
Modélisation et Simulation du Comportement Dynamique des Véhicules Terrestres

Modèles, Stabilité et Simulation sous MATLAB

Travail réalisé par :
BERTA Camille, CHERIF Enzo
Étudiants de Seatech Promo 2025
2A, filière SYSMER

Cours supervisé par :
M. Mathieu RICHIER, Professeur des universités, SEATECH

Dans le cadre du cours
Robotique terrestre

Décembre 2023



Table des matières

1 Introduction	3
1.1 Présentation du sujet : Comportement des véhicules terrestres et étude des virages dans le cadre de la robotique terrestre	3
1.2 Objectifs du TP : Modélisation cinématique et dynamique du véhicule, étude de la stabilité et développement d'un simulateur sous MATLAB	3
2 Modélisation Cinématique du Véhicule	4
2.1 Description du modèle cinématique utilisé	4
2.2 Méthodologie de modélisation	4
3 Modélisation Dynamique du Véhicule	5
3.1 Approfondissement du modèle dynamique	5
3.2 Développement des équations différentielles représentant le mouvement dans des conditions variables	5
4 Étude de la Stabilité du Modèle Dynamique	7
4.1 Analyse des équations du modèle pour évaluer la stabilité du véhicule dans les virages	7
4.2 Identification des conditions de stabilité et d'instabilité	8
5 Développement du Simulateur sous MATLAB	10
5.1 Détails sur la création du code MATLAB	10
5.1.1 Paramètres du modèle	10
5.1.2 Coefficients de frottements	11
5.1.3 Paramétrage du temps de simulation	11
5.1.4 Choix du scénario	12
5.1.5 Initialisation des valeurs	12
5.1.6 Boucle de simulation	13
5.1.7 Différents graphiques	13
5.2 Description de l'interface graphique	13
5.2.1 Aspect général de l'interface	14
5.2.2 Option véhicule	14
5.2.3 Différents sliders	15
5.2.4 Situation souhaitée	15
5.2.5 Conditions de la route	16
5.2.6 Paramètres de temps	16
5.2.7 Lampes indicatrices	17
5.2.8 Boutons de simulation	17
6 Résultats et Analyse	18
6.1 Virage Normal	18
6.1.1 Quad MF400H en virage normal	18
6.1.2 Mercedes Classe S en virage normal	20
6.2 Freinage Brusque	22
6.2.1 Quad MF400H en Freinage Brusque	22
6.2.2 Mercedes Classe S en Freinage Brusque	24
6.3 Evitement d'obstacle	26
6.3.1 Quad MF400H en Evitement d'obstacle	26
6.3.2 Mercedes Classe S en Evitement d'obstacle	28
6.4 Guidonnage	30
6.4.1 Quad MF400H en Guidonnage	30
6.4.2 Mercedes Classe S en Guidonnage	32
6.5 Vitesse Constante	34
6.5.1 Quad MF400H en Vitesse Constante	34
6.5.2 Mercedes Classe S en Vitesse Constante	36
6.6 Conditions de la route	37
6.6.1 Sol Mouillé	38
6.6.2 Sol Verglacé	39
6.7 Analyse globale	40
7 Conclusion	43

8	Bibliographie	45
A	Annexe	46
A.1	Code MATLAB	46

1 Introduction

1.1 Présentation du sujet : Comportement des véhicules terrestres et étude des virages dans le cadre de la robotique terrestre

La robotique terrestre s'intéresse à la conception et au contrôle de véhicules autonomes ou semi-autonomes évoluant sur des terrains variés. Parmi les aspects cruciaux de cette discipline, l'étude du comportement des véhicules dans les virages revêt une importance significative pour garantir la sécurité, la stabilité et la performance de ces engins.

Le comportement d'un véhicule lorsqu'il aborde un virage est un élément essentiel à comprendre pour différents secteurs tels que l'automobile, la robotique mobile et même la logistique. Dans ce contexte, ce travail expérimental se concentre spécifiquement sur l'étude du comportement d'un véhicule de type quad (quatre roues motrices) lors de la prise de virage.

La prise de virage d'un véhicule est influencée par plusieurs facteurs : la vitesse, la configuration des roues, la masse du véhicule, les forces extérieures telles que la friction avec le sol et la gravité. Ces éléments interagissent pour déterminer si le véhicule va adopter un comportement sous-vireur, où il a tendance à glisser vers l'intérieur du virage, ou survireur, où il tend à glisser vers l'extérieur du virage.

L'objectif de ce travail pratique est de modéliser cinétiquement et dynamiquement le comportement du véhicule lors de virages et d'analyser sa stabilité dans différentes conditions. Pour cela, différentes étapes sont menées, allant de la création de modèles mathématiques représentant le mouvement du véhicule à la simulation numérique de ces modèles pour comprendre et visualiser les réactions du véhicule dans des situations spécifiques telles que la vitesse constante, les freinages brusques ou les manœuvres d'évitement.

Ce travail vise donc à approfondir la compréhension du comportement des véhicules terrestres, en particulier des quads, lors de virages, et à fournir des outils permettant de prédire et de contrôler leur stabilité dans des scénarios variés. En intégrant des notions de modélisation, de simulation et d'analyse, ce TP offre un aperçu concret des enjeux liés à la robotique terrestre appliquée à la mobilité des véhicules.

1.2 Objectifs du TP : Modélisation cinématique et dynamique du véhicule, étude de la stabilité et développement d'un simulateur sous MATLAB

Ce travail pratique vise à atteindre plusieurs objectifs fondamentaux pour approfondir la compréhension du comportement des véhicules terrestres, en mettant l'accent sur les quads, lors de leur mouvement dans des virages. Les objectifs spécifiques comprennent :

Modélisation Cinématique du Véhicule : Développer un modèle mathématique décrivant le mouvement du véhicule sans considération des forces, en se concentrant sur les aspects cinématiques tels que la trajectoire, la vitesse et l'accélération en fonction de paramètres comme la vitesse angulaire des roues, l'angle de braquage, etc.

Modélisation Dynamique du Véhicule : Élaborer un modèle prenant en compte les forces agissant sur le véhicule, telles que l'angle de braquage, la vitesse, la rigidité des trains, afin de représenter le mouvement du véhicule dans des conditions variables.

Étude de la Stabilité du Modèle Dynamique : Analyser les équations du modèle dynamique pour évaluer la stabilité du véhicule lors de virages. Identifier les conditions de survirage et de sous-virage et comprendre les facteurs influant sur ces comportements.

Développement d'un Simulateur sous MATLAB : Créer un code informatique utilisant MATLAB pour simuler le comportement du véhicule dans différentes situations. Concevoir une interface graphique permettant de manipuler les paramètres du modèle et visualiser les résultats de simulation de manière intuitive.

En intégrant ces objectifs, ce travail expérimental vise à fournir une approche complète pour comprendre et modéliser le comportement des véhicules terrestres, en mettant en lumière les aspects cinématiques et dynamiques, ainsi que la stabilité dans des contextes de virages. L'aboutissement de ce TP sera la mise en place d'un outil de simulation interactif permettant d'explorer et d'analyser le comportement du véhicule dans divers scénarios, offrant ainsi des perspectives pratiques pour l'ingénierie et le contrôle des véhicules terrestres.

2 Modélisation Cinématique du Véhicule

2.1 Description du modèle cinématique utilisé

Dans le cadre de cette étude, nous adoptons l'hypothèse de modèle de "bicyclette" pour représenter le comportement du quad. Cette approche simplifiée, souvent utilisée dans la dynamique des véhicules, considère le quad comme un système à deux roues, chacune représentant une paire de roues adjacentes (avant et arrière) agissant collectivement pour déterminer le mouvement du véhicule dans le plan de lacet. Cette abstraction permet une modélisation plus simple du comportement dynamique du quad lors des virages.

Le modèle cinématique appliqué au quad repose sur l'hypothèse d'un contact sans glissement entre la roue et le sol, appelée Roulement Sans Glissement (RSG). Cette méthode est essentielle pour décrire la cinématique du véhicule et est fréquemment exploitée dans la commande de robots mobiles à basse vitesse, où l'assumption de RSG demeure valide.

La figure (1) offre une représentation en lacet du véhicule, détaillant le modèle cinématique adopté pour décrire les mouvements du quad. Les notations introduites dans ce cadre englobent :

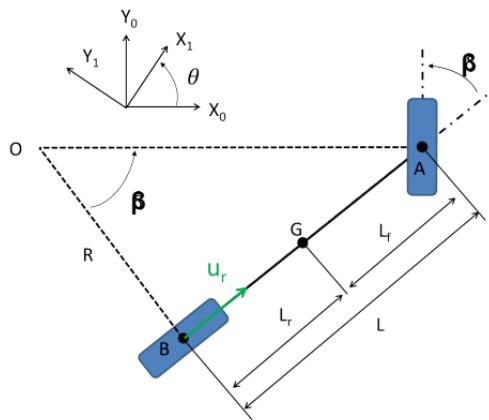


FIGURE 1 – Vue en lacet du véhicule - Modèle cinématique

Les différentes notations introduites sont :

- $R_0(X_0, Y_0, Z_0)$ est le repère terrestre, supposé galiléen.
- $R_1(X_1, Y_1, Z_1)$ est le repère attaché au véhicule.
- O est le Centre Instantané de Rotation (CIR).
- G est le Centre de Gravité du véhicule (CdG), confondu ici avec le CIR puisque le roulis est négligé (cf. hypothèse citée ci-dessus).
- L_f est le demi-empattement avant du véhicule (c'est-à-dire la position longitudinale du CdG par rapport au train avant).
- L_r est le demi-empattement arrière du véhicule.
- $L = L_f + L_r$ est l'empattement du véhicule.
- R est le rayon de courbure.
- β est l'angle de braquage ou angle d'Ackermann.
- θ est l'angle de lacet, définissant l'orientation du repère R_1 par rapport à R_0 .
- u_r est la vitesse linéaire du milieu B de l'essieu arrière.

2.2 Méthodologie de modélisation

En considérant le Centre Instantané de Rotation (CIR) sur la figure 1, l'évolution instantanée de l'angle de lacet est décrite par :

$$\dot{\theta} = \frac{u_r \cdot \tan(\beta)}{L} \quad (1)$$

Cette équation (1) décrit comment l'angle de lacet évolue en fonction de la vitesse linéaire du milieu de l'essieu arrière u_r et de l'angle de braquage β , en prenant en compte les caractéristiques géométriques telles que

l'empattement L du véhicule. Cette modélisation permet d'introduire des concepts clés qui seront utilisés pour élaborer un critère de détection du sur/sous-virage dans la section suivante.

3 Modélisation Dynamique du Véhicule

3.1 Approfondissement du modèle dynamique

Le modèle dynamique du véhicule repose sur une représentation de type "bicyclette" en association avec le modèle de contact roue/sol présenté précédemment dans la section 2.3. Bien que ce dernier modèle soit linéaire, il intègre les fluctuations d'adhérence et la non-linéarité du contact roue/sol en adaptant en temps réel les rigidités de dérive. La représentation dynamique de ce modèle est illustrée dans la figure (2) ci-dessous, et de nouvelles notations sont introduites pour décrire ce modèle :

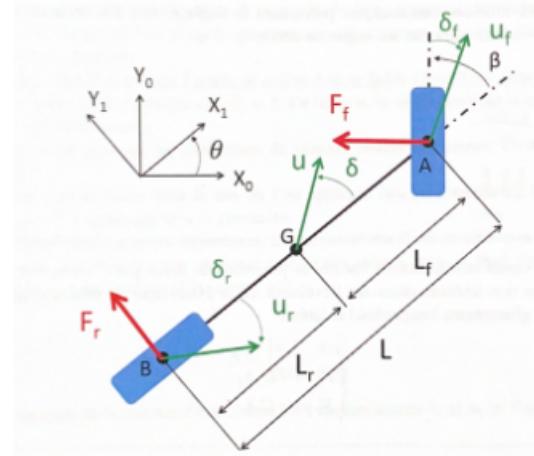


FIGURE 2 – Vue en lacet du véhicule - Modèle dynamique

- \dot{u} et \dot{u}_f représentent respectivement les vitesses du Centre de Gravité (CdG - confondu ici avec le CdR) et du point médian A de l'essieu avant.
- δ_r , δ_f , et δ correspondent respectivement aux angles de dérive pour l'essieu arrière, l'essieu avant et l'angle global au niveau du CdG.
- I_z désigne le moment d'inertie autour de l'axe vertical passant par G .
- m représente la masse du véhicule.
- F_r et F_f représentent les forces latérales avant et arrière.

La figure (2) offre une représentation en lacet du véhicule, détaillant le modèle dynamique. Ces notations et représentations sont essentielles pour définir les interactions dynamiques fondamentales du véhicule et seront utilisées pour modéliser son comportement dans des conditions réelles en tenant compte des forces longitudinales et latérales agissant sur les différentes parties du véhicule.

3.2 Développement des équations différentielles représentant le mouvement dans des conditions variables

Le modèle envisagé intègre des angles de dérive avant et arrière, notés δ_f et δ_r , respectivement situés sur la roue avant (en A) et sur la roue arrière (en B). En appliquant le Principe Fondamental de la Dynamique dans le repère R_0 , les équations suivantes sont obtenues :

$$m\vec{u} = \vec{F}_r + \vec{F}_f \quad (2)$$

Selon la figure (2), nous savons que :

$$\vec{F}_r = \begin{vmatrix} 0 \\ F_r \end{vmatrix} \quad \vec{F}_f = \begin{vmatrix} -F_f \sin \theta \\ F_f \cos \theta \end{vmatrix} \quad (3)$$

De plus, il est observé que :

$$\vec{u} = u \cos(\delta) \vec{x}_1 + u \sin(\delta) \vec{y}_1 \quad (4)$$

Dérivant ce vecteur (application de la formule de Bour), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{u}}{dt} \Big|_{R_0} &= \frac{d\vec{u}}{dt} \Big|_{R_1} + \vec{\Omega}_{R_0/R_1} \wedge \vec{u} \\ &= \begin{bmatrix} -u\dot{\delta}\sin(\delta) + \dot{u}\cos(\delta) \\ u\dot{\delta}\cos(\delta) + \dot{u}\sin(\delta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -u\dot{\theta}\sin(\delta) \\ u\dot{\theta}\cos(\delta) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -u\dot{\delta}\sin(\delta) + \dot{u}\cos(\delta) - u\dot{\theta}\sin(\delta) \\ u\dot{\delta}\cos(\delta) + \dot{u}\sin(\delta) + u\dot{\theta}\cos(\delta) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

D'où,

$$\begin{aligned} \vec{x}_0 : -u\dot{\delta}\sin(\delta) + \dot{u}\cos(\delta) - u\dot{\theta}\sin(\delta) &= -F_f \sin(\beta) \\ \vec{y}_0 : u\dot{\delta}\cos(\delta) + \dot{u}\sin(\delta) + u\dot{\theta}\cos(\delta) &= F_r + F_f \cos(\beta) \end{aligned} \quad (5)$$

De plus, en appliquant l'équation du moment autour de l'axe vertical z au centre de gravité, nous obtenons :

$$I_z \ddot{\theta} = L_f F_f \cos(\beta) - F_r L_r \quad (6)$$

En procédant à la manipulation des équations (5) en soustrayant la ligne (2).cos(δ) - (1).sin(δ), on obtient :

$$\dot{\delta} = \frac{F_r \cos(\delta) + F_f \cos(\beta + \delta)}{mu} - \dot{\theta} \quad (7)$$

Cette relation reste valide sous la condition $x \neq 0$. Lorsque l'on considère les angles de braquage et de dérive, il est important de noter que les voitures de tourisme ont généralement une capacité maximale d'angle de braquage entre 30 et 40 degrés. Cette limite justifie le choix d'envisager des angles de faible amplitude, avec $|\beta - \delta| \leq 10$. Ces contraintes sur les angles influent sur les équations suivantes :

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{(L_f F_f - L_r F_r)}{I_z} \\ \dot{\delta} = \frac{F_r + F_f}{mu} - \dot{\theta} \end{cases} \quad (8)$$

Ainsi, ces équations tiennent compte des limites pratiques des angles de braquage et de dérive, assurant ainsi leur validité dans les modèles analytiques pour les véhicules de ce type.

D'autre part, les relations cinématiques régissant le mouvement des vecteurs vitesse permettent aisément d'établir les liens entre les angles de dérive. Cela se traduit par les équations suivantes, reliant les angles de dérive entre eux :

$$\tan(\delta_f + \beta) = \tan(\delta) + \frac{L_f \dot{\theta}}{u \cos(\delta)} \quad (9)$$

$$\tan(\delta_r) = \tan(\delta) - \frac{L_r \dot{\theta}}{u \cos(\delta)} \quad (10)$$

Selon l'hypothèse des petits angles, formulée précédemment, nous obtenons :

$$\delta_f = \delta + \frac{L_f \dot{\theta}}{u} - \beta \quad (11)$$

$$\delta_r = \delta - \frac{L_r \dot{\theta}}{u} \quad (12)$$

En fin de compte, en associant le modèle linéaire de pneumatique avec l'équation (7), nous obtenons un système d'équations non linéaires qui décrivent l'évolution de la dynamique du véhicule. Ce système intègre les phénomènes de glissement longitudinal et latéral :

$$\begin{cases} F_f = -C_f \delta_f \\ F_r = -C_r \delta_r \end{cases} \quad (13)$$

Avec C_f et C_r représentant respectivement les rigidités de dérive avant et arrière, il devient possible de déduire, à partir des équations précédentes :

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{-L_f C_f (\delta + \frac{L_f \dot{\theta}}{u} - \beta) + L_r C_r (\delta - \frac{L_r \dot{\theta}}{u})}{I_z} \\ \dot{\delta} = \frac{-C_r (\delta - \frac{L_r \dot{\theta}}{u}) - C_f (\delta + \frac{L_f \dot{\theta}}{u} - \beta)}{mu} - \dot{\theta} \end{cases} \quad (14)$$

C_f et C_r symbolisent respectivement les rigidités de dérive avant et arrière. Ces valeurs sont étroitement liées aux conditions d'adhérence entre la roue et le sol, variant en fonction de ces paramètres. Il est pertinent de souligner que le système (13) reste valide à condition que la vitesse ne soit pas nulle. Cette condition demeure toujours respectée dans notre étude, étant donné que notre objectif est d'analyser la dynamique d'un véhicule en mouvement.

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \delta \end{pmatrix} + B\beta \quad (15)$$

Où :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{u I_z} & \frac{C_r L_r - C_f L_f}{I_z} \\ \frac{C_r L_r - C_f L_f}{mu^2} - 1 & -\frac{C_r + C_f}{mu} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{C_f L_f}{I_z} \\ \frac{C_f}{mu} \end{bmatrix}$$

Ce modèle analytique, central dans notre programmation sous Matlab, présente une représentation précise lorsque les angles demeurent proches de zéro. Cette précision s'avère cruciale pour l'étude de la stabilité du modèle dynamique du véhicule.

