

PROJET

DYNAMIQUE DES VÉHICULES ROUTIERS

Aimé Prince BENGUET

SYSMER 2A

Février 2023



ENCADRANT : M. RICHIER Mathieu

Sommaire

1	Modèle petits angles et modèle réel : comparaisons	4
1.1	Courbes et interprétations	4
2	Modèle réel	8
2.1	Modélisation cinématique bicyclette	8
2.2	Modélisation dynamique bicyclette	9
3	Modèle de contact : Kiencke et Nielson	14
3.1	Virage à vitesse constante-rajout d'angle au volant	16
3.2	Virage à vitesse variable-rajout d'angle au volant	20
4	L'interface : Matlab App Design	23

INTRODUCTION

Ce projet a pour but la conception d'un simulateur de la dynamique d'un véhicule routier. Pour ce faire, le travail a été effectué sur Matlab. Des hypothèses ont été posées à cet effet. Entre autres, des effets de roulis qui sont négligés, le sol considéré comme localement plan, le véhicule symétrique dans le plan de lacet. Nous nous basons ici sur la modélisation bicyclette du véhicule, cinématique puis dynamique. Par la suite, le modèle de Kiencke et Nielson sera présenté pour une prise en compte de plus de paramètres significatifs.

1 Modèle petits angles et modèle réel : comparaisons

1.1 Courbes et interprétations

Les caractéristiques du véhicule sont les suivantes :

```

%%% PARAMETRES %%%

m=1310; %kg
Iz=1760; %kg/m2
Lf=1.2; %m
Lr=1.4;
L=Lf+Lr;
Cf=69740; %N/rad
Cr=63460;
eps1=Lr*Cr-Lf*Cf;
K=m*eps1/(L*Cf*Cr);

```

Les entrées du simulateur sont la vitesse linéaire du véhicule et l'angle de braquage (constants dans un premier temps).

- **Test à vitesse linéaire constante et angle de braquage constant :**
 $U=50\text{Km/h}$, $\text{Beta}=0$.

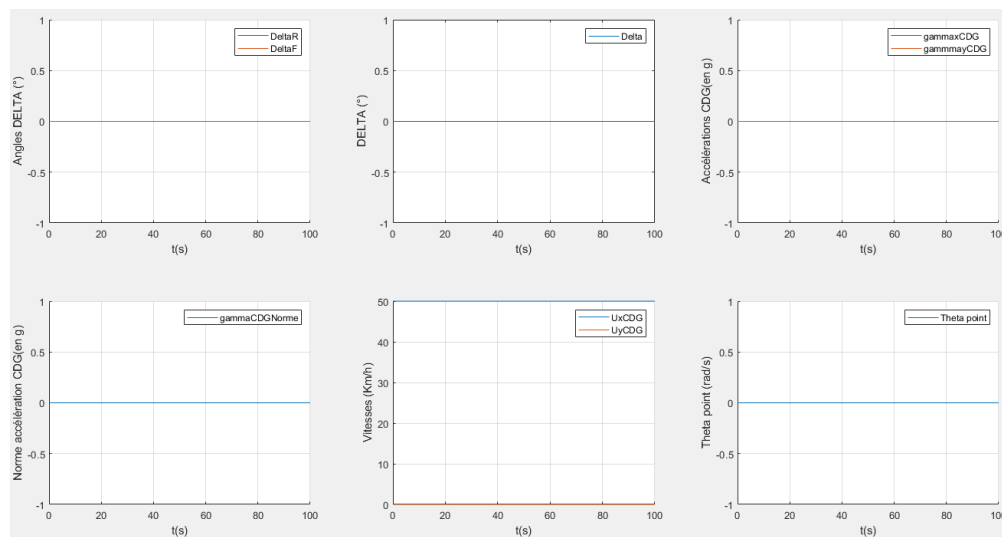
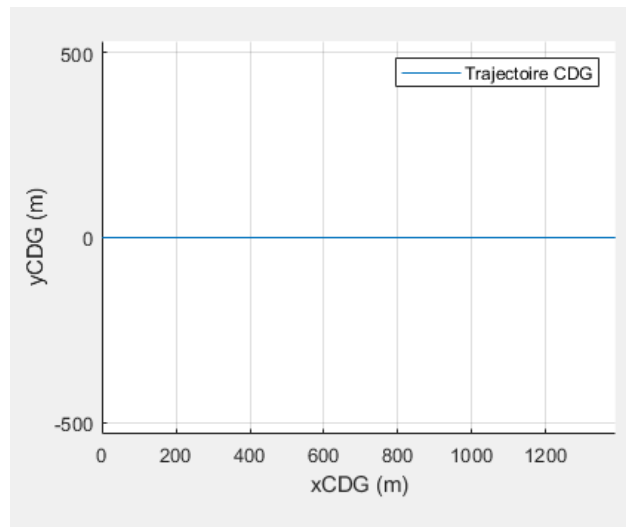
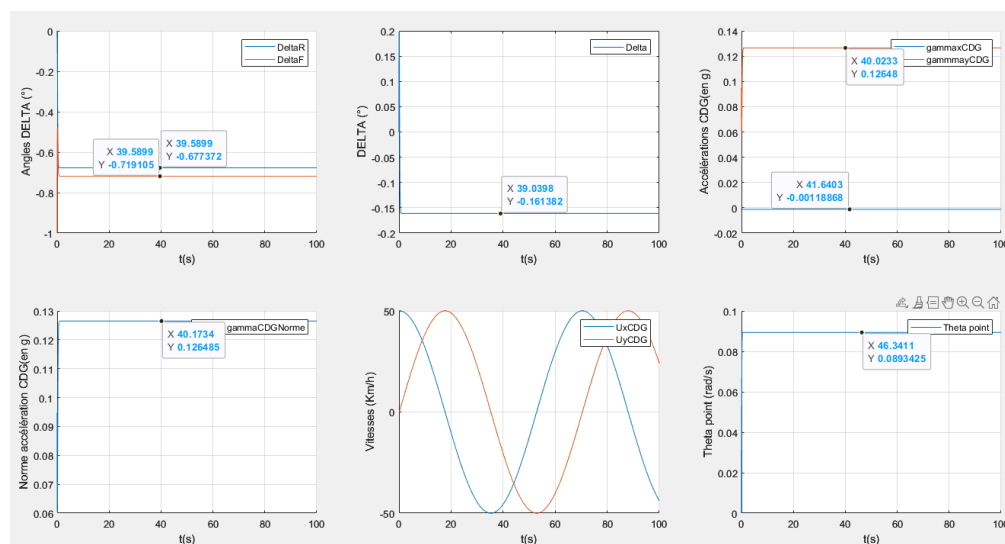


FIGURE 1 – $U=50\text{Km/h}$, $\text{Beta}=0^\circ$

FIGURE 2 – Trajectoire : $U=50\text{Km/h}$, $\text{Beta}=0$

Commentaire : On teste ici le fonctionnement du programme dans le cas le plus simple : sans braquage, pas d'angle de dérive, pas d'angle de lacet.

- **Test à vitesse linéaire constante et angle de braquage constant :**
 $U=50\text{Km/h}$, $\text{Beta}=1^\circ$.

FIGURE 3 – Modèle petits angles, $U=50\text{Km/h}$, $\text{Beta}=1^\circ$

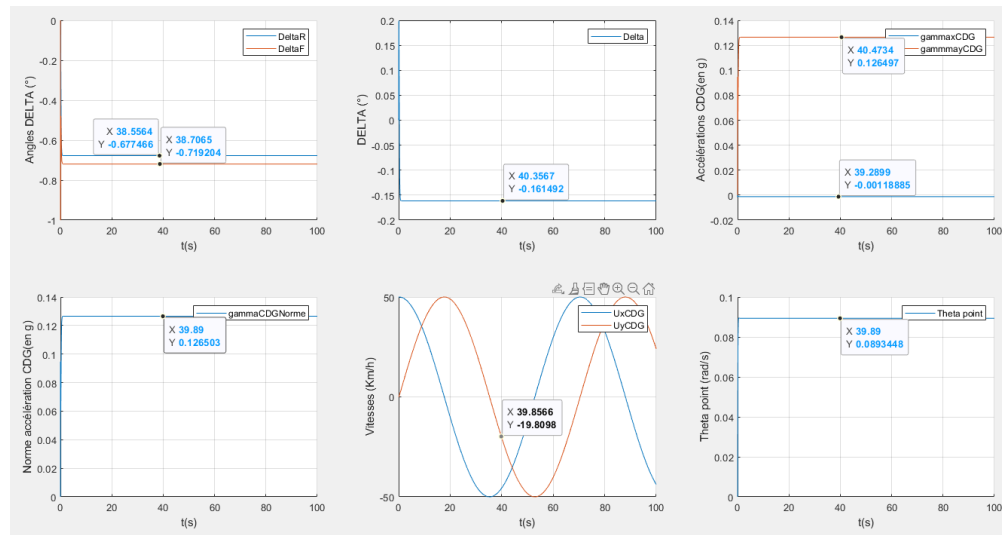


FIGURE 4 – Modèle réel, U=50Km/h, Beta=1

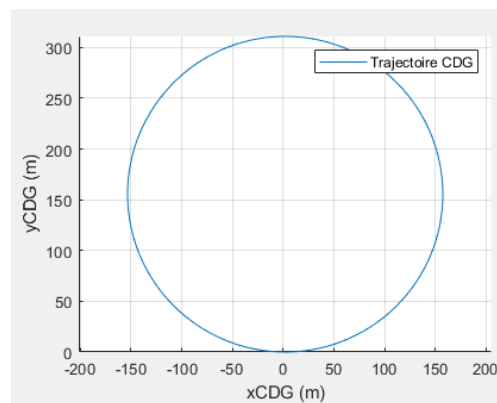


FIGURE 5 – Trajectoire : U=50Km/h, Beta=1°

Commentaires :

