faire aérodynamique et pondant la premier choc pétrolier (1974) en exploitant une soufflerie à l'échelle 1 à Saint Cyr l'Ecole. Aérodynamiciens et stylistes ont travaillé ensemble pour déterminer le meilleur compromis entre la forme de la voiture et le Cx. Le couple principal est réduit, l'angulaire (type R8) cède la place au type rond (type Twingo), ... En 20 ans, le coefficient de traînée aérodynamique est réduit de 15 points (de 0,45 en 1970 à 0,30 en 1990) . Sous l'impulsion des pouvoirs publics, des démonstrateurs technologiques comme la Vesta (1982) et la Vesta 2 (1987) sont apparus pour Renault avec un Cx proche de 0,15, et une consommation inférieure à 3 l/100 km [3]

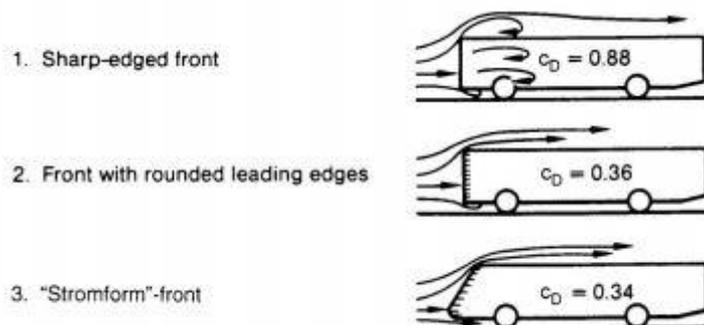


**Figure 2.8- évolution du coefficient de traînée au fil des années passés [2]**

**Ce n'est pas l'avant qui contribue le plus à la traînée...**

La géométrie avant d'une auto représente environ 3% de sa traînée totale. Les montants de baie autour du pare-brise représentent 5%. L'avant d'un véhicule n'est donc générateur que d'une partie très faible de la traînée.

Une calandre aux arêtes droites perturbe plus l'écoulement de l'air qu'une calandre aux arêtes arrondies. Finalement, le top est d'avoir une calandre inclinée pour s'opposer le moins possible à l'air. [12]



**Figure 2.9 - Evolution du coefficient de traînée en fonction de 3 formes de calandre [12]**

**CHAPITRE III :**  
**RAPPEL THEORIQUE SUR**  
**L'AERODYNAMIQUE DES**  
**VOITURE**

### III.1- Introduction sur l'aérodynamique de la voiture :

L'aérodynamique c'est un phénomène physiques, bien qu'ils ont toujours été un domaine fascinant et d'une importance capitale aussi bien en théorie que dans les domaines expérimentaux et industriels, posent des problèmes mathématiques complexes difficiles. Ainsi les résultats actuels ne concernent que des cas où de tels problèmes physiques sont modélisés de façon très simplifiée. Mais les méthodes numériques développées à partir de ces analyses sont de plus en plus performantes et fournissent de nouveaux outils d'aide à la compréhension et à l'interprétation des différents phénomènes qui peuvent survenir dans les écoulements des fluides compressibles. L'aérodynamique de ces fluides compressibles est l'une des branches de la dynamique des fluides qui porte sur l'étude et l'analyse de leurs effets sur les écoulements d'air par exemple, ainsi que sur les corps solides qu'ils entourent. La dynamique des fluides dans ce domaine vise à optimiser les conceptions des formes des profils de hautes performances aérodynamiques dans le domaine de l'aéronautique, dans les voitures etc.....

En générale, le comportement physique des écoulements de fluides compressibles est très complexe par rapport aux écoulements incompressibles. Ces écoulements peuvent se rapporter aussi bien aux fluides visqueux qu'aux fluides non visqueux. L'écoulement compressible non visqueux est étudié par l'utilisation des équations de potentiel ou d'Euler, par contre les écoulements compressibles visqueux sont résolus par les équations de Navier Stokes. La création de l'onde de choc dans les écoulements compressibles correspondant à une certaine valeur du nombre de Mach et elle exige une attention spéciale dans le choix de la méthode numérique qui converge vers une meilleure solution par exemple avec solidworks .

### III.2-Différents type d'écoulements :

On appelle Écoulement le déplacement de l'air par rapport à un objet. On distingue trois grands types d'écoulement. [5]

#### III.2.1- Écoulement laminaire :

Les particules d'air glissent parfaitement les unes sur les autres sans échanges de particules entre elles. Elles suivent un mouvement rectiligne et parallèle. [5]

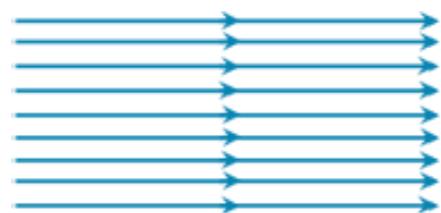


Figure 3.1 Écoulement laminaire [5]

### III.2.2- Écoulement turbulent :

Les particules d'air ont des trajectoires quasiment parallèles entre elles, mais qui ne sont plus rectilignes, tout en se déplaçant globalement dans le même sens à la même vitesse turbulent. [5]



Figure 3.2 Écoulement turbulent [5]

### III.2.3- Écoulement tourbillonnaire :

L'écoulement est très désordonné, les particules se mélangent et ne suivent ni une trajectoire rectiligne ni parallèle, et certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons turbulent. [5]

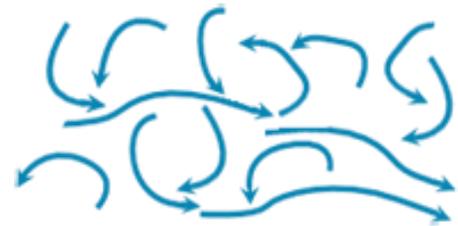


Figure 3.3 Écoulement tourbillonnaire. [5]

### A- Résistance de l'air :

Chaque corps en mouvement dans l'air est soumis de la part de celui-ci à une résistance qui tend à s'opposer à ce mouvement. Cette résistance a son origine dans les propriétés de l'air, mais dépend aussi des caractéristiques du corps concerné (surface, forme.).

Les forces de pression dépendent de la forme du corps et la disposition que celui-ci occupe par rapport à la direction de la vitesse relative du flux d'air.

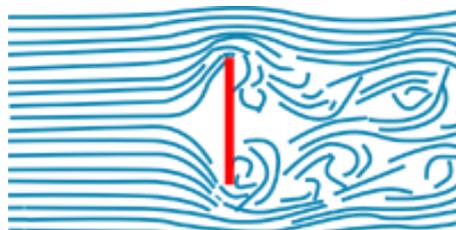


Figure 3.4 Résistance de l'air. [5]

Les forces de frottement, dues à la viscosité de l'air, ont un effet directement en rapport avec l'étendue de la surface du corps et aussi avec l'état de cette surface. En plaçant une

plaque plane perpendiculairement au flux d'air, nous constatons que l'air exerce une forte pression à l'avant, tandis qu'à l'arrière se forme une dépression.

En installant un appareil (dynamomètre) relié à la plaque, on peut mesurer cette force exercée par l'air et quels sont les facteurs qui vont la faire varier. [5]

### **B- Facteurs influençant la résistance de l'air :**

#### **-1-Aire**

Si on double l'aire de la plaque plane, la force mesurée par le dynamomètre double également : La résistance de l'air est proportionnelle à l'aire.

#### **-2- Vitesse**

En augmentant la vitesse de l'écoulement, la force exercée par l'air augmente elle aussi : La résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse

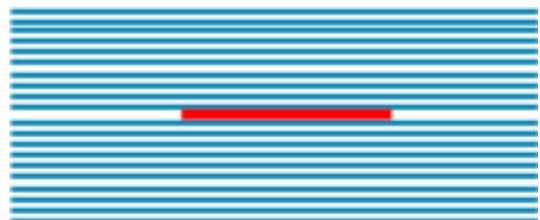
#### **-3- Masse volumique**

La densité de l'air diminue avec l'altitude, la résistance de l'air va diminuer également. On en déduit donc : La résistance de l'air est proportionnelle à la masse volumique de l'air.

### **C- Forme du corps :**

En installant un appareil (dynamomètre) relié à la plaque, on peut mesurer cette force exercée par l'air et quels sont les facteurs qui vont la faire.

Écoulement de l'air sur un disque plat de faible épaisseur disposé parallèlement aux filets d'air est le siège d'une résistance minimale due simplement au frottement de l'air sur les deux parois de la plaque. [5]



**Figure 3.5 - Résistance quasi nulle. [5]**

En mettant un disque plat perpendiculaire au flux d'air d'une soufflerie, nous constatons que l'écoulement de l'air peine à contourner l'obstacle et qu'il se forme une surpression à l'avant et une dépression à l'arrière avec effet tourbillonnaire. [5]

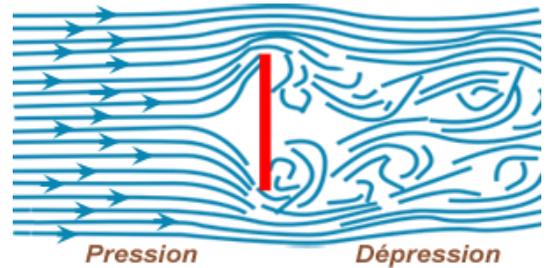


Figure 3.6 - Résistance 100 % [5]

En ajoutant une demi-sphère à l'avant du disque nous constatons que l'air contourne mieux l'objet, la surpression diminue mais il subsiste toujours une dépression et une zone tourbillonnaire à l'arrière. [5]



Figure 3.7- Résistance 75 %.[5]

### III.3 - Les forces aérodynamiques sur une voiture :

On retrouve 3 forces aérodynamiques :

**A-Force de portance :** elle est perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement dans le plan horizontal

**B-Force de dérive :** elle est perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement

**C-Force de traînée :** elle est parallèle à la direction moyenne de l'écoulement [08]

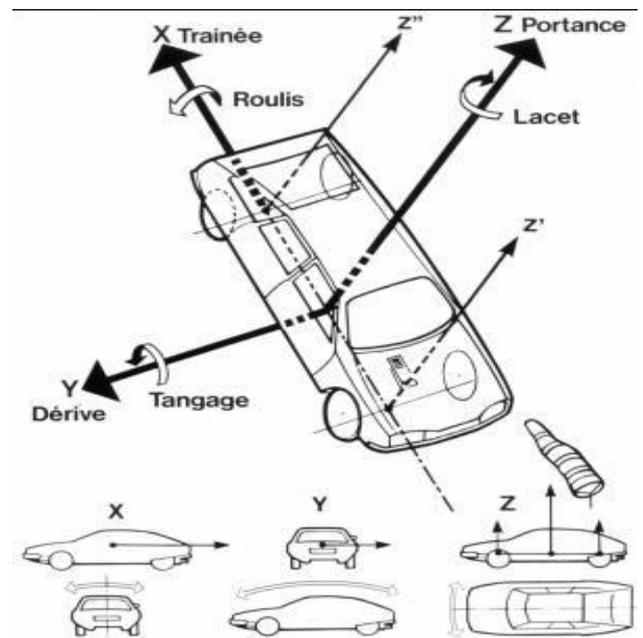


Figure 3.8- Forces aérodynamiques sur une voiture [08]

### III.3 - 1- La force de portance :

La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement

La portance aérodynamique  $\vec{R}_x$  est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

#### A- Facteur influente :

La portance est l'une des composantes de la force aérodynamique  $\vec{R}_a$

Les forces aérodynamiques de portance et de traînée dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont les suivants :

- La vitesse du vent relatif  $V$
- La masse volumique de l'air  $\rho$
- La forme du profil
- L'incidence  $\alpha$
- La surface alaire  $S$
- Les conditions de surface (rugosité)
- La compressibilité

La portance sera donnée par l'équation :  $R_z = 1/2 \rho V^2 S C_z$

Comme toutes les forces aérodynamiques, la portance dépendra :

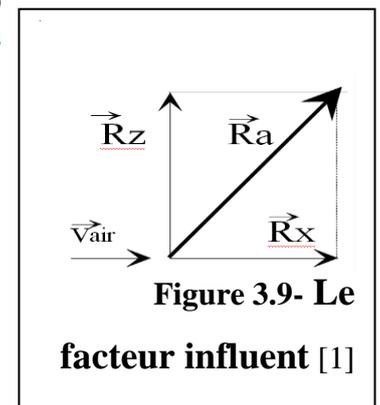
- de la pression dynamique  $1/2 \rho V^2$
- de la surface alaire  $S$
- et d'un coefficient de portance  $C_z$ . [10]

### III.3 - 2- La force de traînée :

en mécanique des fluides, la traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Mathématiquement c'est la composante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide

La traînée  $\vec{R}_x$  est l'une des composantes de la force aérodynamique  $\vec{R}_a$  Cette force est parallèle au secteur du vent relatif

La traînée sera donnée par l'équation :  $R_x = 1/2 \rho V^2 S C_x$



### III.3 - 3- La forme de force de traînée et leur composante :

Elle représente la résistance provoquée par la forme de base du véhicule : elle est donc fonction de ses proportions et de sa taille. Elle s'exprime comme une énergie nécessaire pour séparer les molécules d'air lors du passage du véhicule. C'est pourquoi elle est affectée par la distance entre les particules et l'angle de déflexion qu'elle exerce par le corps

Cependant, la carrosserie d'une voiture ne pourra jamais être totalement dépourvue d'aspérités qui dissocient les filets d'air, ou créent parfois de violents tourbillons. D'un point de vue énergétique, l'énergie qui est absorbée par ces divers remous doit évidemment être ajoutée à la traînée totale. [7]

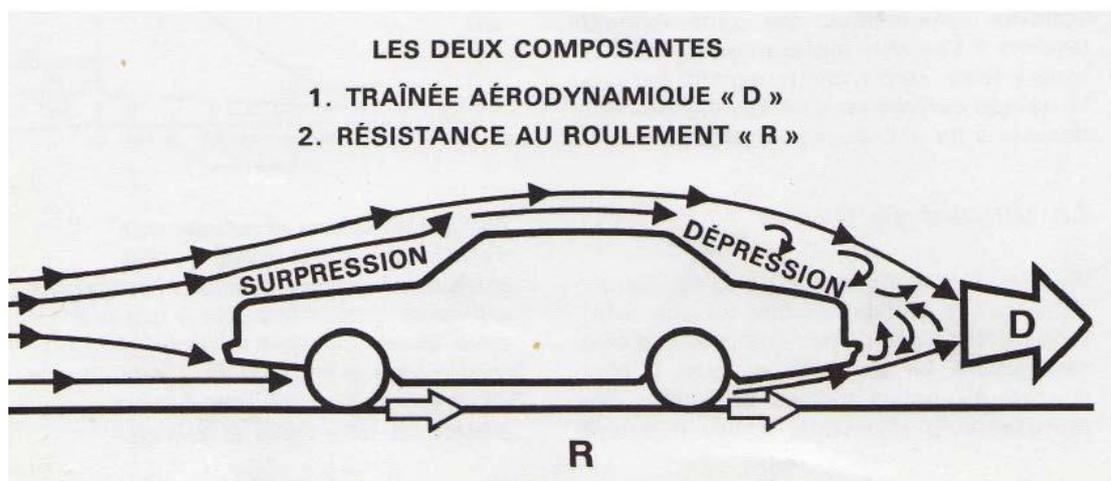


Figure 3.10- Schéma des forces s'opposant au mouvement d'un véhicule [7]

### III.4- Les différents effets qui affectent l'aérodynamisme sur une voiture:

#### III.4- 1- L'évolution de la mesure de $C_x$ :

La Figure 3.12 présente l'évolution de la mesure de  $C_x$  pour un cylindre en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement. On constate que pour des écoulements à petites vitesses, le  $C_x$  prend ses valeurs maximales.

Il suit ensuite une loi en puissance, puis de  $Re=10e2$  à  $Re=10e5$ , les valeurs sont relativement stables jusqu'à atteindre la valeur critique de chute de  $C_x$ . Cela montre que la vitesse de l'écoulement est une donnée essentielle qui se traduit par des comportements différents selon les régimes considéré. [2]

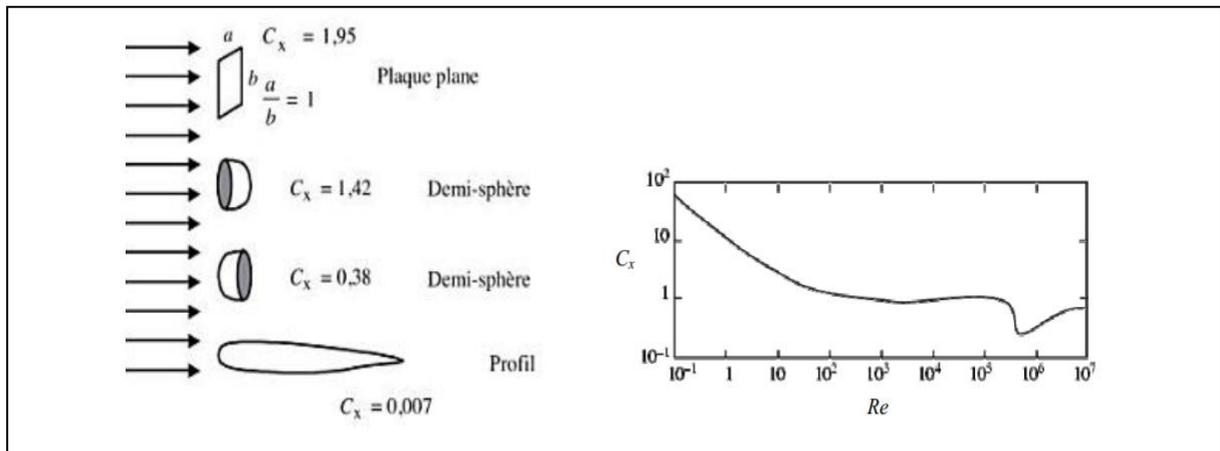


Figure 3.11 - ordre de grandeurs de  $C_x$  pour des formes classique [2]

**III.4 -2- les points critiques qui exerce une pression sur la carrosserie du véhicule :**

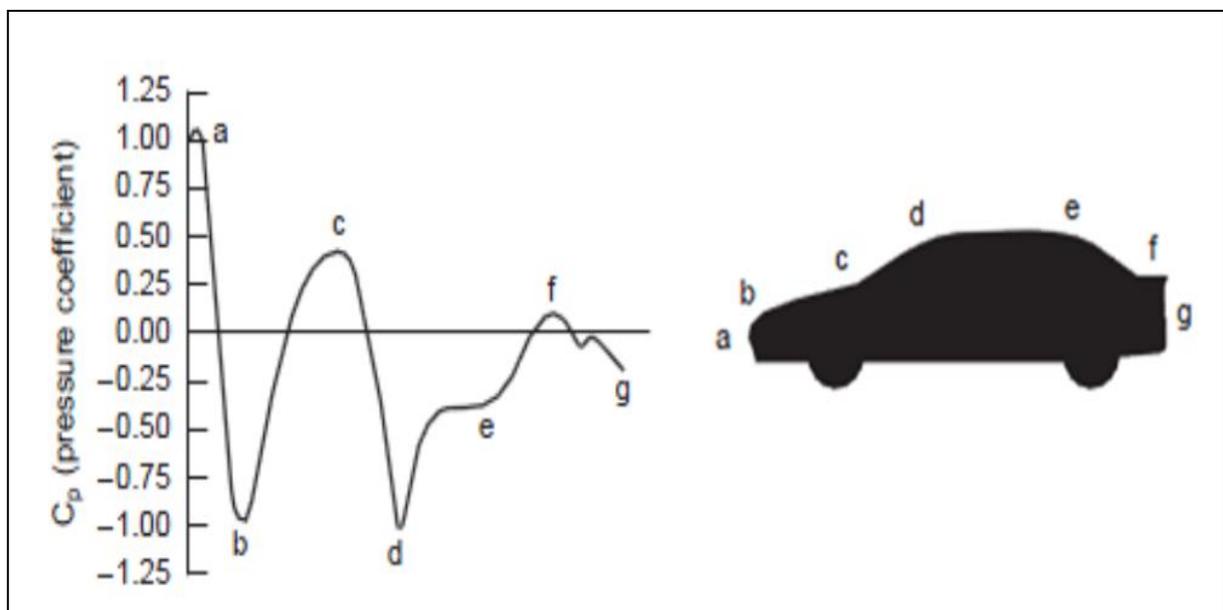


Figure 3.12 - Distribution typique de pression autour d'un véhicule d'après Happian Smith selon des mesures effectuées en soufflerie – Source [Hap] [2]

### III.4 -3- Propriété physiques de l'air :

**4.3.1- L'air est compressible :** il est possible de réduire son volume en le comprimant

**4.3.2- L'air est expansible :** il tend à occuper un volume toujours plus grand

**4.3.3- L'air est élastique :**

Résultante des 2 précédentes. C'est à dire que l'air reprend exactement son volume initial lorsqu'on le replace dans les conditions ayant précédé une compression ou une détente.

**4.3.4- L'air est pesant:**

par rapport aux autres corps, le poids de l'air reste faible (voir météo), toutefois, il est déjà possible de donner trois paramètres principaux définissant l'état de l'air ambiant : [4]

**a- masse volumique :**

Notée  $\rho$ , et exprimée en  $\text{kg. M}^3$

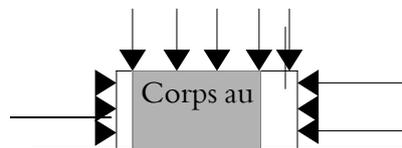
**b- la pression :**

Force exercée par unité de surface, notée  $P$ , et exprimée en Pascal (Pa)

C'est l'effet porteur dû aux actions combinées des pressions et dépressions que l'air la pression est l'application d'une force sur une surface :

$$P = F / S$$

**a.1- Corps au repos :** on appelle « **pression statique PS** », la pression exercée par l'air immobile sur toute la surface d'un corps au repos **Figure 1**



**Figure 3.13- pression statique PS** [4]

**a.2- Corps en mouvement:** on appelle « **pression dynamique PD** », l'énergie acquise par l'air grâce à sa vitesse , ou pression due à la vitesse du vent relatif appliqué sur une surface

### CHAPITRE III : RAPPEL THEORIQUE SUR L'AERODYNAMIQUE DES VOITURES

. perpendiculaire aux filets d'air La valeur de cette pression peut-être exprimée par la loi de

Bernoulli:  $PT = PS + PD$

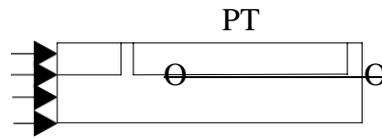
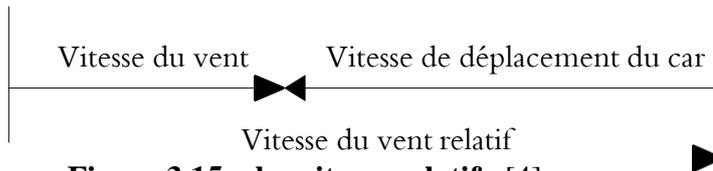


Figure 3.14 - pression dynamique PD [4]



$$PD = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Figure 3.15 – les vitesse relatif [4]

PD = pression dynamique

V= vitesse du vent relatif

$\rho$  = masse volumique de l'air

La force résultant de la pression dynamique sur une surface perpendiculaire « S » vaut :

$$\text{Force} = \text{Pression} \times \text{Surface} \Rightarrow \text{Force aérodynamique} = PD \times S = \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

**c- la température :**

Notée T, et exprimée en Kelvin (K) (rappelle :  $T (K) = T (^\circ C) + 273$ )

**d- la viscosité :**

La viscosité caractérise la cohésion interne d'un fluide. Résistance au déplacement des molécules les unes sur les autres, varie avec les fluides.

Les forces de viscosité sont des forces tangentielles de contact entre deux couches du fluide.

Nombre de **Reynolds**, il chiffre l'influence de la viscosité, sans unité. [4]

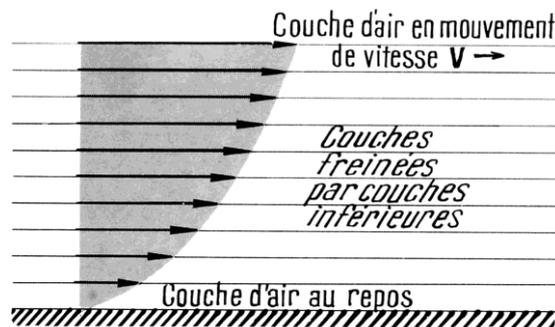


Figure 3.16- les couches du fluide [4]

### III.4 -4- les différents types de traînées :

En réalité il y a plusieurs traînées :

- La traînée induite est une force de résistance à l'avancement induite par la portance.
- La traînée parasite composée de :
  - La traînée de frottement liée aux différences de vitesses entre les filets fluides (viscosité).
  - La traînée de forme apparait dès qu'un objet a une certaine épaisseur.
  - La traînée d'interférence est due à la jonction entre les différents composants. [10]

### III.5- Bases théoriques de la mécanique des fluides

#### III.5-1- La loi de Bernoulli :

affirme que pour un fluide parfait et incompressible qui est en mouvement le long d'une ligne de courant ; la pression totale  $P_t$  et le débit  $Q$  restent constants.

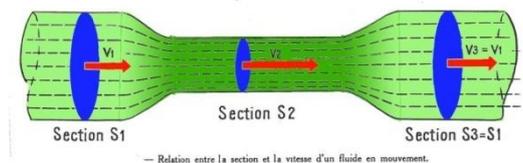
**1. conséquence 1 :** si la section d'un tube d'air diminue, la vitesse d'écoulement augmente

**2. conséquence 2 :** si la vitesse d'écoulement augmente, la pression statique diminue et crée donc une force d'aspiration perpendiculaire au vecteur vitesse

Puisque le débit du fluide dans le tube est constant

on a toujours [11] :

$$Q = V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 = V_3 \cdot S_3 = V \cdot S = \text{cte}$$



**Figure 3.17- Relation entre la section et la vitesse d'un fluide en mouvement [11]**

III.5-2-les efforts et les moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule :

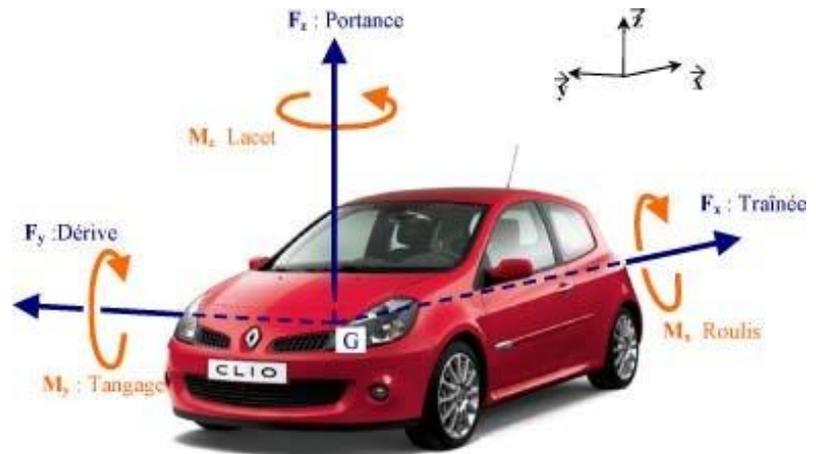


Figure 3.18 : Définition des efforts et moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule [3]

La résultante des efforts aérodynamiques se décompose usuellement dans le repère mobile lié au véhicule ( $G, x, y, z$ ),

$$\vec{F}_a = F_x \vec{x} + F_y \vec{y} + F_z \vec{z} ,$$

où  $G$  est le centre de gravité du véhicule, comme (Figure 3.19) :

$$\vec{M}_a(G) = \vec{F}_a \wedge \vec{GA} = M_x \vec{x} + M_y \vec{y} + M_z \vec{z} ,$$

où  $A$  est le point d'application de la résultante des efforts aérodynamiques,  $M_x$  est le roulis,  $M_y$  le tangage et  $M_z$  le lacet.