Nous allons approfondir notre analyse en étudiant la stabilité du modèle, évaluant comment le véhicule réagit lors des virages. Cela implique une identification précise des conditions de stabilité et d'instabilité, notamment en ce qui concerne le survirage et le sous-virage, ainsi que l'exploration des facteurs qui influent sur ces comportements.

4 Étude de la Stabilité du Modèle Dynamique

4.1 Analyse des équations du modèle pour évaluer la stabilité du véhicule dans les virages

Le modèle de dynamique latérale a été formulé comme un système linéaire à coefficients variables. Bien que sa structure soit relativement simple, évaluer sa stabilité n'est pas une tâche immédiate. Pour obtenir des résultats préliminaires et introduire le critère de sous-virage/survirage, nous considérons les hypothèses suivantes, afin de transformer le système (15) en un système linéaire simple à coefficients constants :

- Nous supposons que l'angle de dérive δ reste faible, une hypothèse souvent vérifiée lors des expérimentations, ce qui permet d'approximer $\cos(\delta)$ par 1. Ainsi, la dépendance de la matrice A par rapport à l'état δ peut être éliminée.
- Nous considérons que les conditions de contact demeurent constantes, c'est-à-dire $C_f = C_r = \text{constante}$.
- Nous nous plaçons dans le cas où les commandes de braquage et la vitesse restent constantes : $\beta = \text{constante}$ et $u = \text{constante}$.

Dans ce contexte défini par ces hypothèses, la matrice d'état A devient constante, facilitant ainsi l'analyse de la stabilité de la dynamique latérale à partir des valeurs propres de A . Pour simplifier les calculs, nous réécrivons la matrice A du système (15) comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

4.2 Identification des conditions de stabilité et d'instabilité

Les valeurs propres de la matrice d'état A correspondent aux deux racines, notées λ_1 et λ_2 , de l'équation caractéristique :

$$\lambda^2 - \lambda(a_{11} + a_{22}) + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0 \quad (16)$$

La stabilité d'un système linéaire est conditionnée par la propriété selon laquelle ses valeurs propres doivent avoir une partie réelle strictement négative. Dans ce cas, le système présente deux valeurs propres, λ_1 et λ_2 , qui peuvent être soit des nombres complexes conjugués soit toutes deux réelles.

1. Dans le scénario des valeurs propres complexes conjuguées, la stabilité est garantie si la somme de ces valeurs propres, $\lambda_1 + \lambda_2$, est inférieure à zéro.
2. Dans le cas des valeurs propres réelles, une seconde condition s'ajoute : leur produit $\lambda_1 \times \lambda_2$ doit être supérieur à zéro.

Ces conditions sont relativement aisées à évaluer dans notre cas, car la somme et le produit des racines d'une équation du second degré normalisée correspondent directement aux coefficients du polynôme. Ainsi, d'après l'équation (16), le modèle de dynamique latérale, sous les hypothèses précédemment énoncées, demeure stable si :

$$\lambda_1 + \lambda_2 = a_{11} + a_{22} < 0 \quad (17)$$

$$\lambda_1 \times \lambda_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0 \quad (18)$$

La première condition demeure vérifiée. En effet, en substituant les expressions de a_{11} et a_{22} telles qu'elles sont formulées dans l'équation (17) et en considérant $\cos(\beta) = 1$, le résultat est le suivant :

$$\lambda_1 + \lambda_2 = -\frac{L_f^2 C_f + L_r^2 C_r}{u I_z} - \frac{C_f + C_r}{mu} = \frac{(-L_f^2 C_f - L_r^2 C_r)m - (C_f + C_r)I_z}{mu I_z} \quad (19)$$

Puisque C_f et C_r représentent des constantes de rigidité, elles sont nécessairement positives. Par conséquent, la somme $\lambda_1 + \lambda_2$ est négative. La première condition est bien respectée.

En explicitant la seconde condition (18) à partir de (19), le résultat obtenu est :

$$\lambda_1 \times \lambda_2 = \frac{L^2 C_f C_r + mu^2 (L_r C_r - L_f C_f)}{mu^2 I_z} \quad (20)$$

Le signe de (20) dépend du signe de $\xi_1 = L_r C_r - L_f C_f$:

- Si $\xi_1 > 0$, le véhicule est toujours stable.
- Si $\xi_1 < 0$, le véhicule est stable tant que la vitesse ne dépasse pas une valeur critique u_{crit} donnée par :

$$u_{crit} = \sqrt{\frac{L^2 C_f C_r}{m(L_f C_f - L_r C_r)}} \quad (21)$$

L'analyse précédente introduit ξ_1 , reflétant la disparité d'adhérence entre les essieux arrière et avant, influencée par la position du centre de gravité. Un ξ_1 positif indique une meilleure adhérence de l'essieu arrière, ce qui pousse le véhicule vers l'extérieur de la trajectoire prévue par la commande δ , résultant en un comportement

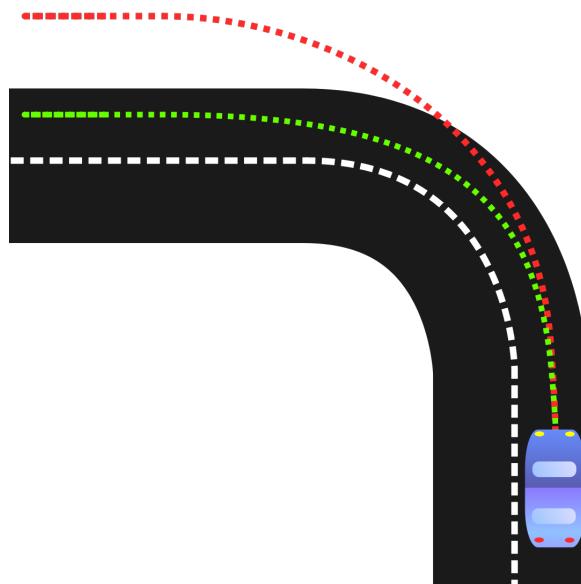


FIGURE 3 – Trajectoire d'une voiture en situation de sous-virage dans un virage

sous-vireur.

En revanche, un ξ_1 négatif tend à amplifier la rotation du véhicule par rapport à la commande, illustrant un phénomène de survirage. L'analyse a démontré que le véhicule reste stable sous un certain seuil de vitesse, au-delà duquel il peut glisser en tête-à-queue, devenant difficile à contrôler.

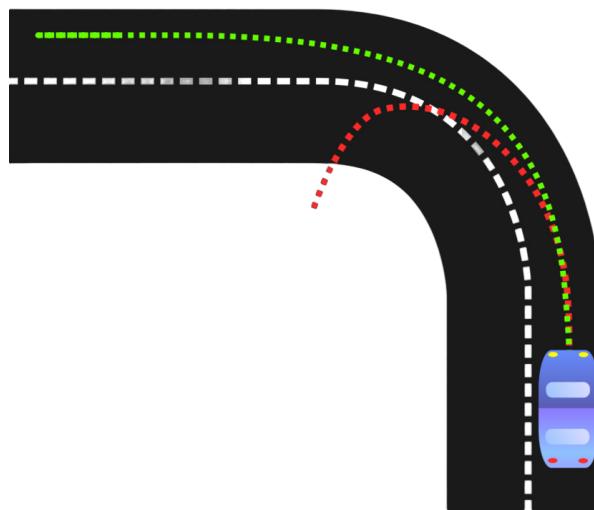


FIGURE 4 – Trajectoire d'une voiture en situation de sur-virage dans un virage

Il est donc important pour les constructeurs automobile de prévenir ce type de situation. D'où la création de systèmes tels que l'ESC (Electronic Stability Control) ou encore l'ESP (Electronic Stability Program) développés par Continental et Bosch respectivement. Ces dispositifs ont été conçus pour remédier aux situations potentiellement dangereuses de perte de contrôle lors de virages serrés ou dans des conditions de route difficiles.

L'ESC de Continental [1] vise à améliorer la stabilité en surveillant en permanence divers paramètres du véhicule tels que la vitesse des roues, l'angle de braquage, la direction du volant et d'autres capteurs pour détecter tout début de perte de contrôle. Il intervient en appliquant sélectivement les freins sur certaines roues

pour rétablir la stabilité du véhicule.

La première voiture équipée du système ESC a été la Mercedes-Benz S-Class en 1995. Ce fut l'une des premières voitures à intégrer ce type de système avancé de contrôle de la stabilité, fournissant une assistance précieuse au conducteur pour maintenir le contrôle du véhicule dans des conditions difficiles.



FIGURE 5 – Mercedes-Benz S-Class

Cette technologie a depuis été largement adoptée par de nombreux constructeurs automobiles pour améliorer la sécurité et la stabilité des véhicules, devenant un élément essentiel des systèmes de sécurité active.

Nous envisageons d'examiner le comportement d'un quad dans des virages sous diverses conditions, notamment en analysant son caractère sous-vireur ou survireur. En utilisant les modèles analytiques que nous avons développés, nous simulerons ces situations dans MATLAB.

5 Développement du Simulateur sous MATLAB

La modélisation de la dynamique d'un quad nécessite une approche précise et détaillée pour comprendre son comportement dans diverses conditions de conduite. L'utilisation de MATLAB pour simuler cette dynamique offre un cadre robuste et flexible pour analyser les mouvements longitudinaux et latéraux, ainsi que les interactions complexes entre le véhicule et la surface.

Cette section détaille le processus de création du code MATLAB dédié à l'étude de la dynamique du quad. De la conception initiale du modèle à l'implémentation des équations de mouvement, cette démarche permettra de simuler et d'analyser le comportement du quad dans des scénarios de virage, tout en fournissant des informations cruciales pour évaluer sa stabilité et sa réactivité.

L'objectif principal est de développer un outil de simulation robuste et précis, permettant d'explorer les caractéristiques sous/sur-vireuses du quad dans différentes situations, ouvrant ainsi la voie à des améliorations de conception et de contrôle pour ces véhicules. ,

5.1 Détails sur la création du code MATLAB

5.1.1 Paramètres du modèle

Pour établir le modèle de dynamique du quad, plusieurs paramètres déterminants sont pris en compte. Voici les détails de la conception initiale :

Choix du modèle de véhicule :

Le modèle de quad retenu est caractérisé par les paramètres suivants :

Paramètre	Symbol	Valeur
Masse du véhicule	m	1310 kg
Moment d'inertie en lacet	I_z	$1760 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
Demi empattement avant	L_f	1.2 m
Demi empattement arrière	L_r	1.4 m
Rigidité de dérive avant	C_f	$69740 \text{ N}\cdot\text{rad}^{-1}$
Rigidité de dérive arrière	C_r	$63460 \text{ N}\cdot\text{rad}^{-1}$

Ces paramètres sont cruciaux pour décrire la dynamique du véhicule et sa réaction face aux forces extérieures, formant ainsi la base du modèle.

Un autre véhicule est pris en compte dans notre étude pour pouvoir analyser l'influence des paramètres du véhicule sur son comportement dynamique. Pour cela nous allons travailler sur une Mercedes Classe S des années 1992, dont voici les paramètres :

Paramètre	Symbol	Valeur
Masse du véhicule	m	2000 kg
Moment d'inertie en lacet	I_z	$1750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
Demi empattement avant	L_f	1.4 m
Demi empattement arrière	L_r	1.45 m
Rigidité de dérive avant	C_f	$65000 \text{ N}\cdot\text{rad}^{-1}$
Rigidité de dérive arrière	C_r	$75000 \text{ N}\cdot\text{rad}^{-1}$

Cette première étape de conception du modèle établit les fondations nécessaires pour représenter avec précision le comportement du quad dans différentes situations, en prenant en compte ses caractéristiques physiques et mécaniques fondamentales.

5.1.2 Coefficients de frottements

Ce bloc de code permet d'adapter les coefficients de frottement (C_r et C_f) en fonction des conditions de conduite spécifiées par l'utilisateur à travers une interface graphique, que nous expliquerons par la suite.

- **L'option "Sec"** maintient les coefficients de frottement à leur valeur d'origine.
- **L'option "Mouillé"** diminue les coefficients à 70% de leur valeur d'origine, simulant des conditions de route humide.
- **L'option "Neige"** réduit les coefficients à 30% de leur valeur d'origine, simulant une surface enneigée.
- **L'option "Verglas"** les diminue à 10% de leur valeur initiale, représentant une route verglacée.

Ces ajustements permettent de modéliser différents niveaux d'adhérence en fonction des conditions de route, offrant ainsi une simulation réaliste des diverses situations rencontrées lors de la conduite.

5.1.3 Paramétrage du temps de simulation

Ce segment de code effectue la préparation des données nécessaires à la simulation du modèle du véhicule. Voici une explication détaillée :

- dt et T_f représentent respectivement le pas de temps et la durée totale de la simulation, récupérés depuis l'interface utilisateur.
- Les conditions suivantes vérifient si les valeurs entrées pour le pas de temps et la durée de simulation sont strictement positives. Si ce n'est pas le cas, des messages d'erreur s'affichent.
- $T_{_}$ est un vecteur de temps allant de 0 à T_f avec un pas de temps de dt . Il permet de définir les instants auxquels seront évaluées les données lors de la simulation.
- $NbrPoint$ représente le nombre de points temporels dans la simulation, calculé à partir de la longueur du vecteur $T_{_}$.
- T_{cbeta} et T_{cu} sont des paramètres déterminant les temps caractéristiques pour atteindre respectivement l'angle de braquage maximum et la vitesse maximale du véhicule.
- Enfin, la variable $Temps$ contient le vecteur temporel pour la simulation, construit en utilisant le pas de temps défini et la durée totale de la simulation.

5.1.4 Choix du scénario

Cette partie du code concerne la simulation d'un virage normal. Elle calcule l'évolution de l'angle de braquage (**Vbeta**) et de la vitesse (**Vu**) sur la durée de la simulation.

Listing 1 – Virage normal

```
if app.VirageNormalButton.Value==1
    % Construction des entrées de vitesse et d'angle de braquage
    for i = 1:NbrPoint
        Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
        ;
        Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);
    end
end
```

La formule utilisée pour **Vbeta** et **Vu** est dérivée des équations caractérisant la réponse temporelle d'un système d'ordre 1. Elle modélise la montée en régime progressif de l'angle de braquage et de la vitesse linéaire jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales en fonction du temps. Ces évolutions sont contrôlées par les constantes de temps **Tc_beta** pour l'angle de braquage et **Tc_u** pour la vitesse.

L'utilisation de la fonction `sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)` permet de gérer la forme de cette montée en régime, en assurant que les valeurs convergent progressivement vers leur valeur maximale tout en évitant des variations brutales.

Ensuite, même chose pour les autres scénarios mais avec leur particularité. Pour ne pas les détailler tous et que ce soit trop lourd nous allons juste voir le freinage brusque

Listing 2 – Freinage brusque

```
elseif app.FreinageBrusqueButton.Value==1
    % Construction des entrées avec freinage brusque
    for i = 1:int64(8 / dt)
        Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);
    end
    % Calcul du freinage moins brusque
    deceleration_rate = 0.001; % Modifier le taux de décélération selon votre
    besoin
    for i = int64(8 / dt):NbrPoint
        Vu(i) = max(0, Vu(i-1) - deceleration_rate * u_(i) * ((Temps(i) - 8) / Tc_u)
        / sqrt(1 + ((Temps(i) - 8) / Tc_u)^2));
    end
    for i = 1:NbrPoint
        Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
        ;
    end
end
```

Dans la première partie, pour une durée de 8 secondes (donnée par `int64(8 / dt)`), elle calcule la vitesse (**Vu**) en utilisant une fonction similaire à celle employée pour le virage normal. Cependant, la vitesse diminue brusquement pendant cette période.

Ensuite, le freinage devient moins abrupt. La décélération est contrôlée par la variable `deceleration_rate`. Cette section de code réduit progressivement la vitesse (**Vu**) à partir de la valeur précédente (après les 8 secondes) jusqu'à atteindre une vitesse nulle tout en évitant des changements trop drastiques.

En parallèle, la simulation maintient l'évolution de l'angle de braquage (**Vbeta**) suivant une progression similaire à celle du virage normal.

5.1.5 Initialisation des valeurs

Ce script [A] initialise un ensemble de variables nécessaires à la simulation de la dynamique du véhicule. Ces variables représentent des paramètres tels que la position, la vitesse et l'accélération dans différentes directions et dans différents points du véhicule.

Il initialise également des vecteurs pour stocker l'évolution de ces paramètres au fil du temps (`NbrPoint`). Ces variables et vecteurs sont utilisés pour suivre les états du véhicule tout au long de la simulation.

Il est important de noter que les valeurs initiales de ces paramètres peuvent être ajustées en fonction des besoins de la simulation pour représenter précisément le comportement du véhicule.

5.1.6 Boucle de simulation

Ce code [A] représente une boucle de simulation pour le comportement d'un véhicule. La boucle calcule les différentes grandeurs physiques liées à la dynamique du véhicule à chaque itération, en fonction du temps, de la vitesse, de l'angle de braquage, des forces de frottement, etc.

La boucle utilise une condition pour différencier deux situations :

- Lorsque la vitesse du véhicule est inférieure à une limite (`ulim`), il effectue des calculs basés sur les angles de lacet et de dérive globaux, les vitesses, les positions, et les accélérations en utilisant des équations spécifiques pour simuler le mouvement du véhicule.
- Lorsque la vitesse du véhicule dépasse la limite (`ulim`), il utilise des coefficients de matrice et des équations de force pour calculer les angles de dérive et de lacet, les forces appliquées sur le véhicule, et d'autres paramètres.

Ces calculs sont ensuite utilisés pour mettre à jour les variables de l'état du véhicule à chaque itération de la simulation.

5.1.7 Différents graphiques

Dans cette section [A] , les données de simulation générées précédemment sont utilisées pour créer différents graphiques qui représentent divers aspects du comportement du véhicule simulé. Voici une explication de chaque graphique généré :

UIAxes1 : Ce graphique comporte deux axes y, l'un représentant l'angle de braquage global du véhicule (Δ) et l'autre représentant la vitesse angulaire de lacet (Θ_p). Ces données sont tracées en fonction du temps (*Temps*).

UIAxes2 : Ce graphique montre les angles de braquage avant (Δ_f), arrière (Δ_r), et global (Δ) du véhicule en fonction du temps.

UIAxes10 : Ce graphique illustre les positions relatives des roues avant, du centre de gravité et des roues arrière du véhicule. Les positions sont représentées dans un espace bidimensionnel (x-y).