- Dans un premier temps on constate que les modèles réel et petits angles sont assez coincidents, à **0.0001 près**. Ceci du fait que nous sommes bien dans le cas des petits angles (Beta=1°).
- Notons que les angles de dérives sont tous négatifs, du fait notamment que nous sommes en haute vitesse. A 10Km/h, δ est positif. L'angle de dérive avant reste supérieur à l'angle de dérive arrière, en valeur absolue, du fait que le véhicule est sous-vireur de base : l'avant tourne plus que l'arrière dans un virage.
- Bien évidemment, l'accélération latérale est bien supérieur à l'accélération longitudinale car la vitesse étant constante il y a, après braquage, des

forces centrifuges qui ramènent le véhicule à l'intérieur de l'arc de cerle suivant lequel il vire. L'angle de braquage étant constant, le guidage vers l'intérieur du centre de l'arc du virage est constant (voir trajectoire également). La trajectoire est la même pour les deux modèles.

— Test à vitesse linéaire Variable et angle de braquage constant : $\text{Beta}=1^\circ$.

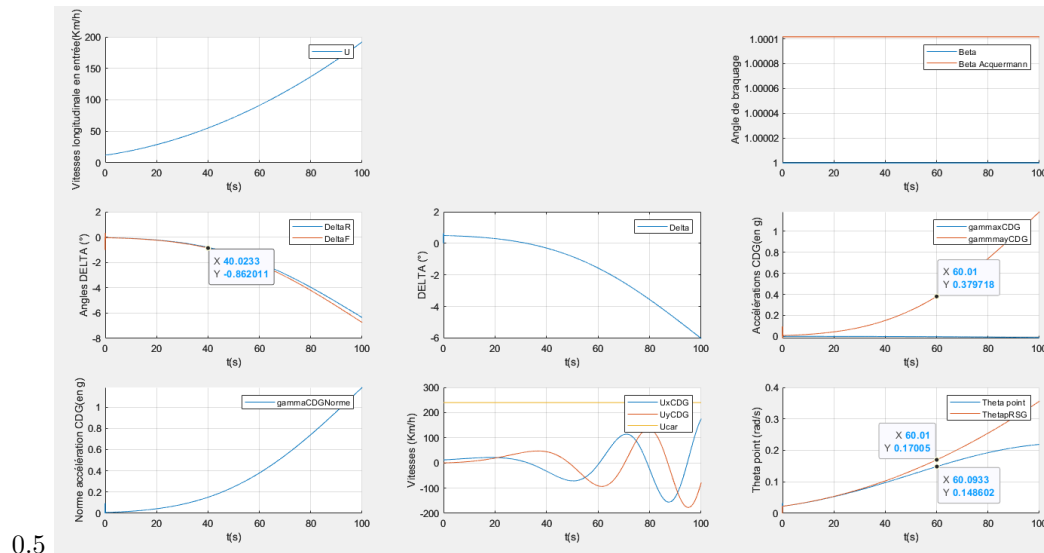


FIGURE 6 – Modèle réel, $\text{Beta}=1^\circ$

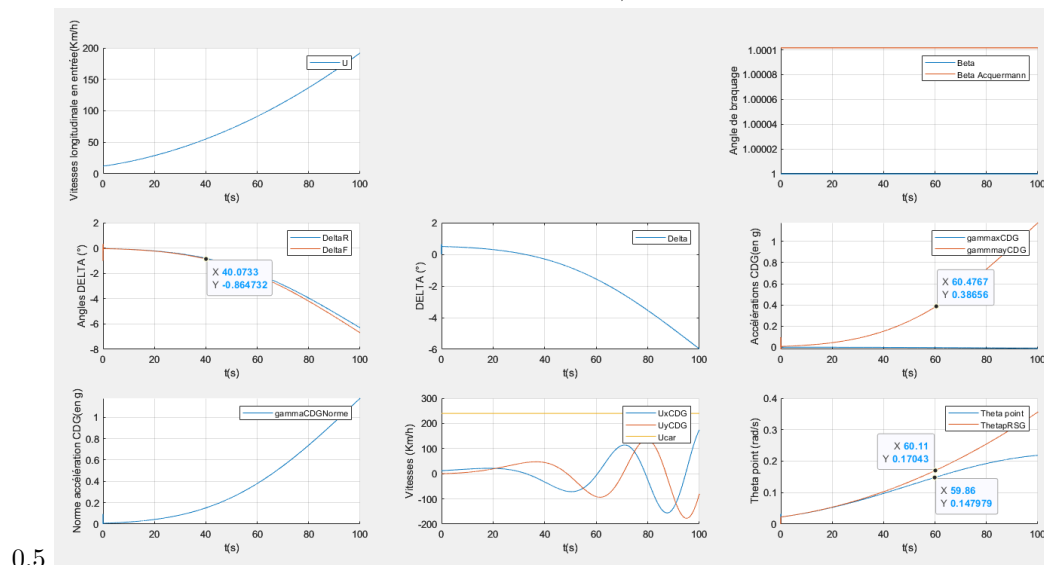


FIGURE 7 – modèle Petits angles, $\text{Beta}=1^\circ$

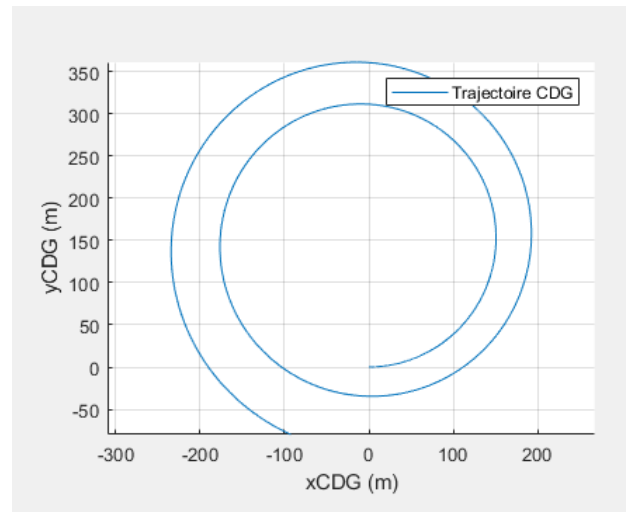


FIGURE 8 – Trajectoire, Modèle réel et modèle petits angles

Commentaires :

- Les angles de dérive augmentent (valeur absolue) avec la vitesse. En effet, le véhicule accélère avec un angle de braquage constant : au moment de tourner les roues glissent et dérivent (voir angles de dérive également).
- L'accélération latérale augmente également avec la vitesse. La vitesse de lacet, elle, correspond à celle d'un mouvement sans glissement jusqu'à environ 40 secondes, puis est plus petite que celle-ci (glissement désormais) : ceci est le fait du glissement des roues qui était très faible au début et qui augmente ensuite. La trajectoire est également la même pour les deux modèles : la vitesse augmente, le rayon de courbure du virage augmente.

2 Modèle réel

2.1 Modélisation cinématique bicyclette

Dans ce modèle :

Les forces centrifuges sont négligeables et les pneus ne développent pas de forces latérales ;

Nous supposons que le mouvement de la voiture se fait sans glissement et sans dérive. Dans le modèle cinématique, nous nous plaçons dans le cas d'un virage à faible vitesse. Ici, la vitesse du véhicule est de **10 Km/h** et l'angle de braquage, de **1°**.