Pour s'affranchir des dimensions du véhicule et des conditions de roulage du véhicule, les efforts aérodynamiques sont exprimés sous forme de coefficients aérodynamiques par :

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty} , C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty} , C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty} ,$$

$$C_l = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty} , C_m = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty} , C_n = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty} ,$$

$\rho$  : est la masse volumique de l'air,

$U_\infty$  : la vitesse de déplacement du véhicule,

$S_\infty$  : le maître couple

$L$  : la longueur du véhicule.

Ces coefficients permettent de disposer d'éléments de comparaison adimensionnels entre les différents modèles.

Le maître couple  $S_\infty$  varie entre 1.5 m<sup>2</sup> pour les petits véhicules particuliers (VP) du segment A (Twingo par exemple) à 2.5 m<sup>2</sup> pour les grands VP (de type Espace). A coefficient aérodynamique constant, la tendance actuelle qui consiste à proposer des véhicules de plus en plus grands, se traduit alors par une augmentation des efforts aérodynamiques pour le véhicule. [3]

### III.5-3- Comparaison entre les Classements du meilleur SCx :

Il est donc temps de regarder le tableau ci-dessous pour déterminer la voiture la plus aérodynamique :

Classement	N°	Modèles	Cx	S	SCx
1er	Numéro 1	Mercedes CLA BlueEfficiency	0,22	2,23	0,490
2e	Numéro 3	Tesla Model S	0,24	2,34	0,562
3e	Numéro 4	Bugatti Veyron	0,39	1,91	0,745
4e	Numéro 2	Renault Zoé	0,28	2,68	0,750
5e	Numéro 6	Ford Focus RS	0,36	2,28	0,810
6e	Numéro 5	Mercedes Vito	0,34	3,19	1,083

**Tableau III .1 - Classement du meilleur SCx : [12]**

La **Mercedes CLA** est la grand gagnante avec un Cx record de 0.22 qui lui donne un SCx de 0.490. La **Tesla Model S** n'est pas loin avec un SCx de 0.562. Ensuite la troisième place est

remportée de peu par la **Bugatti Veyron** malgré un Cx élevé (car elle doit avoir beaucoup d'appui aérodynamique) mais grâce à une surface frontale la plus petite. Suit la **Renault Zoé** à quasi égalité qui bien qu'avoir un Cx très faible, sa surface frontale assez grande la pénalise. La **Ford Focus RS** arrive 5ème car son Cx élevé est une conséquence de forts appuis aérodynamiques pour cette voiture de sport. Le **Vito** termine à la dernière place car il a à la fois un Cx élevé et une surface frontale S grande. [12]

### III.6- Résumé :

Les recherches contemporaines dans le domaine de l'aérodynamique ont donné lieu à des hautes performances dans les technologies de la mécanique, l'aéronautique et les technologies spatiales ; ce qui ont permis à l'amélioration des perfectionnements techniques des voiture , et motrices ainsi que des nouveaux véhicules . Cependant la mise en équation de ces problèmes reste toujours complexe vu les méthodes numériques de résolution et le calcul expérimental utilisés tout en tenant compte des nouvelles technologies.

Notre travail consiste représentation les caractéristiques aérodynamiques des voiture de différents profils avec une logiciel de simulation et de calcul **SOLIDWORKS** et on a utilisé dans une étude pour connaitre le meilleur résultante

**CHAPITRE IV :**  
**MODELISATION ET SIMULATION**

## IV .1- Introduction :

L'aérodynamique est une branche ou une science de la dynamique des fluides qui traite du concept d'analyse des flux d'air, ainsi que de leur influence sur les éléments solides qui les entourent. . Ces effets peuvent être provoqués naturellement par un objet immobile soumis à un flux d'air rapidement propulsé, par un objet se déplaçant dans l'atmosphère, ou bien tous les deux suggestions précédentes.

Dans le cadre de la réduction de la consommation énergétique des véhicules et des émissions de gaz à effet de serre, la maîtrise de la résistance des véhicules est l'un des principaux enjeux appliqués à la recherche automobile.

Récemment, diverses études se sont focalisées sur la mise en place de contrôles de flux autour de modèles de véhicules, ce qui permet de comparer l'efficacité des différents dispositifs présentés. Cette géométrie est constituée, identifiée par des études antérieures au aérodynamique.

## IV .2 - L'outil éteule pour la simulation :

SOLIDWORKS Flow Simulation i est une application qui effectue des calculs MVF pour résoudre la dynamique des fluides dans SOLIDWORKS 3D CAD vous permettant de simuler des flux de fluides et de gaz à l'intérieur et de transformer vos conceptions rapidement et facilement et fonctionnalités des produits. Il est nécessaire de connaître bien les étapes de simulation afin d'obtenir des bons résultats. La première des choses il faut choisir le domaine de calcul comme montre les figures ci-dessous. [4]

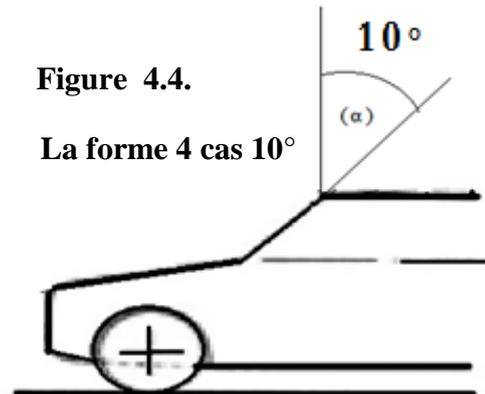
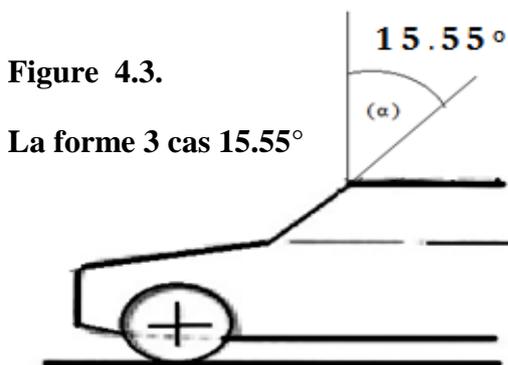
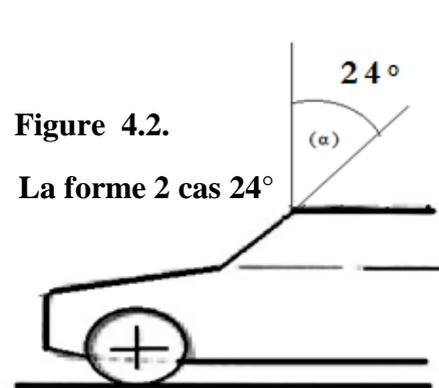
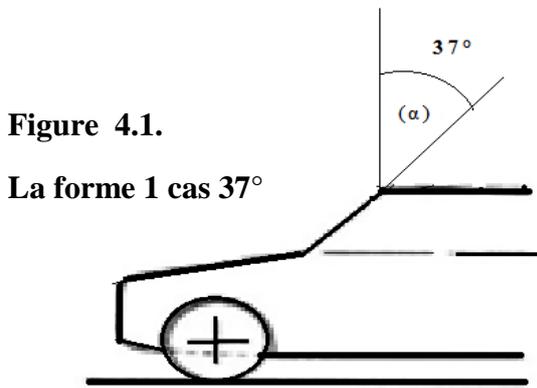
### IV.2.1 - Les différents D'angle utilisé pour approfondir les notions

#### évoquées :

Grâce à l'angle d'attaque, au capot et le pare-brise elle diminué la vitesse de voiture. D'après le graphique ci-dessous, nous pouvons voir que la diminution de l'angle ( $\alpha$ ) réduit la résistance de l'air.

Un angle inférieur à 10 degrés est alors utile. De plus, la réduction de traînée reste la même.

La réduction de l'angle du pare-brise ( $\alpha$ ) est également indiquée pour la résistance à l'air.

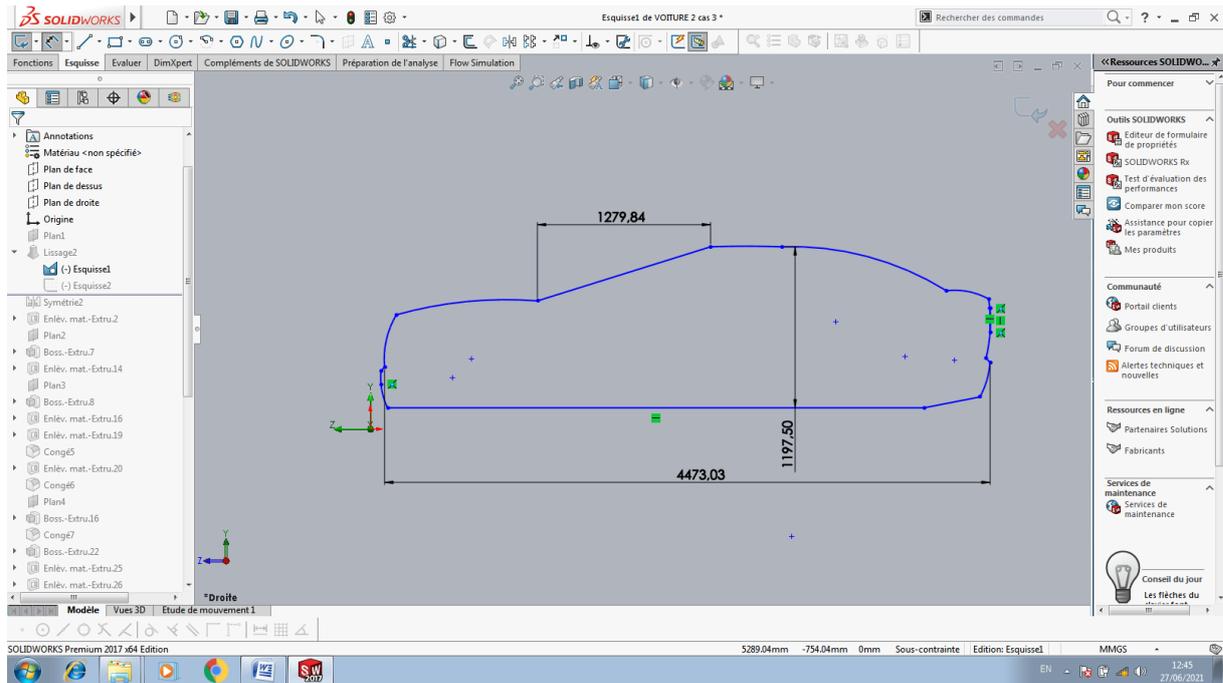


**IV .3- Les étapes de la conception d'une voiture avec solidworks :**

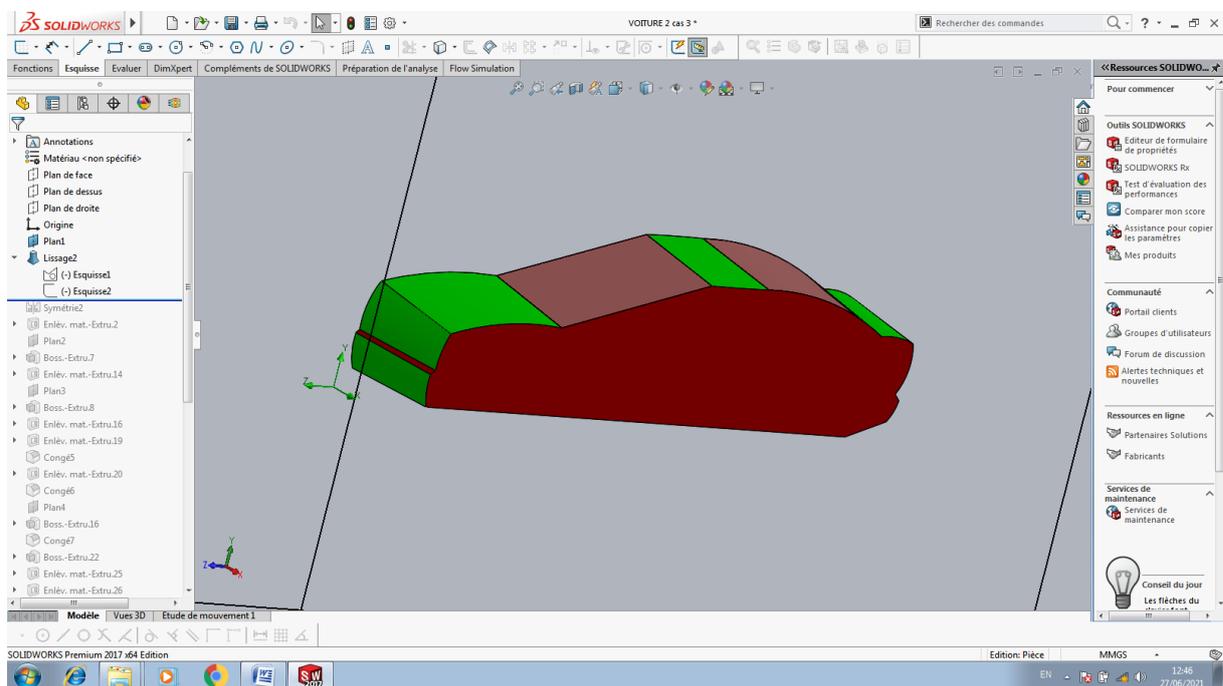
**IV .3.1- Tableau 1 - Les paramètres de simulation :**

Longueur	3818mm
Largeur	1940mm
Hauteur	1430mm
Poids	920Kg
Gravité	Composante X= $0\text{m/s}^2$ Composante Y= $-9.81\text{m/s}^2$ Composante Z= $0\text{ m/s}^2$
Fluide du projet	Air
Type d'écoulement	Laminaire +Turbulent
Condition thermique de paroi	Paroi adiabatique
Paramètres thermodynamique	Pression= $101325\text{ Pa}$ Températures= $293.2\text{K}$
Paramètres de vitesse	Vitesse dans la direction X= $50\text{m/s}$ Vitesse dans la direction Y= $0\text{m/s}$ Vitesse dans la direction Z= $0\text{m/s}$
Paramètres de turbulence	Intensité de turbulence= $2\%$ Longueur de turbulence= $0.0143799439\text{m}$
Energie de turbulence (k)	$1\text{J/Kg}$
Dissipation de turbulence ( $\epsilon$ )	$1\text{W/Kg}$

**IV.3.2 - Les étapes de la conception :**



**Figure 4.5- dessin technique de voiture**



**Figure 4.6 - la forme d'une fonction volumique en extrudant**

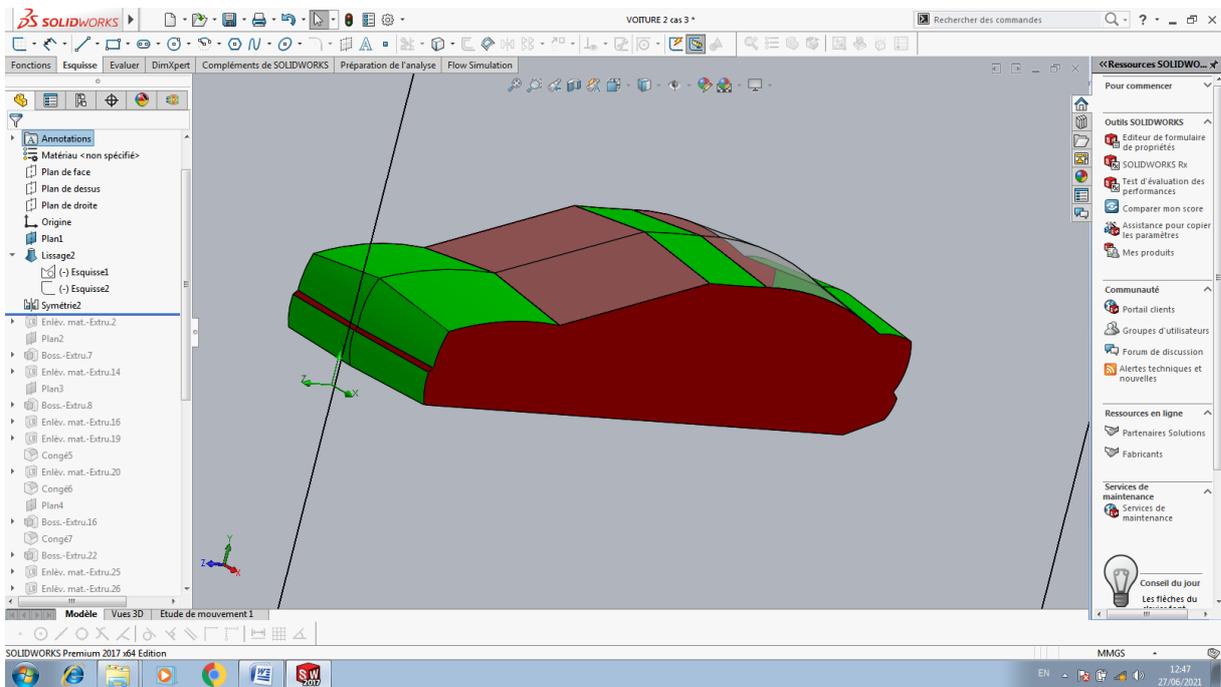


Figure 4.7 - la forme après la symétrie de volumique en extrudant

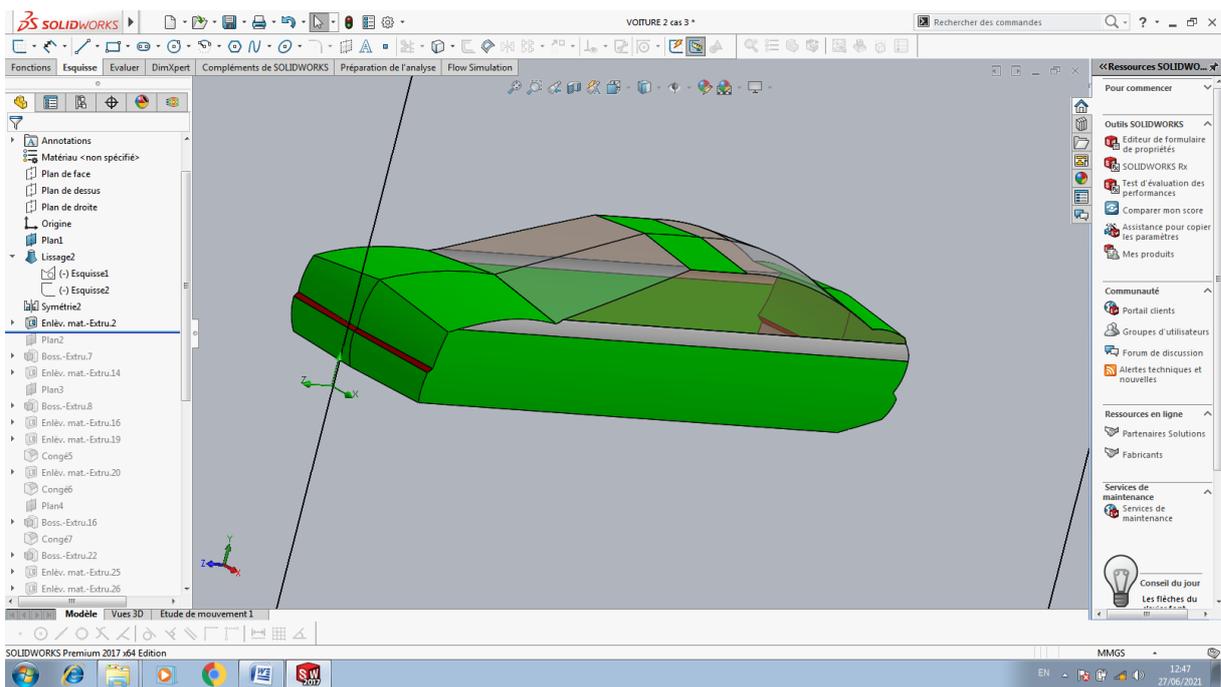


Figure 4.8 - la forme après enlève la matière de volumique en extrudant

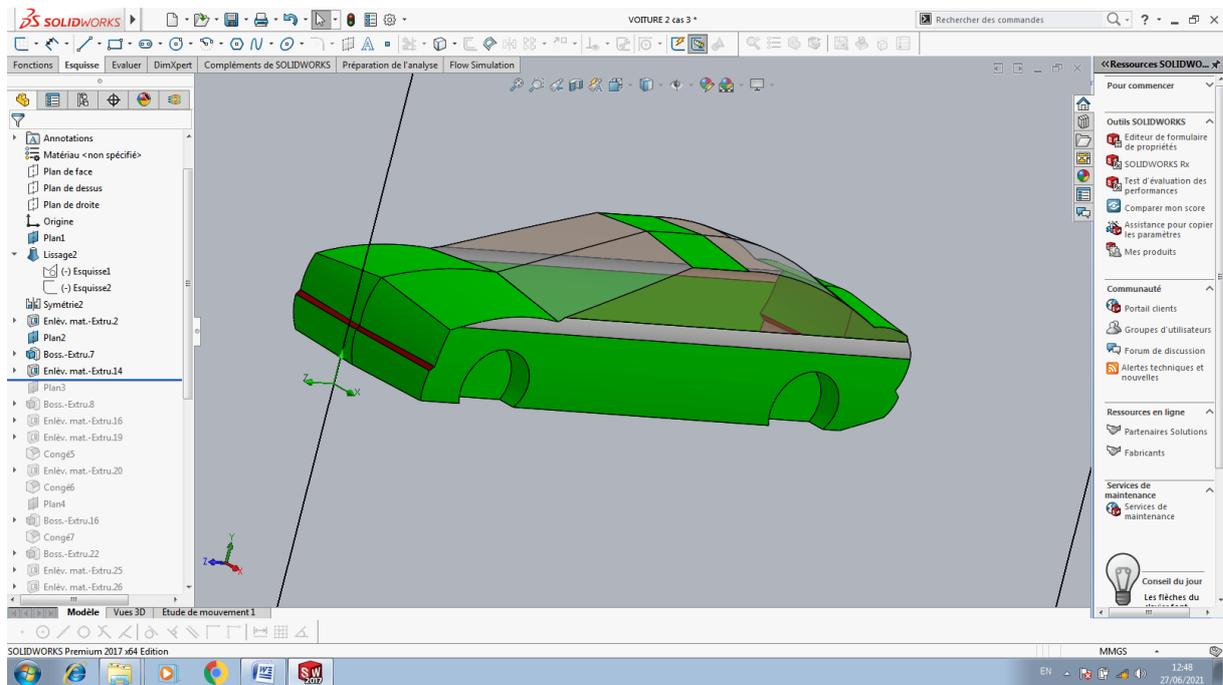


Figure 4.9 - la forme après enlève la matière a cage roue de volumique en extrudant

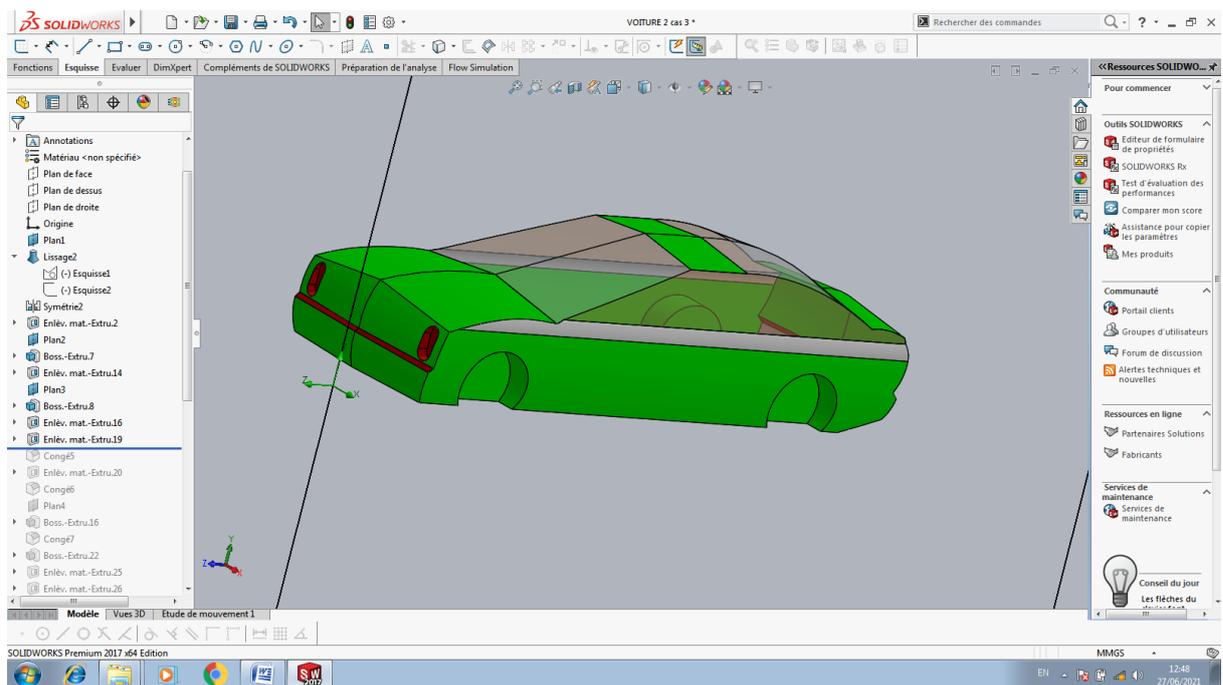


Figure 4.10 - la forme après enlève la matière a les feux du route de volumique en extrudant