Les autres graphiques (**UIAxes3** à **UIAxes9**) sont conditionnellement tracés en fonction de différents boutons de l'interface utilisateur :

UIAxes3 : Affiche la vitesse linéaire en fonction du temps si le bouton correspondant est activé.

UIAxes4 : Affiche l'angle de braquage en fonction du temps si le bouton correspondant est activé.

UIAxes5 : Présente la différence entre les angles de braquage avant et arrière en fonction du temps si le bouton correspondant est activé.

UIAxes9 : Présente les forces de dérive latérales avant et arrière avec saturation en fonction de l'angle de braquage si le bouton correspondant est activé.

Ces graphiques permettent de visualiser différentes propriétés et paramètres du comportement simulé du véhicule, offrant ainsi une vue d'ensemble et détaillée de son mouvement, de ses angles et des forces impliquées.

5.2 Description de l'interface graphique

L'environnement de développement utilisé pour ce projet est l'AppDesigner intégré à MATLAB, un environnement puissant dédié à la conception et à la création d'interfaces utilisateur graphiques (GUI). AppDesigner fournit une interface conviviale permettant de construire et de personnaliser des applications interactives sans avoir à écrire de code complexe.

La conception graphique de l'interface utilisateur est réalisée de manière visuelle à l'aide d'une interface intuitive de type glisser-déposer. Cela permet d'assembler facilement les différents éléments graphiques tels que les boutons, les axes, les graphiques et les champs de texte. L'interface offre une palette d'outils complète permettant de styliser et de configurer chaque composant pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

La facilité de manipulation des composants, la flexibilité de mise en page et les fonctionnalités interactives offertes par AppDesigner sont des éléments clés ayant permis de concevoir une interface utilisateur conviviale et fonctionnelle pour ce projet.

5.2.1 Aspect général de l'interface

L'interface de simulation de véhicule est structurée de manière intuitive à travers des onglets distincts, offrant un accès organisé et simple aux paramètres et aux différents scénarios de simulation. Les onglets "Options Véhicule", "Paramètres de Simulation", "Scénarios" et "Conditions de Route" permettent une sélection précise des configurations. Des contrôles tels que des sliders pour la vitesse et l'angle de braquage, ainsi que des boutons pour les actions de simulation, offrent une interaction fluide et directe avec l'application. En outre, des graphiques détaillés donnent un aperçu complet des résultats de la simulation, facilitant l'analyse des données générées.

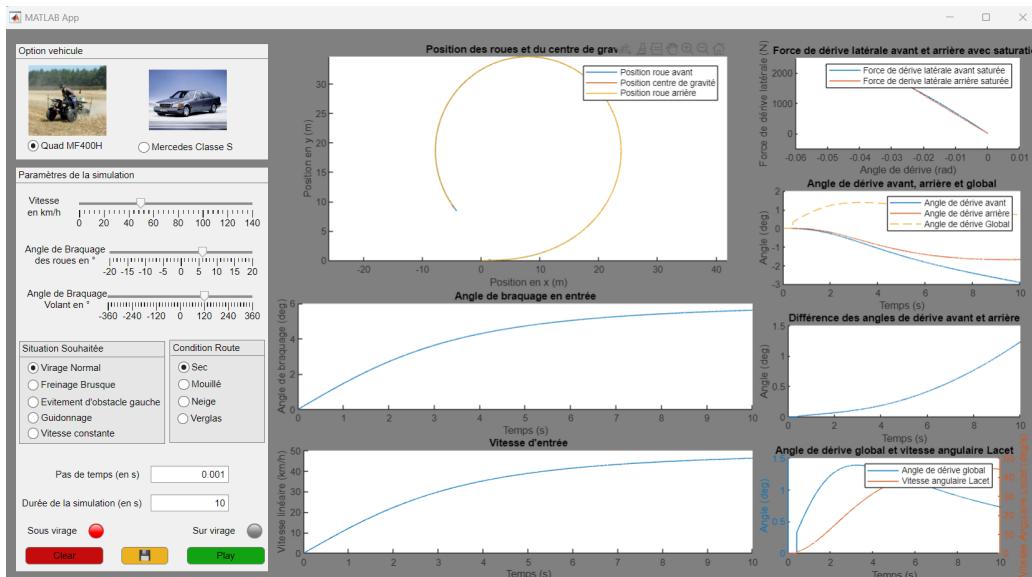


FIGURE 6 – Aspect général de l'interface

Après cette vue d'ensemble, nous examinerons en détail chaque élément de l'interface, mettant en lumière les fonctionnalités spécifiques et les interactions offertes par chaque onglet.

5.2.2 Option véhicule

Dans l'onglet "Options Véhicule", l'utilisateur a le choix entre deux véhicules distincts : un quad MF400H et une Mercedes Classe S. Ces choix sont représentés visuellement par des images distinctes des deux véhicules. Cette option offre une valeur ajoutée à l'interface en permettant de sélectionner deux modèles de véhicules radicalement différents, offrant ainsi une expérience de simulation diversifiée.

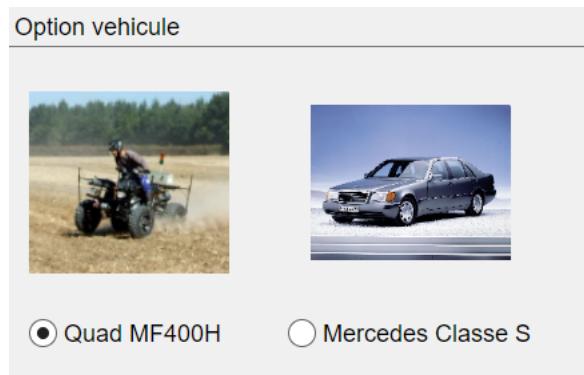


FIGURE 7 – Option véhicule

5.2.3 Différents sliders

Dans l'onglet "Paramètres de Simulation", trois sliders sont disponibles pour ajuster les paramètres de la simulation. Le premier slider permet de régler la vitesse du véhicule en km/h, offrant ainsi la possibilité de simuler différents scénarios à des vitesses variées.

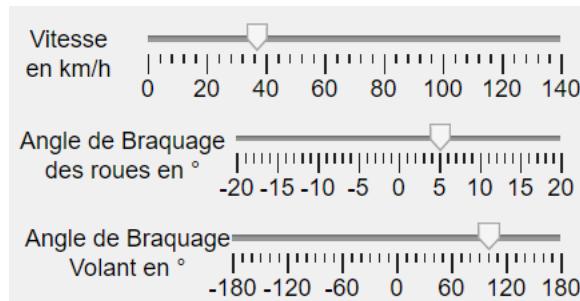


FIGURE 8 – Sliders permettant à l'utilisateur de choisir les valeurs de la vitesse d'entrée et de l'angle de braquage

Les deux autres sliders sont interconnectés pour contrôler l'angle de braquage des roues et celui du volant. Cette interconnexion reproduit de manière réaliste le lien mécanique entre ces deux paramètres dans un véhicule réel. Ajuster l'angle de braquage des roues impacte directement et proportionnellement l'angle de braquage du volant, reproduisant ainsi le comportement dynamique d'une direction réelle. Cette liaison entre les sliders garantit une simulation cohérente et réaliste des mouvements du véhicule.

5.2.4 Situation souhaitée

Dans la section des scénarios, cinq options distinctes permettent de simuler diverses conditions de conduite.

Le premier scénario simule un "Virage Normal" où à la fois la vitesse et l'angle de braquage augmentent de manière linéaire. Cela reproduit une courbe de conduite courante, où le véhicule accélère tout en virant.

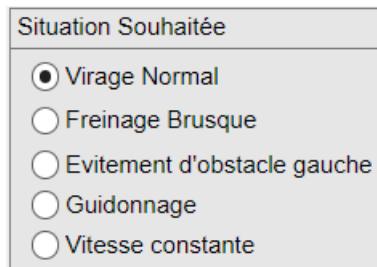


FIGURE 9 – 5 scénarios de simulation possible

Le deuxième scénario, "Freinage Brusque", suit une logique similaire au virage normal mais intègre une décélération soudaine à la fin de la simulation. Cela permet d'observer les conséquences d'un freinage brusque vers la fin du parcours.

Le troisième scénario, "Évitement d'Obstacle", suit une trajectoire semblable à celle du virage normal, mais à un moment précis, l'angle de braquage augmente de façon significative pour simuler l'évitement d'un obstacle soudain sur la route.

Le quatrième scénario, "Phénomène de Guidonnage", simule des oscillations dans l'angle de braquage, bien que cela ne soit pas typique pour une voiture ou un quad. Il permet de visualiser l'impact de ce phénomène sur la trajectoire du véhicule.

Enfin, le dernier scénario, "Vitesse Constante", maintient la vitesse et l'angle de braquage constants, offrant ainsi un exemple de simulation à vitesse constante sans changement significatif dans l'angle de braquage.

5.2.5 Conditions de la route

Dans la section "Condition de la Route", quatre conditions distinctes peuvent être sélectionnées pour simuler différentes surfaces de conduite :

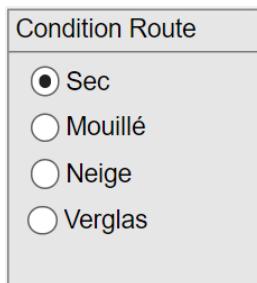


FIGURE 10 – Différentes conditons de la route

Sec : Cette condition simule une route sèche, offrant une adhérence optimale entre les pneus et la chaussée. C'est une surface de conduite standard avec une friction élevée, représentant des conditions idéales.

Mouillé : Cette condition représente une route mouillée, avec une diminution de l'adhérence due à la présence d'eau sur la route. Cela peut affecter la friction entre les pneus et la surface, entraînant une adhérence réduite et potentiellement des conditions de conduite plus glissantes.

Neige : Ce scénario simule une route recouverte de neige, offrant une adhérence encore plus faible en raison de la couche de neige sur la chaussée. La friction est significativement réduite, ce qui peut rendre la conduite plus difficile et moins prévisible.

Verglas : En sélectionnant cette condition, la simulation représente une surface glacée. Le verglas réduit considérablement l'adhérence, ce qui rend la route extrêmement glissante et la conduite particulièrement dangereuse.

Chaque condition de la route offre une expérience de conduite distincte avec des niveaux d'adhérence variables, permettant d'observer l'impact des différentes surfaces sur le comportement du véhicule.

5.2.6 Paramètres de temps

Dans cette application, l'utilisateur a le contrôle total sur deux aspects cruciaux de la simulation :

Pas de temps (en s)	<input type="text" value="0"/>
Durée de la simulation (en s)	<input type="text" value="0"/>

FIGURE 11 – Paramètres temps

Pas de temps : L'utilisateur peut spécifier le pas de temps qu'il souhaite pour la simulation. Cela représente l'intervalle entre chaque itération de la simulation. Une valeur plus petite fournit une représentation plus précise des changements dans le système, mais nécessite également plus de temps de calcul.

Durée de la simulation : L'utilisateur peut également définir la durée totale de la simulation. Cette valeur détermine sur quelle période de temps la simulation sera exécutée, permettant d'observer le comportement du véhicule sur une certaine période, en fonction des scénarios choisis et des conditions de la route.

Ces deux paramètres sont essentiels pour contrôler la précision et la durée de la simulation. L'utilisateur peut ajuster ces valeurs pour obtenir le niveau de détail souhaité dans les résultats de la simulation, en fonction de ses besoins spécifiques ou des expériences qu'il souhaite étudier.

Si l'utilisateur entre des valeurs nulles pour le pas de temps ou la durée de simulation, un message d'erreur spécifique est généré pour chaque cas :

Pas de temps nul : Si l'utilisateur entre un pas de temps nul, un message d'erreur l'avertit que cette valeur ne peut être nulle, car elle détermine l'intervalle entre chaque itération de la simulation, nécessaire pour calculer



FIGURE 12 – Erreur pas de temps

les états successifs du système.

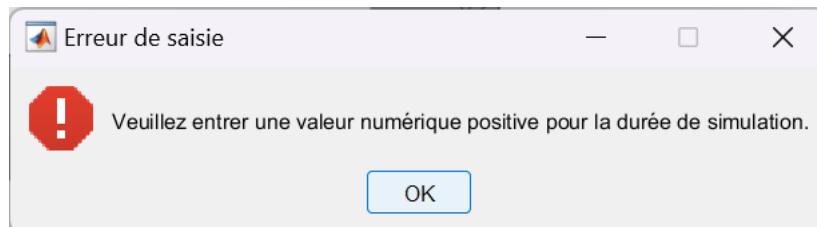


FIGURE 13 – Erreur durée de simulation

Durée de simulation nulle : De même, si l'utilisateur entre une durée de simulation nulle, un message d'erreur l'informe que la simulation doit avoir une durée définie pour pouvoir observer le comportement du véhicule sur une période temporelle spécifique.

Ces messages d'erreur aident l'utilisateur à comprendre l'importance de ces paramètres et l'invitent à entrer des valeurs valides pour garantir une simulation précise et significative.

5.2.7 Lampes indicatrices

Dans l'interface, deux lampes situées dans le coin en bas à gauche sont dédiées à la détection d'une situation de sous-virage ou du survirage.

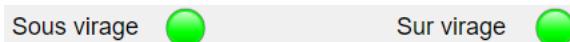


FIGURE 14 – Lampes indicatrices

Sous-virage : Une lampe est dédiée à la détection du sous-virage. Si, au cours de la simulation, le véhicule montre des tendances de sous-virage (lorsque la roue avant perd en adhérence et glisse vers l'extérieur dans un virage), cette lampe s'allume en rouge pour signaler cette condition.

Survirage : La deuxième lampe est destinée à détecter le survirage. Elle s'illumine en rouge si la simulation montre des signes de survirage (lorsque l'arrière du véhicule perd en adhérence et glisse vers l'extérieur dans un virage), permettant ainsi à l'utilisateur d'identifier visuellement cette condition.

Ces indicateurs visuels offrent une représentation en temps réel des conditions de sous-virage et de survirage pendant la simulation, aidant ainsi l'utilisateur à observer et à analyser plus facilement les réponses du véhicule dans différentes situations.

5.2.8 Boutons de simulation

Les trois boutons situés dans le coin en bas à gauche de l'interface offrent des fonctionnalités spécifiques pour interagir avec la simulation :

Bouton "Clear" : Ce bouton est dédié à la remise à zéro des différents graphiques générés pendant la simulation. En appuyant sur ce bouton, tous les graphiques actuellement affichés sont effacés, permettant à l'utilisateur de nettoyer l'écran et de préparer un nouvel ensemble de graphiques.



FIGURE 15 – Boutons de simulation

Bouton de sauvegarde ("Disquette") : Symbolisé par une icône de disquette, ce bouton permet à l'utilisateur de sauvegarder les différents graphiques générés lors de la simulation. En cliquant sur ce bouton, l'utilisateur peut télécharger le graphique de son choix sous le format "png" dans le dossier où se trouve l'application. Ainsi, l'utilisateur pourra le consulter ultérieurement et l'analyser hors de l'interface de simulation.

Bouton "Play" : Ce bouton permet de démarrer ou de lancer la simulation une fois que toutes les valeurs ont été paramétrées. En appuyant sur ce bouton, la simulation commence avec les paramètres donnés (vitesse, angles, conditions, etc.) et les résultats sont affichés sur les graphiques prévus à cet effet. Ce bouton déclenche le début du processus de simulation.

6 Résultats et Analyse

Dans cette section "Résultats et Analyse", nous explorons en détail les performances et comportements de deux modèles de véhicules : un quad MF400H et une Mercedes Classe S de 1992, à travers une simulation dynamique. Nous étudions l'influence de divers paramètres ajustables, des scénarios de conduite et des conditions routières sur le comportement de ces véhicules.

6.1 Virage Normal

Dans un virage normal, le temps pour atteindre la vitesse est identique pour le quad MF400H et la Mercedes Classe S. Cependant, leurs comportements divergent considérablement en raison de leurs caractéristiques propres. Nous prendrons une vitesse de 80 km/h et un angle de braquage des roues (β) de 7° .

6.1.1 Quad MF400H en virage normal

Dans un virage normal, la caractéristique la plus prédominante du quad MF400H est sa propension au sous-virage. Initialement, grâce à sa capacité de braquage supérieure, le quad semble bien négocier le virage. Cependant, au fur et à mesure qu'il progresse dans le virage (voir figure 16), une tendance se dessine : plus il avance, plus le quad a tendance à vouloir continuer tout droit au lieu de suivre la trajectoire courbe du virage.

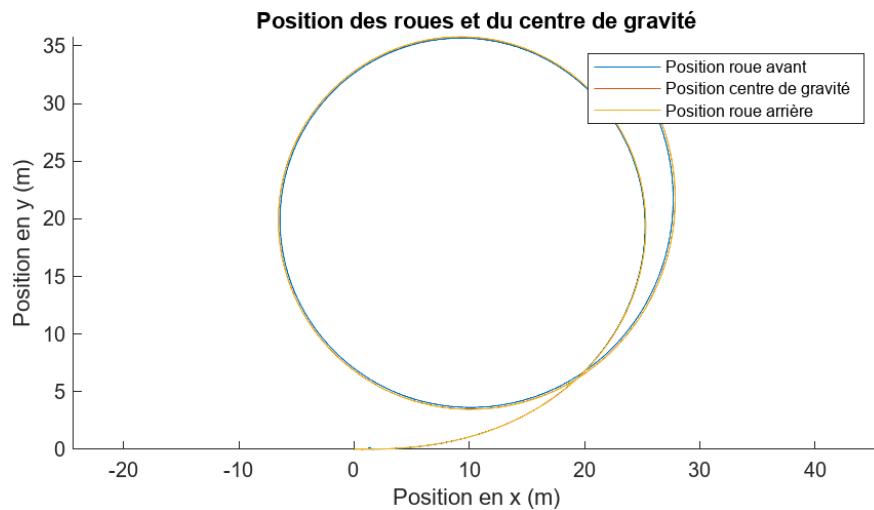


FIGURE 16 – Position des roues du quad dans un virage normal

Cette caractéristique de sous-virage se manifeste par un glissement vers l'extérieur du virage. Concrètement, alors que le virage se dessine, le quad semble vouloir maintenir une trajectoire rectiligne, nécessitant ainsi des corrections constantes pour contrôler sa direction et rester sur la trajectoire souhaitée. Cette nécessité de correction découle de la tendance du quad à vouloir continuer tout droit plutôt que de suivre naturellement la courbe du virage.