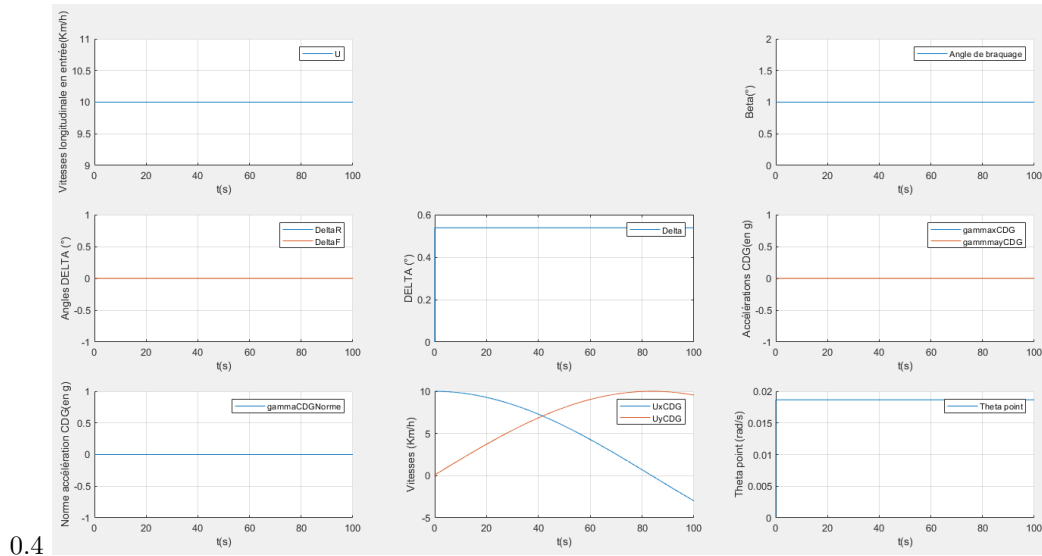


FIGURE 9 – Courbes :Beta=1, modèle cinématique

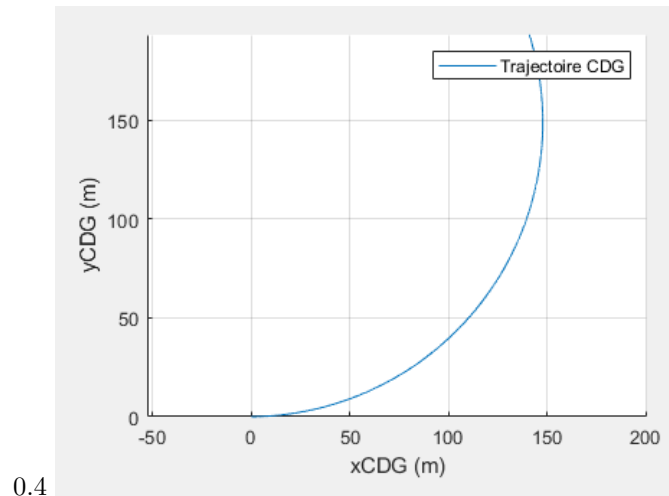


FIGURE 10 – Courbes :Beta=1, Modèle cinématique

Commentaires :

Les angles de dérive au niveau des roues sont bien nuls, mais l'angle de dérive du véhicule n'est pas nul, il est aussi positif car nous sommes à vitesse faible. La vitesse de lacet est positive ($\beta \geq 0$) et constante car la vitesse et l'angle de braquage le sont.

La vitesse du véhicule est faible d'où l'arc de cercle décrit par le véhicule.

2.2 Modélisation dynamique bicyclette

— Caractère sur/sous-vireur du véhicule.

La vitesse du véhicule est de 90 km/h et l'angle de braquage $\beta=1^\circ$.

0.8

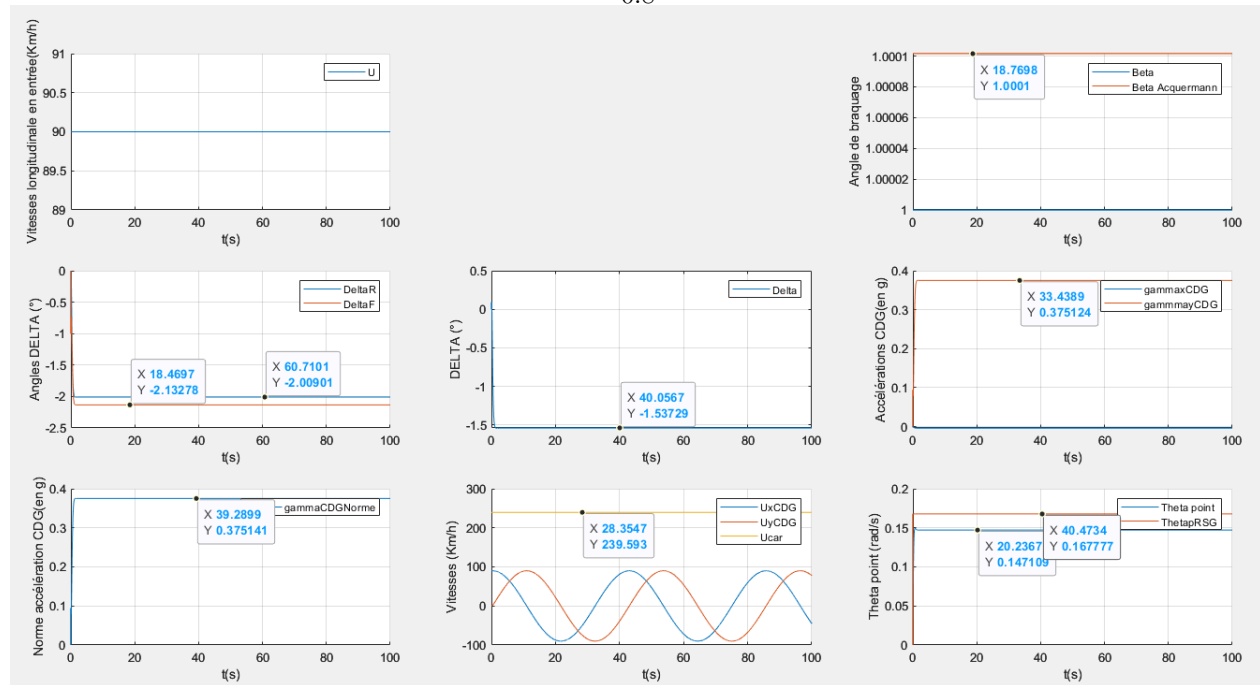
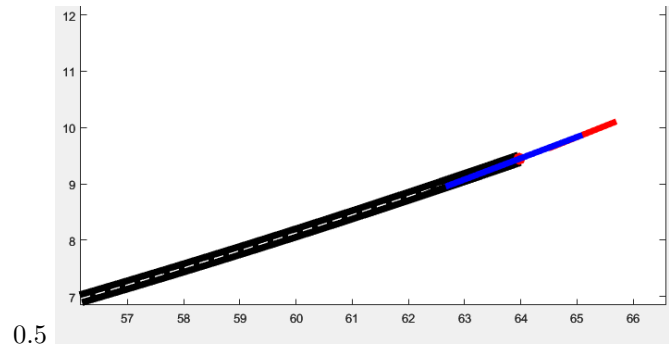
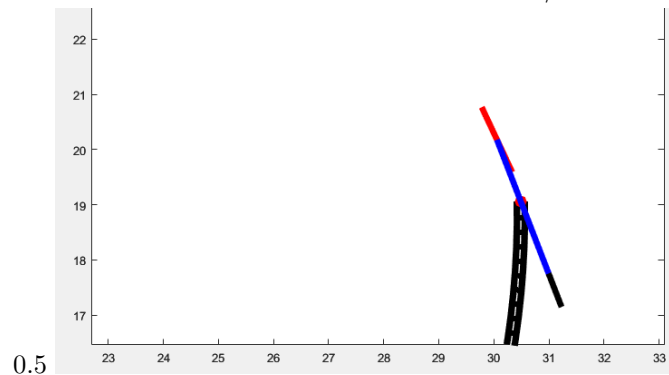


FIGURE 11 – Courbes :Beta=1, Modèle dynamique

Commentaires :

- Nous pouvons constater que les angles de dérive sont tous négatifs, car le véhicule roule à haute vitesse : les axes longitudinaux des roues s'éloignent plus des vecteurs vitesses correspondants. L'accélération latérale étant positive et bien plus grande que l'accélération longitudinale comme vu plus haut (le véhicule vire).
- La vitesse de lacet du véhicule demeure inférieure à celle qu'aurait le véhicule sans glissement : ceci suppose alors des phénomènes de glissement.