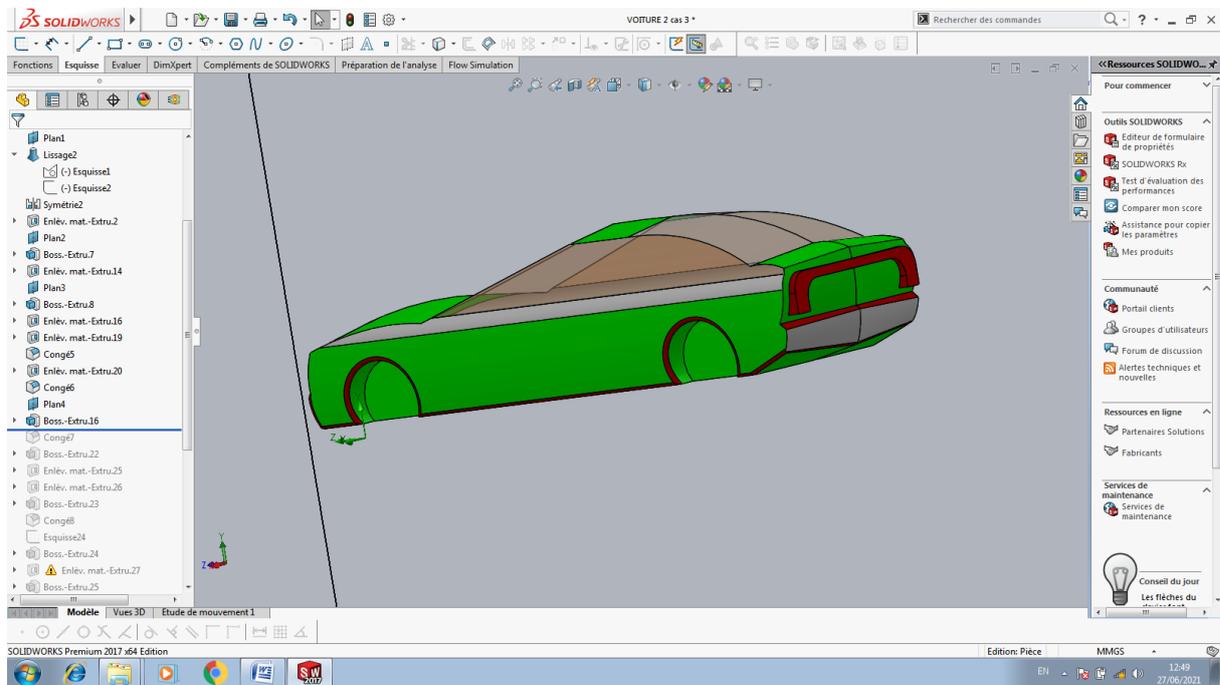


Figure 4.11 - la forme d'une fonction volumique en extrudant de feux arrière

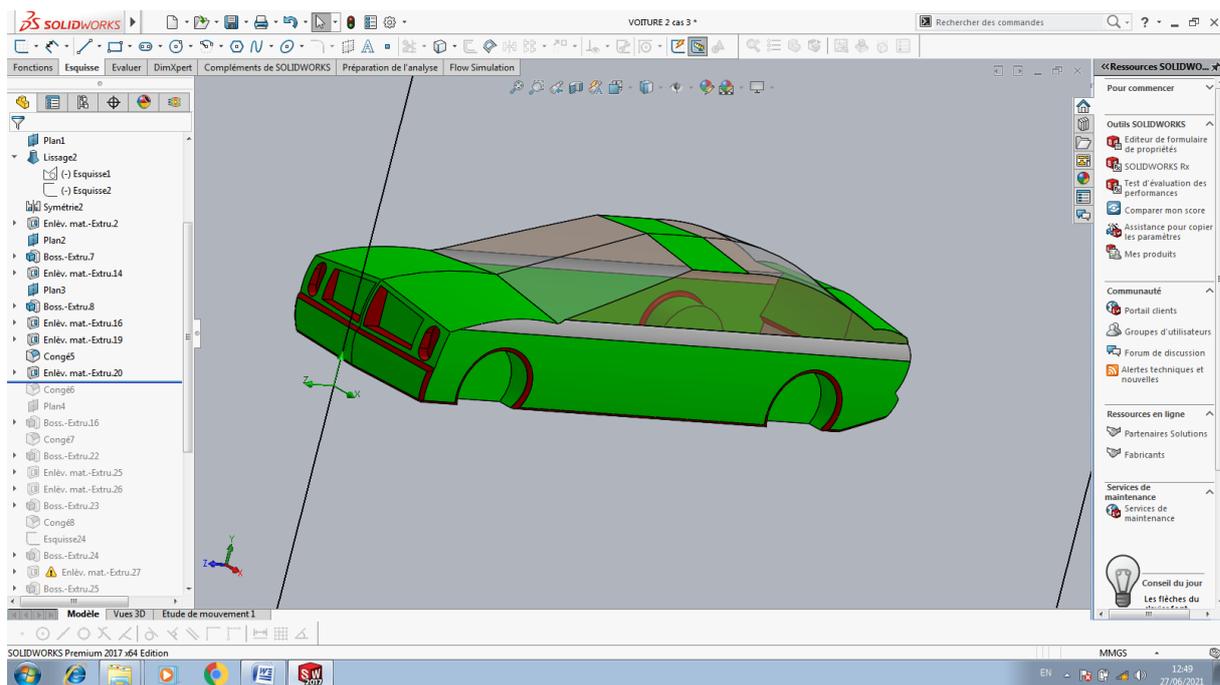


Figure 4.12- la forme après enlève la matière a les calandres de volumique en extrudant

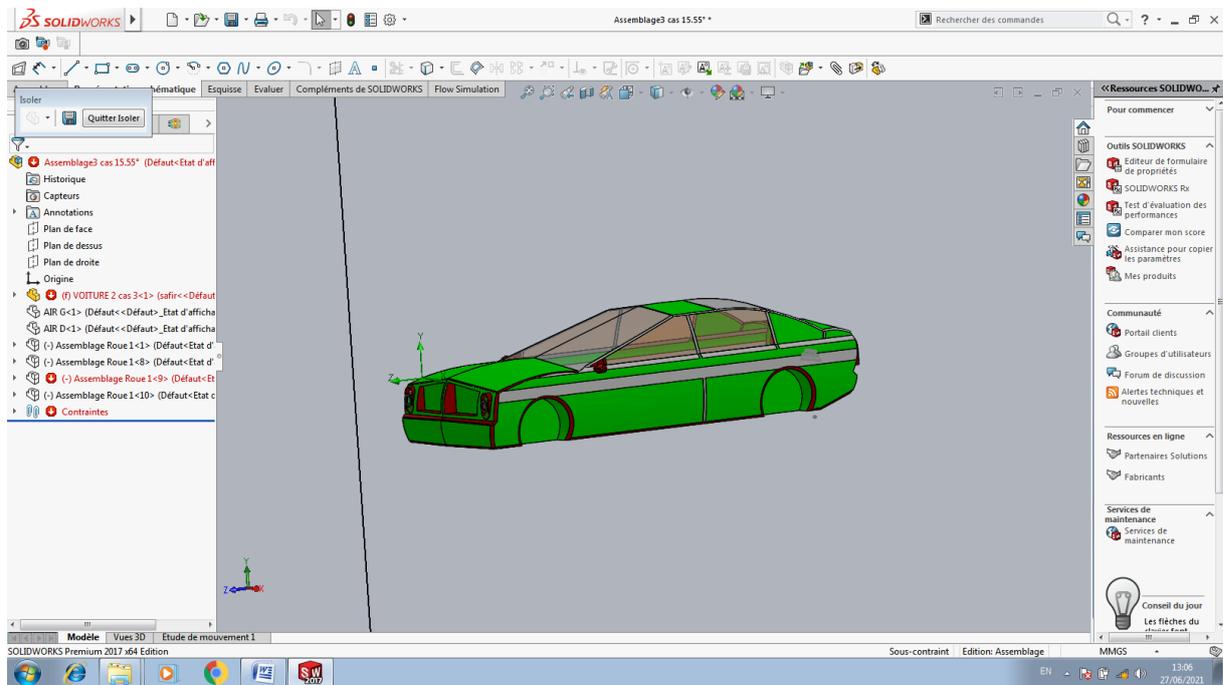


Figure 4.13 - la forme final

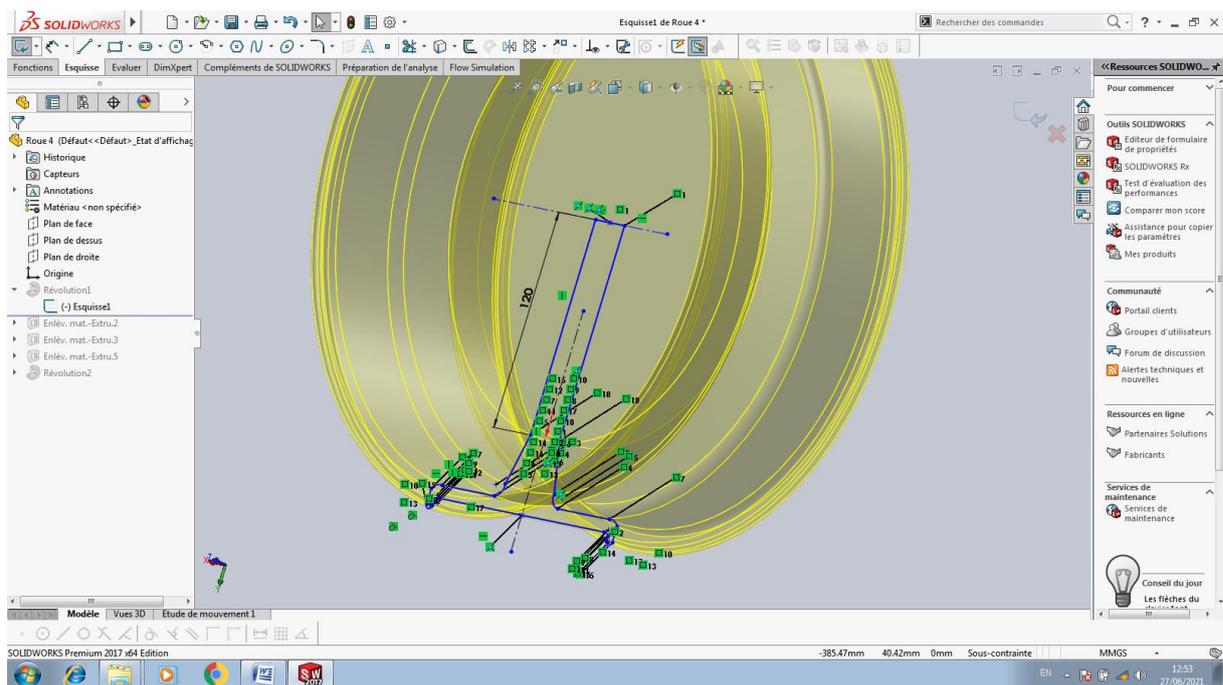


Figure 4.14 - dessin technique de roue avec la lancement de Bose avec révolution

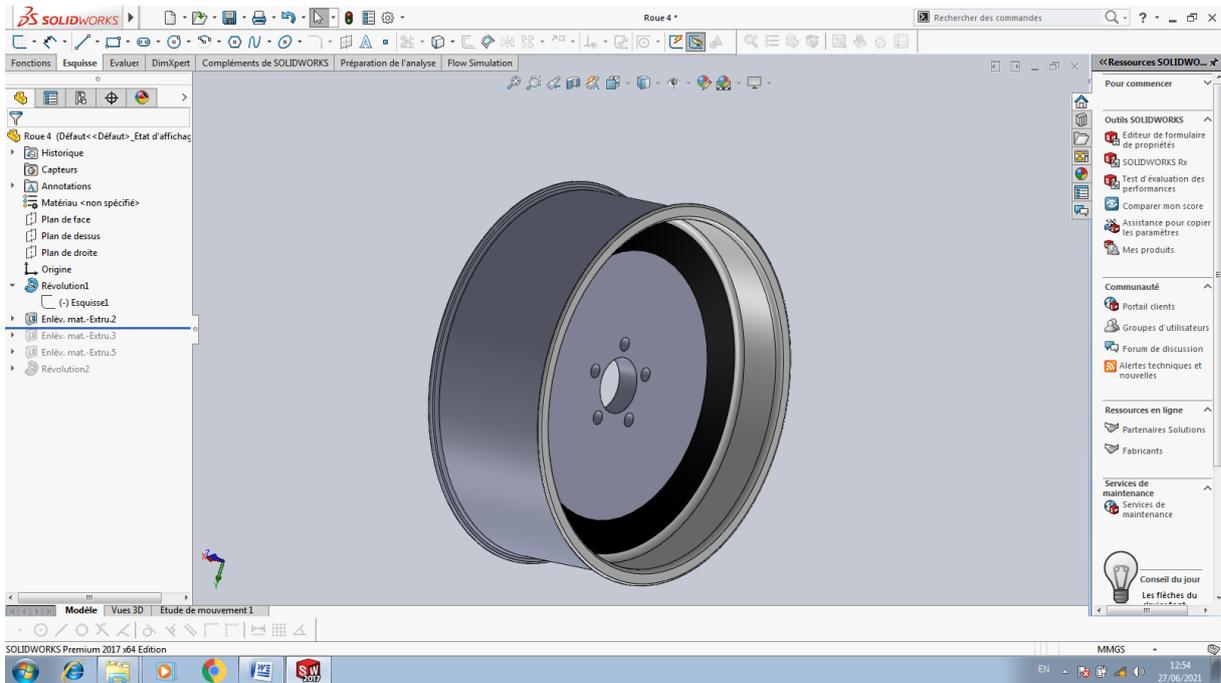


Figure 4.15 - le perçage

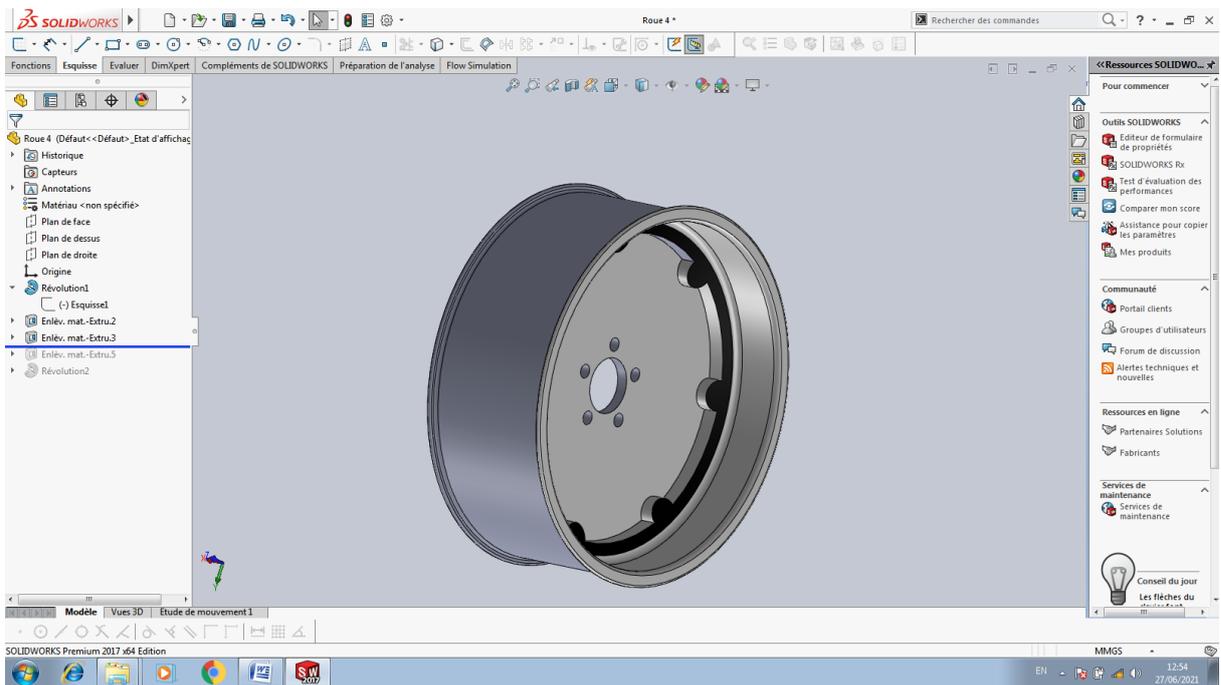


Figure 4.16 - bossage extrudé a l'intérieur

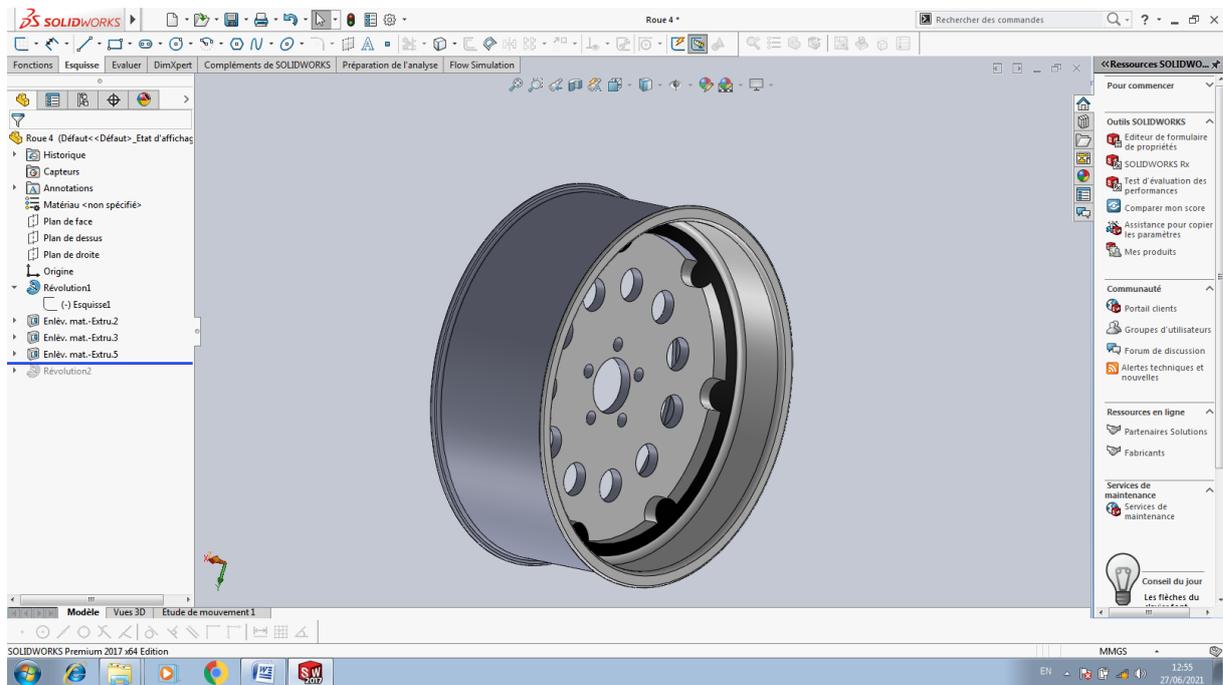


Figure 4.17 - bossage extrudé a l'intérieur avec le perçage

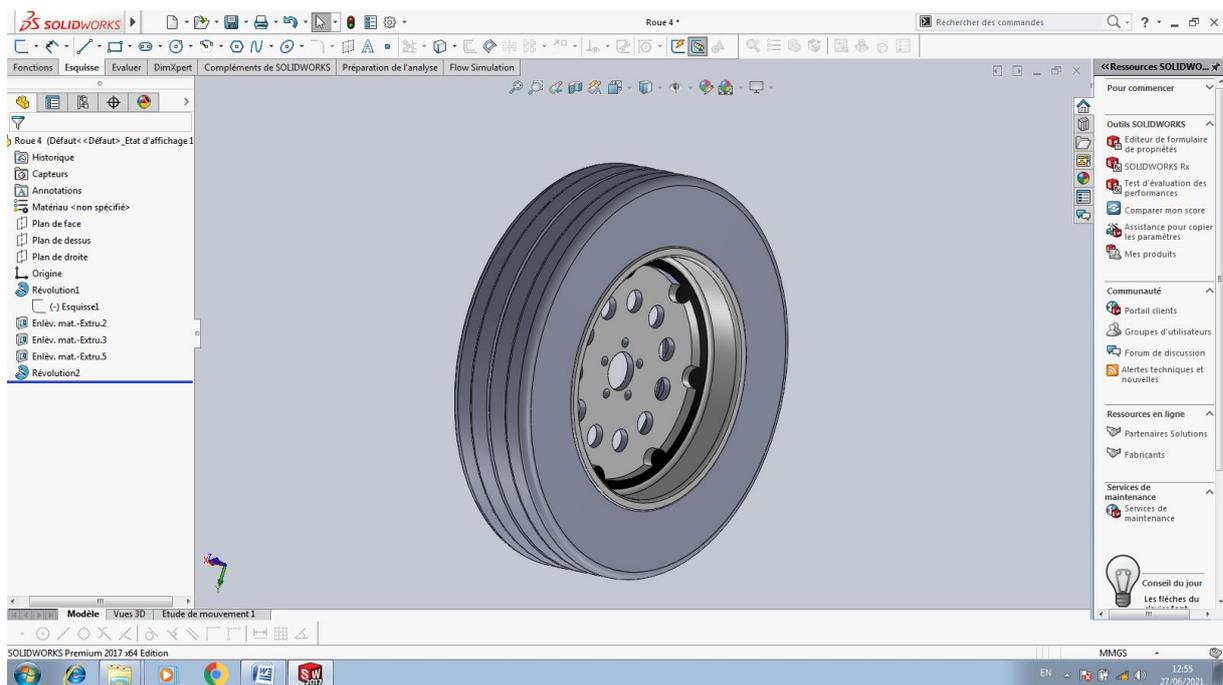


Figure 4.18 - la forme final roue

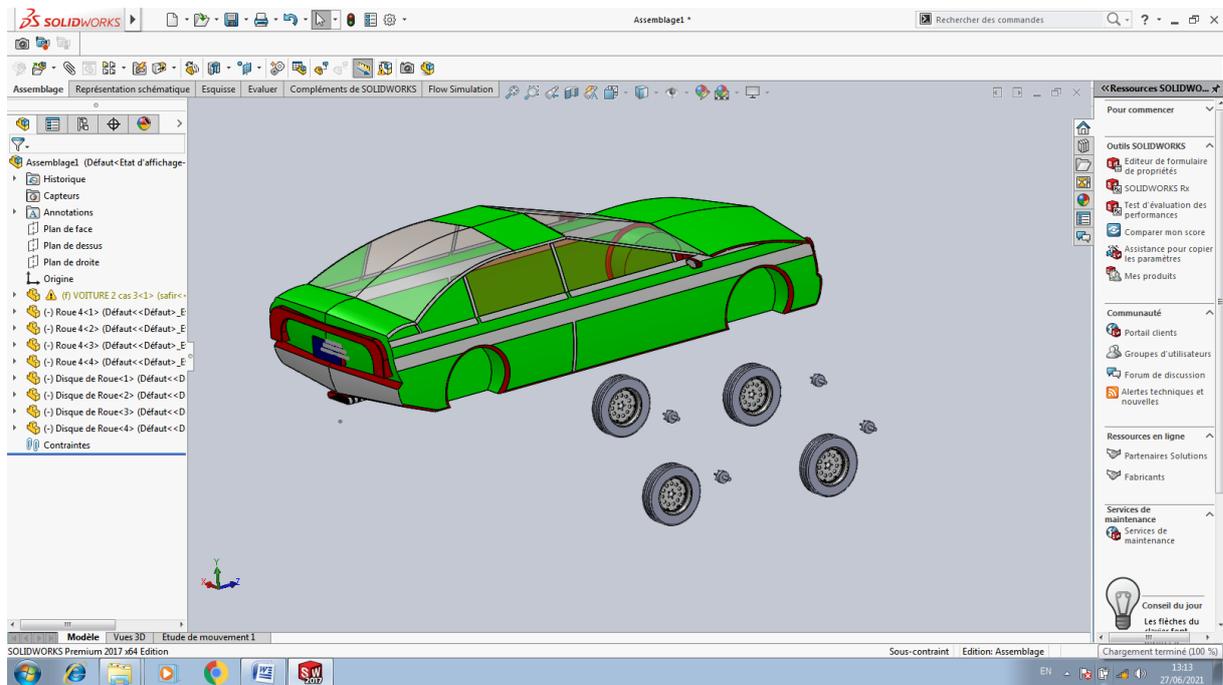


Figure 4.19 - L'assemblage

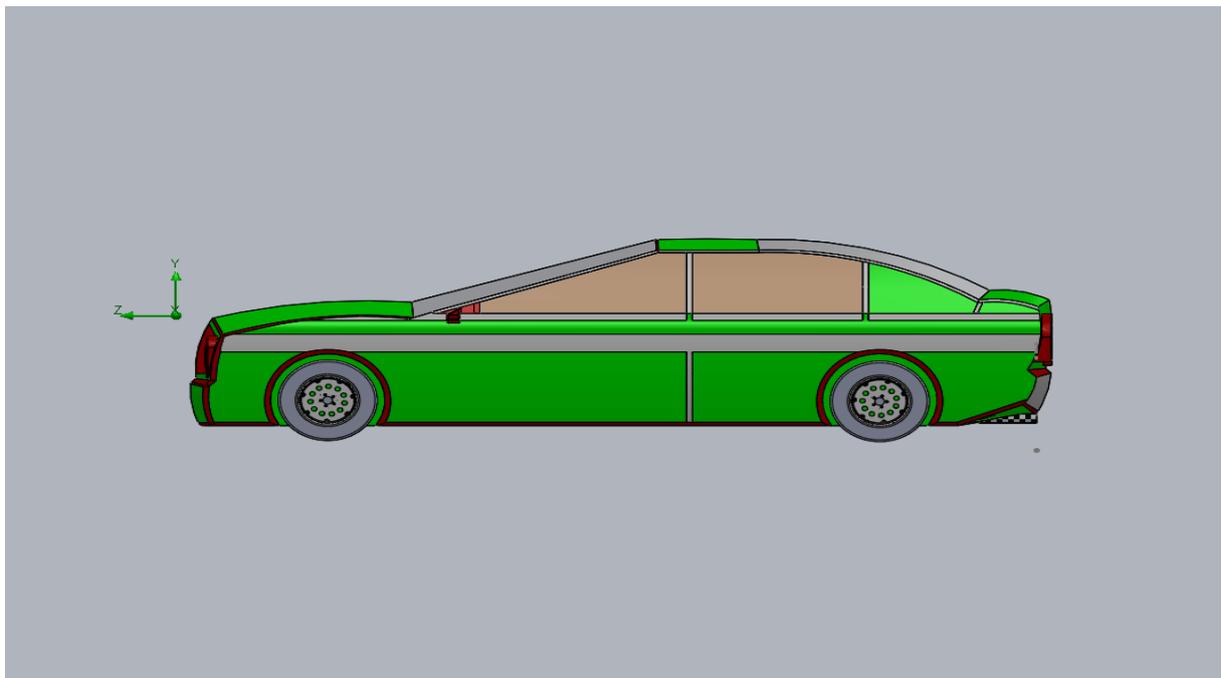


Figure 4.20 - la forme final de la voiture

IV. 4- Les différents angles d'attaque  $-37^{\circ}$ - $24^{\circ}$ - $15.55^{\circ}$ - $10^{\circ}$  :

IV.4.1- Forme d'un Angle  $-37^{\circ}$  :