Cette particularité du sous-virage est accentuée par la capacité de braquage initiale du quad. Bien qu'il puisse initier le virage avec agilité, sa propension au sous-virage devient plus marquée à mesure qu'il progresse

dans le virage, nécessitant une gestion continue pour maintenir la trajectoire courbe souhaitée. Cela s'explique et se comprend avec les autres courbes.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

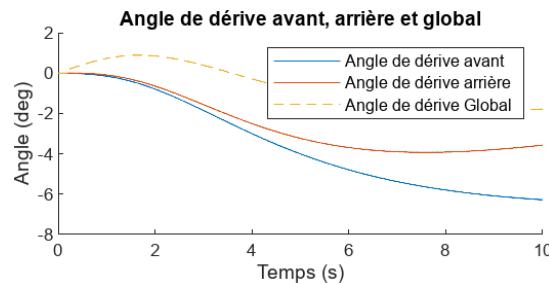


FIGURE 17 – Angle de dérive du quad dans un virage normal en fonction du temps

Dans le virage normal, l'examen des angles de dérive avant et arrière révèle une décroissance initiale similaire (voir figure 17). Cependant, à mesure que le virage progresse, l'angle de dérive avant diminue plus rapidement que celui de l'arrière.

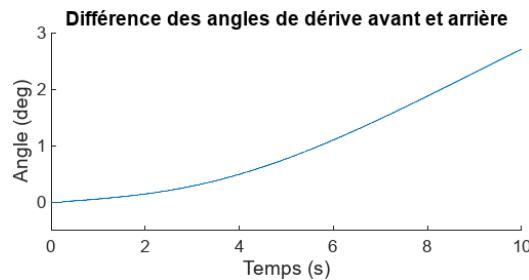


FIGURE 18 – Différence des angles de dérive du quad dans un virage normal en fonction du temps

Cette disparité croissante se reflète dans la courbe de la différence (voir figure 18) entre ces angles (Da), où Da devient progressivement strictement supérieur à 0. Cette divergence souligne le comportement sous-vireur du quad dans ce contexte.

Vitesse Angulaire de Lacet :

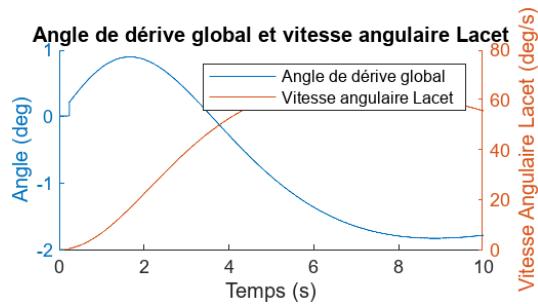


FIGURE 19 – Vitesse angulaire de lacet du quad dans un virage normal en fonction du temps

En parallèle, la vitesse angulaire de lacet augmente de manière significative (voir figure 19). Cette croissance témoigne d'une instabilité accrue du véhicule pendant le virage. La variation notable de cette vitesse angulaire confirme l'effet du sous-virage sur la stabilité globale du quad.

Forces de Dérive Latérales :

L'évolution des forces de dérive latérales complète ces observations. On constate une décroissance brusque des forces latérales, illustrant le caractère sous-vireur du quad dans ce virage (voir figure 20). Cette diminution abrupte souligne les difficultés du véhicule à maintenir la trajectoire désirée, mettant en évidence la nature instable du quad dans cette condition spécifique.

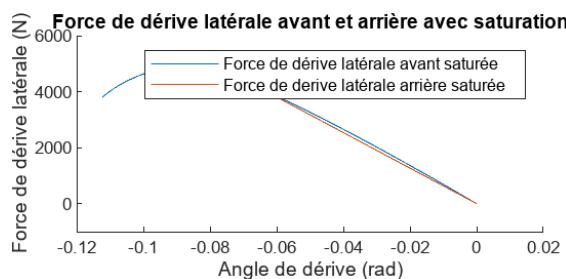


FIGURE 20 – Forces de dérive latérales du quad dans un virage normal en fonction de son angle de dérive

Cette analyse des différentes dynamiques offre une perspective globale sur le comportement du quad dans un virage normal, mettant en lumière sa tendance sous-vireuse et son instabilité croissante au fil du virage.

6.1.2 Mercedes Classe S en virage normal

Dans un virage normal, la Mercedes Classe S de 1992 présente une dynamique différente de celle du quad MF400H. La caractéristique la plus prédominante de la Mercedes est sa propension au survirage, un comportement opposé au sous-virage du quad.

La Mercedes, bien que moins agile que le quad, montre une réactivité spécifique lors de la négociation du virage. Son temps de braquage légèrement plus long s'accompagne d'une tendance à « trop » s'engager dans le virage, se rapprochant du survirage.

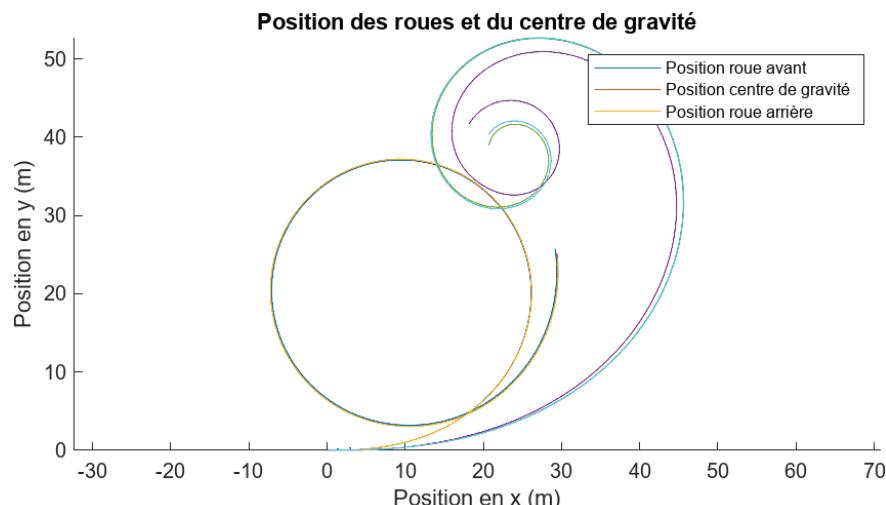


FIGURE 21 – Comparaison entre la position des roues du quad et de la Mercedes dans un virage normal

Contrairement au sous-virage du quad, la Mercedes a tendance à trop s'engager dans le virage (voir figure 21). Initialement, elle semble bien négocier la courbe, mais à mesure qu'elle progresse, elle a une propension à trop s'engager, risquant ainsi de dévier de la trajectoire courbe souhaitée. Dans des conditions de vitesse plus élevées ou avec un angle de braquage plus prononcé, la Mercedes Classe S de 1992 montre une propension à perdre le contrôle et à partir en spin. Cette observation met en évidence une caractéristique de la Mercedes dans des conditions extrêmes, où sa tendance au survirage s'accentue, affectant la stabilité du véhicule et pouvant entraîner une perte de contrôle, se traduisant par un spin.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

L'évolution des angles de dérive avant et arrière révèle une décroissance similaire au début du virage (voir figure 22). Cependant, au fil de la courbe, l'angle de dérive avant diminue moins rapidement que celui de l'arrière, entraînant une différence croissante entre ces angles (Da), avec Da devenant progressivement supérieur à 0 (voir figure 23). Ce phénomène indique le comportement survireur de la Mercedes dans ce contexte.

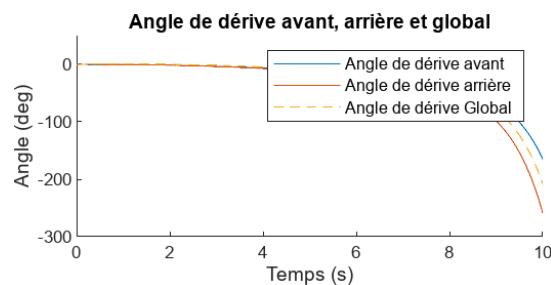


FIGURE 22 – Angle de dérive de la Mercedes dans un virage normal en fonction du temps

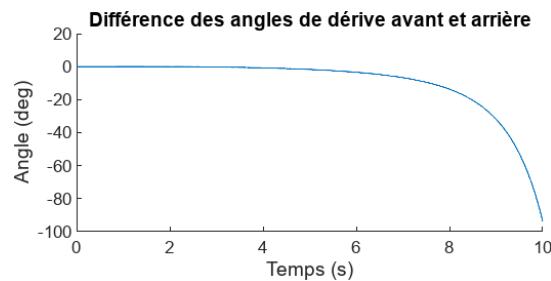


FIGURE 23 – Différence des angles de dérive de la Mercedes dans un virage normal en fonction du temps

Vitesse Angulaire de Lacet :

La vitesse angulaire de lacet augmente également, signifiant une instabilité croissante de la Mercedes pendant le

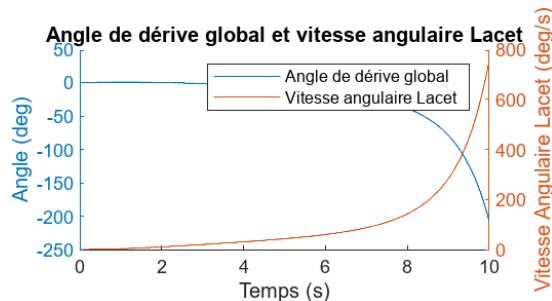


FIGURE 24 – Vitesse angulaire de lacet de la Mercedes dans un virage normal en fonction du temps

virage (voir figure 24). Cette variation met en évidence l'impact du survirage sur la stabilité globale du véhicule.

Forces de Dérive Latérales :

L'analyse des forces de dérive latérales souligne également la nature survireuse de la Mercedes (voir figure 25). Une diminution significative des forces latérales indique une difficulté à maintenir la trajectoire désirée, mettant en évidence l'instabilité du véhicule dans cette condition spécifique.

Cette analyse comparative des comportements dans un virage normal offre un aperçu des différences entre le sous-virage du quad MF400H et le survirage de la Mercedes Classe S, mettant en lumière leurs dynamiques opposées et leur impact sur la stabilité dans cette configuration de virage. Voyons donc comment les autres scénarios peuvent influer sur nos véhicules.

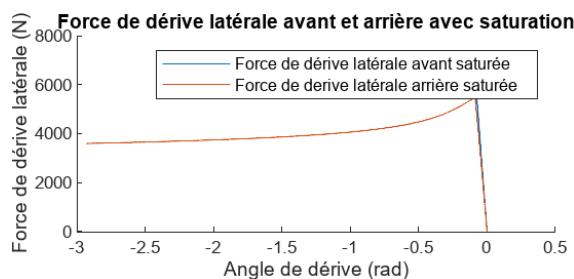


FIGURE 25 – Forces de dérive latérales de la Mercedes dans un virage normal en fonction du temps

6.2 Freinage Brusque

Dans un virage normal, le temps pour atteindre la vitesse est identique pour le quad MF400H et la Mercedes Classe S. Cependant, leurs comportements divergent considérablement en raison de leurs caractéristiques propres. Nous prendrons une vitesse de 80 km/h et un angle de braquage des roues (β) de 7°.

6.2.1 Quad MF400H en Freinage Brusque

Pendant la phase de freinage brusque, le Quad MF400H suit initialement une trajectoire similaire à celle observée dans un virage normal (voir figure 26). Cependant, lors du freinage intense, une réaction inattendue se manifeste : le quad semble momentanément perdre sa trajectoire courbe pour adopter brièvement une direction plus droite avant de revenir vers la courbe initiale du virage. Cette réaction atypique reflète une instabilité temporaire où le véhicule réagit de manière imprévisible face à l'impact du freinage soudain.

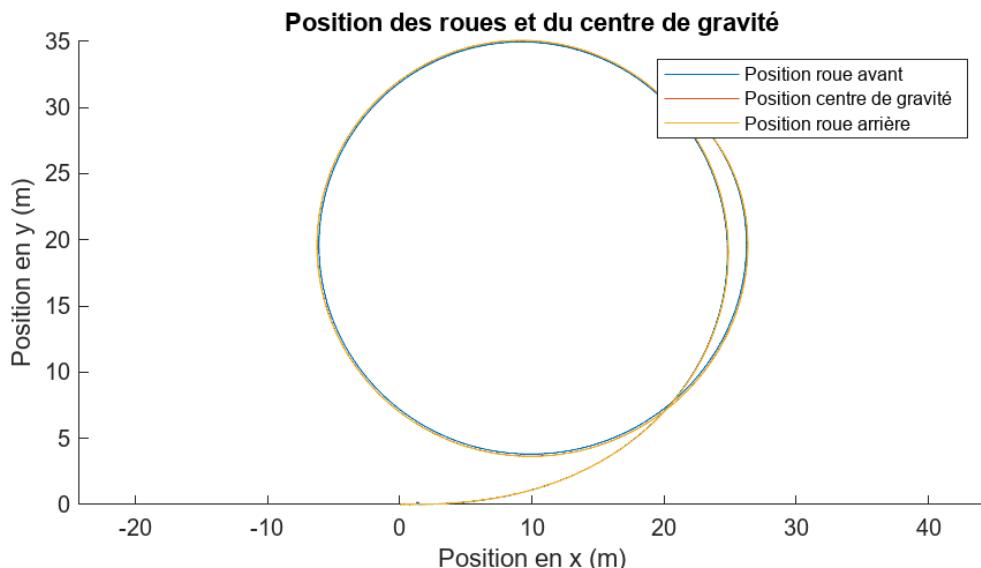


FIGURE 26 – Position des roues du quad lors d'un freinage brusque

Cette réaction atypique, bien que passagère, soulève une préoccupation en termes de sécurité, mettant en lumière le risque potentiel encouru par l'utilisateur. Cela met en évidence la recommandation bien connue de ne pas freiner lorsqu'on est engagé dans un virage, afin d'éviter toute perte de contrôle ou toute réaction imprévisible du véhicule.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

Pendant le freinage brusque, l'angle de dérive avant du Quad MF400H ne diminue pas instantanément, mais plutôt continue à augmenter avant d'entamer sa décroissance (voir figure 27).

Cette évolution s'observe alors que l'angle de dérive avant tend progressivement à se rapprocher de l'angle de dérive arrière. Cette dynamique est particulièrement mise en évidence à travers la courbe de différence entre ces angles (Da). Initialement, cette différence augmente, indiquant un écart croissant entre les angles de dérive avant et arrière (voir figure 28). Cependant, par la suite, cette différence diminue progressivement vers la fin du

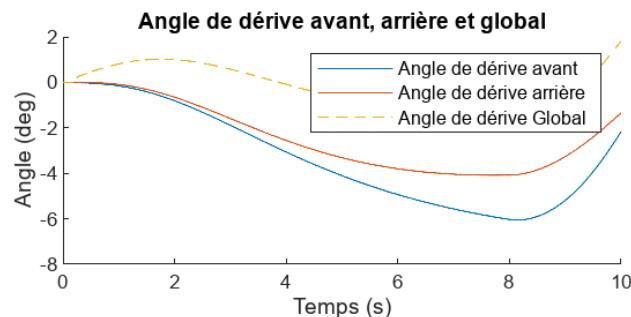


FIGURE 27 – Angle de dérive du quad lors d'un freinage brusque en fonction du temps

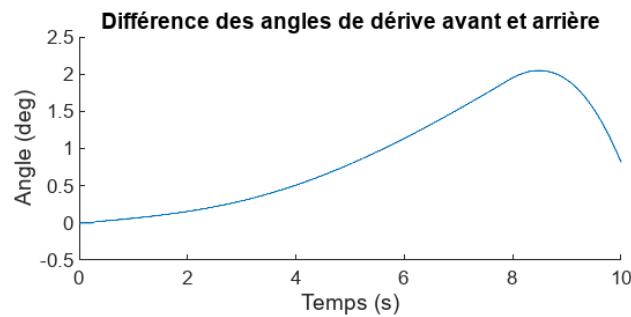


FIGURE 28 – Différence des angles de dérive du quad lors d'un freinage brusque en fonction du temps

freinage, signalant une convergence entre ces angles.

Vitesse Angulaire de Lacet :

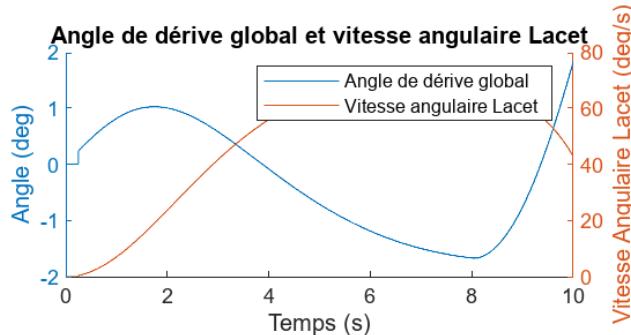


FIGURE 29 – Vitesse angulaire de lacet du quad lors d'un freinage brusque en fonction du temps

La vitesse angulaire de lacet diminue également pendant le freinage (voir figure 29). Cette décroissance souligne l'effet du freinage brusque sur la stabilité du quad, traduisant une réduction de la rotation du véhicule autour de son axe vertical.

Forces de Dérive Latérale :

L'évolution des forces de dérive latérale pendant le freinage brusque met en évidence une décroissance significative (voir figure 30). Cette diminution montre les difficultés du quad à maintenir sa trajectoire initiale, soulignant les défis rencontrés par le véhicule lors de manœuvres de freinage intense.

Cette analyse souligne les réponses spécifiques du Quad MF400H lors d'un freinage brusque, mettant en évidence son comportement de perte momentanée de trajectoire, ses adaptations aux angles de dérive et sa réduction de vitesse de rotation, tout en illustrant les contraintes rencontrées en termes de maintien de trajectoire.

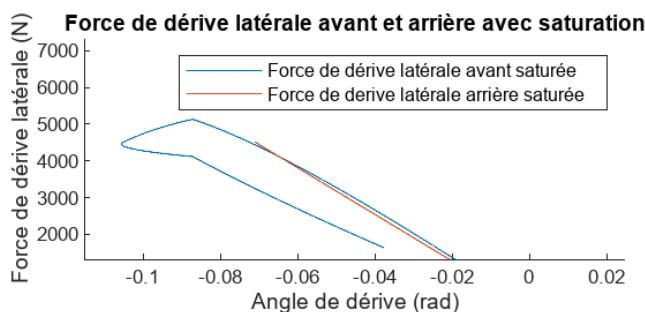


FIGURE 30 – Vitesse angulaire de lacet du quad lors d'un freinage brusque en fonction de son angle de dérive

6.2.2 Mercedes Classe S en Freinage Brusque

Lorsque la Mercedes Classe S de 1992 entreprend un freinage brusque, la dynamique initiale de survirage se maintient, ce qui signifie que la voiture a une propension à tourner plus que ce que le conducteur attend. Au moment du freinage intense, cette tendance de survirage s'accentue davantage, ce qui se traduit par une augmentation de la rotation de la voiture autour de son axe vertical. Cependant, à mesure que la manœuvre de freinage se poursuit, la Mercedes Classe S réagit en réduisant progressivement ce survirage initial, semblant corriger sa trajectoire pour se rapprocher d'une position plus alignée avec la direction souhaitée (voir figure 31).