FIGURE 12 – Simulation : $U=90\text{Km/h}$ FIGURE 13 – Simulation : $U=90\text{Km/h}$; $C_f=1.5C_f$ $K= -0.0028$

Commentaires : Afin de simuler un peu mieux et de visu, le caractère sous-vireur du véhicule, j'ai affiché la trajectoire du véhicule dans le temps (la route visible étant celle par laquelle le véhicule est déjà passé). Dans un premier temps, à la figure 12 le véhicule a un caractère sous-vireur et est stable. En effet, les tests effectués à vérifier consistait à vérifier le comportement du véhicule : en sous-virage le système est stable (en changeant par moment la vitesse, il reste au niveau de la route), tandis qu'en sur-virage (**coefficient sous-vireur du véhicule négatif après avoir augmenté C_f , fig.13**) le véhicule tourne de plus en plus vite et par en tête à queue.

- Tests : Accélération/Freinage
- Accélération

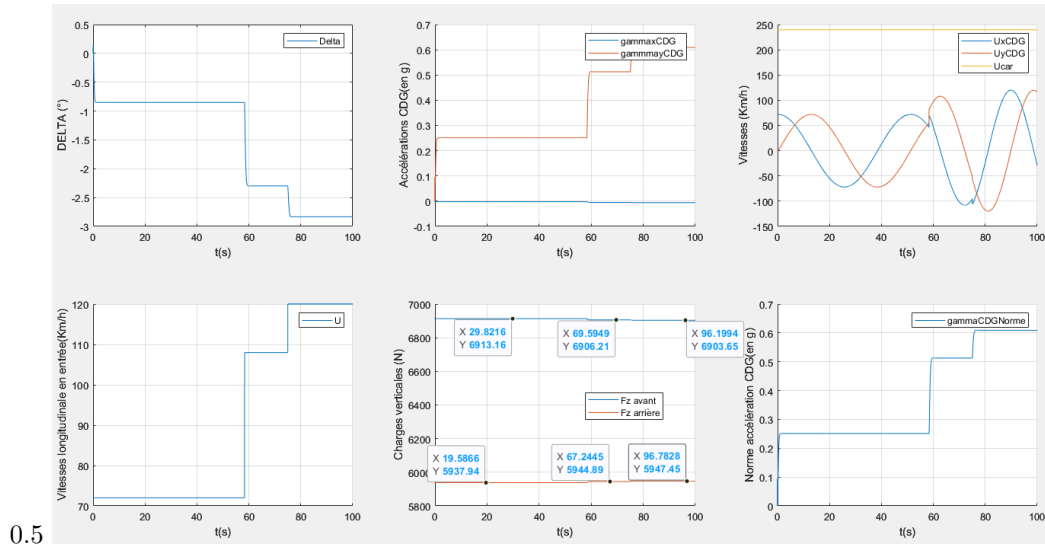


FIGURE 14 – Courbes : Accélération, Beta=1

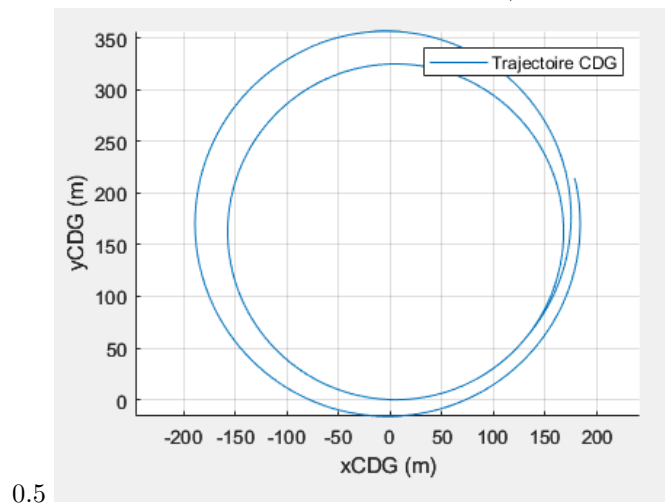


FIGURE 15 – Trajectoire : Accélération, Beta=1

Commentaires : Ici je simule une accélération brusque pour mettre en avant certaines grandeurs.

- Nous pouvons voir que l'angle de dérive augmente bien avec la vitesse : plus on accélère de façon brusque et plus les roues glissent et dérivent. L'accélération brusque provoque la dérive du véhicule. Les forces de guidages du véhicule vers l'intérieur du virage sont de plus en plus grandes au vu de l'accélération latérale du véhicule.
- Remarquons ce qui se passe avec la charge verticale : plus le véhicule accélère, plus le report de charge croît et la charge est plus grande à l'arrière du véhicule, plus petite à l'avant (**fig.14, ligne 2 colonne 2**).

— Freinage

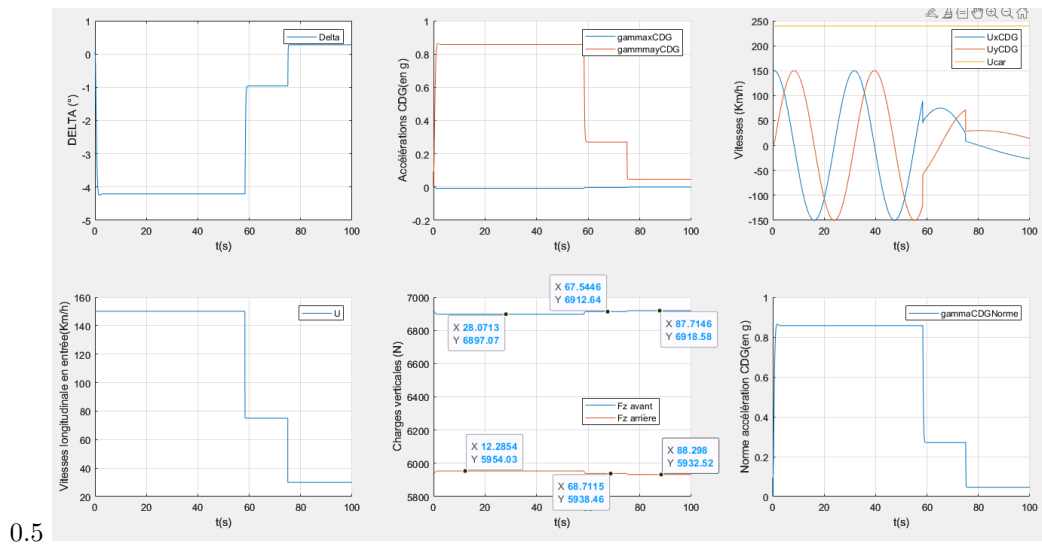


FIGURE 16 – Courbes Freinage, Beta=1

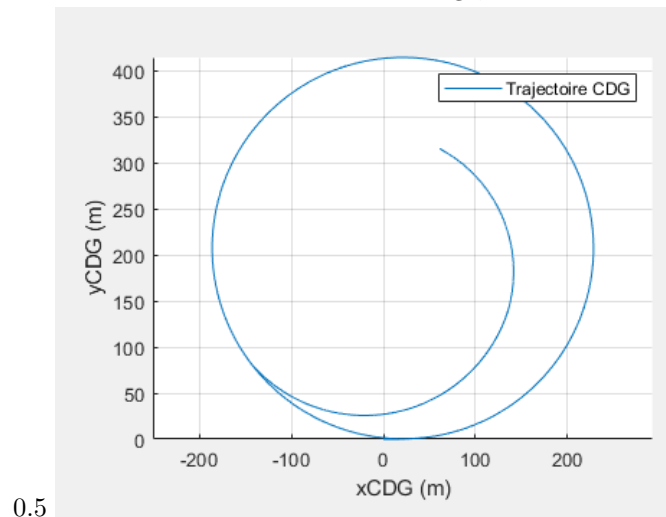


FIGURE 17 – Freinage, Beta=1

Commentaires : Ce qui se passe en freinage brusque ici est bien l'opposé du cas d'accélération brusque. On note cette fois-ci que la charge augmente à l'avant et diminue à l'arrière. Le rayon de courbure de la trajectoire est de plus en plus faible à cause de la diminution de la vitesse (β étant constant).

3 Modèle de contact : Kiencke et Nielson

Dans cette partie, je m'intéresse entre autres, au modèle de Kiencke et Nielson qui utilise des paramètres suffisants pour décrire la dynamique du véhicule simulée.

$$\mu = (c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda)e^{-c_4\lambda V_G}(1 - c_5F_z^2) \quad (5)$$

Les efforts longitudinaux et transversaux sont définis par $F_x = \mu_x F_z$ et $F_y = \mu_y F_z$ (où $k_{\mu t}$ pondère les efforts transversaux) avec :

$$\begin{aligned} \mu_x &= \frac{\mu}{\lambda}(\lambda_l \cos(\alpha) - k_{\mu t} \lambda_t \sin(\alpha)) \\ \mu_y &= \frac{-\mu}{\lambda}(k_{\mu t} \lambda_t \cos(\alpha) - \lambda_l \sin(\alpha)) \end{aligned} \quad (6)$$

Avec λ : le glissement total et α : l'angle de dérive du véhicule.