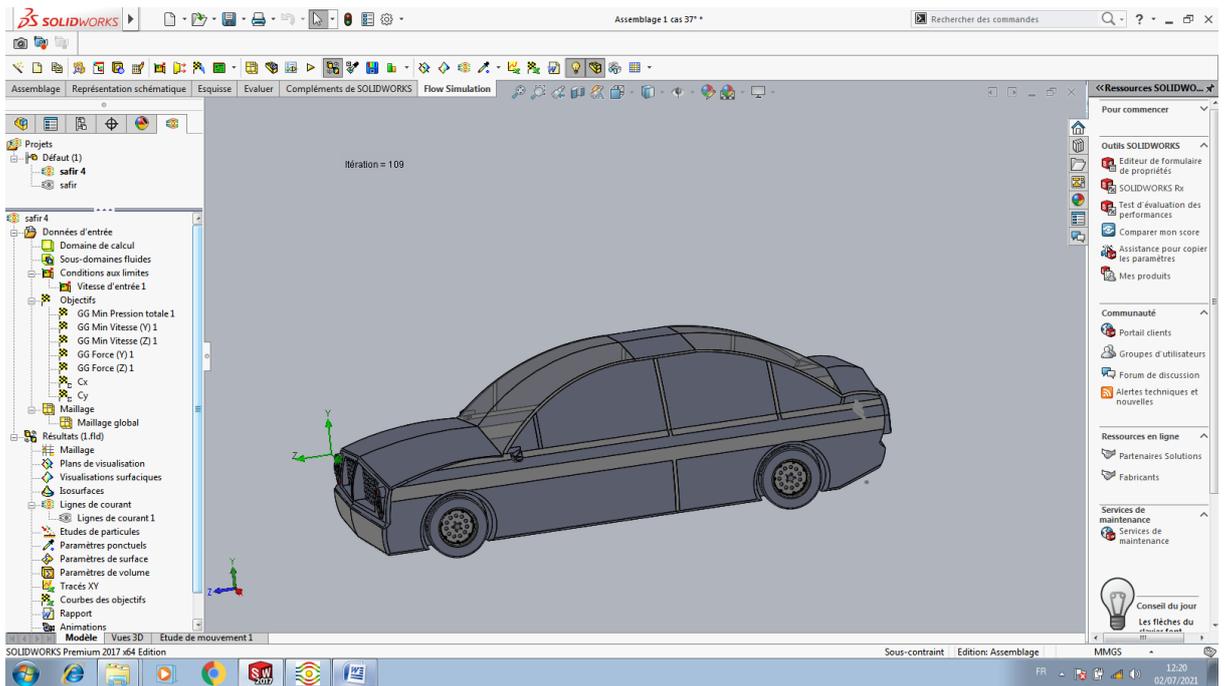


Figure 4.21 - Modèle d'un voiture avec Solidworks a un angle de  $37^{\circ}$

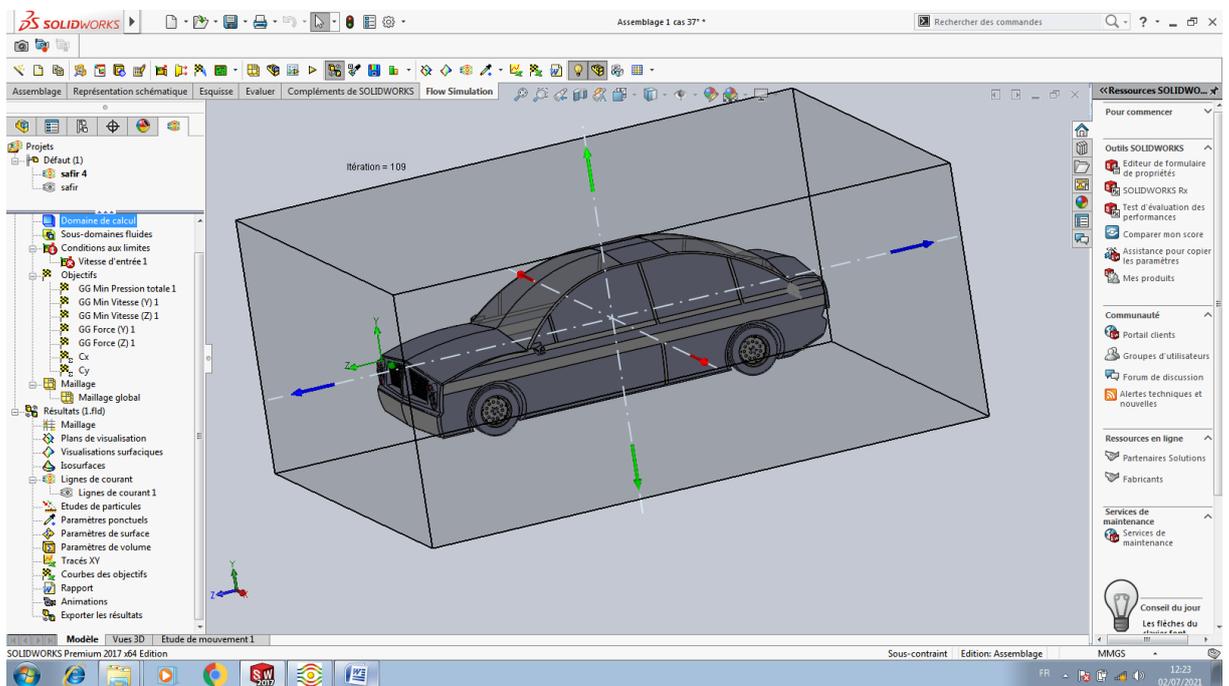


Figure 4.22- domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de  $37^{\circ}$

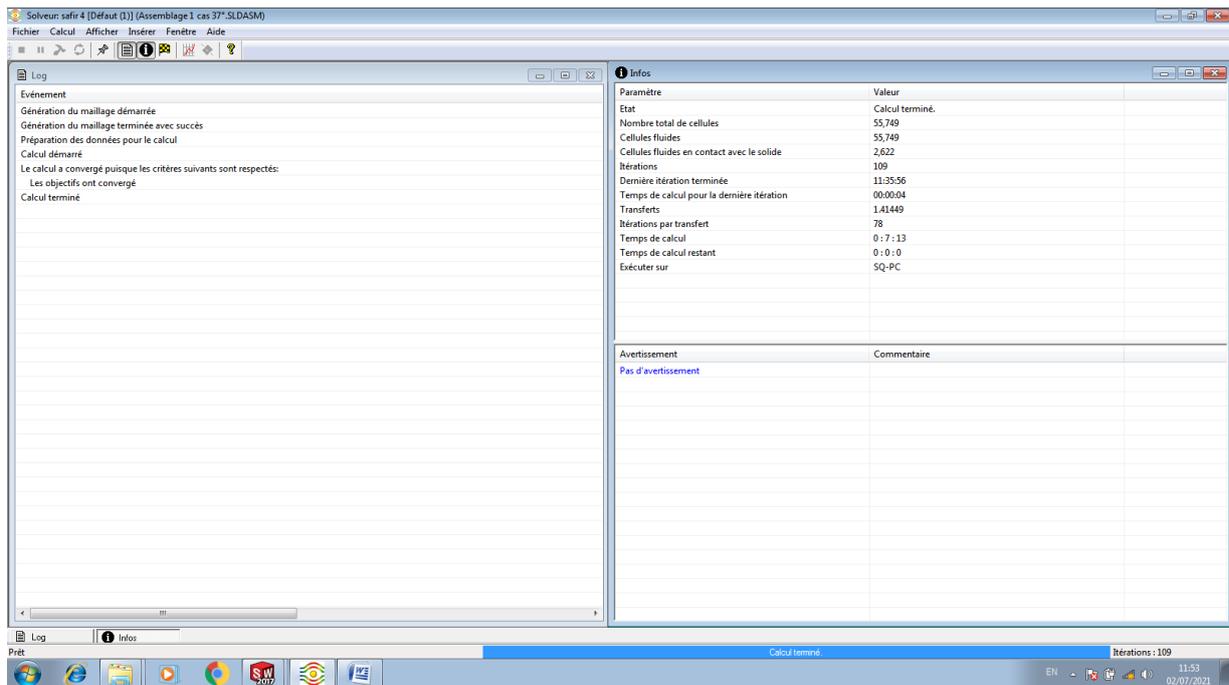


Figure 4.23- Résultat de calcul des équations des objectifs

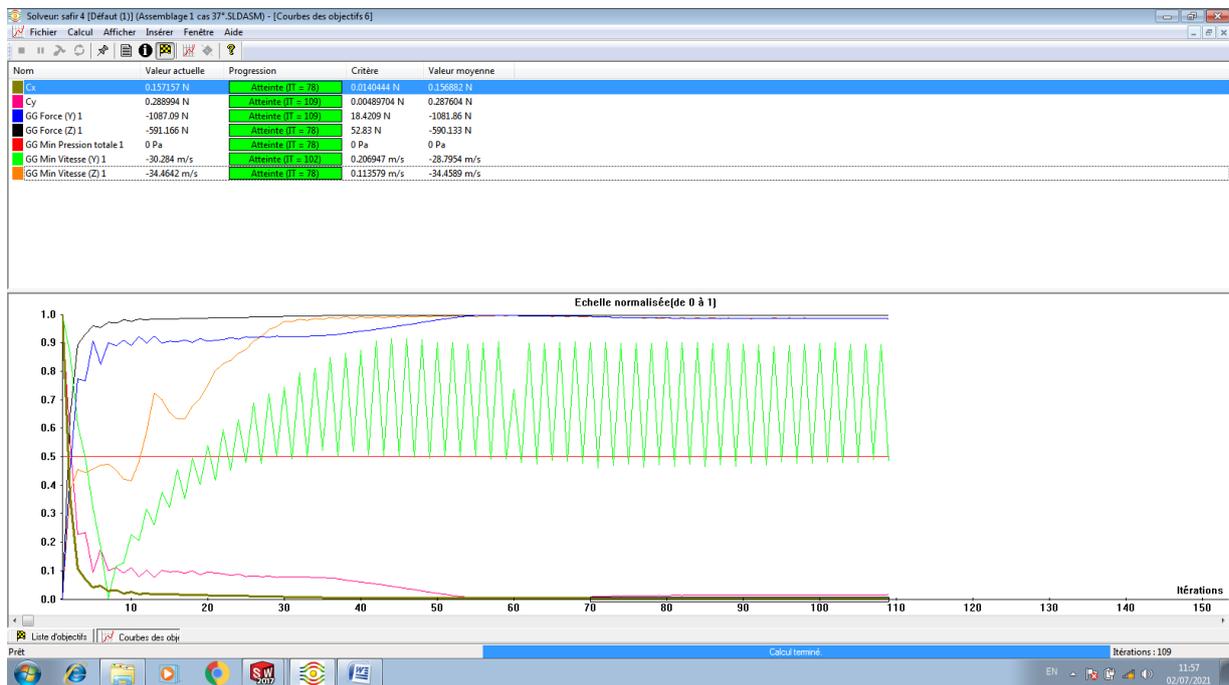


Figure 4.24 - Résultat de calcul des objectifs des équations

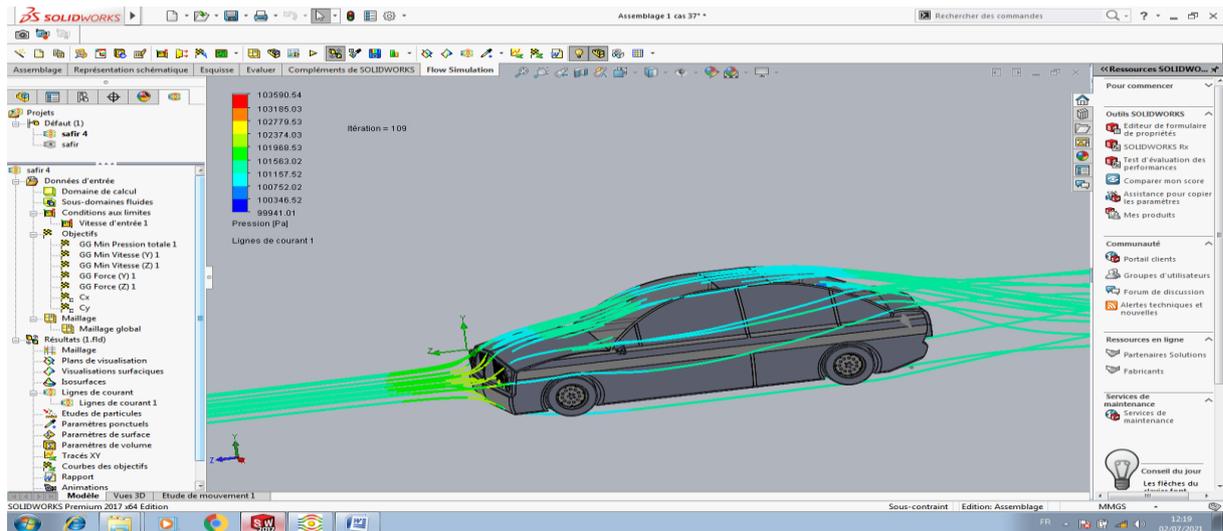


Figure 4.25 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression

Remarque. La figure 4.21. Montre les lignes de courant pour notre modèle testé, elle nous montre la formation d’une zone de recirculation des lignes des courant à l’angle d’attaque de la voiture et cela est le changement de la formation de la ligne de courant qui va augmenter la pression au l’avant de la voiture.

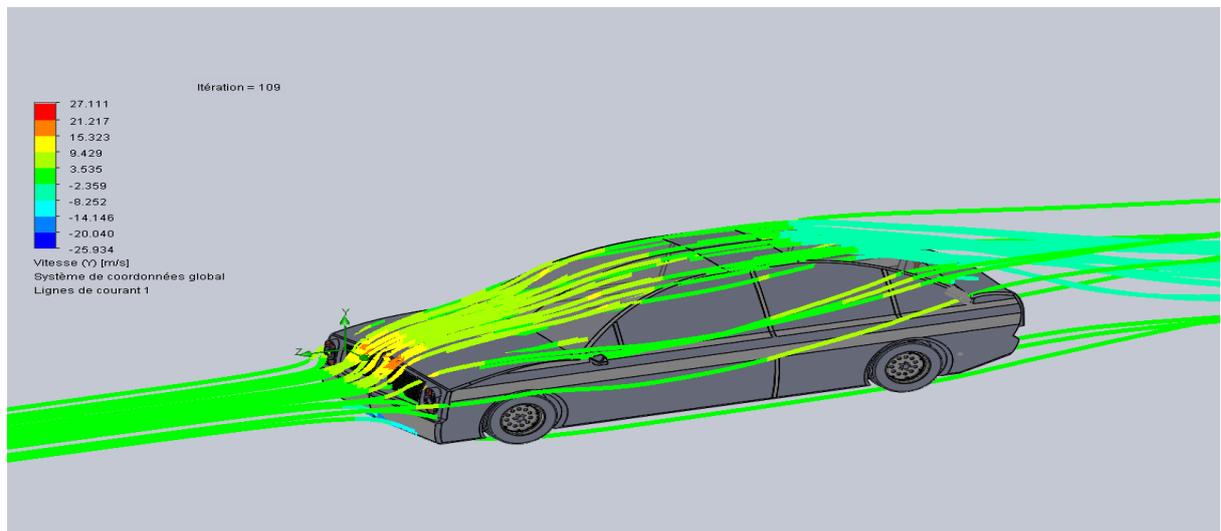


Figure 4.26 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse axe(Y)

Remarque. La figure 4.22. montre les courants et les contours de vitesse suivant axe (Y), nous constatons que les vitesse s’annule à l’avant du véhicule à cause du choc et du frottement puis s’accélèrent en se dégageant du profil de la voiture puisque on a un chemin convergent.

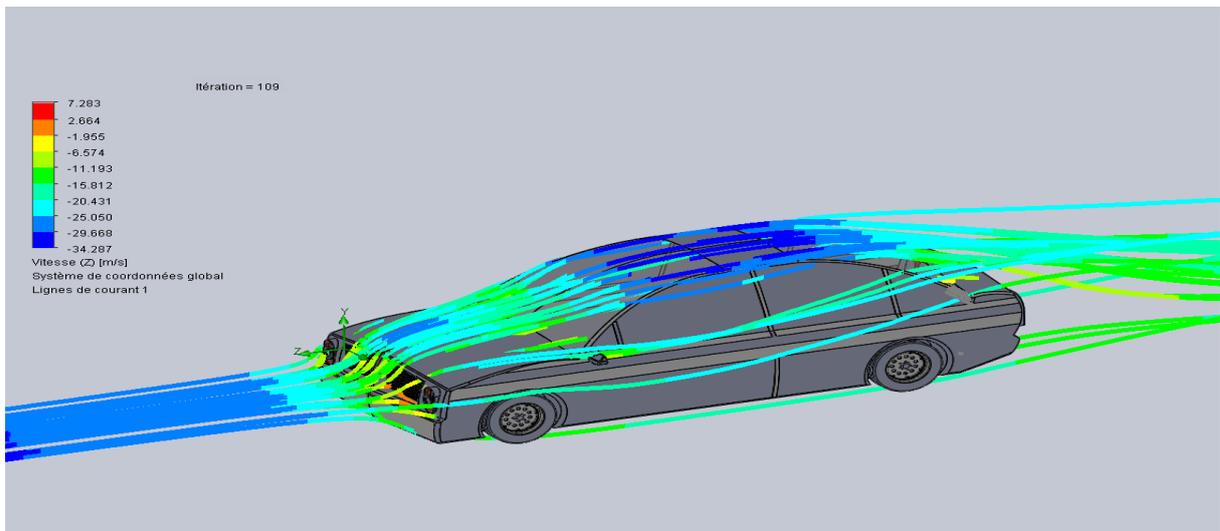


Figure 4.27 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z)

La figure 4.23. montre les courants et les contours de vitesse suivant axe (Z) , nous constatons que les vitesse s’annule à l’avant du véhicule à cause du choc et du frottement puis s’accélèrent en se dégageant du profil de la voiture puisque on a un chemin convergent, puis on a des valeur négative au sillage due au tourbillon qui créent des vecteurs de vitesse d’écoulement.