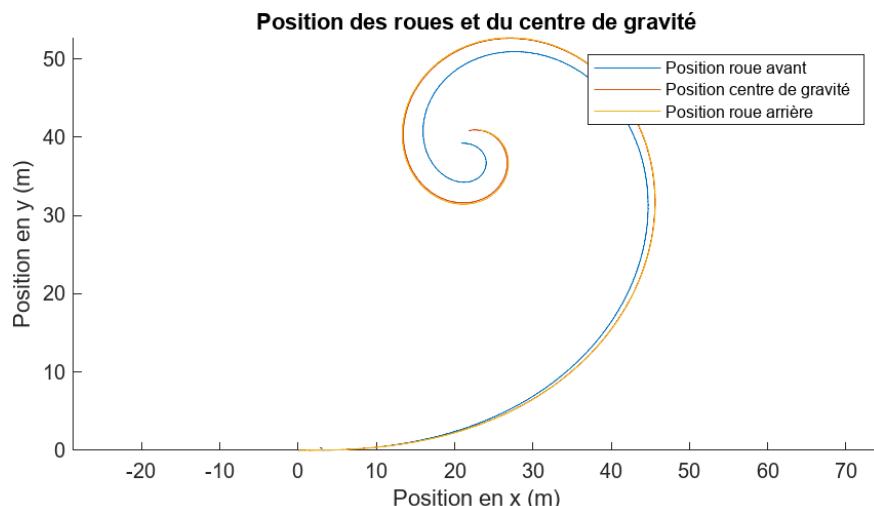


FIGURE 31 – Position des roues de la Mercedes lors d'un freinage brusque

Dans ce contexte de freinage brusque, il est crucial de souligner le danger inhérent à freiner lorsqu'un véhicule est en situation de survirage ou de sous-virage. Ces conditions exacerbent l'instabilité du véhicule et rendent la correction de trajectoire plus difficile. Il est essentiel de noter que ces comportements peuvent compromettre la sécurité de la conduite.

De plus, il convient de rappeler que la Mercedes Classe S de 1992, bien que disposant de dispositifs pour éviter le blocage des roues, n'a pas pris en compte ces dispositifs dans cette étude spécifique. Ces dispositifs jouent un rôle important dans la capacité de la voiture à maintenir une adhérence optimale lors du freinage intense, mais ils n'ont pas été pris en considération dans les analyses présentées.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

Les angles de dérive avant et arrière continuent de diminuer même pendant le freinage brusque (voir figure 32). Pendant cette manœuvre, les angles de dérive avant et arrière diminuent, mais l'angle de dérive arrière connaît une décroissance plus rapide que l'angle de dérive avant.

Cette divergence dans leur évolution entraîne une différence négative (Da) entre ces angles, illustrant une

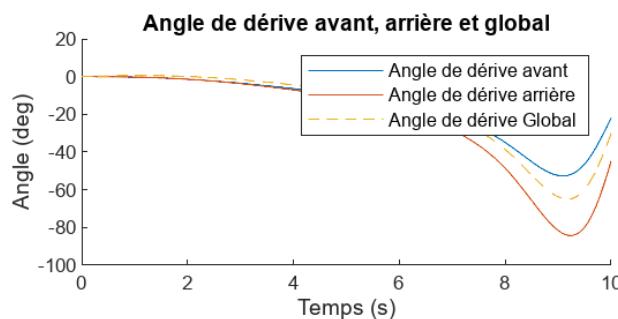


FIGURE 32 – Angles de dérive de la Mercedes lors d'un freinage brusque en fonction du temps

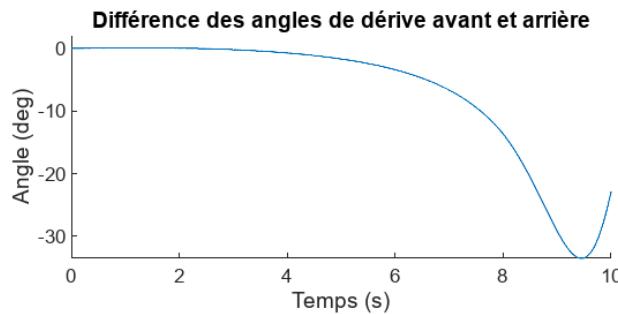


FIGURE 33 – Différence des angles de dérive de la Mercedes lors d'un freinage brusque en fonction du temps

augmentation de l'angle de dérive avant par rapport à celui de l'arrière au cours du freinage (voir figure 33). Cette dynamique peut être attribuée à la répartition du poids du véhicule vers l'avant lors du freinage, accentuant la diminution de l'angle de dérive arrière plus rapidement que celui de l'avant, et conduisant à une convergence progressive vers la fin du freinage.

Vitesse Angulaire de Lacet :

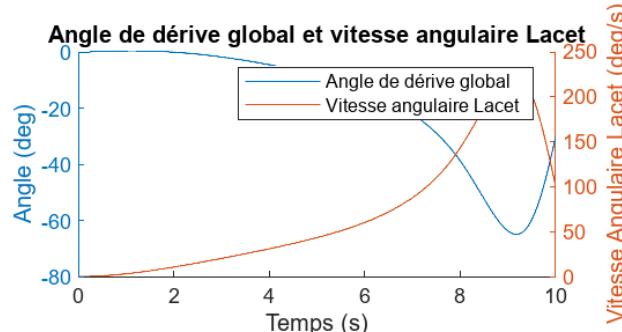


FIGURE 34 – Vitesse angulaire de lacet de la Mercedes lors d'un freinage brusque en fonction du temps

Pendant le freinage brusque de la Mercedes Classe S de 1992, la vitesse angulaire de lacet subit une forte augmentation initiale, témoignant de l'effet du freinage sur la rotation du véhicule autour de son axe vertical (voir figure 34). Par la suite, cette vitesse diminue progressivement vers la fin de cette manœuvre. Cette variation brusque de la vitesse angulaire de lacet durant le freinage dénote une instabilité momentanée du véhicule, illustrant l'impact du freinage sur sa stabilité directionnelle.

Forces de Dérive Latérales :

L'analyse des forces de dérive latérales pendant le freinage brusque illustre une décroissance marquée (voir figure 35). Cette diminution met en évidence la difficulté de la Mercedes Classe S à maintenir sa trajectoire, accentuant la tendance au survirage initial et soulignant les contraintes rencontrées lors de manœuvres de

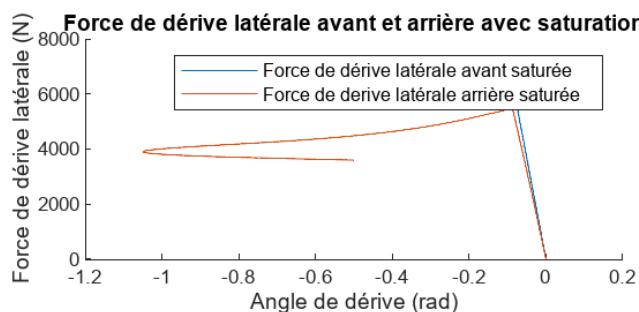


FIGURE 35 – Forces de dérive latérales de la Mercedes lors d'un freinage brusque en fonction de son angle de dérive

freinage intense.

Cette observation met en lumière les réponses spécifiques de la Mercedes Classe S lors d'un freinage brusque, notamment son comportement de survirage accentué, les adaptations dans les angles de dérive et la réduction de la vitesse de rotation, tout en illustrant les difficultés rencontrées pour maintenir la trajectoire désirée.

6.3 Evitement d'obstacle

Dans un virage normal, le temps pour atteindre la vitesse est identique pour le quad MF400H et la Mercedes Classe S. Cependant, leurs comportements divergent considérablement en raison de leurs caractéristiques propres. Nous prendrons une vitesse de 80 km/h et un angle de braquage des roues (β) de 7°.

6.3.1 Quad MF400H en Evitement d'obstacle

Dans ce contexte, l'évitement brusque à gauche révèle la stabilité initiale du quad MF400H malgré la manœuvre abrupte. Contrairement à une déviation brusque vers une direction rectiligne, le quad parvient à conserver une trajectoire courbe, reflétant sa capacité à répondre à des changements soudains de direction. Cependant, cette manœuvre génère des fluctuations importantes dans ses réponses dynamiques, illustrant la réactivité du véhicule à de telles sollicitations (voir figure 36).

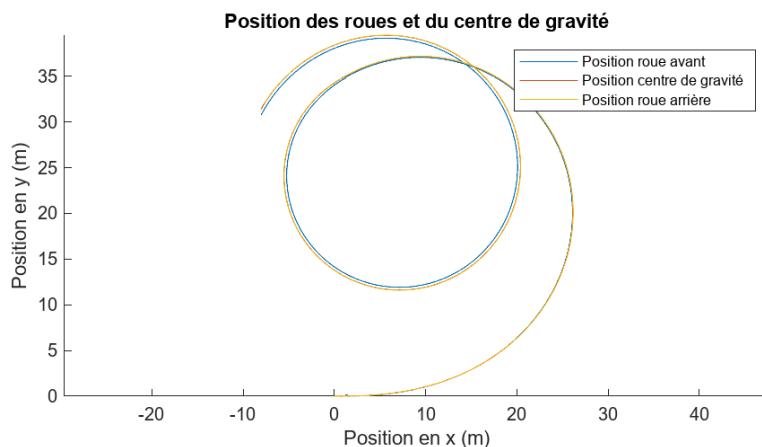


FIGURE 36 – Position des roues du quad lors d'un évitement brusque à gauche

De plus, dans une simulation prolongée ou avec des paramètres tels qu'un angle de braquage plus important ou une vitesse accrue, il est envisageable que le quad MF400H perde progressivement de l'adhérence à l'avant, risquant ainsi de dévier vers une trajectoire linéaire. Ces conditions pourraient accentuer sa propension au sous-virage, entraînant éventuellement une perte totale d'adhérence et une déviation du quad vers une trajectoire rectiligne. Dans le scénario d'un évitement brusque à gauche, le quad MF400H maintient sa tendance sous-vireuse. Initialement, malgré la manœuvre brutale, le quad conserve une trajectoire courbe sans dévier brutalement vers une direction rectiligne. Cependant, cet évitement entraîne un changement significatif dans les dynamiques du véhicule.

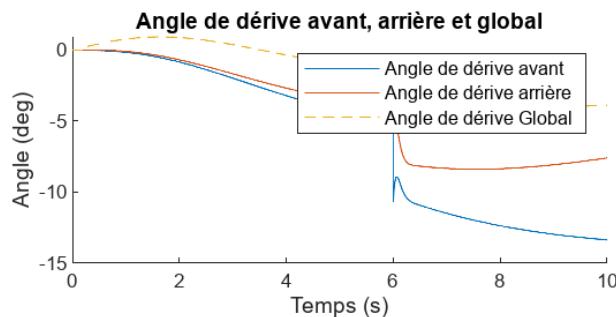


FIGURE 37 – Angles de dérive du quad lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

Angles de Dérive Avant et Arrière :

Lors de l'évitement brusque, on observe un saut dans les angles de dérive avant et arrière, puis une décroissance rapide de l'angle de dérive avant par rapport à l'angle de dérive arrière (voir figure 37).

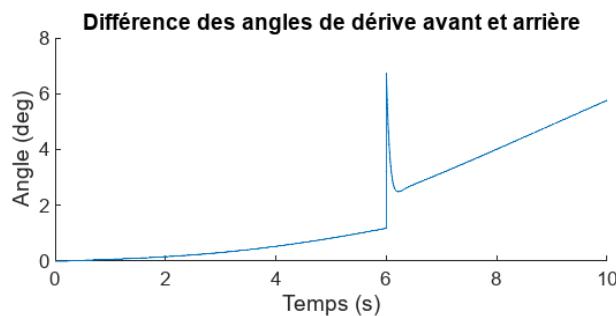


FIGURE 38 – Différence des angles de dérive du quad lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

Cette décroissance inégale induit une augmentation progressive de la différence entre ces angles (Da), traduisant le caractère sous-vireur du quad dans cette situation (voir figure 38). Si la simulation se prolongeait, cette divergence croissante suggérerait une perte d'adhérence à l'avant du véhicule, le poussant vers une trajectoire rectiligne.

Vitesse Angulaire de Lacet :

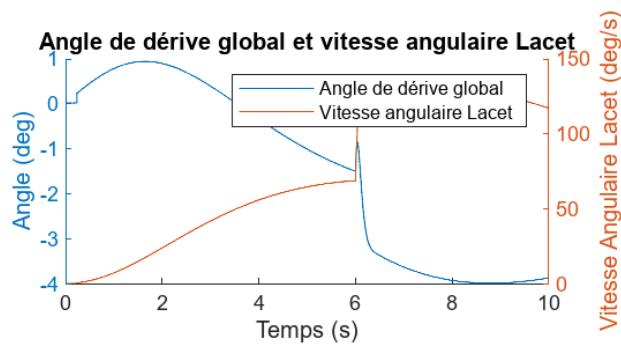


FIGURE 39 – Vitesse angulaire de lacet du quad lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

La courbe de la vitesse angulaire de lacet ne fait qu'augmenter pendant cette manœuvre d'évitement (voir figure 39). Cette croissance continue souligne l'instabilité accrue du quad lors de cette manœuvre brusque, mettant en évidence sa difficulté à maintenir sa stabilité directionnelle.

Forces de Dérive Latérales :

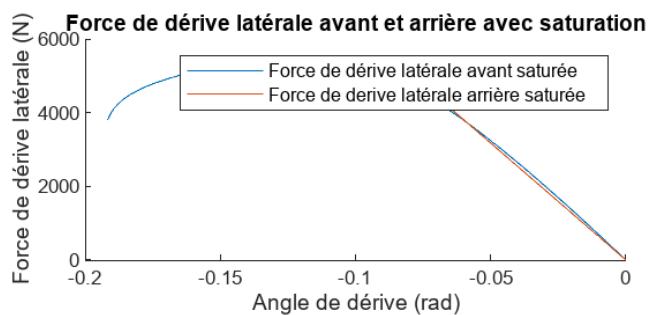


FIGURE 40 – Forces de dérive latérales du quad lors d'un évitement brusque à gauche en fonction de son angle de dérive

Les forces de dérive latérales pendant l'évitement brusque révèlent une augmentation temporaire suivie d'une diminution progressive (voir figure 40). Cette variation illustre la difficulté du quad à maintenir une trajectoire courbe stable lors de manœuvres rapides et brusques, soulignant sa tendance sous-vireuse et son instabilité momentanée.

Dans cette situation d'évitement brusque à gauche, le quad MF400H révèle sa tendance sous-vireuse. Malgré sa capacité à maintenir une trajectoire courbe, les dynamiques observées soulignent son instabilité, particulièrement avec la décroissance rapide de l'angle de dérive avant par rapport à l'arrière et la croissance continue de la vitesse angulaire de lacet.

6.3.2 Mercedes Classe S en Evitement d'obstacle

Dans le contexte d'un évitement brusque vers la gauche, la Mercedes Classe S, déjà dotée d'une tendance à la sur-virer, suit initialement une trajectoire caractérisée par une dérive plus prononcée vers l'extérieur du virage (voir figure 41). Cependant, au moment crucial où le conducteur tente de remettre de l'angle pour esquiver l'obstacle, la voiture accentue sa tendance à survirer. Cette situation conduit progressivement la Mercedes vers une perte de contrôle, où sa direction devient difficile à maîtriser et se traduit par une instabilité croissante.

Cette remise d'angle brutale, bien que nécessaire pour l'évitement, pousse la voiture à s'engager dans une trajectoire encore plus prononcée vers l'extérieur du virage, accentuant ainsi son comportement de survirage. Ce phénomène, combiné à la dynamique de vitesse et d'angles de dérive, met en lumière la difficulté de la

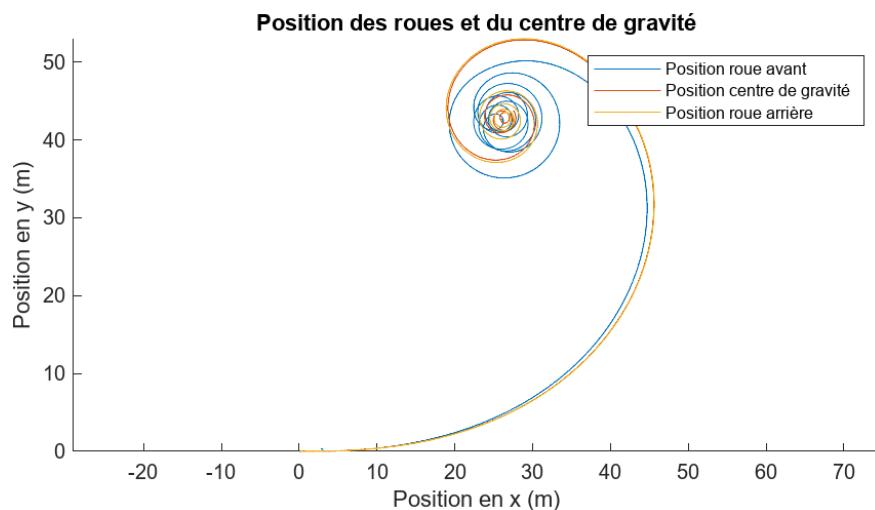


FIGURE 41 – Position des roues de la Mercedes lors d'un évitement brusque à gauche

Mercedes à conserver une trajectoire stable lors de manœuvres rapides, aboutissant éventuellement à une perte de contrôle et à une instabilité critique.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

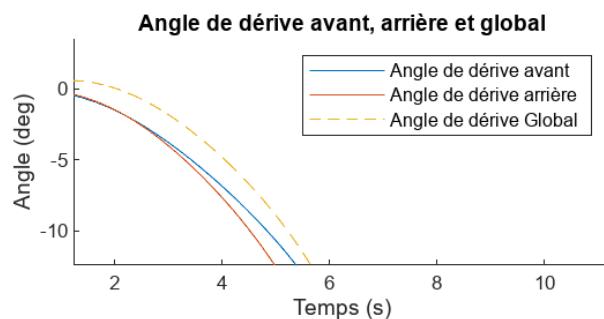


FIGURE 42 – Angles de dérive de la Mercedes lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

Au moment de l'évitement, les angles de dérive avant et arrière présentent un saut distinct, puis une diminution similaire vers des valeurs négatives (voir figure 42). Cependant, l'angle de dérive arrière diminue plus rapidement que l'angle de dérive avant.