Il était nécessaire de connaître les coefficients du modèle. Je les ai alors choisis dans le livre *Automotive Control System for engine, driveline and vehicle* de Kiencke et Nielson.

	c_1	c_2	c_3
Asphalt, dry	1.2801	23.99	0.52
Asphalt, wet	0.857	33.822	0.347
Concrete, dry	1.1973	25.168	0.5373
Cobblestones, dry	1.3713	6.4565	0.6691
Cobblestones, wet	0.4004	33.7080	0.1204
Snow	0.1946	94.129	0.0646
Ice	0.05	306.39	0

J'ai choisi de **modéliser le sol comme étant bétonné et sec (Concrete, dry)**. Les deux autres coefficients sont aussi données dans le livre ($c_4 = 0.003m$; $c_5 = 0.00015(1/kN)^2$; J'ai pris $Cp = k_{\mu t}=0.925$;)

Je m'intéresse entre autres à certaines variables non prises en compte jusqu'ici : glissement, forces latérales, coefficients d'adhérence/de friction... Pour calculer ces grandeurs, j'ai défini des caractères assez réalistes du véhicule simulé, notamment le **diamètre** des roues que je prends égal à **15 pouces** et la hauteur du centre de gravité que je prends égal à **3 fois le rayon des roues** (utile pour calculer le report de charge). En effet, le calcul de la vitesse

de rotation des roues du véhicule était nécessaire pour obtenir les coefficients de glissement et les grandeurs liées.

```

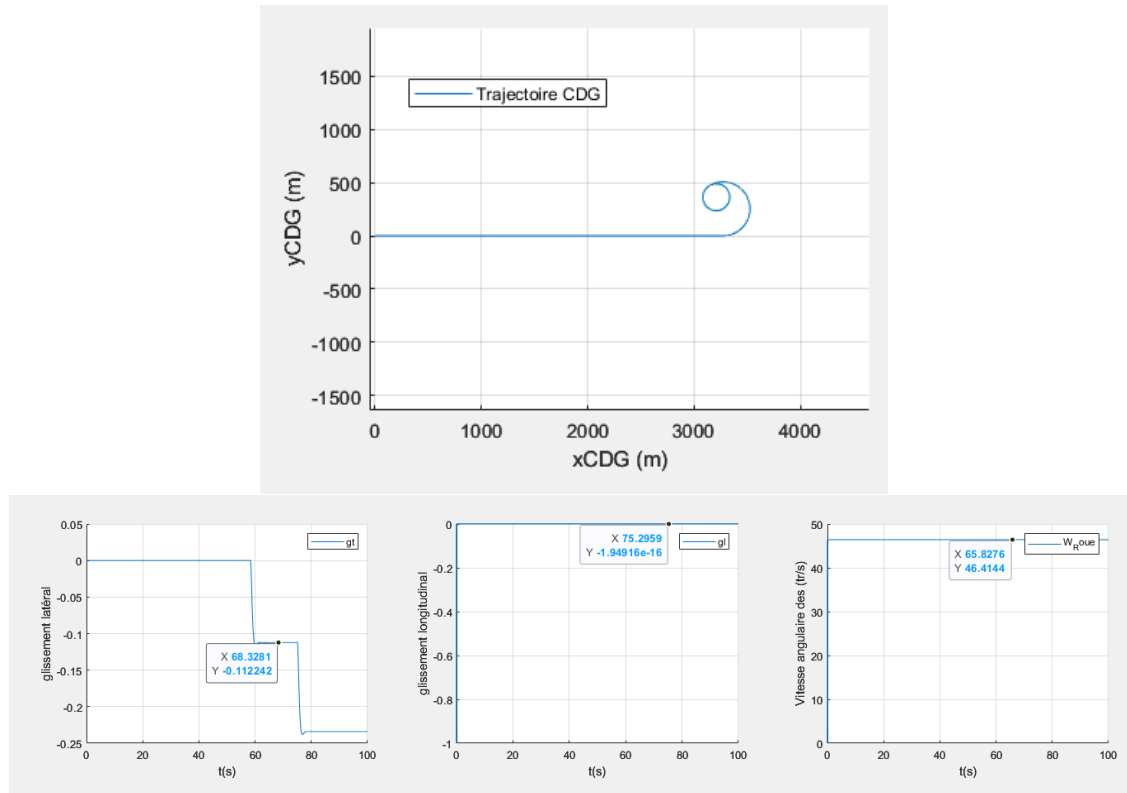
337      %%% MODELE DE Kiencke et Nielson
338      %
339      c1=1.1973;c2=25.168;c3=0.5373;
340      c4=0.003;%s/m
341      c5=0.00015/(10^6);
342      Cp=0.925;%en moyenne; cours page 106 %
343      mu_f=(c1*(1-exp(-c2*g(k)))-c3*g(k))*exp(-c4*g(k)*U(k))*(1-c5*Nf(k)^2);
344      mu_r=(c1*(1-exp(-c2*g(k)))-c3*g(k))*exp(-c4*g(k)*U(k))*(1-c5*Nr(k)^2);
345      %
346      MUx_f(k)=mu_f/g(k)*(gl(k)*cos(Delta(k))-0.925*gt(k)*sin(Delta(k)));%MU
347      MUy_f(k)=mu_f/g(k)*(gl(k)*sin(Delta(k))+0.925*gt(k)*cos(Delta(k)));
348      MUx_r(k)=mu_r/g(k)*(gl(k)*cos(Delta(k))-0.925*gt(k)*sin(Delta(k)));
349      MUy_r(k)=mu_r/g(k)*(gl(k)*sin(Delta(k))+0.925*gt(k)*cos(Delta(k)));
350      %
351      Fx_f(k)=MUx_f(k)*Nf(k);% Cp=0.925 moyenne
352      Fy_f(k)=MUy_f(k)*Nf(k);
353      %
354      Fx_r(k)=MUx_r(k)*Nr(k);% Cp=0.925 moyenne
355      Fy_r(k)=MUy_r(k)*Nr(k);
356      %
357      Fz_f=Nf;
358      Fz_r=Nr;

```

Code pour le calcul des efforts latéraux pour le modèle de Kiencke et Nielson.

3.1 Virage à vitesse constante-rajout d'angle au volant

$U=200\text{km/h}$, $\text{Beta}=1^\circ$ puis 2° .



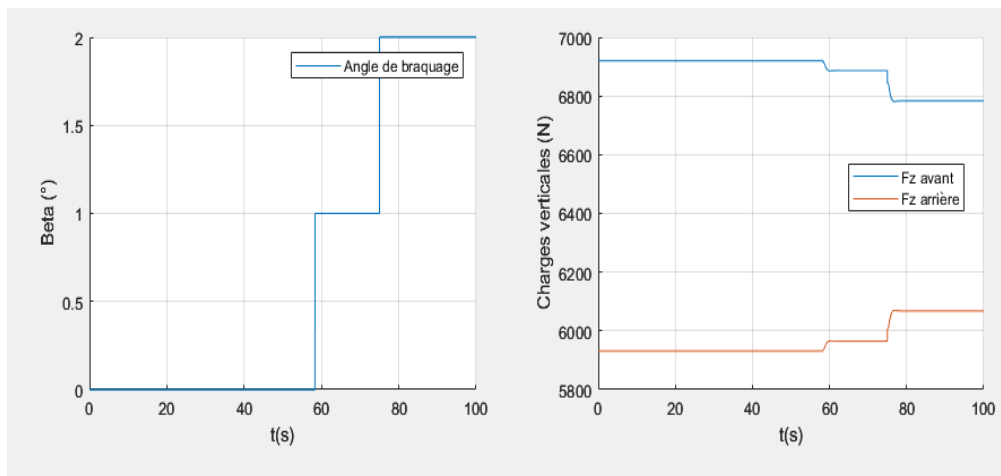
Une idée de l'approximation de la vitesse angulaire des roues : ici, W_{roue} vaut $2\pi \cdot 46.4144$ tr/s soit une Vitesse linéaire des roues égale à $W_{roue} \cdot R_{roue} = 55.4097\text{m/s}$, soit 199.4750 km/h. La vitesse linéaire du véhicule étant de 200 km/h : on comprend à ce stade le glissement linéaire des roues qui est bien très faible et négatif, sachant la formule du glissement utilisée : $gl = (W - V_{linVehicule} / R_{roue}) / (\max(\|W\|, \|V_{linVehicule} / R_{roue}\|))$. L'algorithme de calcul de W_{roue} est alors acceptable. Le glissement latéral des roue se voit bien à chaque rajout d'angle au volant. Le véhicule roule très vite donc au moindre braquage (donc angle au volant) les roues glissent plus et dérivent.