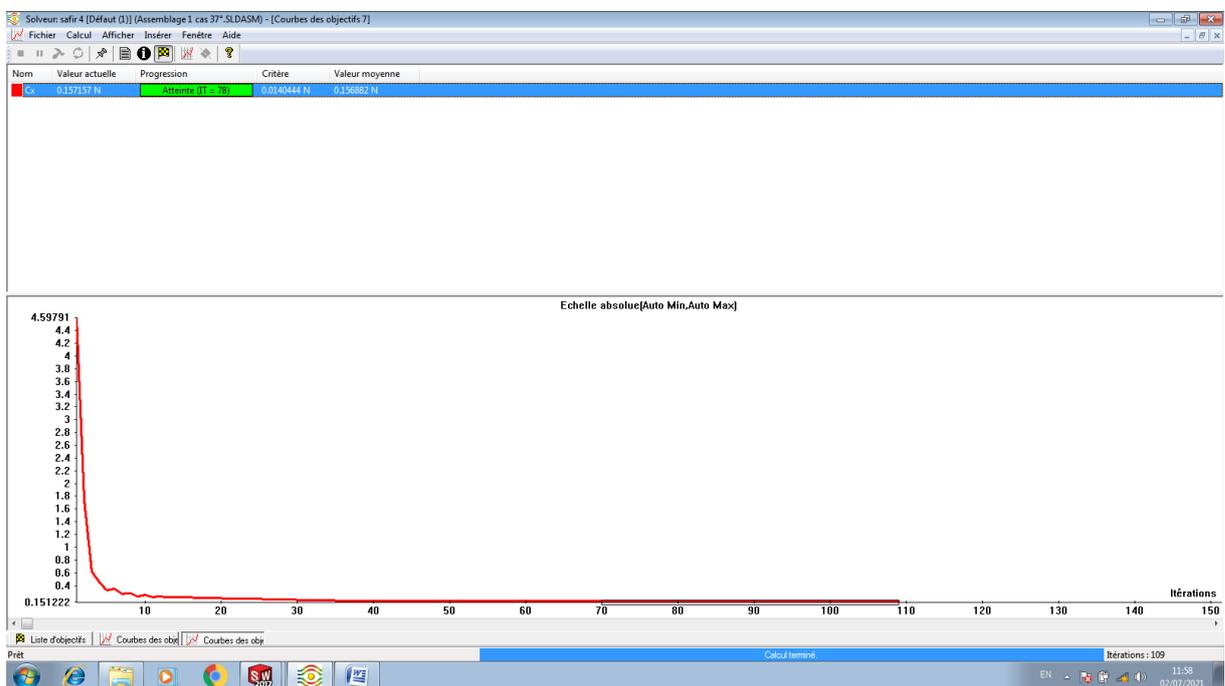


Figure 4.28 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d’itérations

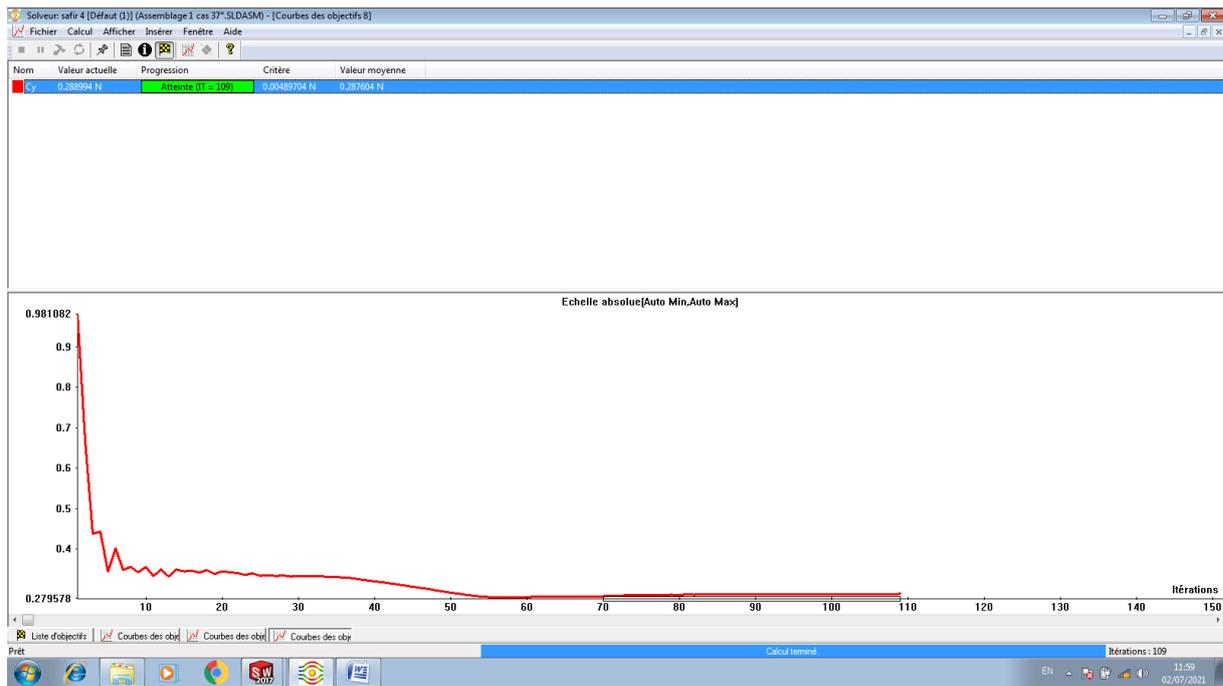


Figure 4.29 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations

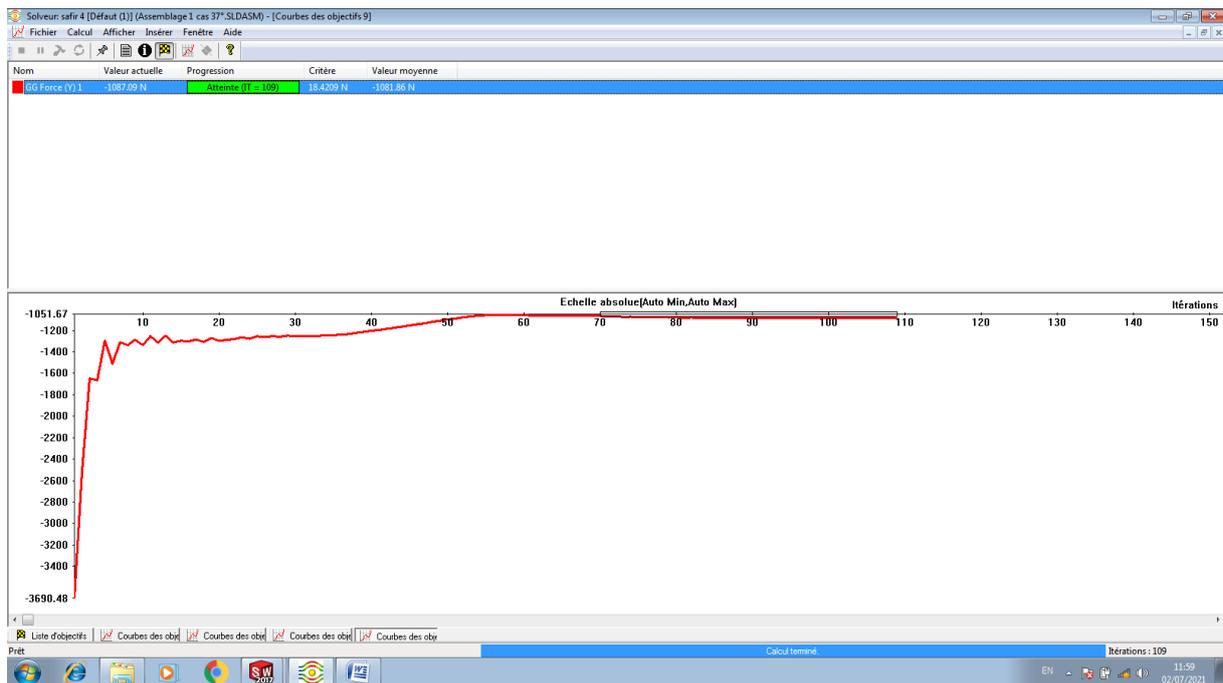


Figure 4.30 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

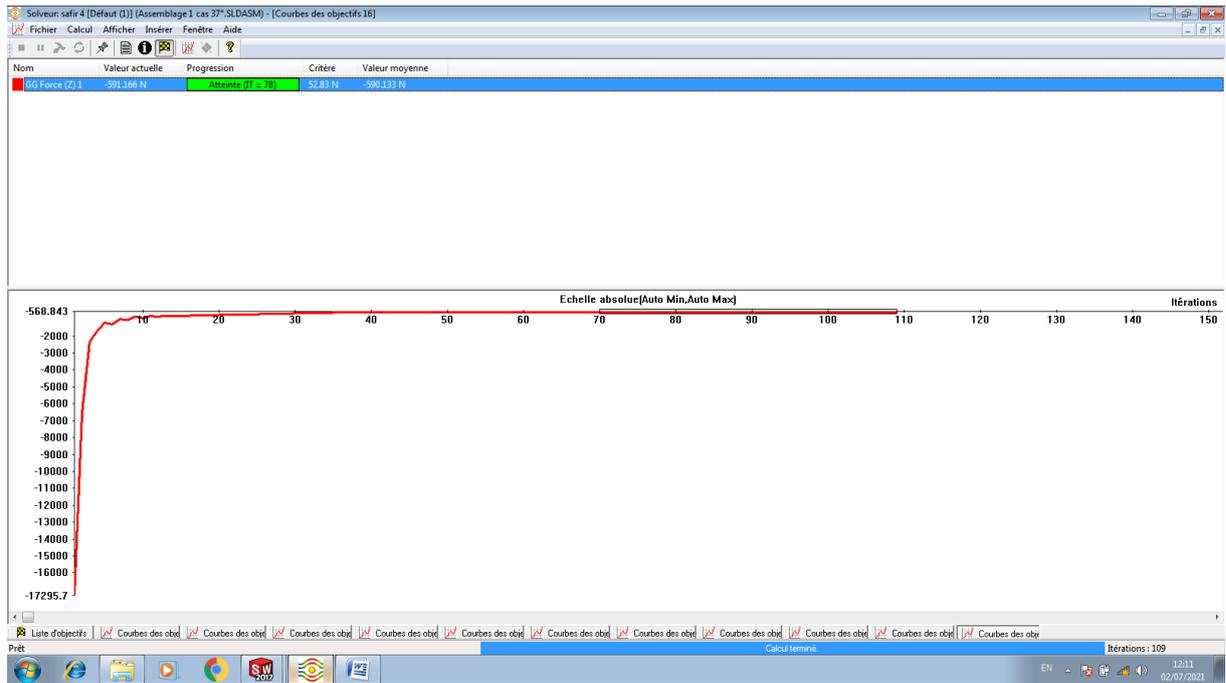


Figure 4.31 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

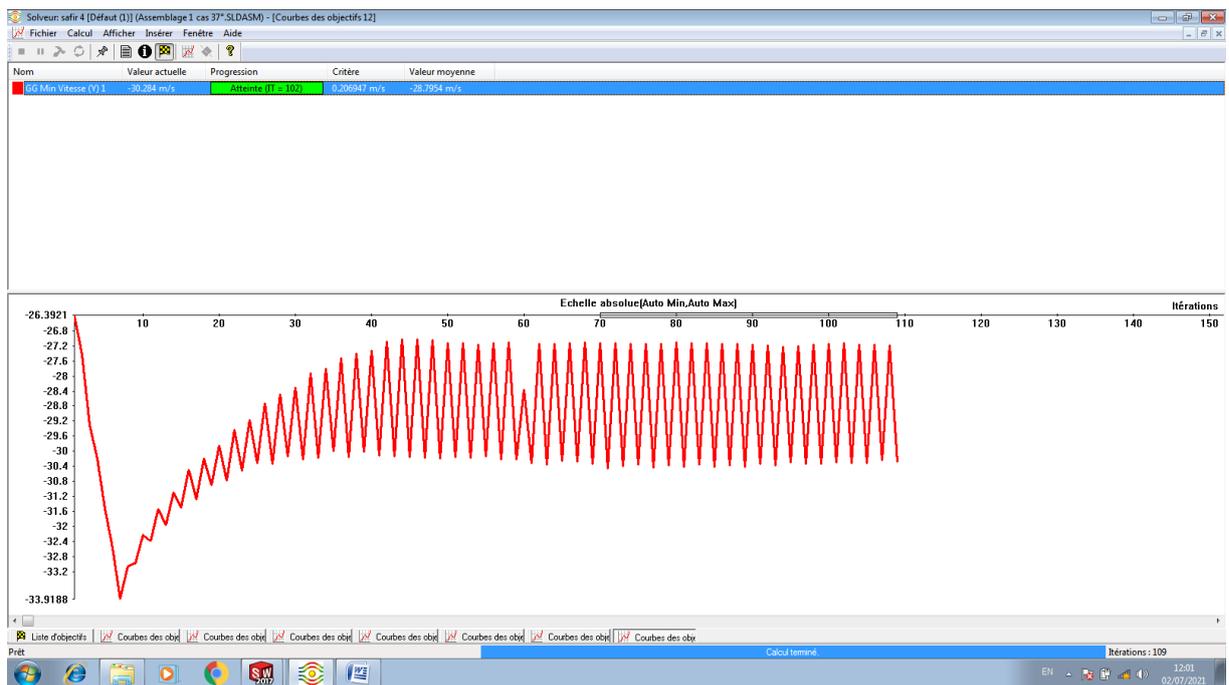


Figure 4.32 - le coefficient de l'effet de vitesse à

l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

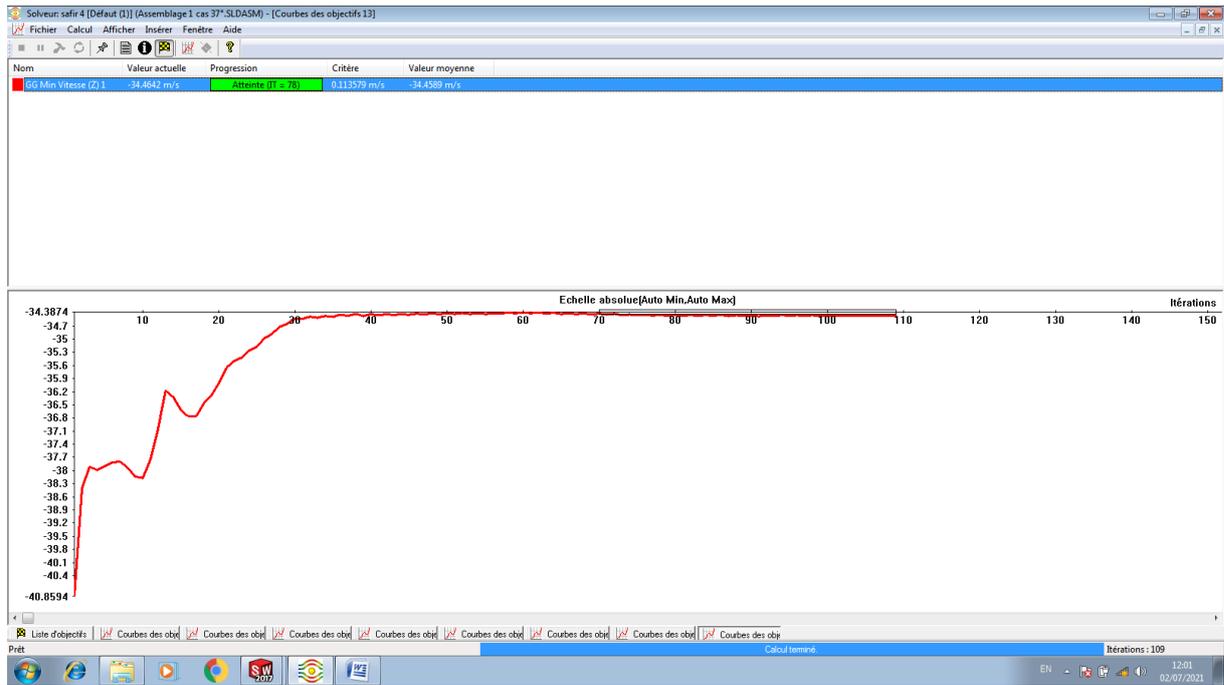


Figure 4.33 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

**Remarque :**

Les modélisations de simulation montrées dans les figures précédant et les résultats de simulation montrée permettent de valoriser et mettre en relief la pertinence de nos simulation.

On remarque d'après ces figures que la force de la portance est plus grande que la traînée c'est pour cela que les constructeur jouent sur la forme géométrique pour réduire la force de portance qui influe directement sur la stabilité de la voiture pendant la vitesse.

IV.4.2- Forme d'un Angle -24° : H=1430mm

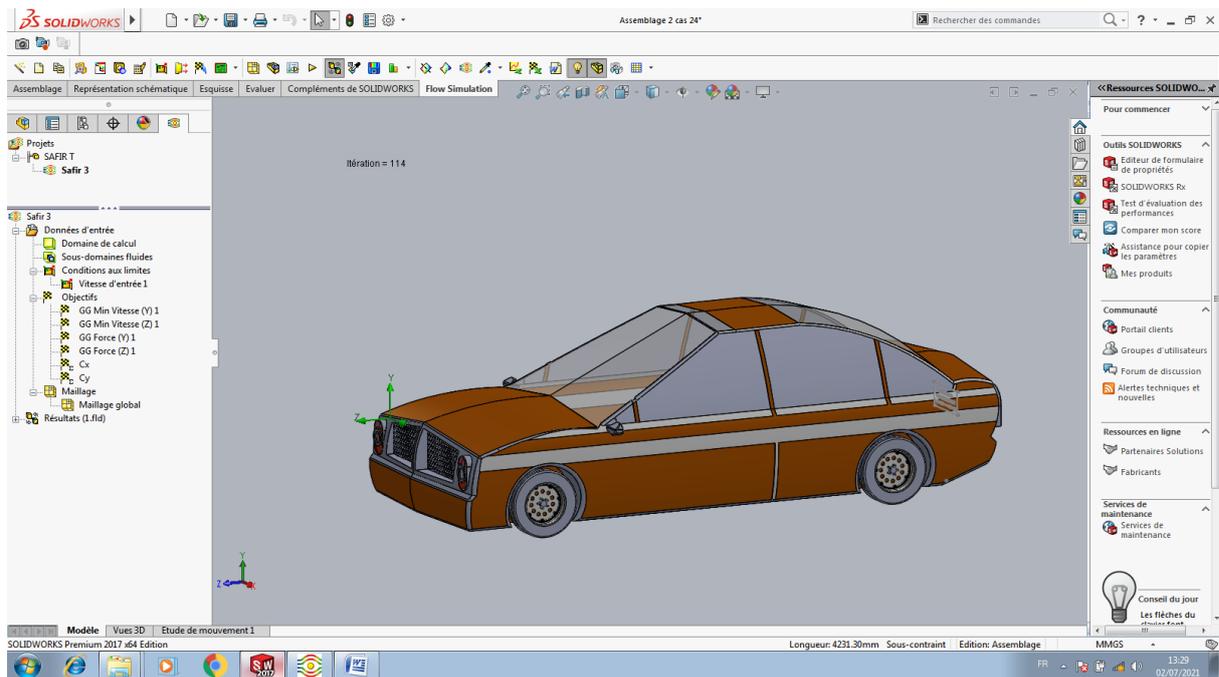


Figure 4.34 - Modèle d'un voiture avec Solidworks à un angle de 24°

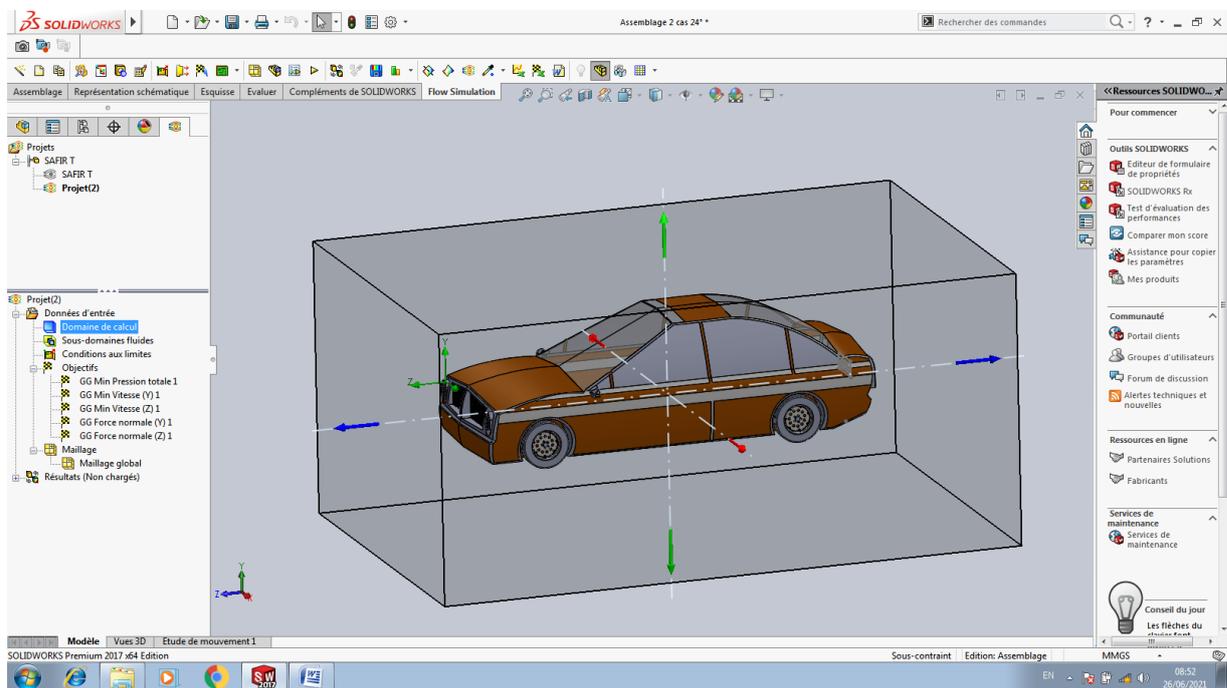


Figure 4.35- domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 24°.

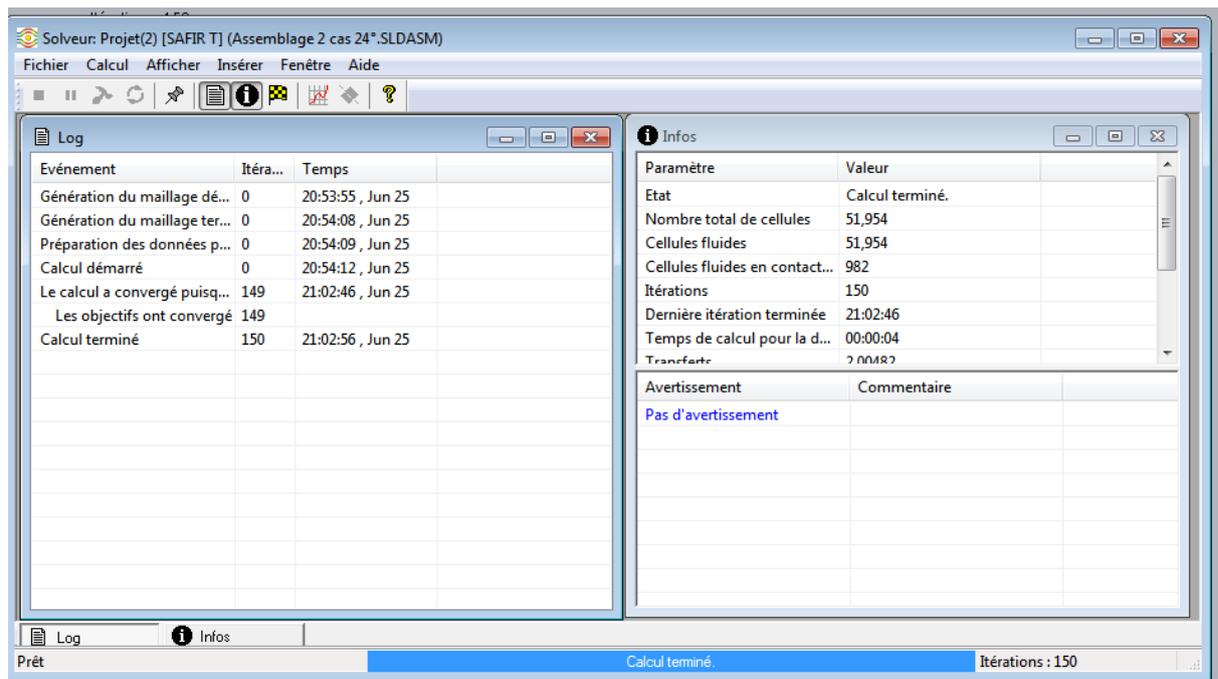


Figure 4.36 - Résultat de calcul des équations des objectifs

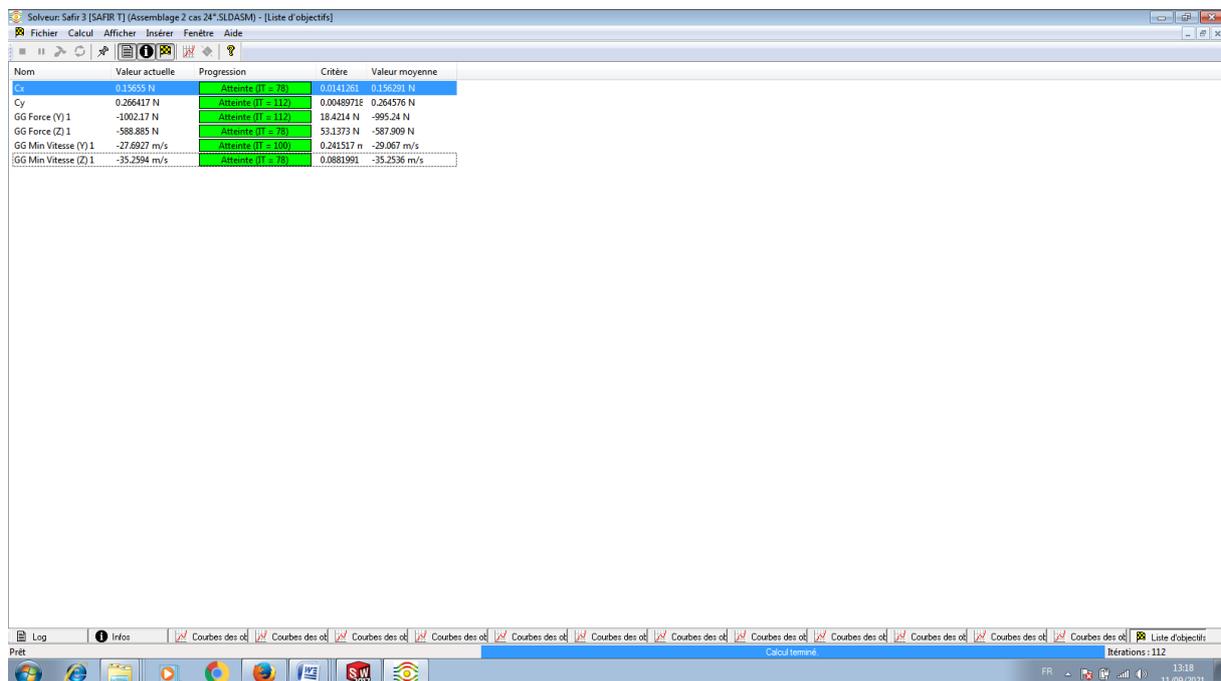


Figure 4.37 - Résultat de calcul des équations des objectifs

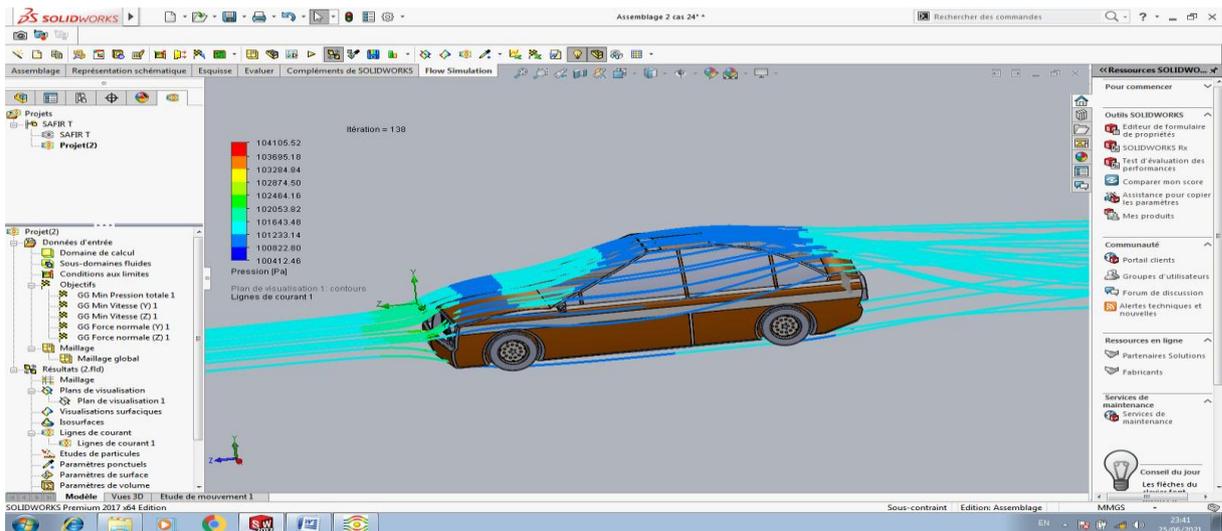


Figure 4.38 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression

Remarque. La figure .4.34. donne les contours de pression pour le configuration, on remarque que la pression se crée en s’approchant vers l’amant de l’automobile jusqu’aelle atteint son maximum et cela est due à l’effet de choc car la vitesse de l’écoulement est inversement proportionnelle à la pression, la pression est très faible au-dessus de la voiture.

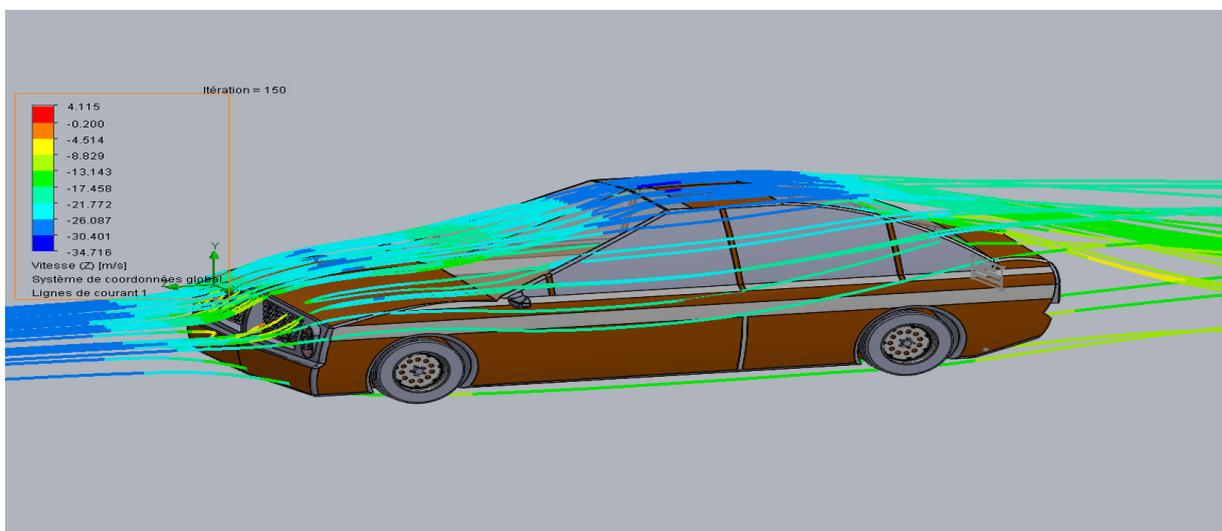


Figure 4.39 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z)

Remarque. La figure 4.35. Montrent les gradients de vitesse suivant axe (Z) au niveau de la lunette et le par choque et le toit arriéré de voiture, elles sont négatives près de la paroi due au décollement de l’écoulement dans ces zones, les profils de vitesse sont évidés près de la paroi et penche à inverser leur sens d’écoulement

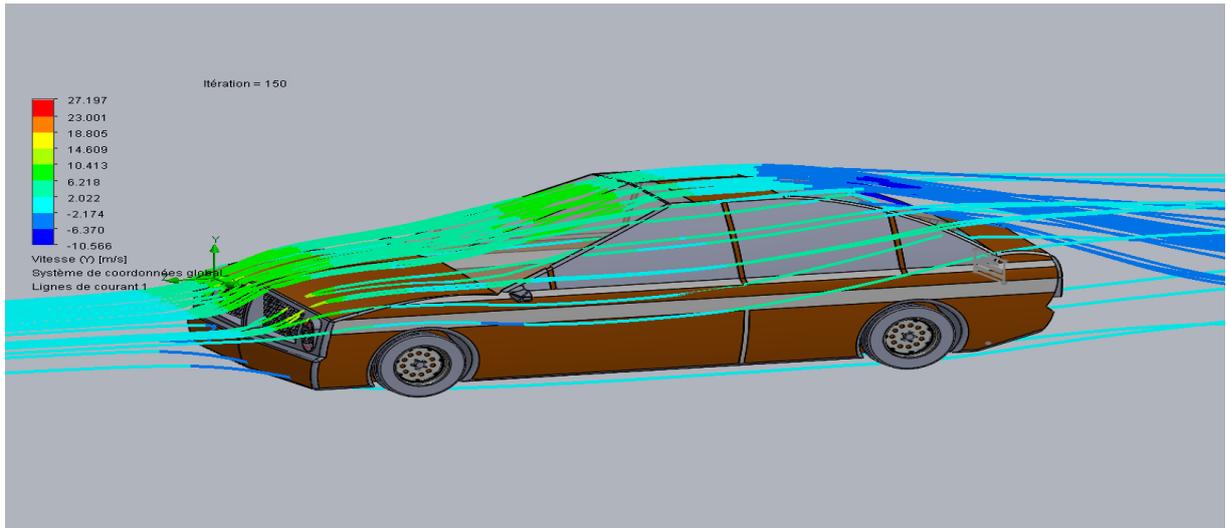


Figure 4.40 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y)

Remarque. La figure 4.35. Montrent les gradients de vitesse suivant axe (Y) au niveau de la lunette et le par choque et le toit arriéré de voiture, elles sont négatives près de la paroi due au décollement de l'écoulement dans ces zones, les profils de vitesse sont évidés près de la paroi et penche à leur sens d'écoulement