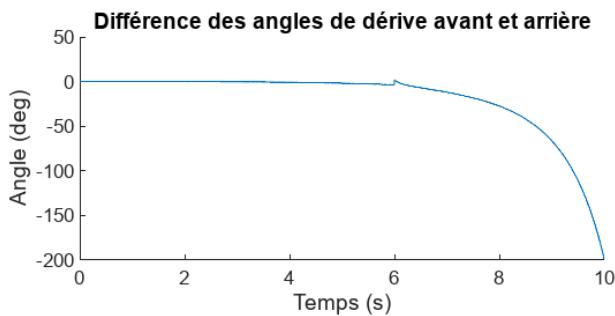


FIGURE 43 – Différence des angles de dérive de la Mercedes lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

Cette tendance souligne un phénomène de survirage prononcé, confirmé par la différence croissante entre ces angles (Da), suggérant une instabilité croissante du véhicule (voir figure 43).

Vitesse Angulaire de Lacet :

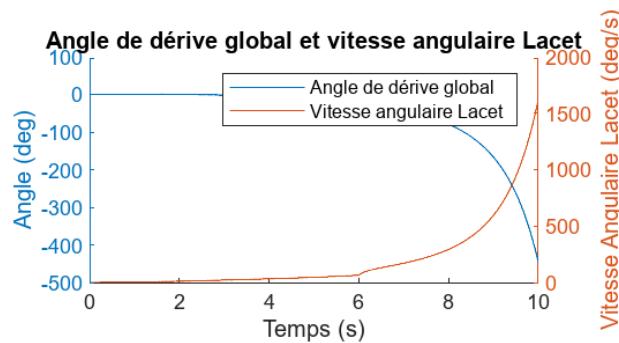


FIGURE 44 – Vitesse angulaire de lacet de la Mercedes lors d'un évitement brusque à gauche en fonction du temps

La vitesse angulaire de lacet pour la Mercedes montre une augmentation rapide, tendant même vers une croissance verticale (voir figure 44). Cette forte croissance dénote une instabilité évidente, mettant en évidence la perte de contrôle du véhicule et son倾向 à partir en spin.

Forces de Dérive Latérales :

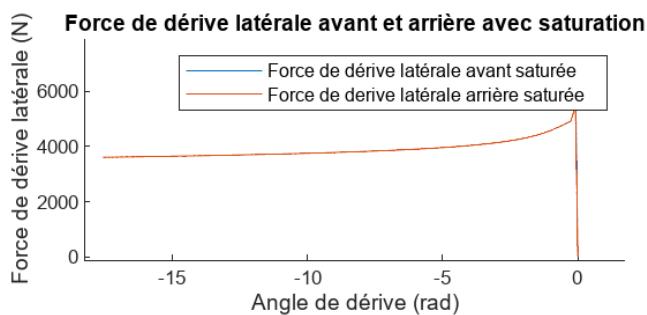


FIGURE 45 – Forces de dérive latérales de la Mercedes lors d'un évitement brusque à gauche en fonction de son angle de dérive

L'analyse des forces de dérive latérales illustre une augmentation suivie d'une diminution progressive (voir figure 45). Cela reflète les difficultés de la Mercedes à maintenir une trajectoire stable lors d'une manœuvre d'évitement rapide, confirmant son comportement survireur et son instabilité croissante.

Cette analyse démontre clairement les différences de comportement entre le quad MF400H et la Mercedes Classe S dans un scénario d'évitement brusque, mettant en évidence la manière dont leurs caractéristiques intrinsèques influent sur leur stabilité et leur capacité à négocier des manœuvres rapides et soudaines.

6.4 Guidonnage

Dans un virage normal, le temps pour atteindre la vitesse est identique pour le quad MF400H et la Mercedes Classe S. Cependant, leurs comportements divergent considérablement en raison de leurs caractéristiques propres. Nous prendrons une vitesse de 80 km/h et un angle de braquage des roues (β) de 7°.

6.4.1 Quad MF400H en Guidonnage

Dans le contexte d'un guidonnage, une situation peu commune pour un quad mais intéressante à analyser, le véhicule présente des oscillations significatives, bien que ces mouvements ne compromettent pas complètement sa capacité à maintenir sa trajectoire. Les observations sur les paramètres dynamiques du quad pendant le guidonnage permettent de saisir son comportement dans cette condition inhabituelle (voir figure 46).

La position du quad montre des oscillations légères, illustrant la difficulté du véhicule à maintenir une trajectoire constante. Néanmoins, le quad parvient à poursuivre sa direction malgré ces oscillations.

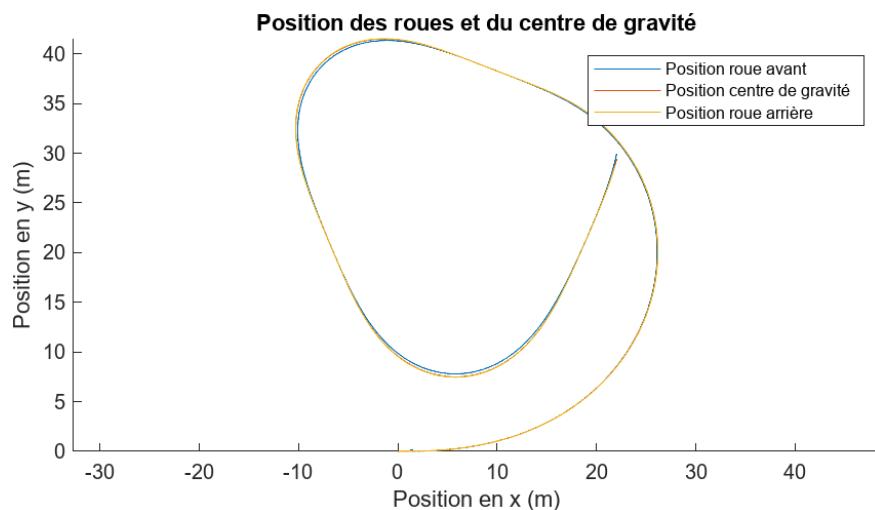


FIGURE 46 – Position des roues du quad lors du guidonnage

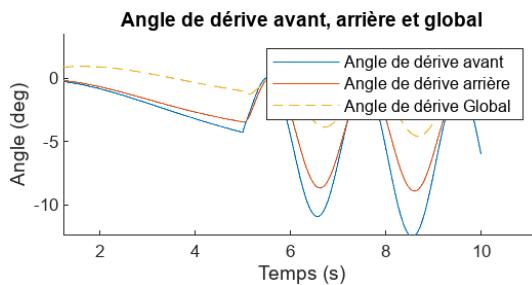
Angles de Dérive Avant et Arrière :

FIGURE 47 – Angles de dérive du quad lors du guidonnage en fonction du temps

Les angles de dérive avant et arrière affichent des variations notables (voir figure 47). Bien que l'angle de dérive avant soit généralement plus grand en valeur absolue que l'angle arrière, la différence entre ces angles reste proche de zéro sur la courbe Da (voir figure 48).

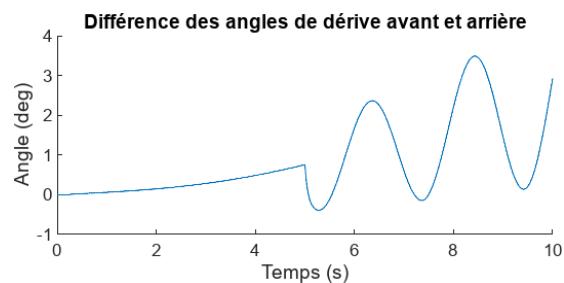


FIGURE 48 – Différence des angles de dérive du quad lors du guidonnage en fonction du temps

Cette proximité suggère une relative similitude dans les comportements des deux angles, malgré leurs valeurs différentes.

Vitesse Angulaire de Lacet :

La vitesse angulaire de lacet oscille considérablement pendant le guidonnage, reflétant l'instabilité engendrée par ce phénomène (voir figure 49). Ces fluctuations traduisent la difficulté du quad à maintenir une stabilité pendant le guidonnage.

Forces de Dérive Latérales :

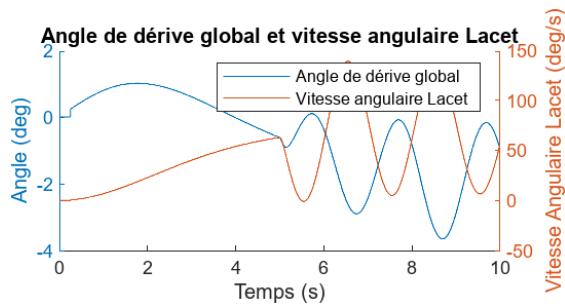


FIGURE 49 – Vitesse angulaire de lacet du quad lors du guidonnage en fonction du temps

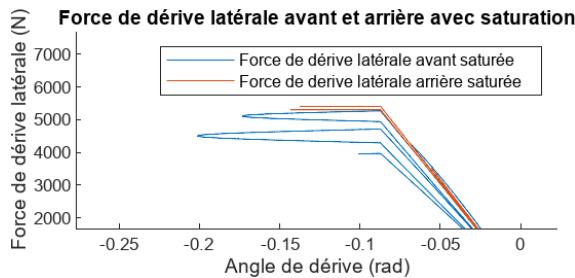


FIGURE 50 – Forces de dérive latérales lors du guidonnage en fonction de son angle de dérive

Les forces de dérive latérales offrent une perspective supplémentaire sur le comportement du quad lors du guidonnage (voir figure 50). Ces forces varient probablement en réponse aux oscillations observées dans les autres paramètres dynamiques du véhicule.

Cette analyse met en lumière la capacité du quad à maintenir une direction malgré les oscillations induites par le guidonnage, offrant une vision approfondie du comportement du véhicule dans une situation peu conventionnelle.

6.4.2 Mercedes Classe S en Guidonnage

Dans le cadre d'un phénomène de guidonnage, bien que moins plausible pour une voiture de type Mercedes Classe S, l'observation des paramètres dynamiques offre une perspective sur son comportement dans cette condition. Ces observations offrent des choses intéressantes bien que moins habituelles pour ce type de véhicule (voir figure 51).

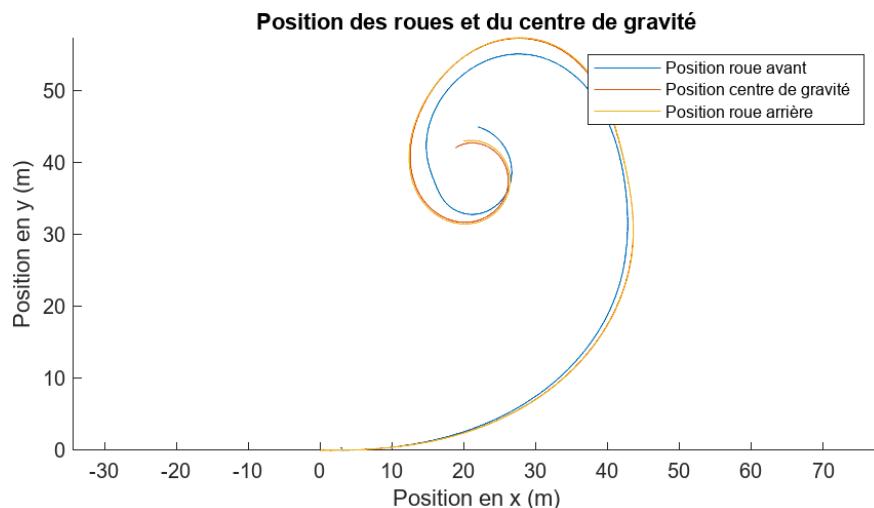


FIGURE 51 – Position des roues de la Mercedes lors du guidonnage

Dans cette situation de guidonnage, qui n'est pas typique pour une Mercedes Classe S, une observation surprenante se présente : bien que la voiture reste sur-vireuse, caractérisée par sa tendance à glisser vers l'extérieur

dans les virages, le guidonnage ne semble pas accentuer cette propension à partir en spin, contrairement aux attentes conventionnelles.

Ce qui se démarque, c'est une réaction qui pourrait être qualifiée de correction de trajectoire. Cette réaction ressemble à certains égards à la pratique du drift, une technique de conduite sportive où le véhicule glisse de manière contrôlée dans les virages tout en maintenant une trajectoire prévue.

Dans le cas présent, bien que le guidonnage induise une instabilité apparente, la Mercedes Classe S semble parvenir, dans une certaine mesure, à stabiliser sa trajectoire. Cette réaction inhabituelle peut être interprétée comme une tentative de réajustement du véhicule pour contrôler son orientation malgré les oscillations induites par le guidonnage. Cela illustre une réponse dynamique inhabituelle pour ce type de véhicule dans cette situation spécifique.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

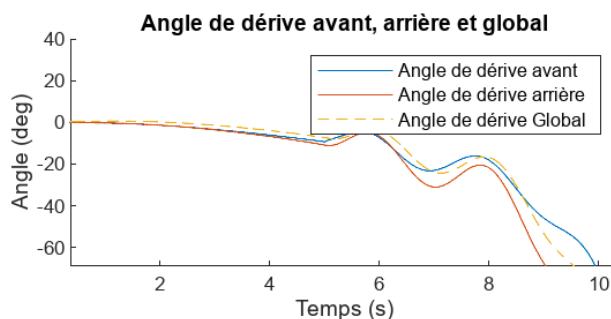


FIGURE 52 – Angles de dérive de la Mercedes lors du guidonnage en fonction du temps

Les angles de dérive avant et arrière diminuent tous deux fortement, bien que l'angle de dérive arrière présente une diminution plus rapide (voir figure 52).

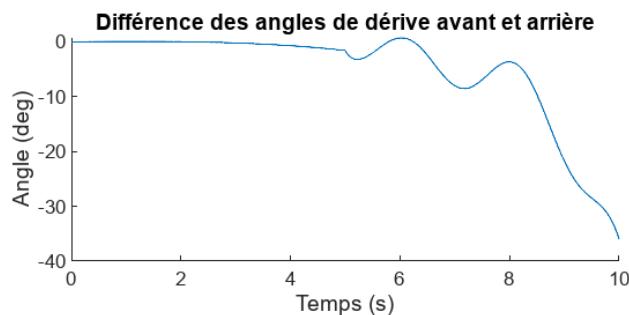


FIGURE 53 – Différence des angles de dérive de la Mercedes lors du guidonnage en fonction du temps

Cependant, à certains moments du guidonnage, ces angles semblent converger, avec des valeurs presque identiques, générant des différences d'angles négatives sur la courbe Da , indiquant une certaine instabilité de survirage associée à des oscillations (voir figure 53).

Vitesse Angulaire de Lacet :

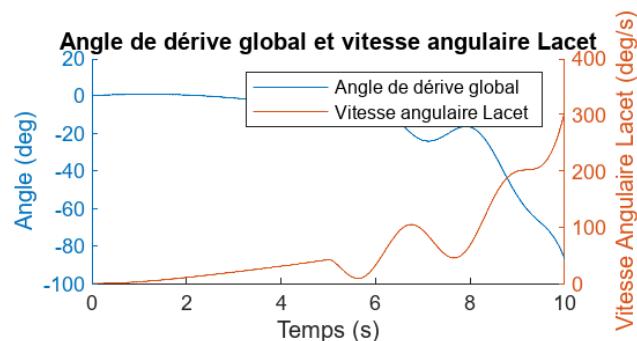


FIGURE 54 – Vitesse angulaire de lacet de la Mercedes lors du guidonnage en fonction du temps

La vitesse angulaire de lacet oscille pendant cette phase, mais vers la fin, elle semble tendre vers une croissance exponentielle, indiquant une instabilité croissante du véhicule (voir figure 54).

Forces de Dérive Latérales :

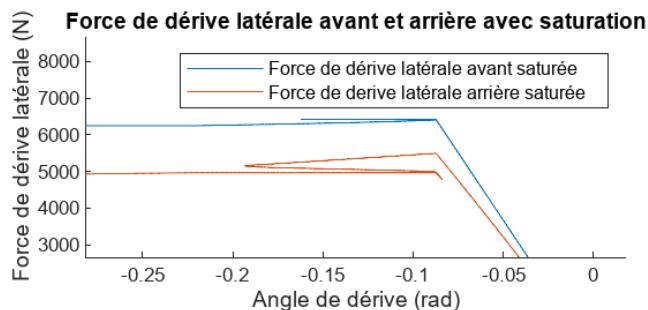


FIGURE 55 – Forces de dérive latérales de la Mercedes lors du guidonnage en fonction de son angle de dérive

Les forces de dérive latérales pour la Mercedes Classe S, dans le contexte du guidonnage, apportent des informations complémentaires sur la réponse dynamique de la voiture à ce phénomène spécifique (voir figure 55).

Ces observations offrent une perspective intéressante sur le comportement inhabituel d'une Mercedes Classe S dans une situation de guidonnage, soulignant une certaine instabilité et des réponses dynamiques non conventionnelles.

Le comportement observé peut être qualifié de "contre-braquage". Bien que la Mercedes Classe S soit initialement sur-vireuse, elle parvient, lors du guidonnage, à contrebalancer cette tendance en corrigeant sa trajectoire. Ce phénomène de contre-braquage est similaire à la pratique du drift, où malgré une apparente instabilité, le véhicule parvient à maintenir une certaine stabilité en ajustant son angle de braquage. Cela illustre une capacité surprenante de correction de trajectoire, même dans des conditions de guidonnage.

6.5 Vitesse Constante

Dans un virage normal, le temps pour atteindre la vitesse est identique pour le quad MF400H et la Mercedes Classe S. Cependant, leurs comportements divergent considérablement en raison de leurs caractéristiques propres. Nous prendrons une vitesse de 80 km/h et un angle de braquage des roues (β) de 7° .

6.5.1 Quad MF400H en Vitesse Constante

Dans le scénario d'un virage à vitesse constante avec une augmentation linéaire de l'angle de braquage pour le quad, on observe des comportements spécifiques reflétant sa nature sous-vireuse (voir figure 56). Au début de la simulation, le quad évolue en ligne droite avant d'entamer progressivement son virage. Malgré la réalisation du virage, le véhicule conserve ses caractéristiques sous-vireuses tout au long de la manœuvre. Cependant,

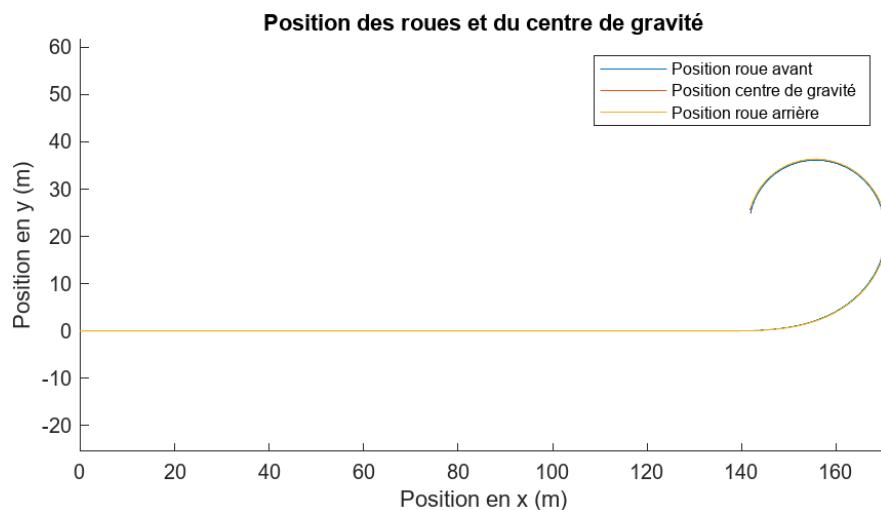


FIGURE 56 – Position des roues du quad dans un virage à vitesse constante

durant cette simulation le quad arrive à maintenir son virage ne pas partir en ligne droite.