Pour cet algorithme : je considère le point de contact roue/sol à un instant donné. La distance parcourue par ce point entre deux instants est approchée par celle parcourue par le centre de la roue entre ces même instants. J'utilise la formule : $S = R \cdot \theta$ (S : arc de cercle, R le rayon)

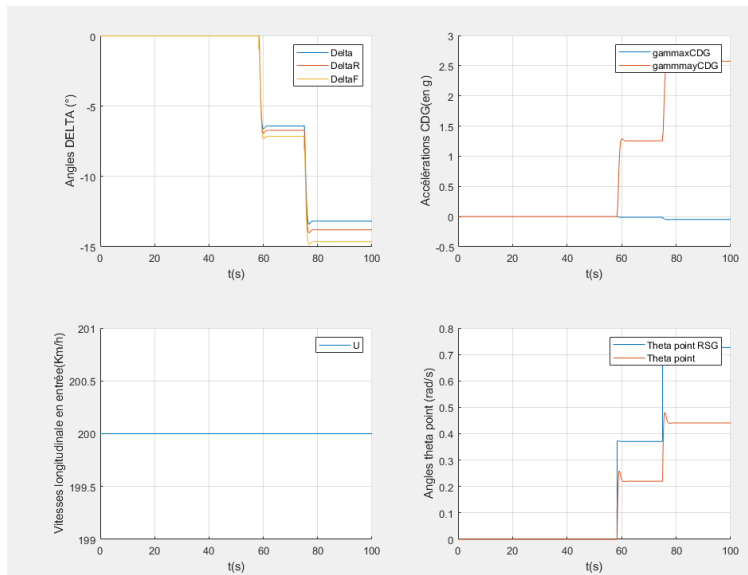

```

289 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ALGO W_Roue
290 Theta_roue(k)=sqrt((xAvant(k)-xAvant(k-1))^2+(yAvant(k)-yAvant(k-1))^2)/Rjante;
291 W_Roue(k)=abs((Theta_roue(k)-Theta_roue(k-1)))/(t(k)-t(k-1));
292
293 if k>3 %%% pas nécessaire pour W(1) et W(2)
294     if U(k)==U(k-1)
295         W_Roue(k)=W_Roue(k-1);
296     else
297         W_Roue(k)=((Theta_roue(k)-Theta_roue(k-1)))/(t(k)-t(k-1));
298     end
299 end
300 if (W_Roue(k)<0 && U(k)>0)
301     W_Roue(k)=abs(W_Roue(k));
302 end
303 if (U(k)<0)
304     W_Roue(k)=-abs(W_Roue(k));
305 end

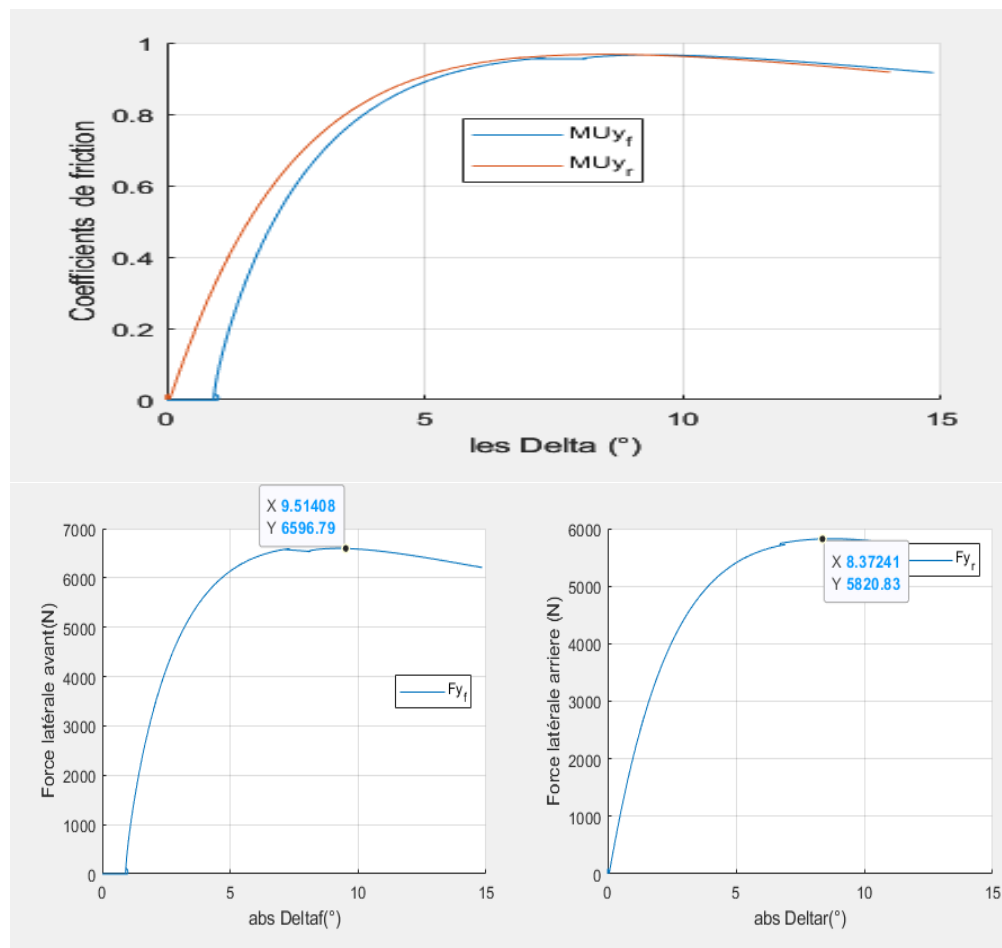
```



Remarquons encore que plus la vitesse accélère, plus la charge augmente à l'arrière et diminue à l'avant.



L'angle de dérive de la roue avant est toujours plus grand que celui de la roue arrière. Le véhicule est toujours sous-vireur. La vitesse de lacet augmente avec la vitesse en restant inférieure à celle d'un mouvement sans glissement (ce qui confirme qu'il y a glissement).



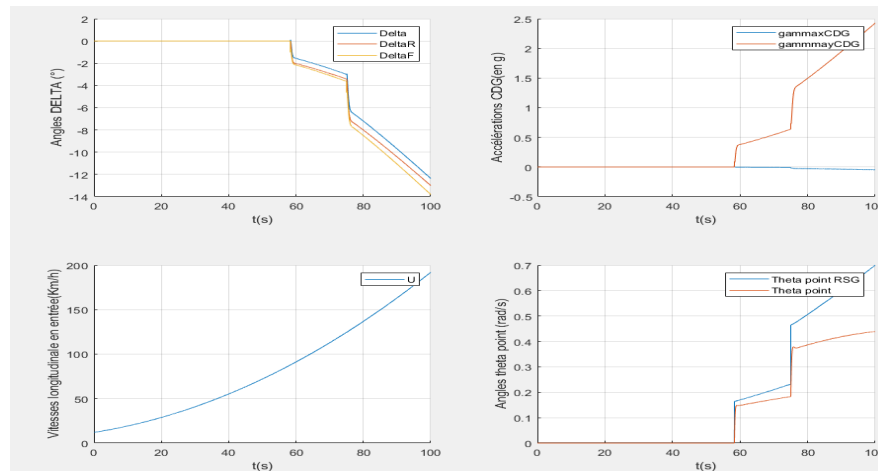
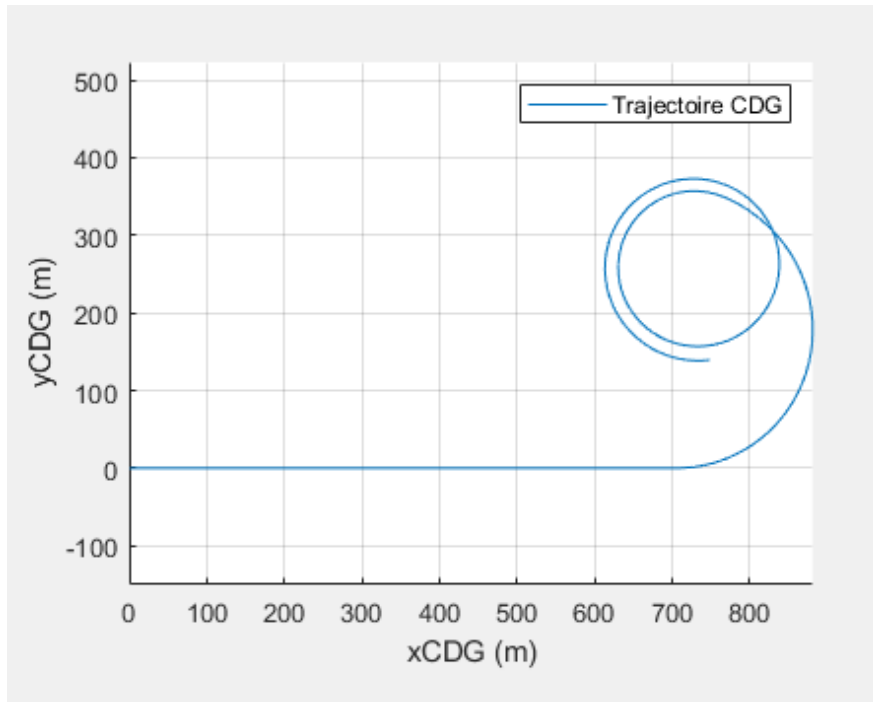
Commentaires :

Concernant les forces latérales, on reconnaît 3 zones : une élastique, une de transition et une de friction. La première est linéaire et plus les roues dérives, plus les forces latérales s'appliquent aux pneus. La pente de la courbe dans cette zone est considérée comme la rigidité de dérive du pneu. On note un pic des forces latérales entre 5° et 9° .