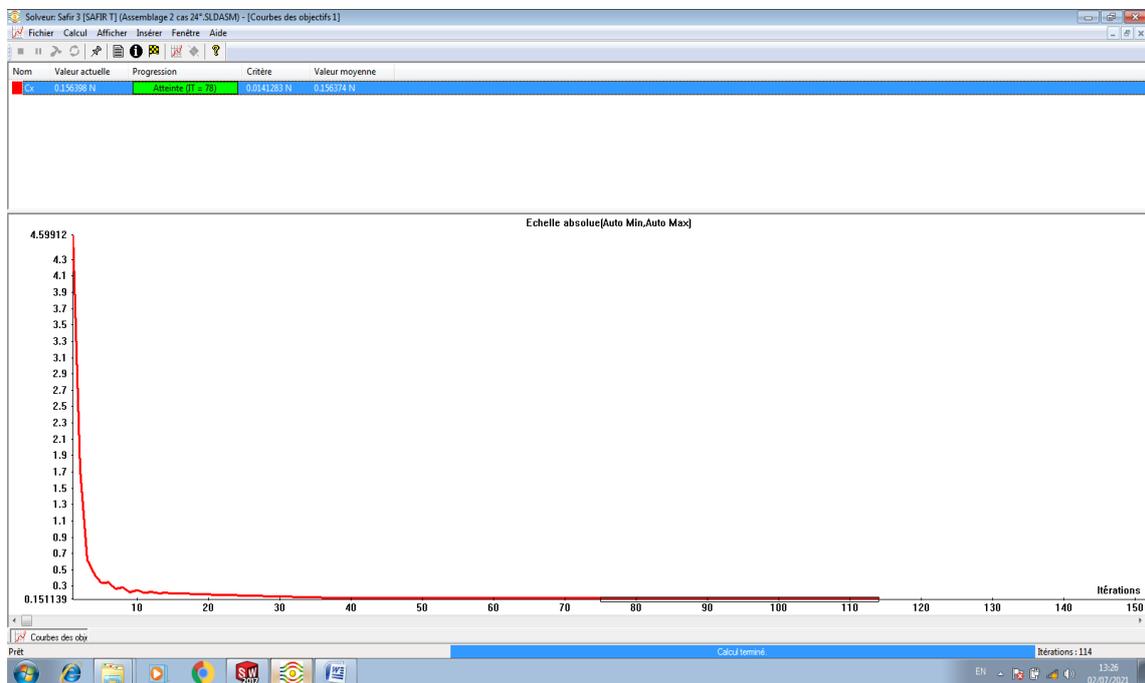


Figure 4.41 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d'itérations

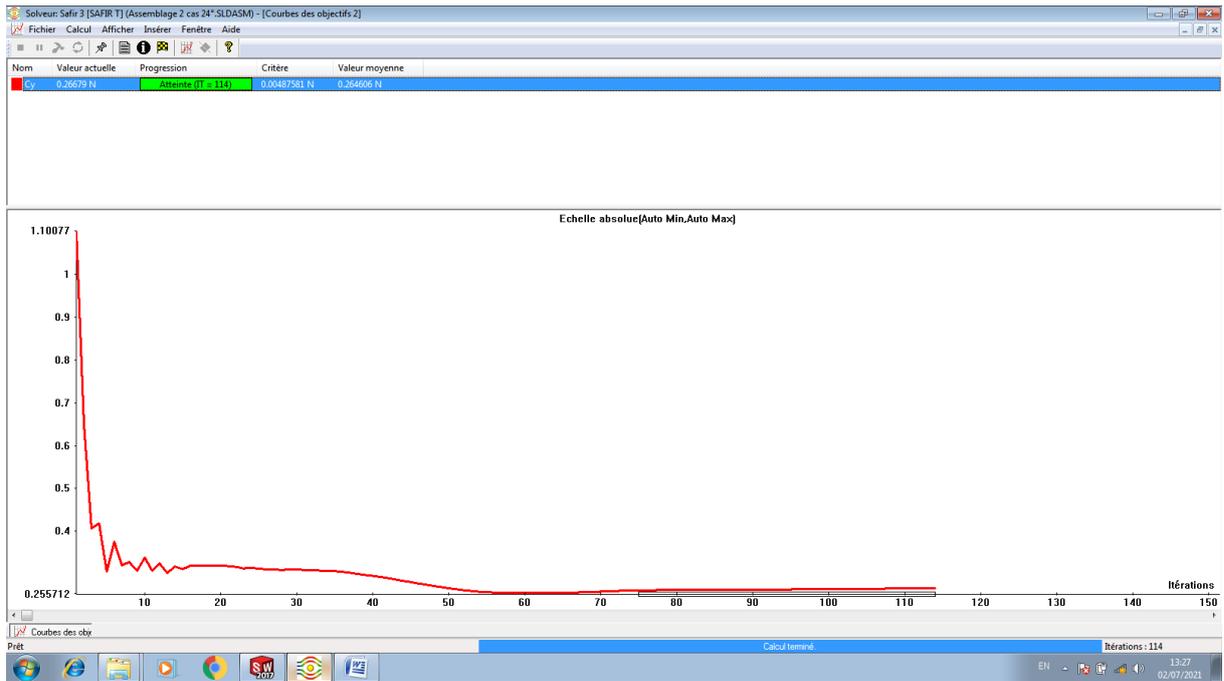


Figure 4.42 - le coefficient de départance en fonction de nombre d'itérations

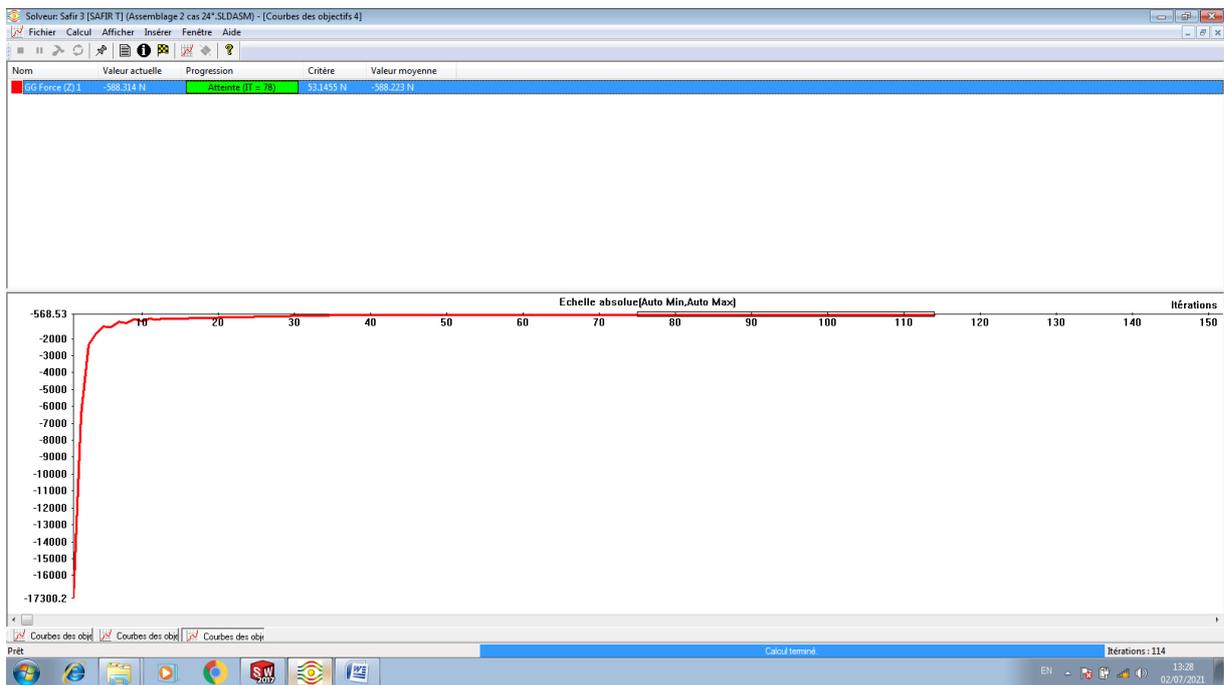


Figure 4.43 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

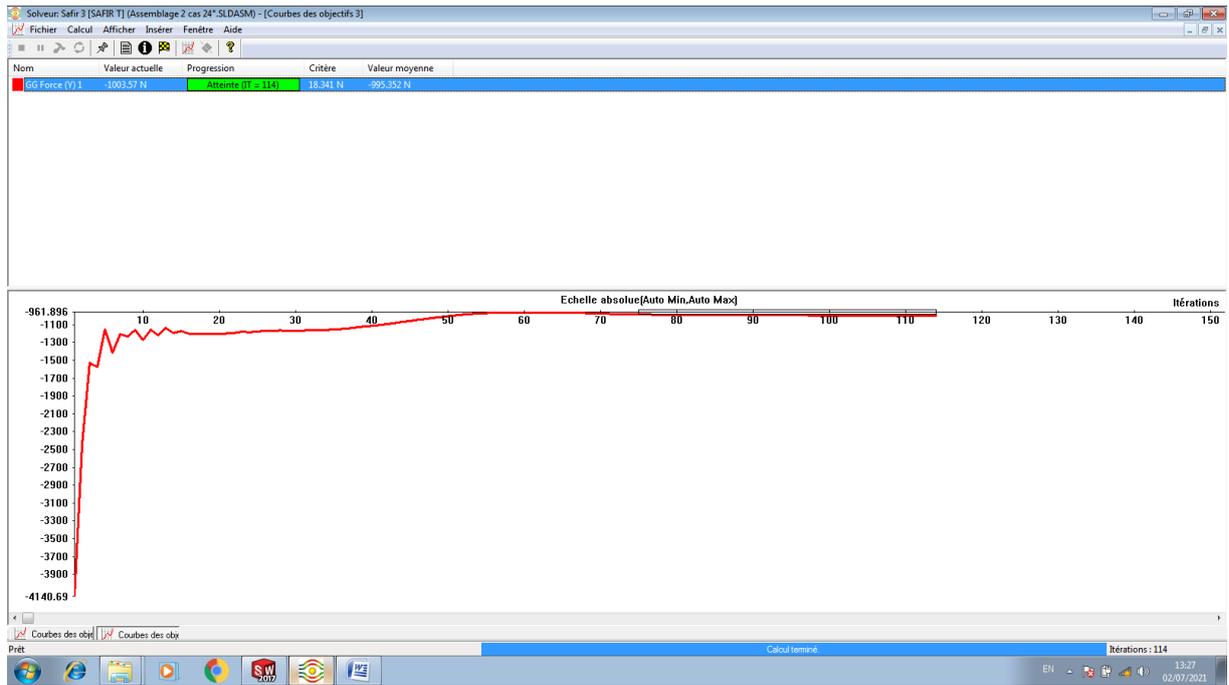


Figure 4.44 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

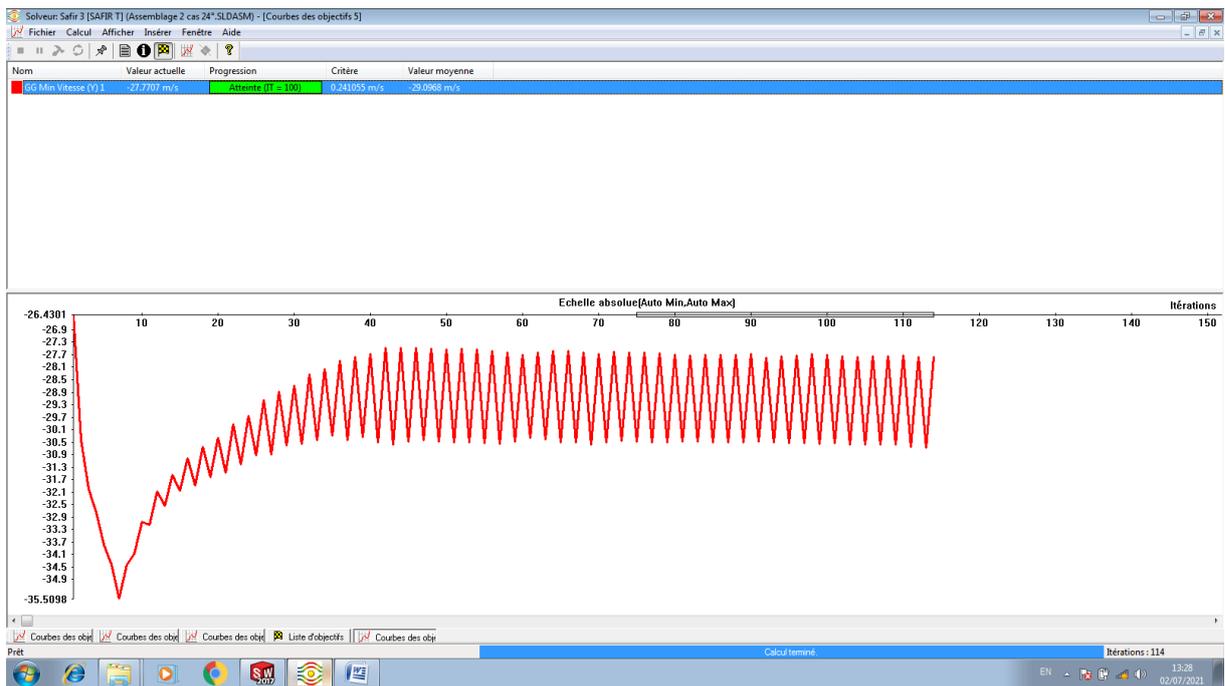


Figure 4.45 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

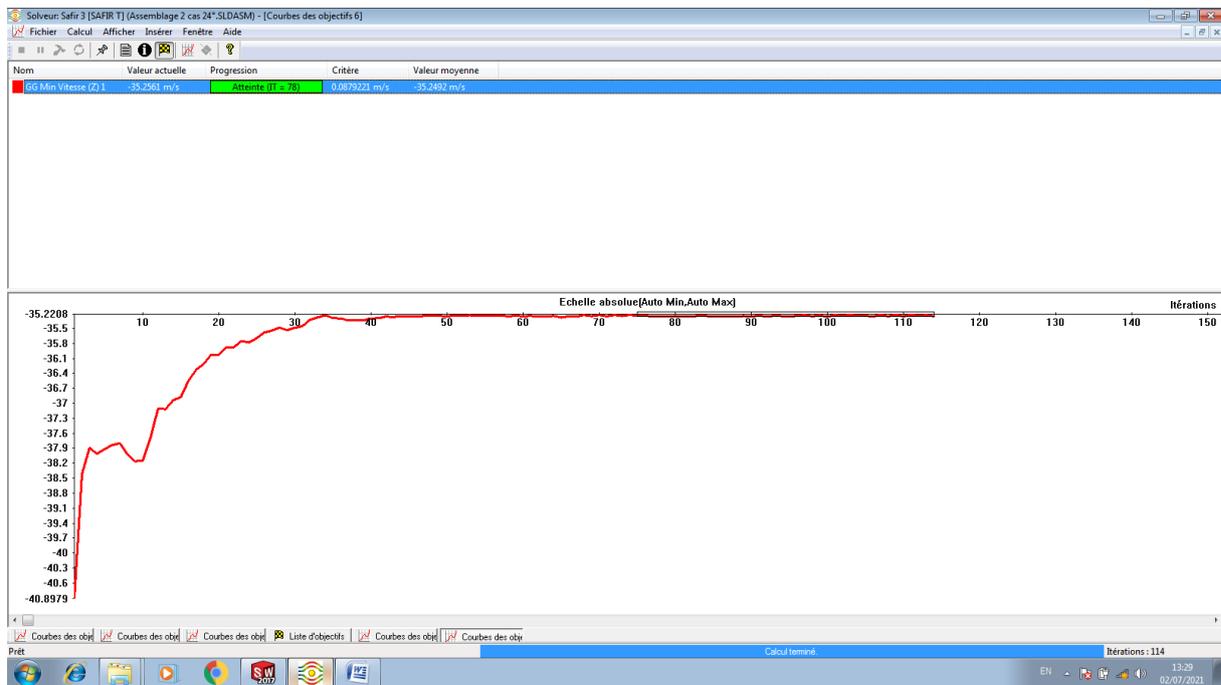


Figure 4.46 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

**Remarque :**

Les résultats de simulation montrent l'importance de la forme d'angle d'attaque et d'après ces figures de simulation ; on remarque que la force de déportance est plus grande que la trainée et on remarque que la force de déportance est reliée avec la force de trainée et la forme de l'angle d'attaque

IV.4.3- Forme d'un Angle  $-15.55^\circ$  : H=1220mm

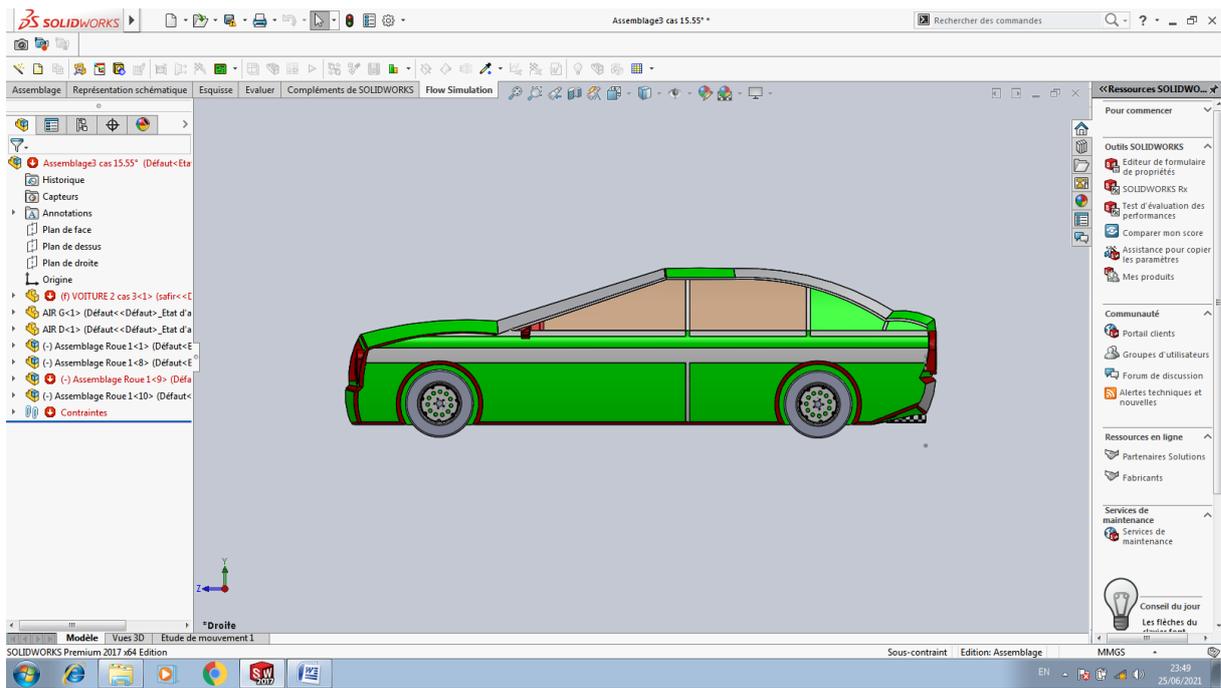


Figure 4.47 - Modèle d'une voiture avec Solidworks à un angle de  $15.55^\circ$

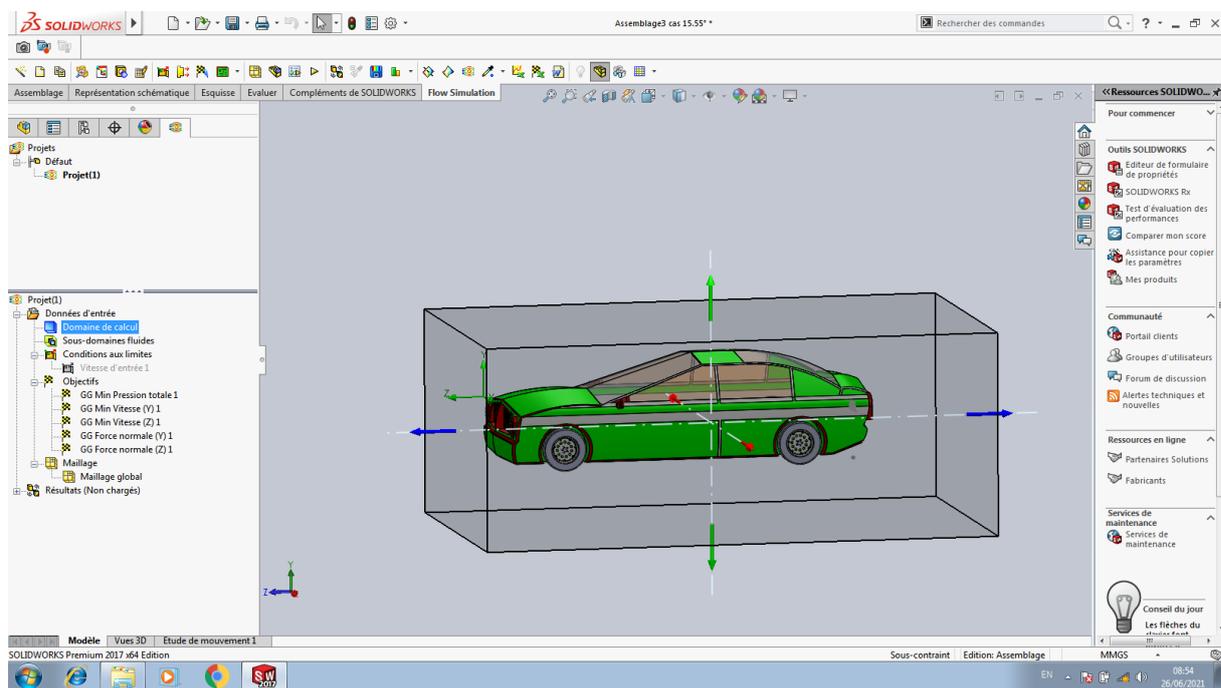


Figure 4.48 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de  $15.55^\circ$

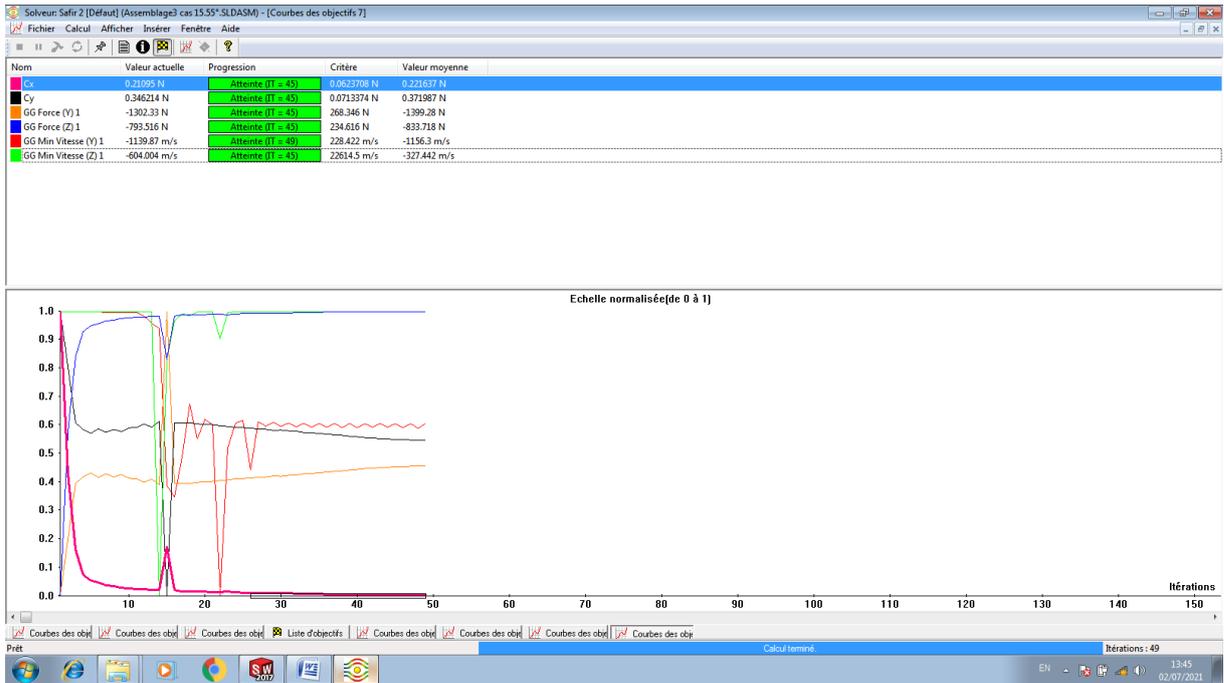


Figure 4.49 - Résultat de calcul des équations des objectifs

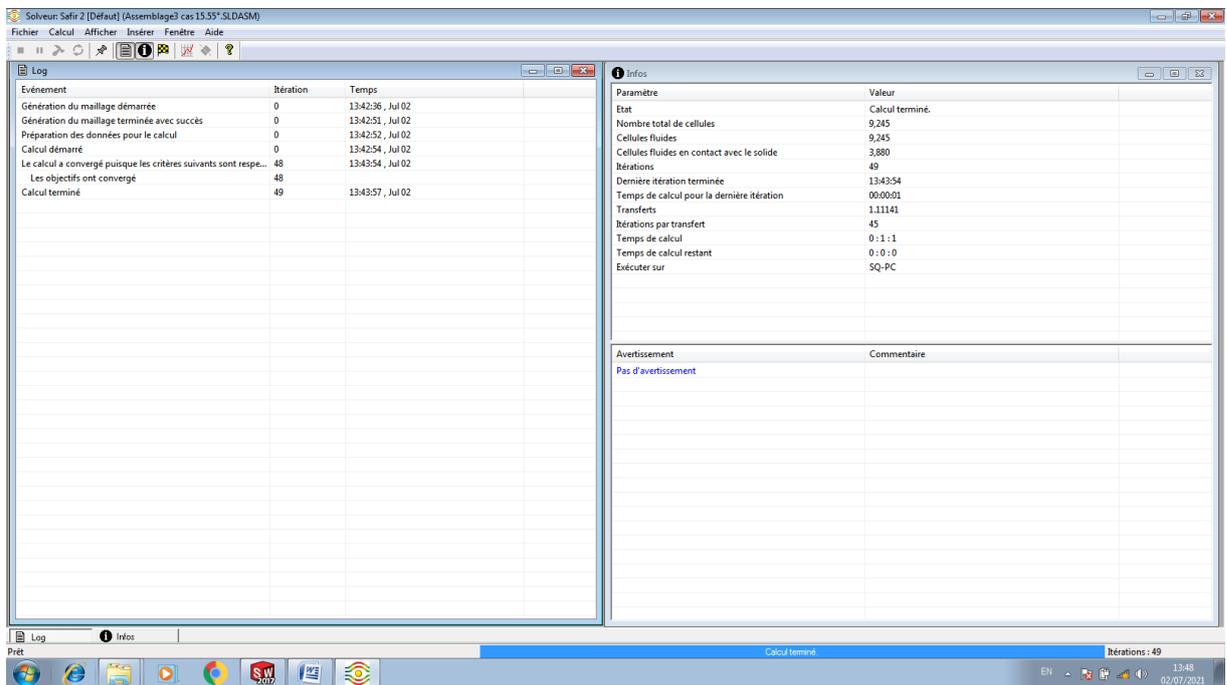


Figure 4.50 - Résultat de calcul des équations des objectifs

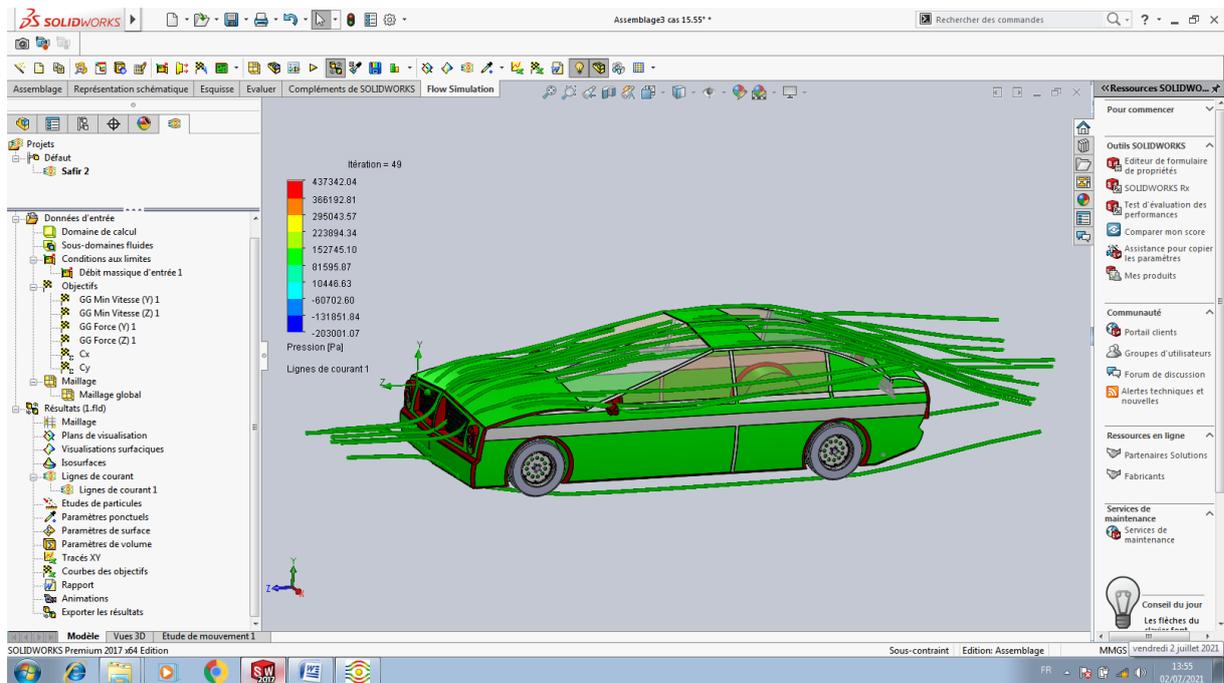


Figure 4.51 - Modèle des lignes de courant avec effet de pression

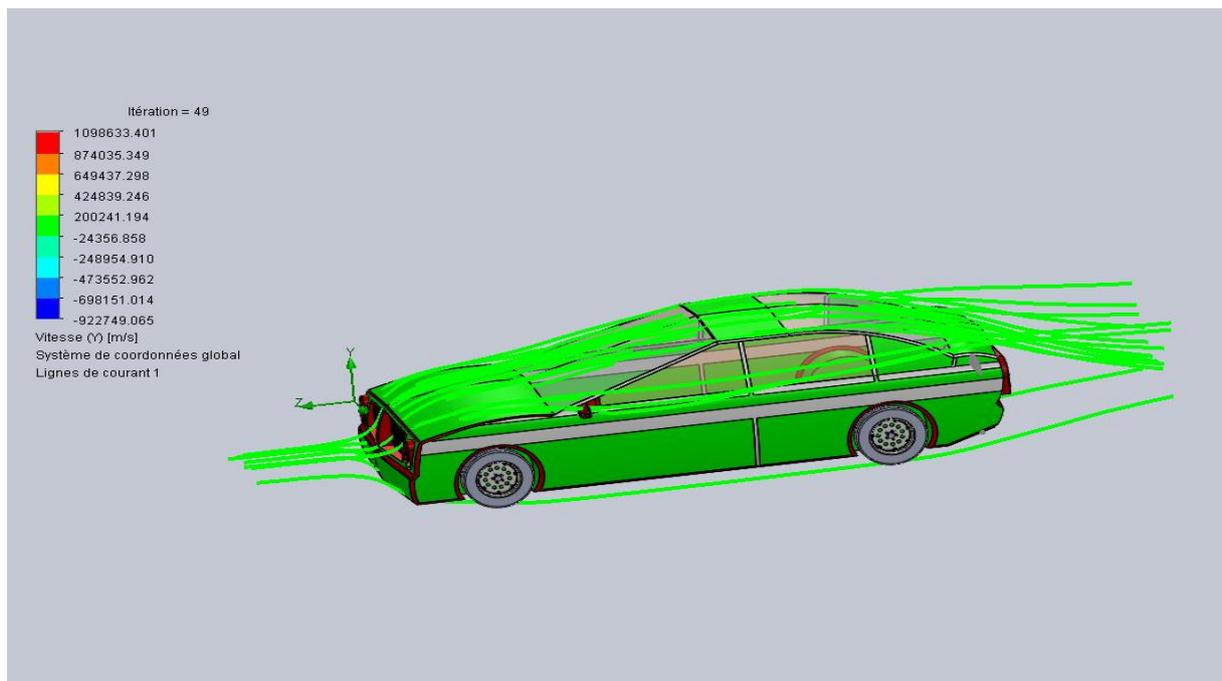


Figure 4.52 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y)