Angles de Dérive Avant et Arrière :

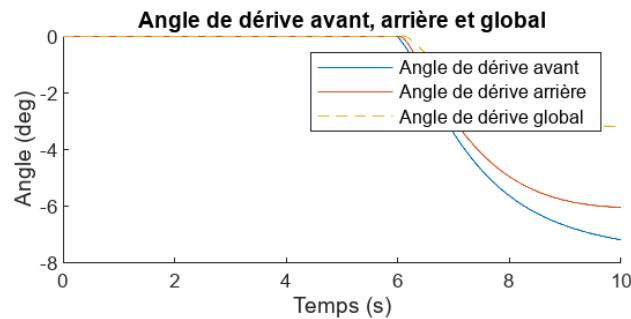


FIGURE 57 – Angles de dérive du quad dans un virage à vitesse constante en fonction du temps

L'analyse des angles de dérive révèle que l'angle de dérive avant diminue plus rapidement que celui de l'arrière (voir figure 57).

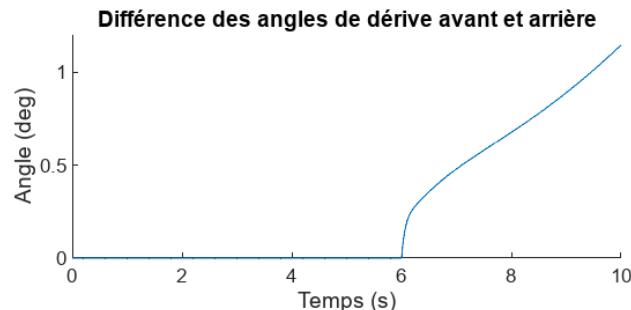


FIGURE 58 – Différence des angles de dérive du quad dans un virage à vitesse constante en fonction du temps

Cette différence se manifeste dans la courbe de différence des angles de dérive (Da), où la valeur reste positive, indiquant une tendance sous-vireuse persistante (voir figure 58). Cette divergence croissante suggère que le véhicule pourrait perdre progressivement son adhérence à l'avant et potentiellement partir en ligne droite.

Vitesse Angulaire de Lacet :

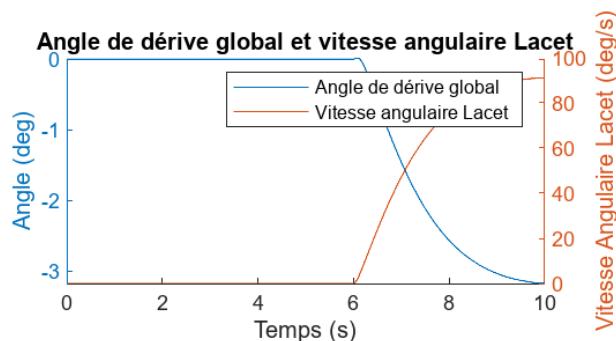


FIGURE 59 – Vitesse angulaire de lacet du quad dans un virage à vitesse constante en fonction du temps

La vitesse angulaire de lacet augmente rapidement, témoignant de l'instabilité du quad pendant cette phase (voir figure 59). Néanmoins, vers la fin de la simulation, la vitesse semble se stabiliser, indiquant un potentiel d'équilibre dans cette configuration particulière.

Forces de Dérive Latérales :

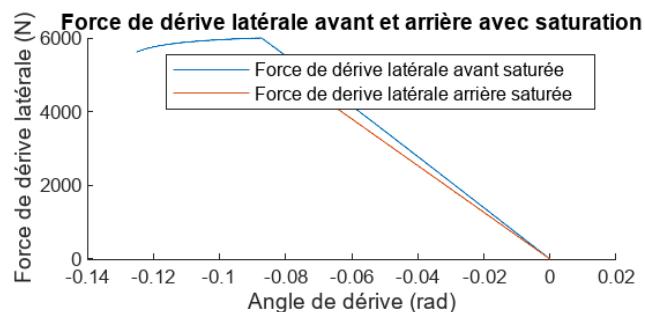


FIGURE 60 – Forces de dérive latérales du quad dans un virage à vitesse constante en fonction de son angle de dérive

L'analyse des forces de dérive latérales du quad dans ce scénario offre une perspective complète sur la dynamique du véhicule dans un virage à vitesse constante avec une augmentation progressive de l'angle de braquage (voir figure 60).

Ces observations soulignent la nature sous-vireuse du quad et mettent en évidence son instabilité pendant cette manoeuvre spécifique.

6.5.2 Mercedes Classe S en Vitesse Constante

Dans le scénario du virage à vitesse constante avec une augmentation linéaire de l'angle de braquage pour la Mercedes Classe S, ses tendances survireuses marquées sont maintenues.

La Mercedes, conforme à son comportement habituel, survire dans cette simulation, mais le degré de survirage semble plus prononcé que le sous-virage observé pour le quad (voir figure 61).

Angles de Dérive Avant et Arrière : L'examen des angles de dérive révèle une dynamique intéressante : dans un premier temps, la différence des angles de dérive (Da) est strictement positive, indiquant une légère tendance sous-vireuse de la Mercedes au début du virage. Cependant, par la suite, cette différence se réduit, illustrant une reprise du comportement survireur caractéristique du véhicule (voir figures 62-63).

Vitesse Angulaire de Lacet : La vitesse angulaire de lacet connaît une augmentation soudaine et significative au début du virage, démontrant une instabilité marquée de la Mercedes pendant cette phase de la simulation (voir figure 64).

Forces de Dérives Latérales : L'analyse des forces de dérive latérales de la Mercedes Classe S dans ce scénario offre un aperçu détaillé du comportement du véhicule dans un virage à vitesse constante avec une augmentation progressive de l'angle de braquage. Ces observations soulignent le caractère survireur de la

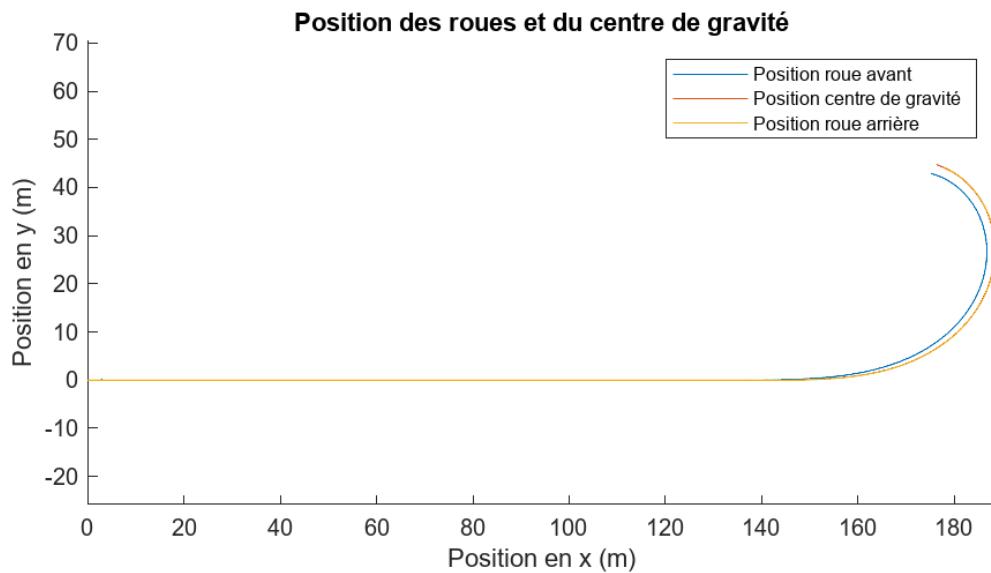


FIGURE 61 – Position des roues de la Mercedes lors d'un virage à vitesse constante

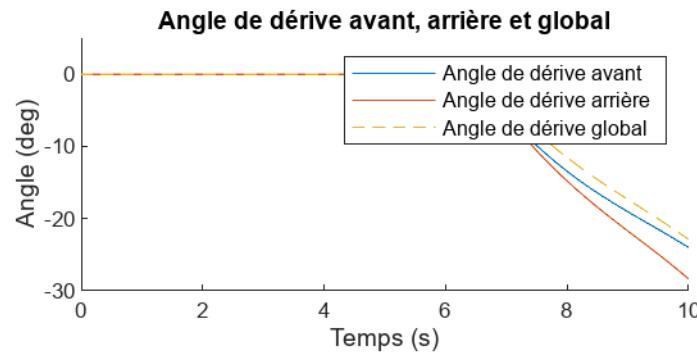


FIGURE 62 – Angles de dérive de la Mercedes lors d'un virage à vitesse constante en fonction du temps

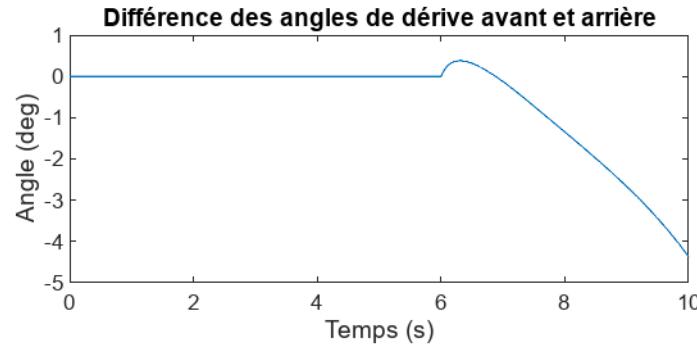


FIGURE 63 – Différence des angles de dérives de la Mercedes lors d'un virage à vitesse constante en fonction du temps

Mercedes, confirmant sa propension à une dynamique de conduite plus délicate dans ce contexte spécifique (voir figure 65).

6.6 Conditions de la route

Dans cette nouvelle phase d'analyse, nous explorons l'impact des différentes conditions de la route, telles que le sol mouillé, enneigé et verglacé, sur les comportements respectifs du quad MF400H et de la Mercedes Classe S. En variant les conditions du revêtement, nous cherchons à saisir comment ces variations peuvent influencer les caractéristiques de conduite des véhicules, de la stabilité aux réactions lors des virages et des freinages. Cette investigation approfondie vise à éclairer les particularités de ces véhicules dans des environnements routiers diversifiés, contribuant ainsi à une compréhension plus approfondie des performances et des limites de chaque

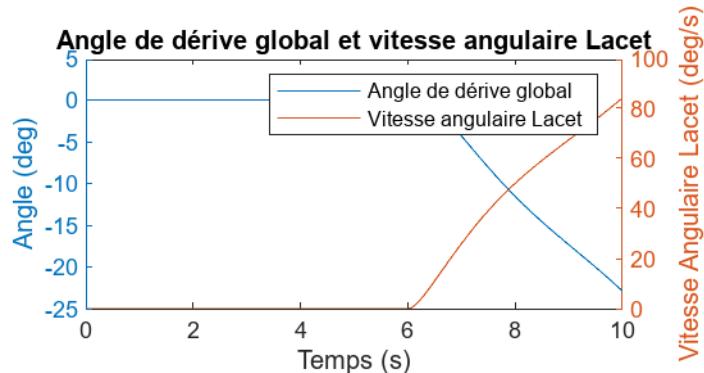


FIGURE 64 – Vitesse angulaire de lacet de la Mercedes lors d'un virage à vitesse constante en fonction du temps

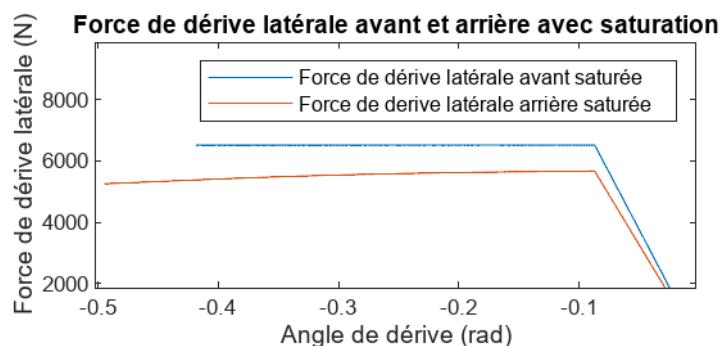


FIGURE 65 – Forces de dérives latérales de la Mercedes lors d'un virage à vitesse constante en fonction de son angle de dérive

modèle face à des conditions de surface différentes.

6.6.1 Sol Mouillé

Quad MF400H : Le changement des conditions de la route, en passant d'un sol sec à un sol mouillé, peut considérablement affecter le comportement du quad MF400H. En observant la simulation dans un virage normal, les positions du véhicule sur sol mouillé révèlent une tendance accentuée au sous-virage par rapport à un sol sec. Cette différence se manifeste notamment par une capacité de braquage moindre, augmentant ainsi la difficulté à négocier le virage. Cette situation pourrait potentiellement présenter des risques, car le véhicule perd en agilité et en adhérence, compromettant sa stabilité dans des conditions routières moins favorables (voir figure 66).

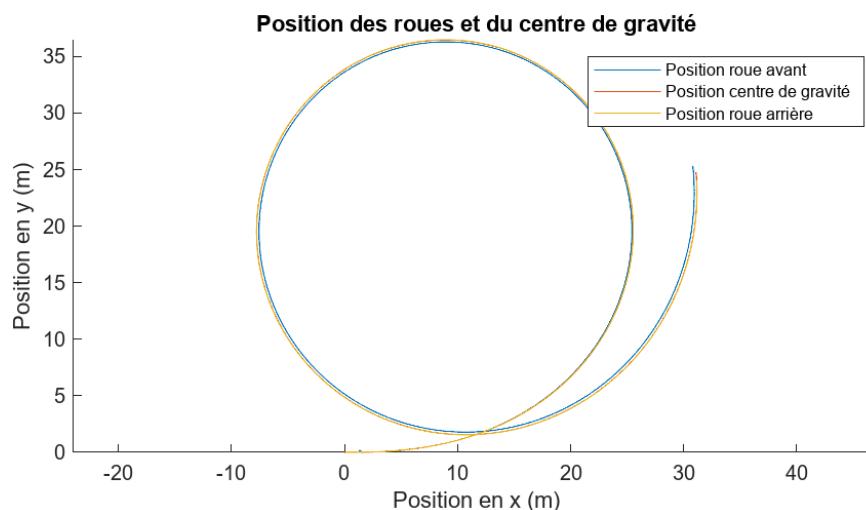


FIGURE 66 – Position des roues du quad lors d'un virage normal sur sol mouillé

Les autres courbes révèlent des caractéristiques similaires mais exacerbées : les angles de dérive, la différence entre les angles de dérive avant et arrière, la vitesse angulaire de lacet ainsi que les forces de dérive latérales semblent être plus prononcés, soulignant davantage les difficultés du quad à maintenir une trajectoire stable et précise sur un sol mouillé. Ces observations mettent en lumière l'impact significatif des conditions de la route sur le comportement du quad et soulignent l'importance de considérer ces variations dans les scénarios de conduite simulés.

Mercedes Classe S : Le changement des conditions routières, passant d'un sol sec à un sol mouillé, influe considérablement sur le comportement de la Mercedes Classe S de 1992. Lors de simulations dans un virage normal, les positions du véhicule sur sol mouillé témoignent d'une augmentation significative du phénomène de survirage par rapport à un sol sec. En effet, la Mercedes devient beaucoup plus instable et montre une propension accrue à partir en spin, compromettant nettement sa maniabilité. Ce changement drastique suggère un danger potentiel pour l'utilisateur, car la conduite devient difficile à contrôler (voir figure 67).

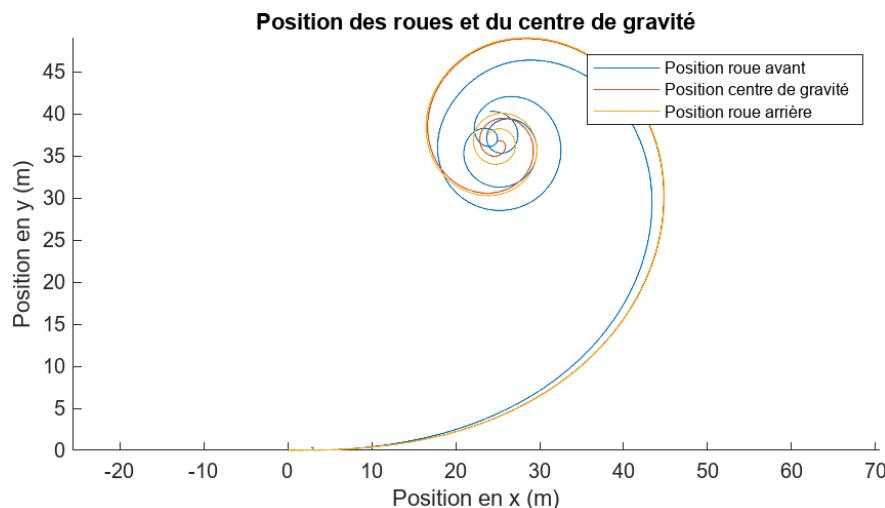


FIGURE 67 – Position des roues de la Mercedes lors d'un virage normal sur sol mouillé

Les autres courbes, telles que les angles de dérive, la différence entre les angles de dérive avant et arrière, la vitesse angulaire de lacet ainsi que les forces de dérive latérales, semblent suivre des tendances similaires, mais avec des altérations plus marquées sur sol mouillé. Ces observations soulignent l'importance critique des conditions routières sur le comportement du véhicule, mettant en évidence la nécessité de prendre en compte ces variations pour garantir la sécurité et la stabilité lors de la simulation de différents scénarios de conduite.

6.6.2 Sol Verglacé

Quad MF400H : Le passage à un sol verglacé engendre des changements drastiques dans le comportement du quad, en particulier dans un virage normal. L'analyse des positions du quad sur ce type de surface révèle un phénomène alarmant : le quad perd presque totalement sa capacité à négocier le virage. En effet, il présente une tendance marquée à perdre l'adhérence à l'avant, ce qui se traduit par une incapacité à suivre la trajectoire courbe du virage. Cette observation soulève une problématique majeure de maniabilité et de contrôle du véhicule sur un sol verglacé, rendant la conduite du quad très délicate voire dangereuse (voir figure 68).