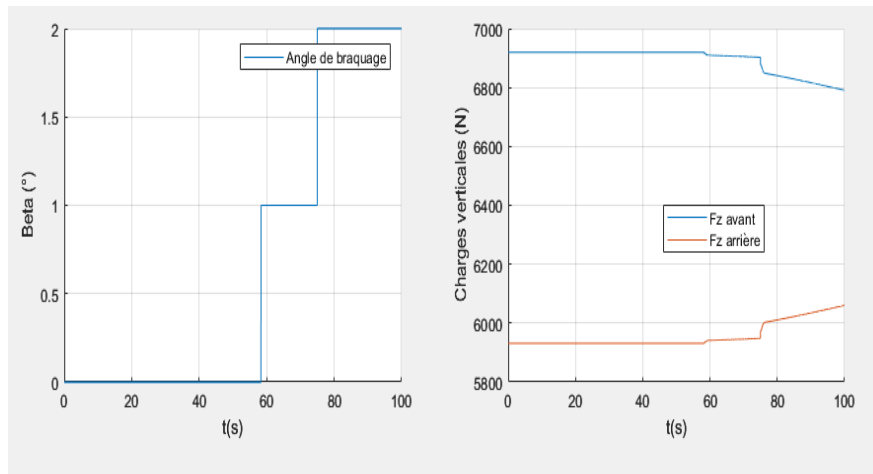
Dans la deuxième zone, angles de dérive et forces latérales évoluent dans le même sens, mais plus de façon linéaire et juste après, les pneus ne développent plus de forces latérales car ils sont saturés. C'est ainsi que si on freine et qu'on se retrouve dans cette zone, on est dans l'incapacité de diriger le véhicule dans le sens latéral.

Le coefficient de friction est lié aux forces latérales par une relation quasi-linéaire si la charge verticale varie peu. D'où l'allure similaire à celles des forces latérales.

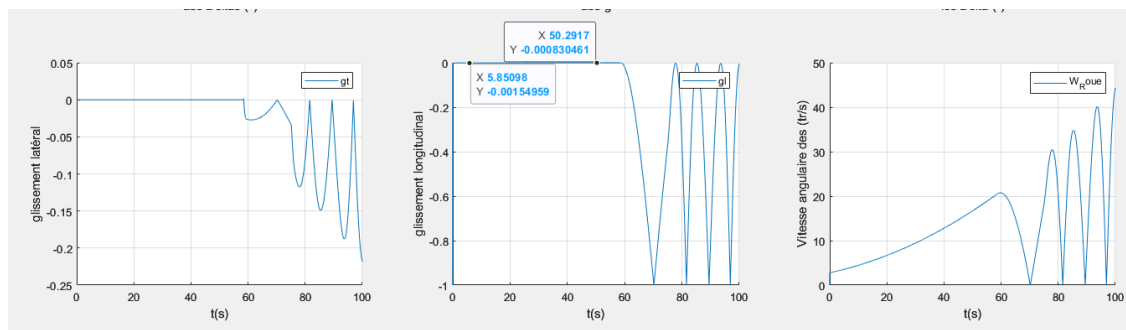
3.2 Virage à vitesse variable-rajout d'angle au volant



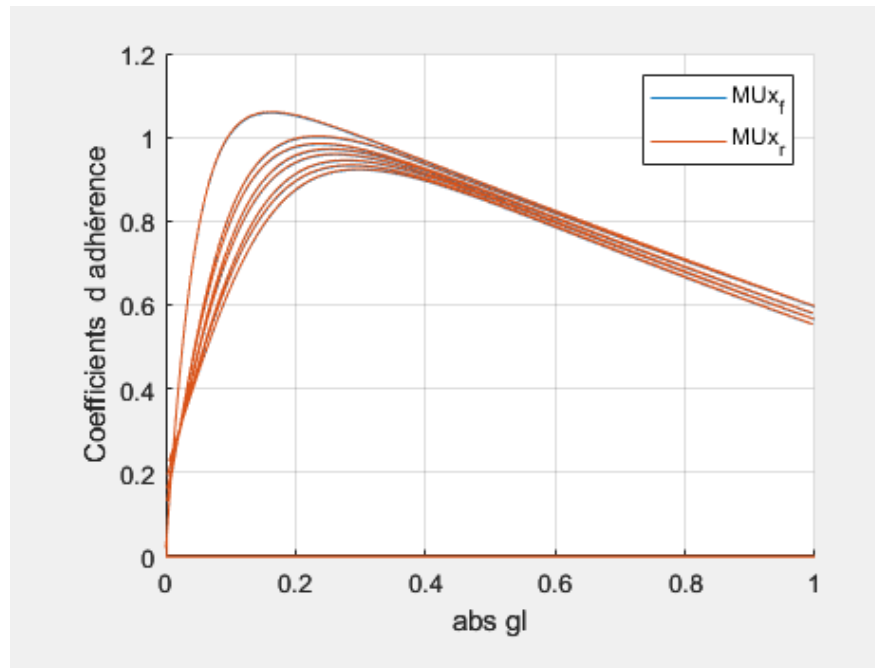
Le véhicule dérive encore plus lorsqu'on accélère et ajoute un angle au volant, donc un angle de braquage. On peut remarquer que jusqu'à $U = 90$ km/h la vitesse de lacet est encore très proche de celle du modèle sans glissement : le véhicule glisse peu. Il conserve toutefois son caractère sous-vireur.



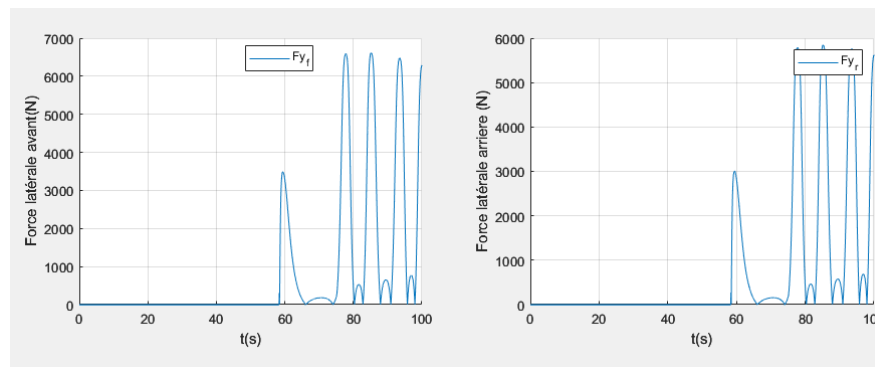
Nous remarquons que la charge à l'arrière croît rapidement et diminue de même à l'avant. En effet, ici la vitesse augmente, diminue dans le sens longitudinal car le véhicule vire et l'accélération longitudinale dont dépend la charge verticale (N_f et N_r) est négative. Sachant $N_f = P_f + \text{ReportCharge}$ et $N_r = P_r - \text{ReportCharge}$, la charge augmente à l'arrière et diminue à l'avant.