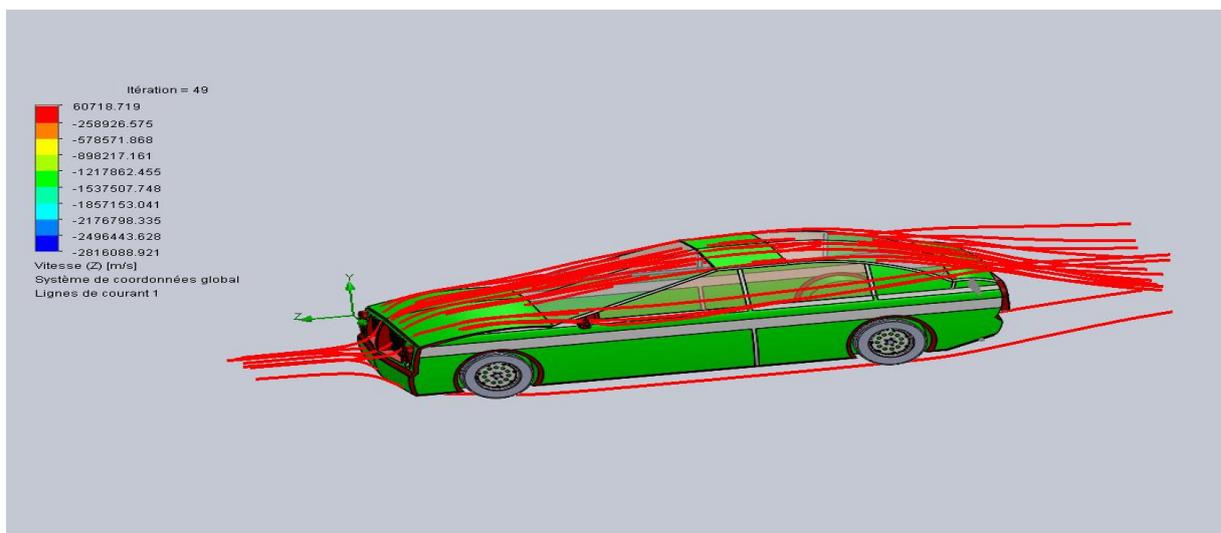


Figure 4.53- Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z)

On remarque d’après les trois figures 51, 52 et 53 que la vitesse du fluide suivant l’axe (Z.Y) reste a peu près stable rien a changé par pour les expériences président et la pression du fluide gardé la même condition des que le fluide il est en contact avec la voiture a cause du frottement.

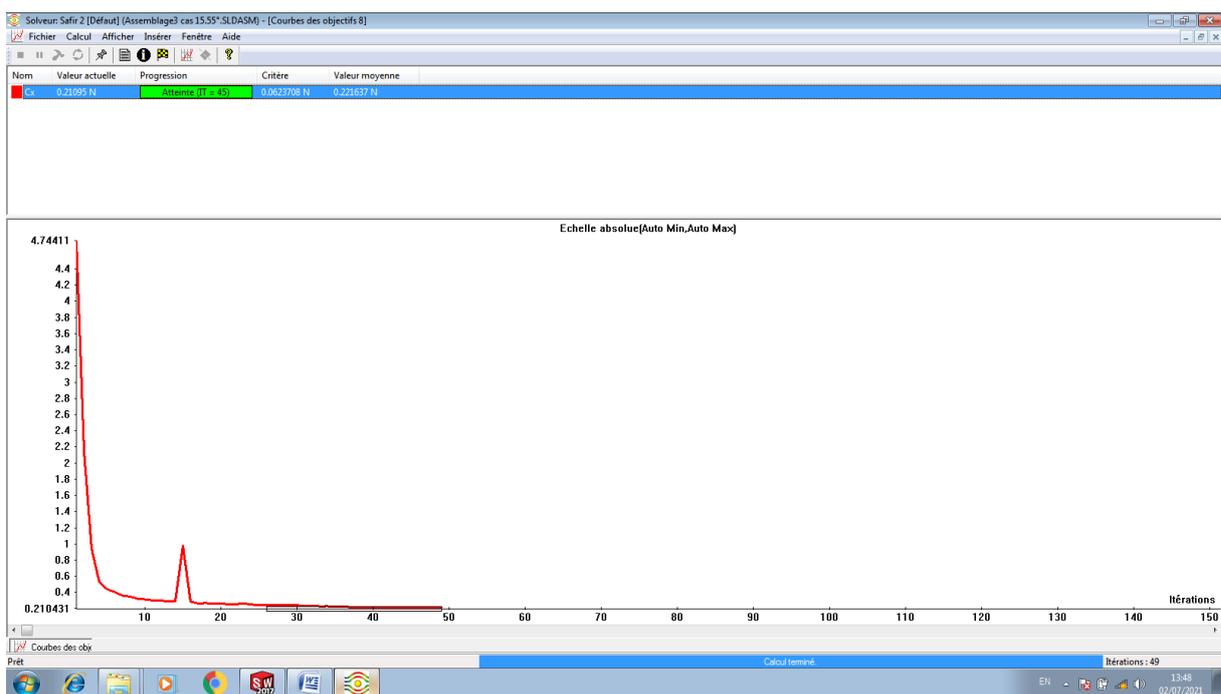


Figure 4.54 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d’itérations

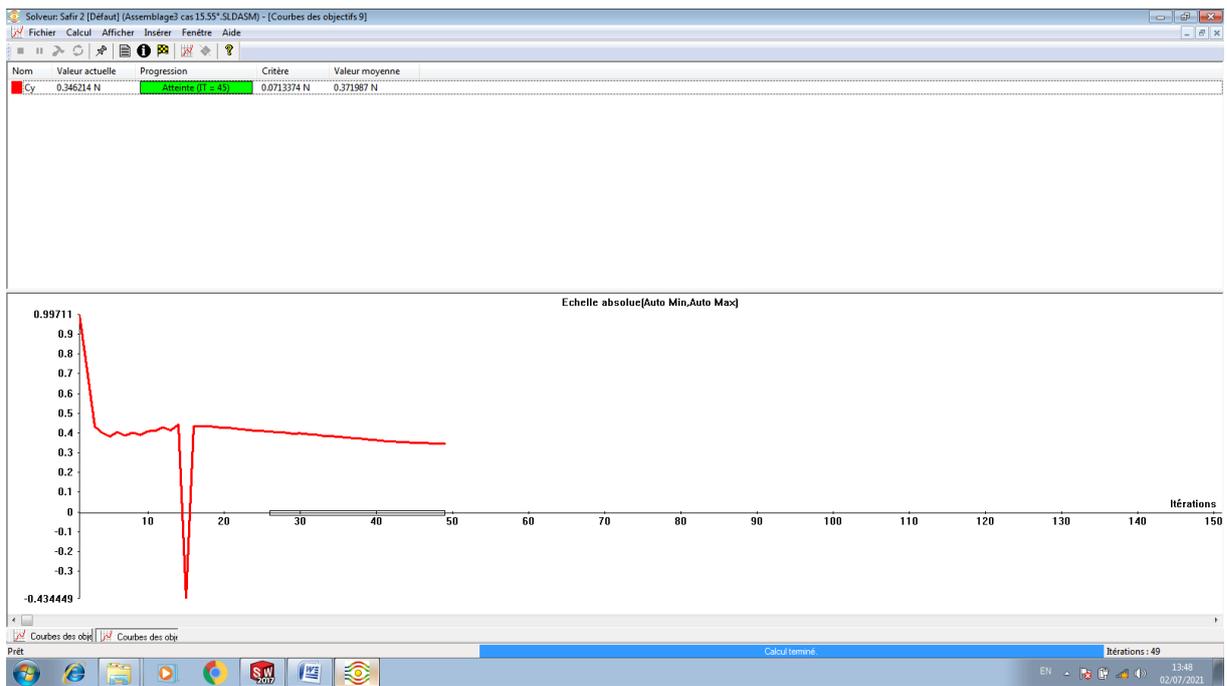


Figure 4.55 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations

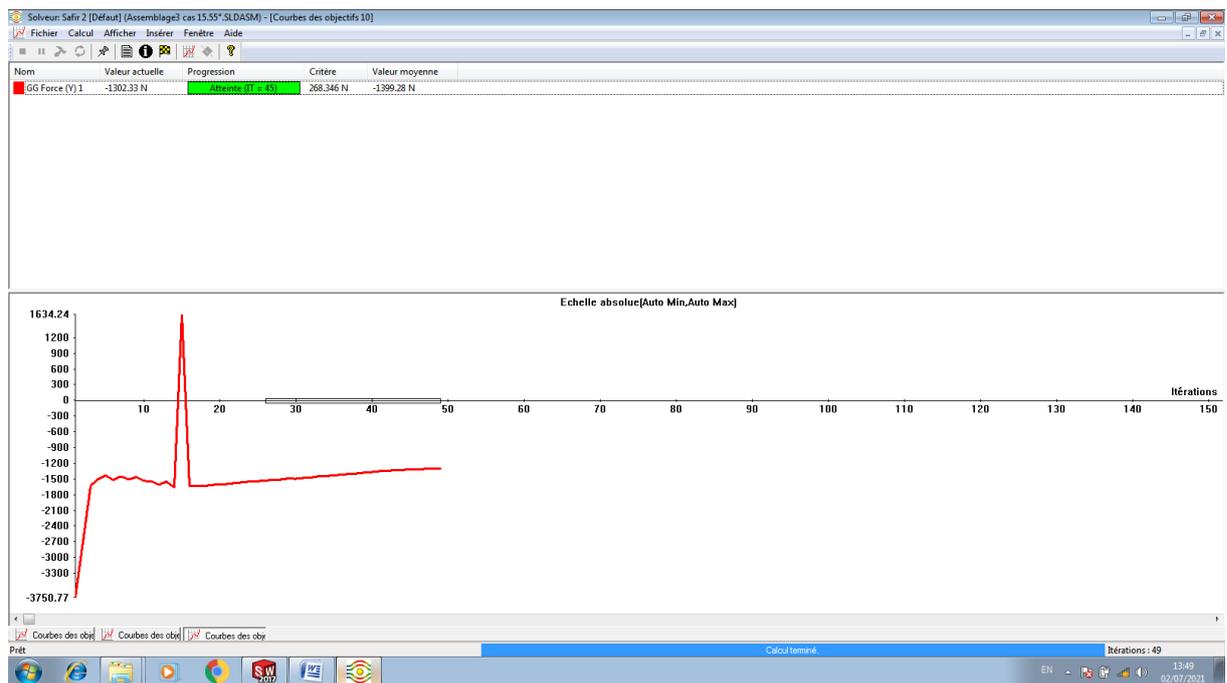


Figure 4.56 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

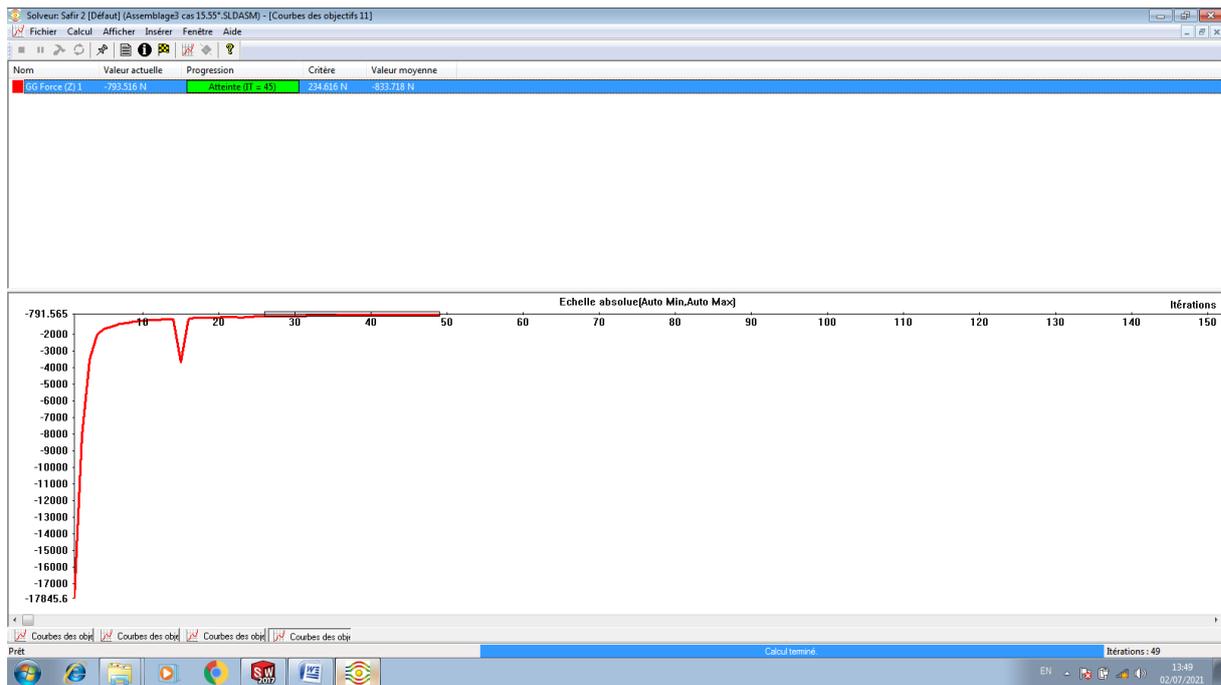


Figure 4.57 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

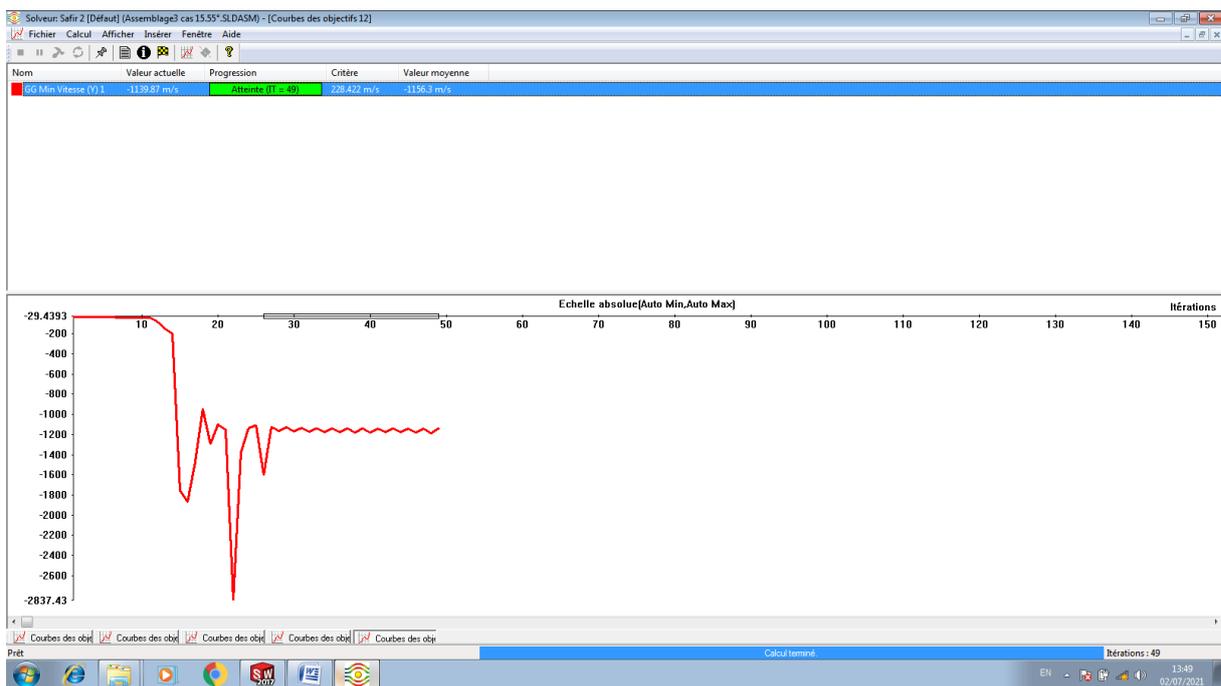


Figure 4.58 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

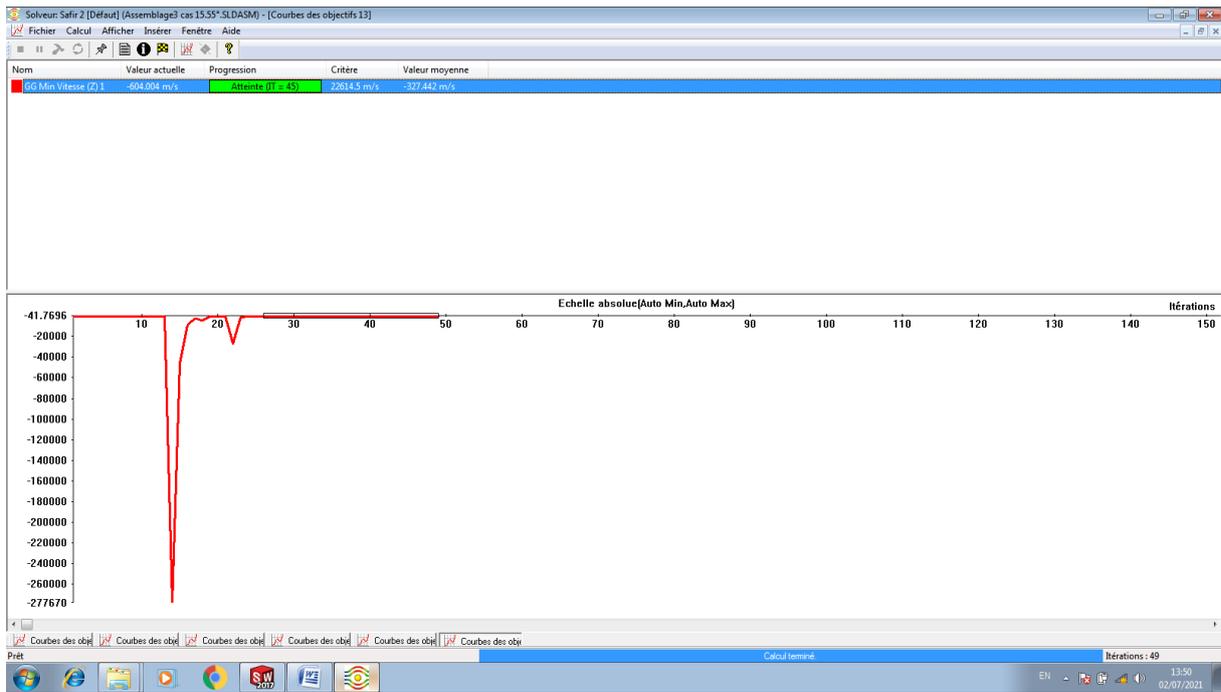


Figure 4.59 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itérations

On remarque que la force de trainée est plus petite que la déportance ce qui explique l'importance de la forme géométrique de la voiture qui définit les grandeurs physique de calcul