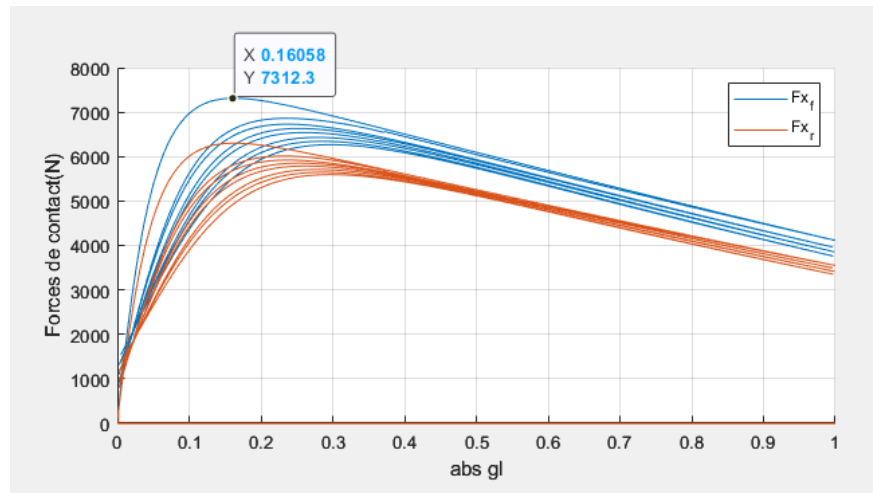
La vitesse angulaire des roues est telle que celles-ci roulent moins vite au moment de tourner et au même moment on peut voir que les roues glissent plus et s'arrête par moment (où nous voyons $gl = -1$). Aux mêmes instants le véhicule ne glisse presque pas dans le sens latéral : le pneu est saturé dans le sens longitudinal.



Sur cette courbe, dans un premier temps les roues adhèrent plus avec le glissement tant qu'il est inférieur à une valeur de glissement optimum (où l'adhérence est maximale). Par suite, les roues adhèrent moins bien lorsque le véhicule glisse trop, logiquement.



La roue avant développe plus de force latérale que la roue arrière. Ceci se comprend car le véhicule étant sous-vireur, on sait que l'avant dérive plus que l'arrière, et donc il y a plus d'effort latéraux à l'avant qu'à l'arrière.



La force longitudinale varie comme le coefficient d'adhérence du fait de leur relation à la charge verticale. Après la zone quasi linéaire : plus la roue glisse dans la direction longitudinale, moins il y a d'effort fournit.

4 L'interface : Matlab App Design

Précédemment, je me suis servi d'entrées prédéfinies (U et β) sur Matlab pour mieux illustrer les résultats. Basé sur un même programme principal, J'ai conçu une interface qui permet d'entrer les variables U et β instantanément, pour un cas plus général.

Le fonctionnement est simple : l'utilisateur entre la vitesse du véhicule (Km/h) et l'angle de braquage ($^\circ$) dans l'emplacement **Commandes/entrées**. On peut entrer des valeurs exactes manuellement (où cela est possible) ou en se servant de boutons grâce auxquels on augmente ou diminue les valeurs. Les boutons et zones d'entrée manuelles exactes sont liés.

Dans l'emplacement **Lancement de la simulation** l'utilisateur peut lancer/arrêter la simulation (une lampe à côté devient rouge ou verte) ou la mettre en pause.

Pour afficher les courbes :

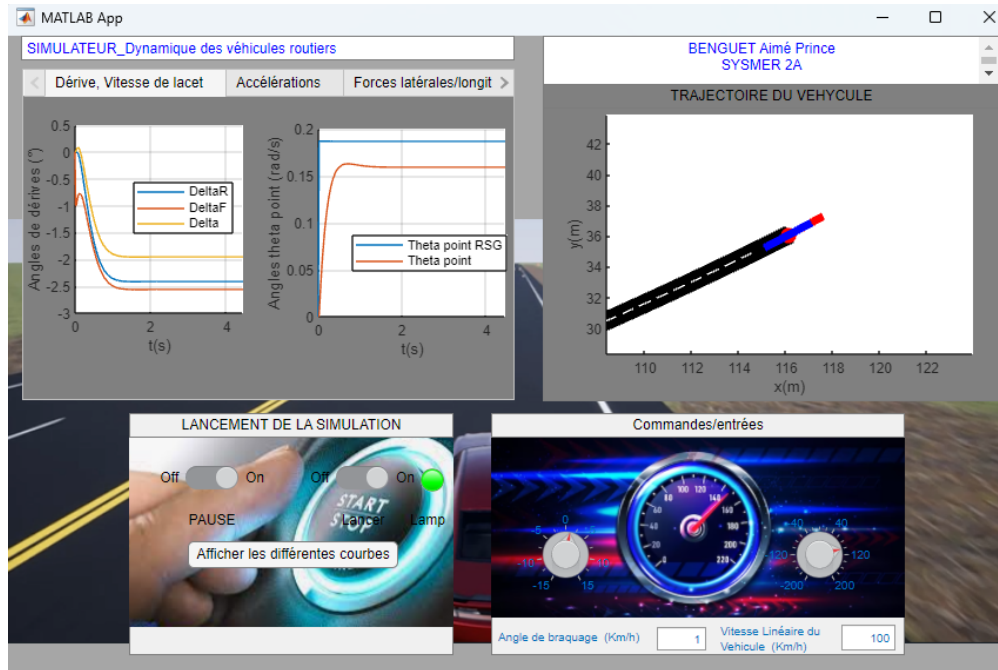
Il faut soit mettre la simulation en pause, soit arrêter la simulation, puis appuyer sur **Afficher les courbes**.

NB : Pour afficher les courbes lorsqu'on est en pause, il faut stopper la pause (Pause 'off') un instant (1 clic), appuyer ensuite sur "afficher les courbes" et remettre à pause si on souhaite rester en pause le temps de voir les courbes obtenues jusqu'à l'instant de pause. Pour repartir, il suffit de stopper la pause à nouveau (Pause 'off').

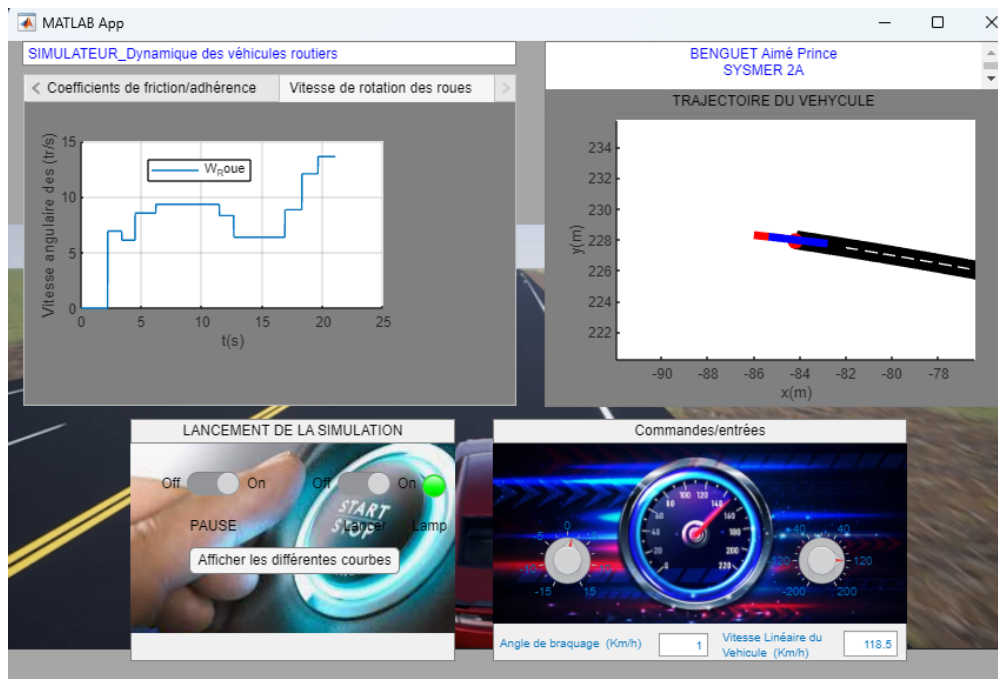
Lors de l'affichage une figure vide apparaît certainement à cause de la fonction "drownow", il suffit de la mettre sur le côté.



Dans ce cas ($U=100\text{Km/h}$, $\beta=1^\circ$), j'ai mis la simulation en pause.



Ici, j'ai affiché les courbes à l'instant de pause.



Dans ce cas, j'ai fait varier la vitesse comme on peut s'en apercevoir grâce à la vitesse de rotation des roues affichée.

Le comportement du simulateur est le même que dans les parties précédente de ce rapport, je n'ai donc pas repris mes interprétations faites plus haut.

CONCLUSION

Cette étude de la dynamique de véhicule, sous Matlab nous a permis de comprendre le comportement d'un véhicule en particulier lorsqu'il vire. Les différents modèles utilisés démontrent l'importance de respecter les hypothèses pour lesquelles ils s'appliquent. C'est ainsi que certaines formules ne sont plus valables dans le modèle des petits angles et des calculs moins exacts dans le modèle cinématique si jamais la vitesse est trop grande.

Le véhicule était sous-vireur de base et stable dans son mouvement et en changeant la rigidité de dérive avant (en l'augmentant de sa moitié) comme je l'ai testé, le véhicule devient sur-vireur. L'avant tourne plus rapidement que l'arrière et le véhicule devient instable dans son mouvement.