### IV.4.4 - Forme d'un Angle -10° :1185mm

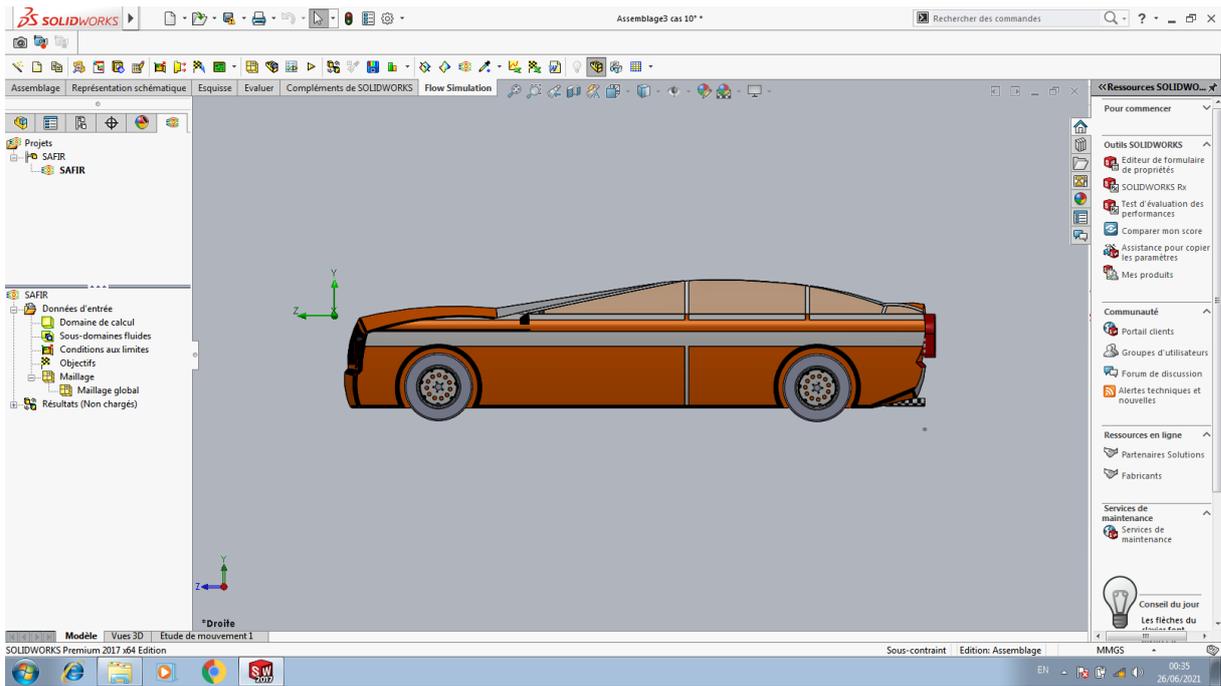


Figure 4.60 - Modèle d'une voiture avec Solidworks à un angle de 10°

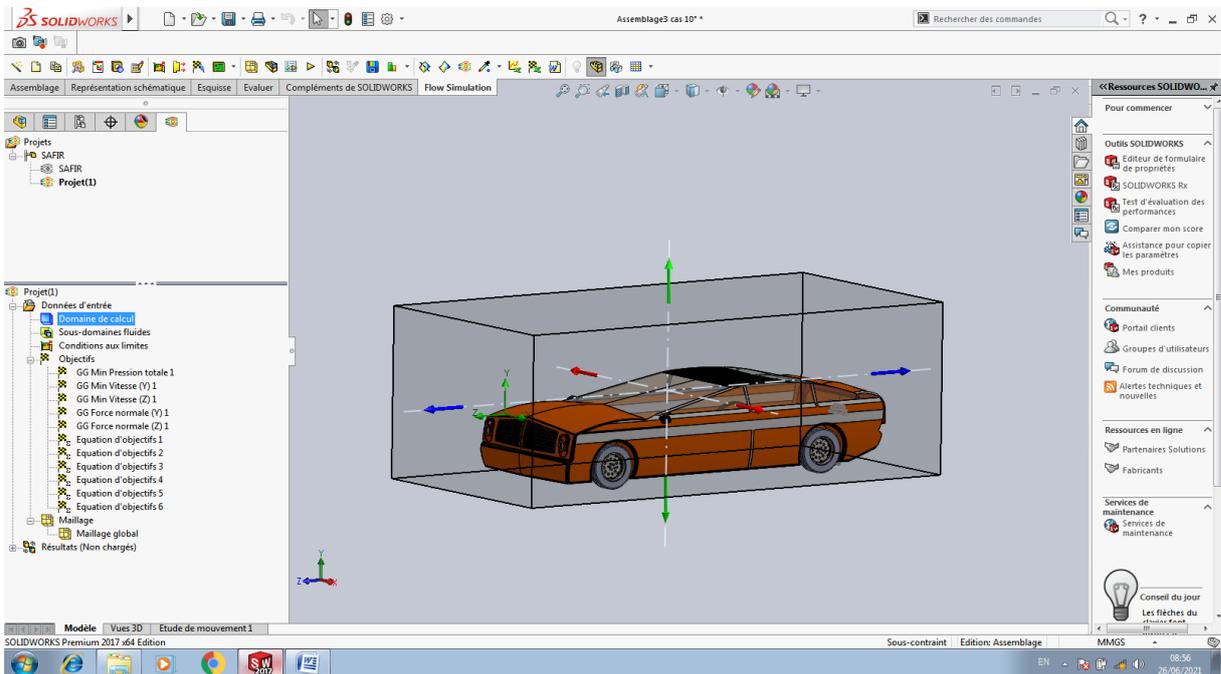


Figure 4.61 - domaine de calcul d'un modèle de voiture avec un angle de 37°



Figure :4.62 - Résultat de calcul des équations des objectifs

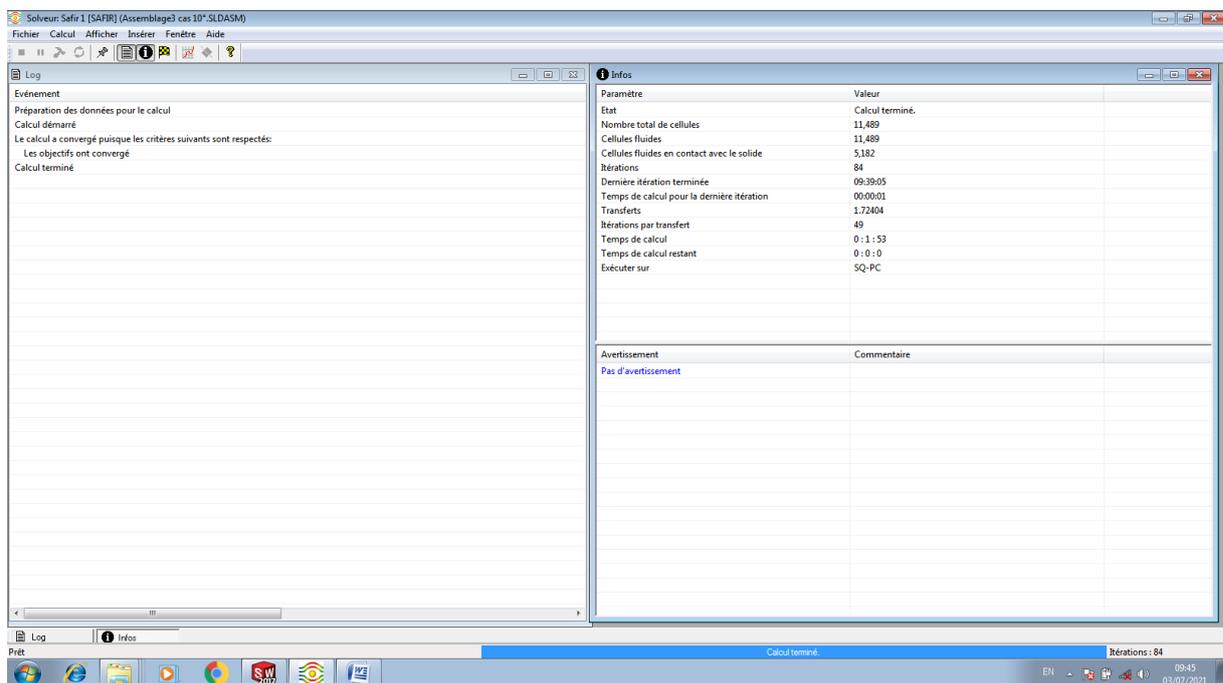


Figure 4.63 - Résultat de calcul des équations des objectifs

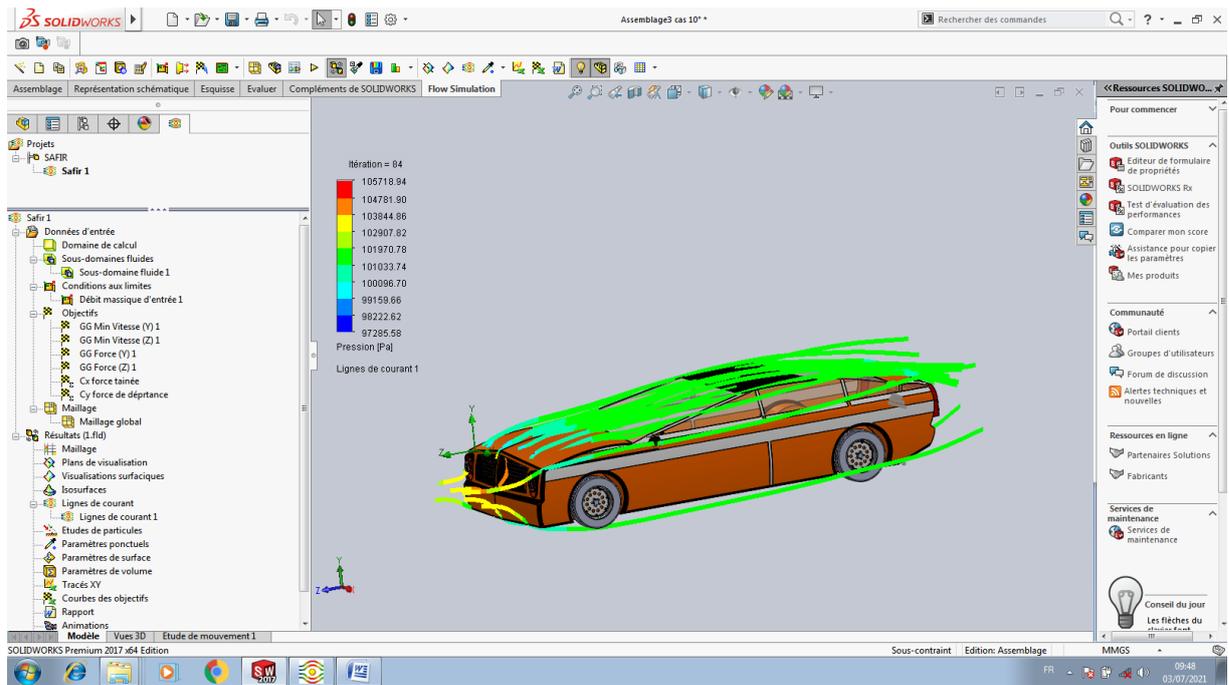


Figure 4.64 - Model des lignes de courant avec effet de pression

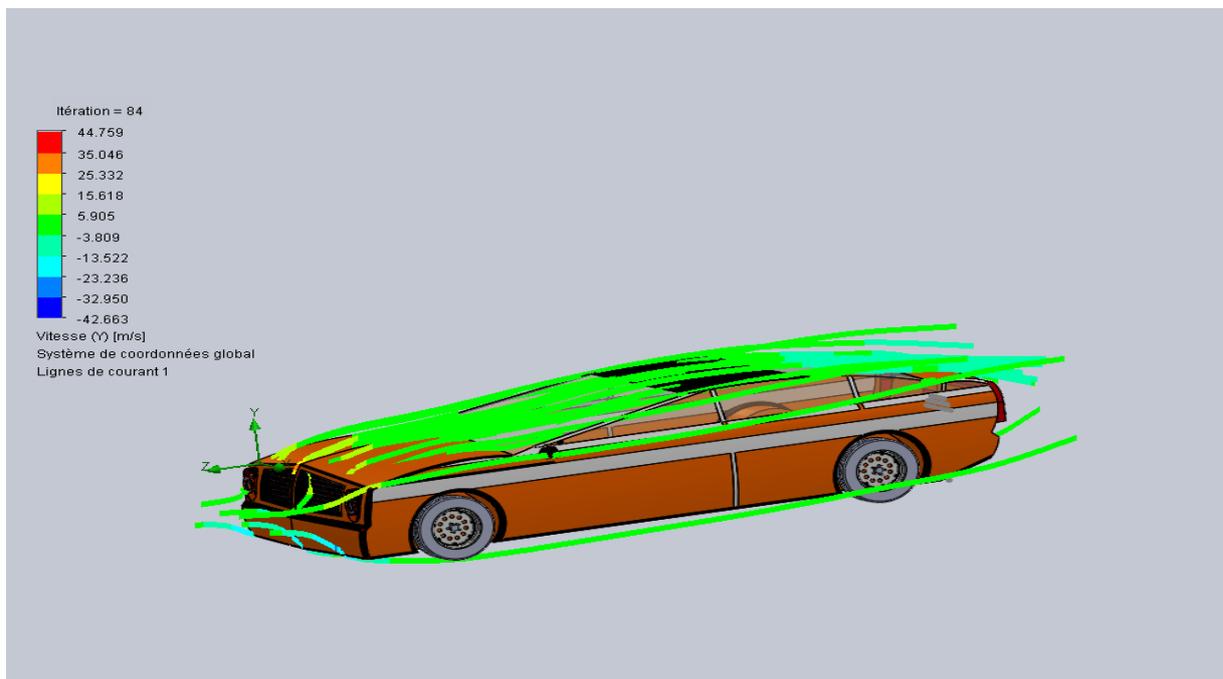


Figure 4.65- Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Y)

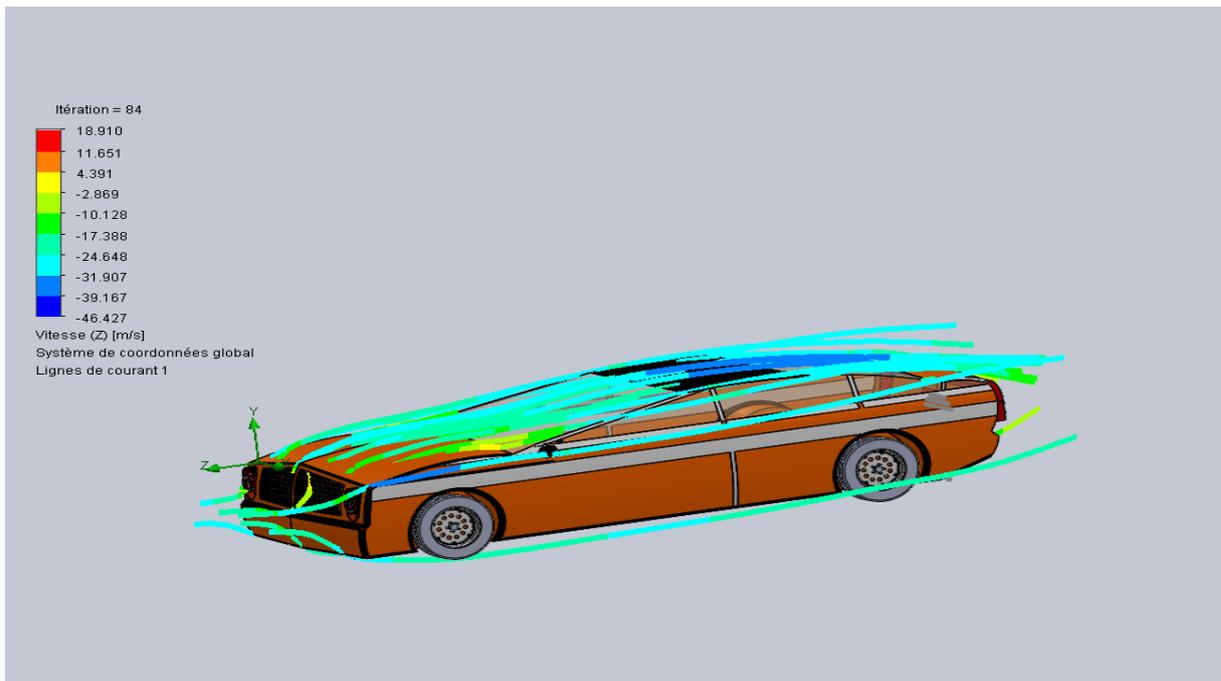


Figure :4.66 - Modèle des lignes de courant avec effet de vitesse suivant axe (Z)

On remarque d’après les trois figures 64, 65 et 66 que la vitesse du fluide suivant l’axe (Z.Y) et rapide par pour les expériences président et la pression du fluide gardé la même condition des que le fluide il est en contact avec la voiture a cause du frottement. Une autre remarque qui est très intéressante est la forme arrière de la voiture qui crée des turbulences qui font augmenter la vitesse de la voiture et diminue la consommation du carburant comme montre la

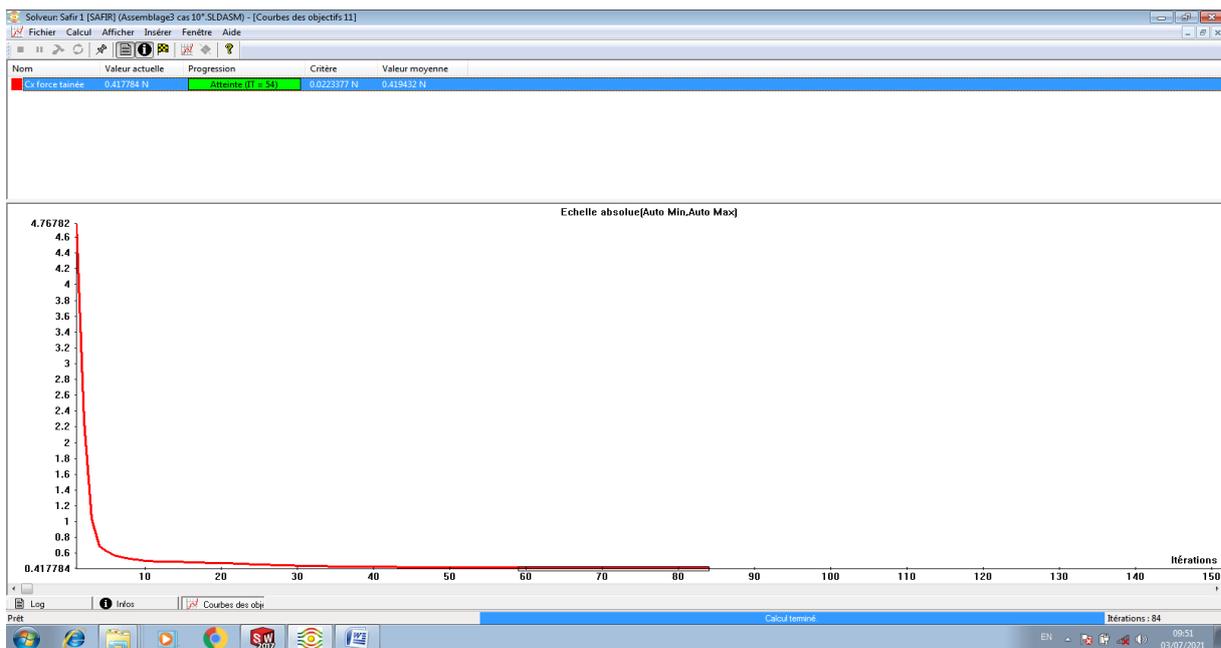


Figure 4.67 - le coefficient de trainée en fonction de nombre d’itérations

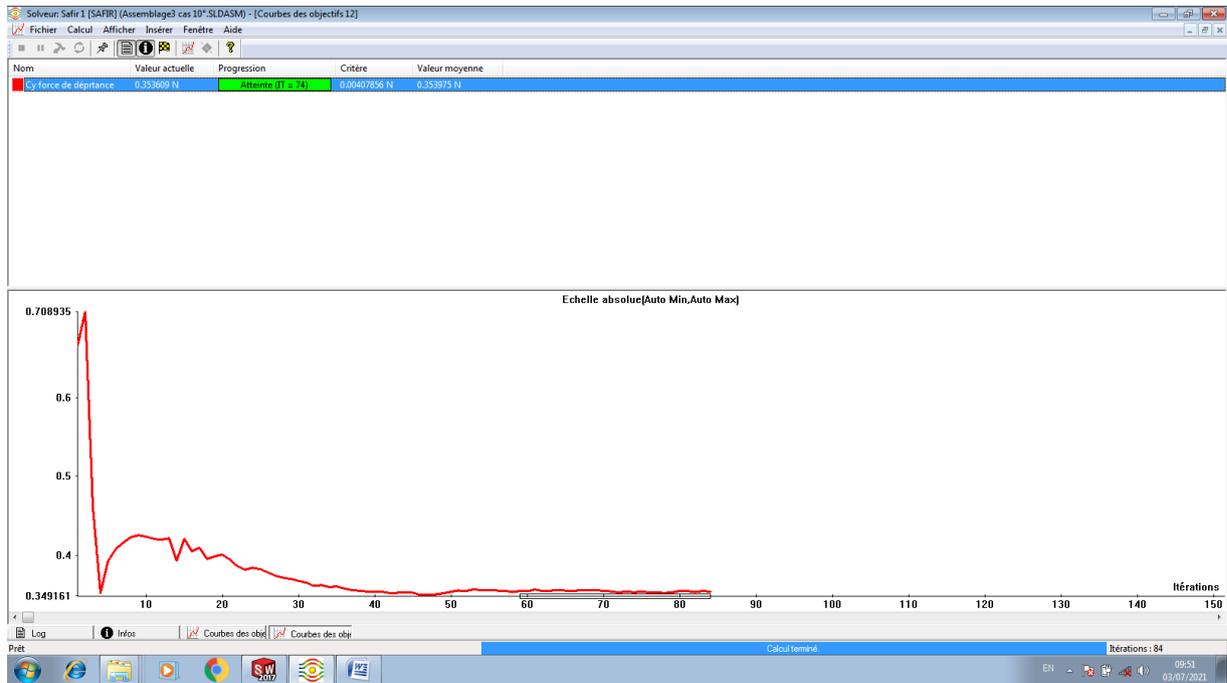


Figure 4.68 - le coefficient de déportance en fonction de nombre d'itérations

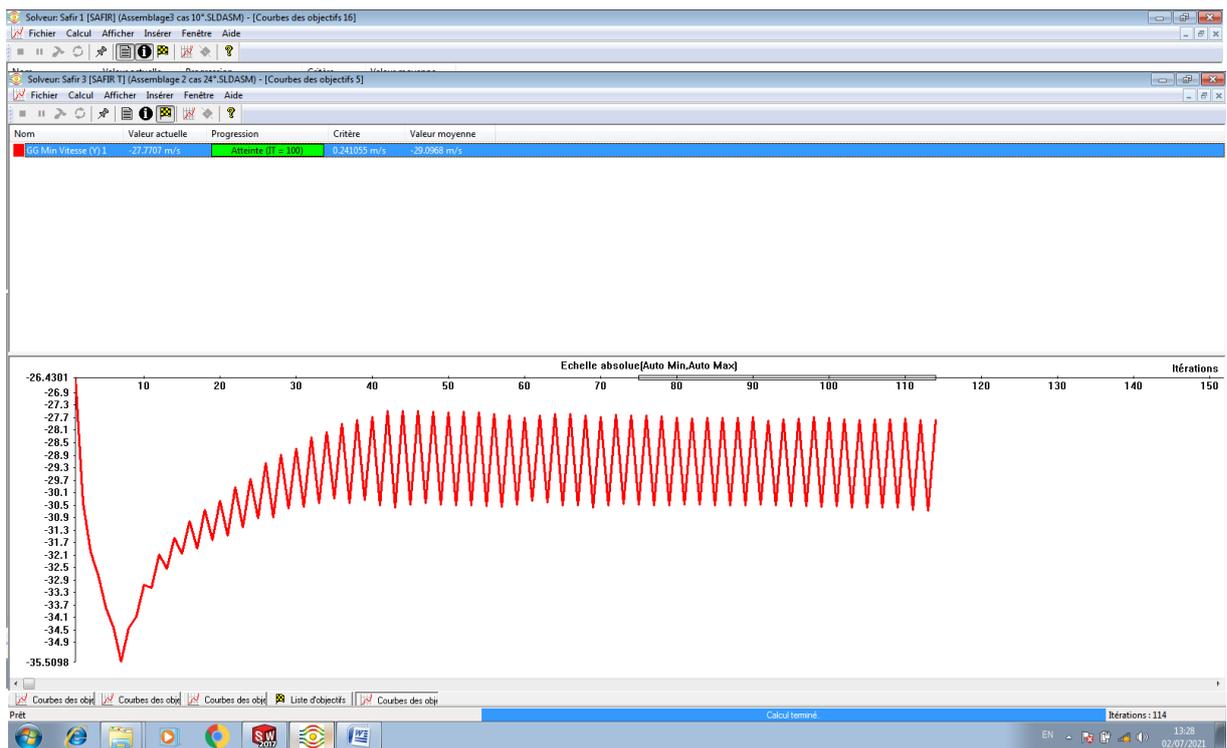


Figure 4.69 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itérations

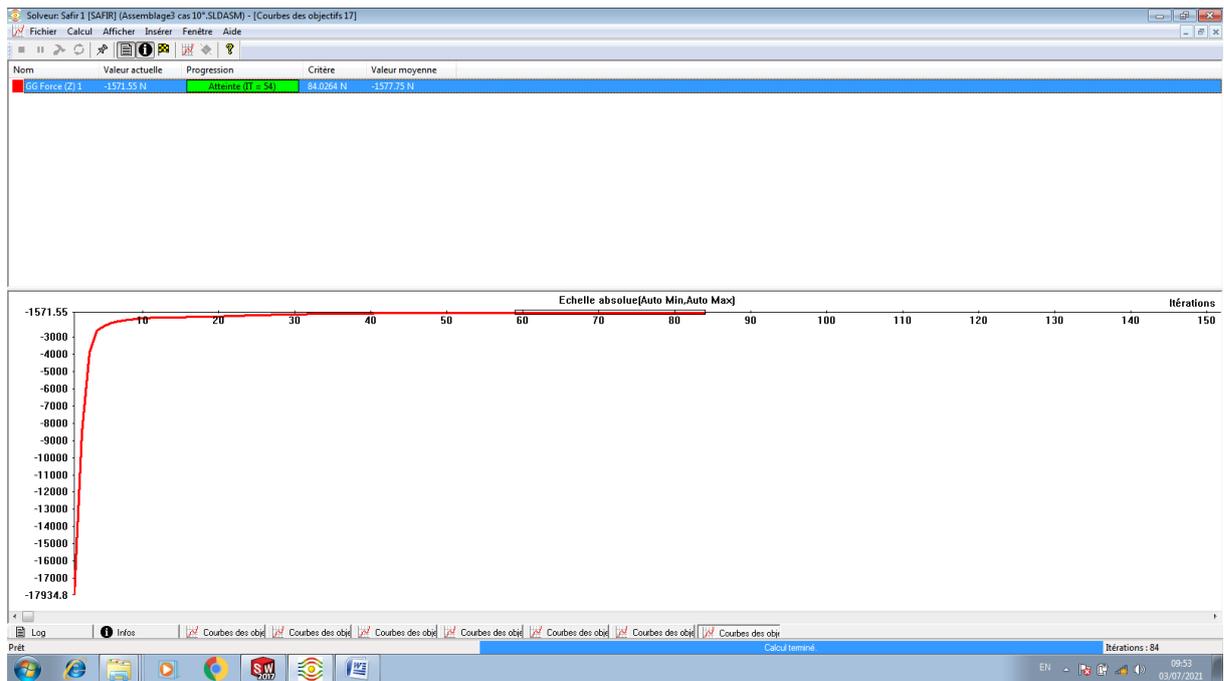


Figure 4.70 - le coefficient de l'effet de force à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itération

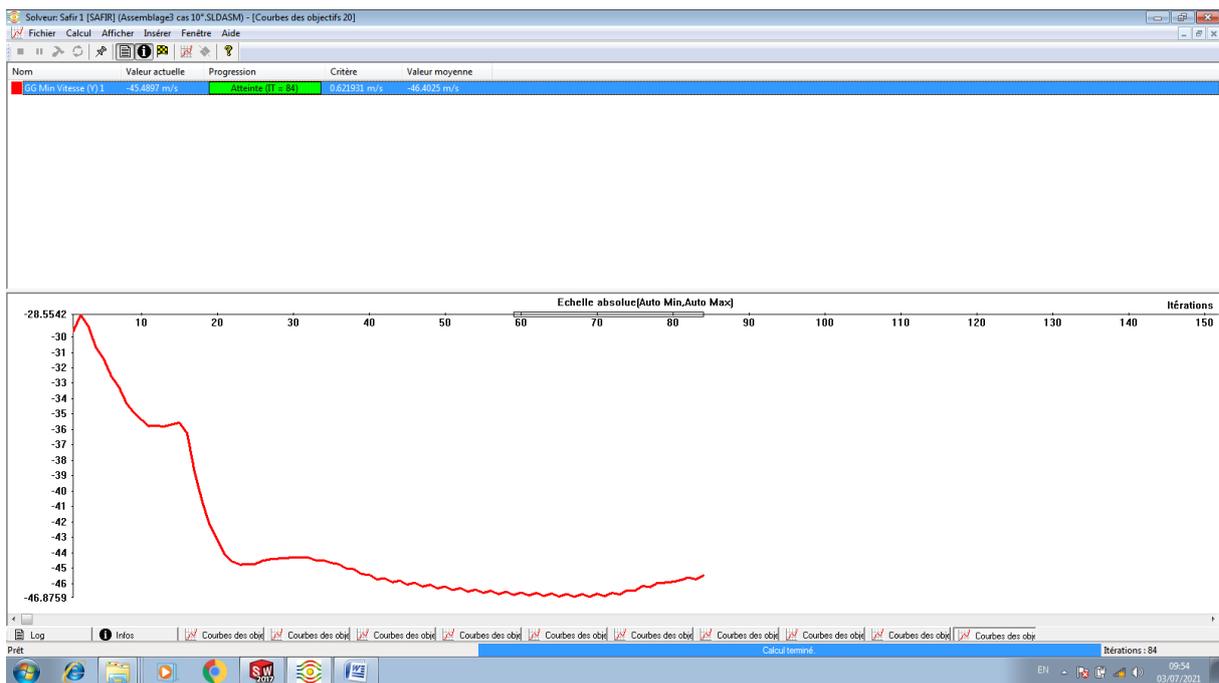


Figure 4.71 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Y) en fonction de nombre d'itération



Figure 4.72 - le coefficient de l'effet de vitesse à l'axe (Z) en fonction de nombre d'itération

On remarque que la force de trainée et la déportance dépendent de la forme géométrique de la voiture et on remarque aussi que la force de trainée est plus grande que la déportance et conclu que la stabilité et la consommation de l'énergie au véhicule relie avec la forme géométrique aérodynamique de la voiture.

et d'après les trois figures des angles d'attaques on suivant  $37^{\circ}$  .  $24^{\circ}$  .  $15^{\circ}$  toujours. On a trouvé de ces résultats que la force de portance est importante par rapport a la force de la trainé et au cas de l'angle de  $15^{\circ}$  la force de portance inferieur de la force de trainée et tout sa relire au la forme géométrique de voiture

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion général:

Le but de la simulation aérodynamique d'une voiture avec plusieurs angles d'attaque et d'écoulement est de montrer l'efficacité du contrôle SOLIDWORKS et l'étude des différents paramètres qui affectent sa position, sa fréquence et le nombre de coefficients de mouvement, et d'utiliser Solidworks pour la simulation afin d'améliorer la carrosserie. Les performances aérodynamiques

En particulier, la réduction de coefficient de traînée et l'amélioration la forme géométrique de voiture :

Nous avons vérifié l'efficacité du contrôle par différents angles d'attaque, et la fiabilité du solidworks.

Tout cela pour améliorer la stabilité, réduire la traînée et améliorer les performances du véhicule. Il s'agit également de réduire la consommation de carburant, ce qui se traduit par des économies d'énergie et une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour les perspectives il faut élargir les nombres d'expériences afin d'obtenir des paramètres plus fiables .

Une étude expérimentale en utilisant les techniques de la simulation de solidwork.

# **BIBLIOGRAPHIE**

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] . <https://www.lavionnaire.fr/AerodynIntro.php> 26/04/2021
- [2] . Yoann Eulalie, Etude a l'aérodynamique et contrôle de la traînée sur un corps de Ahmed culot droit, 29 Apr 2015.
- [3] . Cédric LECLERC , réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié al'aide du contrôle actif par jet synthétique 11 Janvier 2008 à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
- [4] . [http://www.aerobigorre.org/bia/download/tome\\_2\\_aerodynamique\\_mecanique\\_du\\_vol.pdf](http://www.aerobigorre.org/bia/download/tome_2_aerodynamique_mecanique_du_vol.pdf)  
26/04/2021
- [5] . [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/airo\\_lo.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/airo_lo.pdf) -Aérodynamique ladjedel omar
- [6] . [http://colleges.ac\)rouen.fr/raimboung/blog/CenC\\_00/index.php?post/2012/09/24/Simulation-aerodynamique](http://colleges.ac)rouen.fr/raimboung/blog/CenC_00/index.php?post/2012/09/24/Simulation-aerodynamique) 22/05/2021
- [7] . Mlle Lazzouni Rima.Mme Bouzziza Asma , étude et contrôle des écoulements aérodynamiques sur l'automobile 2015/2016
- [8] . Hernández Ustarroz Florencio(+6) , ETUDE AERODYNAMIQUE  
université toulouse III PAUL Sabtier
- [9] . Thomas drian ,réduction de la traînée aérodynamique d'un tricycle de type roadster université de sherbrooke sherbrooke (québec) canada mars 2012
- [10] . <https://www.lavionnaire.fr/AerodynPortance.php>
- [11] . Collège P. Matraja , aérodynamique et mécanique du vol 2016/2017
- [12] . article consacré à l'aérodynamisme de votre auto . L'aérodynamisme de mon auto : comment l'améliorer