Les autres courbes présentent des tendances similaires à celles observées sur sol mouillé, mais avec des altérations encore plus prononcées. Les angles de dérive, la différence entre les angles de dérive avant et arrière, la vitesse angulaire de lacet ainsi que les forces de dérive latérales montrent des variations exacerbées, soulignant l'extrême impraticabilité du verglas pour la conduite du quad. Cette observation met en évidence la nécessité d'une attention particulière aux conditions de la route, surtout dans des contextes tels que le verglas, où la sécurité routière est fortement compromise.

Mercedes Classe S :

Sur une surface verglacée, la Mercedes Classe S affiche un comportement surprenant dans un virage normal. Contrairement à la tendance attendue d'une réaction accrue de survirage, la voiture manifeste une propension significative au sous-virage, dérivant presque en ligne droite vers la fin du virage. Cette observation déconcertante suggère une réponse non conventionnelle de la Mercedes Classe S à ce type de surface (voir figure 69).

En analysant les angles de dérive, il est notable que l'angle de dérive avant diminue plus rapidement que celui de l'arrière. Cependant, ce qui intrigue est que, par intermittence, l'angle de dérive arrière semble tenter

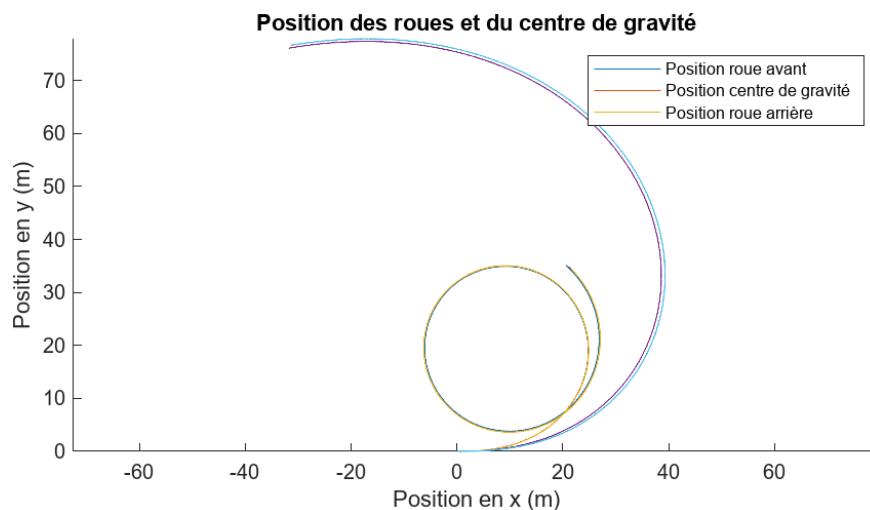


FIGURE 68 – Comparaison de la position des roues du quad lors d'un virage normal sur sol sec et verglacé

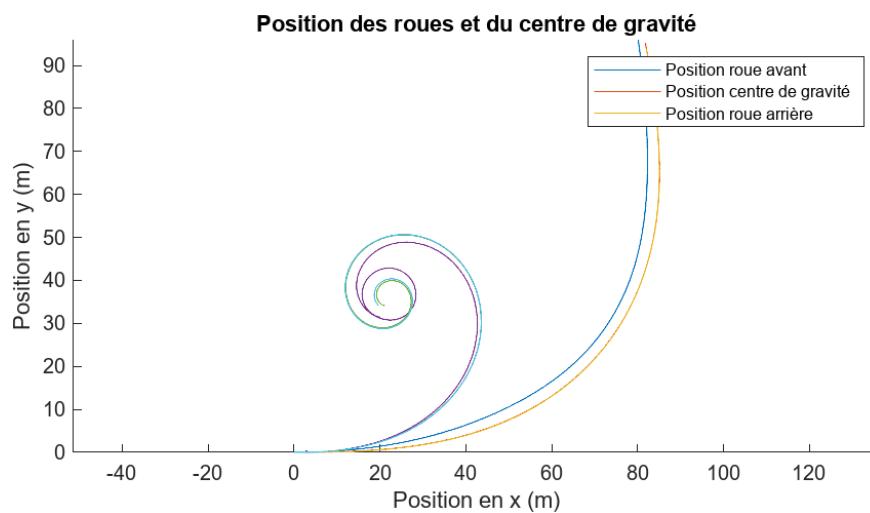


FIGURE 69 – Comparaison de la position des roues de la Mercedes lors d'un virage normal sur sol sec et verglacé

de réduire son écart avec l'avant. Cette fluctuation se révèle dans la courbe représentant la différence entre les angles de dérive, présentant des variations, mettant en évidence le caractère sous-vireur de la Mercedes sur la surface verglacée (voir figure 70).

De plus, la vitesse angulaire de lacet de la Mercedes augmente considérablement. Cette accélération de la vitesse de lacet souligne l'instabilité induite par le verglas, témoignant d'une réponse complexe de la voiture à ces conditions environnementales difficiles. Cette réaction atypique de la Mercedes Classe S soulève des interrogations sur sa maniabilité et son comportement dans des situations de verglas, remettant en question les attentes habituelles en termes de survirage (voir figure 71).

6.7 Analyse globale

Dans nos simulations, nous avons constaté que le comportement des véhicules varie considérablement en fonction des scénarios et des conditions de la route. En virage normal, le quad présente un sous-virage marqué, tandis que la Mercedes tend à être sur-vireuse. Ces caractéristiques peuvent rendre la conduite imprévisible pour les conducteurs novices.

Lors des simulations de freinage brusque, les pertes d'adhérence sur des surfaces altérées, comme celles mouillées, enneigées ou verglacées, sont marquées. Ces conditions réduisent considérablement la capacité de freinage des véhicules. Effectuer un freinage brusque en virage accentue ces risques en diminuant davantage l'adhérence des pneus avec le sol, augmentant ainsi le danger de perte de contrôle et de dérapage. Éviter les freinages brusques, surtout en virage et sur ces surfaces, est essentiel pour une conduite plus sécurisée.

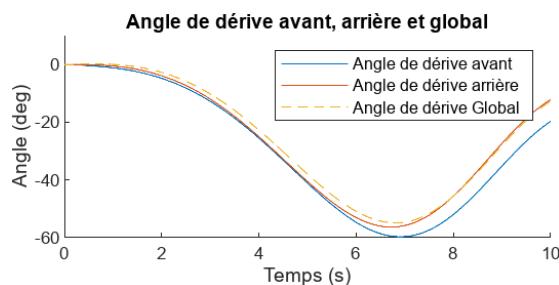


FIGURE 70 – Angles de dérive de la Mercedes lors d'un virage normal sur sol verglacé

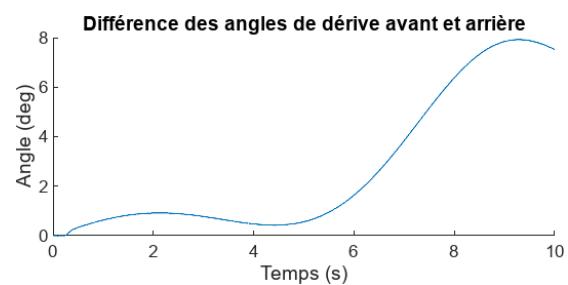


FIGURE 71 – Différence des angles de dérive de la Mercedes lors d'un virage normal sur sol verglacé

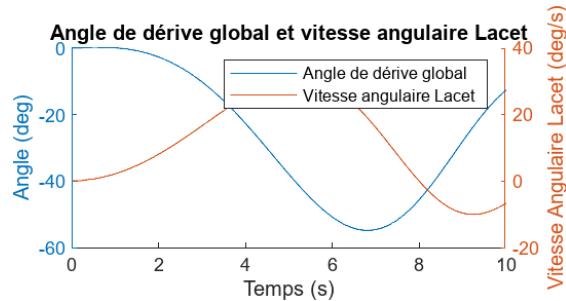


FIGURE 72 – Angles de dérive de la Mercedes lors d'un virage normal sur sol verglacé en fonction du temps

Le guidonnage, qui reste un phénomène atypique pour un quad et pratiquement impossible pour une Mercedes, a mis en évidence une instabilité extrême dans les virages simulés. Cependant, nos observations ont montré qu'avec une expertise élevée, des pilotes expérimentés peuvent parfois maîtriser des situations de survirage extrême en ajustant précisément les angles de braquage. Cette observation suggère que des compétences avancées peuvent être utilisées pour récupérer partiellement le contrôle d'un véhicule instable en limitant son instabilité.

Concernant les conditions de la route, le passage du sec au mouillé ou verglacé a entraîné des changements dramatiques dans le comportement des véhicules, accroissant les risques de perte de contrôle. Sur un sol mouillé, la capacité de braquage diminue et les véhicules deviennent plus instables. Enneigé ou verglacé, les véhicules perdent considérablement leur adhérence, augmentant ainsi le danger de conduite.

Pour atténuer ces risques, il est essentiel d'adapter la conduite aux conditions de la route. Utiliser des pneus adaptés à ces conditions peut grandement améliorer l'adhérence. Sur des surfaces glissantes comme le verglas ou la neige, les pneus perdent leur adhérence, allongeant considérablement les distances de freinage. Opter pour des pneus adaptés à chaque saison est crucial. Les pneus hiver garantissent une meilleure traction sur les surfaces froides, tandis que les pneus été ou toutes saisons offrent une adhérence optimale sur sol sec ou mouillé, réduisant ainsi les risques de perte de contrôle.

Toutes les personnes ne possèdent pas les compétences de pilotage avancées nécessaires pour gérer efficacement des situations de survirage ou d'instabilité extrême. C'est pourquoi de nombreux constructeurs automobiles ont développé des systèmes d'assistance à la conduite pour aider les conducteurs à maintenir le contrôle du véhicule. Parmi ces systèmes, on retrouve :

- **Antipatinage (ASR/TCS)[2]** : Système qui régule le patinage des roues en ajustant la puissance du moteur et/ou en appliquant les freins pour améliorer l'adhérence sur des surfaces glissantes.
- **Système de contrôle de stabilité (ESP/VSC)[3]** : Ce système intervient pour corriger le survirage ou le sous-virage en ajustant individuellement le freinage des roues pour stabiliser le véhicule lors de manœuvres brusques ou sur surfaces glissantes.
- **Système d'assistance au freinage d'urgence (BA/EBA)[4]** : Il augmente la pression de freinage lorsque le conducteur freine brusquement, aidant ainsi à raccourcir la distance d'arrêt.
- **Système de gestion de traction (TCS)[2]** : Il assure une traction optimale en ajustant la puissance transmise aux roues pour éviter le patinage sur des surfaces glissantes.

Ces systèmes sont conçus pour offrir une assistance précieuse aux conducteurs, limitant les risques d'accidents et améliorant la sécurité, surtout dans des conditions routières difficiles.

En somme, nos observations soulignent l'importance de la prudence au volant, de l'adaptation de la conduite aux conditions routières et de l'utilisation de systèmes de sécurité, notamment des pneus adaptés et d'autres technologies de contrôle de stabilité, pour réduire les risques et assurer une conduite plus sûre.

7 Conclusion

Rappel des Objectifs :

Au commencement de cette étude, notre objectif principal était de valider un modèle théorique préalablement établi à travers différentes équations pour déterminer la stabilité ou les comportements sous-vireur/sur-vireur des véhicules. Pour concrétiser cette démarche théorique, nous avons développé un code MATLAB permettant la simulation des résultats envisagés. Pour rendre cette expérience plus accessible et compréhensible, nous avons également mis en place une interface graphique intuitive, offrant une visualisation directe des résultats de nos simulations.

Cette approche multidimensionnelle visait à confronter les prédictions théoriques à des simulations pratiques, en observant comment les véhicules réagissent dans divers scénarios de conduite et conditions routières. L'objectif ultime était de confirmer, à travers nos simulations, la validité des modèles théoriques préexistants et de fournir une représentation visuelle des résultats pour une meilleure compréhension des comportements des véhicules dans ces diverses situations.

Analyse des Résultats :

En revisitant les différentes situations de simulation (virage normal, freinage brusque, guidonnage, vitesse constante) et en explorant les diverses conditions de route (sol sec, mouillé, neige, verglas), nous avons pu observer un éventail varié de comportements des véhicules.

Virage Normal : Dans cette situation, nous avons noté des différences marquées entre les véhicules. Le quad a révélé un comportement sous-vireur, tandis que la Mercedes Classe S a montré une tendance à la survirage. Ces observations ont été cohérentes sur des surfaces sèches, mais des variations significatives ont été constatées avec des conditions routières alternatives.

Freinage Brusque : Les simulations de freinage brusque ont mis en évidence des pertes d'adhérence, notamment sur des surfaces humides, enneigées ou verglacées. Réaliser un freinage brusque en virage accroît considérablement ces risques, augmentant la probabilité de perte de contrôle.

Guidonnage : Ce scénario a souligné des phénomènes d'instabilité extrême dans les virages, montrant les limites de contrôle des véhicules. Cependant, des pilotes expérimentés peuvent parfois réussir à gérer des situations survireuses en ajustant les angles, bien que cette compétence ne soit pas à la portée de tous.

Vitesse Constante : À vitesse constante mais avec un angle de braquage variable, les véhicules ont montré des réactions distinctes. Le quad est resté sous-vireur, tandis que la Mercedes est devenue sous-vireuse, accentuant la difficulté de contrôle dans ces conditions.

Conditions de Route : La transition vers des conditions routières différentes (sol mouillé, neige, verglas) a révélé des comportements alarmants. Sur sol mouillé, les véhicules ont montré une diminution de l'adhérence, augmentant les risques de perte de contrôle. Cependant, sur verglas, le comportement est devenu nettement plus critique, entraînant une perte presque totale de contrôle, surtout pour le quad.

Ces observations soulignent la sensibilité des véhicules aux conditions de route variées, exposant les risques et les difficultés que peuvent rencontrer les conducteurs dans ces situations spécifiques.

Limites de l'Étude :

Il est essentiel de noter que nos simulations reposent sur un modèle théorique avec des hypothèses spécifiques, ce qui entraîne des limites inhérentes à l'exactitude des résultats par rapport à la réalité. Dans notre modèle, nous avons effectué l'hypothèse de la représentation simplifiée d'un véhicule par une dynamique proche de celle d'une bicyclette, ce qui peut ne pas refléter toutes les subtilités d'un véritable système automobile.

De plus, certaines équations utilisées dans nos simulations se basent sur l'hypothèse des petits angles, ce qui peut limiter la précision de nos résultats lorsque les conditions réelles s'éloignent de cette hypothèse.

Ces modèles simplifiés peuvent ne pas capturer tous les aspects complexes de la dynamique véhiculaire dans des situations réelles. L'extrapolation directe des résultats des simulations à des conditions de conduite réelles nécessite de tenir compte d'autres variables importantes. Les conditions environnementales, la qualité des pneus,

la configuration du véhicule ou encore le comportement du conducteur sont autant de facteurs qui peuvent influencer le comportement d'un véhicule mais qui ne sont pas nécessairement intégrés dans nos simulations.

Ainsi, ces simulations offrent une représentation théorique et informative, mais elles ne doivent pas être interprétées comme une reproduction exacte du comportement d'un véhicule dans toutes les situations réelles.

Perspectives et Recommandations :

1. Utilisation sécurisée des véhicules : Les conclusions de nos simulations mettent en lumière l'importance d'adopter des pratiques de conduite prudentes, notamment dans des situations telles que les virages serrés ou le freinage brusque. Il est recommandé d'éviter les remises d'angle ou les freinages intenses en plein virage, en particulier sur des surfaces glissantes. Une compréhension approfondie des réactions du véhicule dans ces scénarios peut guider les conducteurs vers une conduite plus sûre.

2. Systèmes de sécurité embarqués : Les avancées technologiques offrent une gamme de systèmes de sécurité intégrés dans les véhicules modernes. Les dispositifs tels que l'ABS (Système de Freinage Antiblocage), l'ESP (Programme électronique de stabilité) ou encore les systèmes de contrôle de traction peuvent considérablement aider à réduire les risques dans des conditions de conduite difficiles. Nos simulations soulignent l'efficacité de ces systèmes dans la préservation de la stabilité du véhicule lors de freinages brusques ou dans des virages délicats.

3. Équipements adaptés : L'importance des pneus adaptés aux conditions environnementales est cruciale. Des pneus spécifiques pour les routes mouillées, enneigées ou verglacées peuvent améliorer considérablement l'adhérence et la maniabilité du véhicule. Cela réduit les risques d'accidents liés à des conditions météorologiques défavorables.

Conclusion Générale :

Cette étude a mis en lumière l'importance de la simulation pour appréhender les comportements des véhicules dans des conditions variées. En explorant différents scénarios tels que les virages normaux, les freinages brusques, ou encore les conditions de route comme le sol sec, mouillé, enneigé et verglacé, nous avons obtenu des perspectives précieuses sur la dynamique et la réaction des véhicules.

Les simulations ont révélé des réponses distinctes pour le quad et la Mercedes Classe S dans des situations variées. Ces résultats ont souligné l'impact significatif des conditions routières sur la stabilité et la maniabilité des véhicules. Ils ont également mis en évidence des différences de comportement entre un quad et une berline de luxe dans des situations similaires.

Cependant, il est essentiel de souligner que ces simulations sont basées sur des modèles théoriques et des hypothèses spécifiques. Elles ne doivent pas être interprétées comme une reproduction parfaite du comportement des véhicules dans toutes les situations réelles. D'autres facteurs tels que les compétences du conducteur, les conditions météorologiques, ou encore l'état du véhicule peuvent jouer un rôle crucial dans le résultat final.

En conclusion, les simulations ont apporté des éclairages précieux sur les réponses des véhicules dans des conditions diverses, offrant ainsi une compréhension approfondie des dynamiques véhiculaires. Cependant, il est primordial de considérer ces résultats avec prudence et de les associer à d'autres paramètres pour une application pertinente dans des situations réelles.

En envisageant des perspectives d'amélioration, il serait judicieux d'explorer des modèles plus complexes et précis pour représenter la dynamique des véhicules. Abandonner le modèle de la bicyclette au profit de modèles plus sophistiqués, tels que ceux de Pacejka ou d'autres chercheurs éminents, pourrait offrir une représentation plus fidèle des réponses des véhicules dans des conditions variées. Intégrer des éléments plus complets de la physique des pneumatiques ou considérer des interactions plus subtiles entre les composants du véhicule permettrait d'obtenir des simulations plus précises et plus proches de la réalité.

Cette démarche vers des modèles plus élaborés ouvrirait de nouvelles voies pour appréhender avec une plus grande précision les réponses des véhicules dans des conditions complexes, améliorant ainsi la fiabilité des simulations et leur utilité dans le domaine de l'ingénierie automobile et de la sécurité routière.

8 Bibliographie

Références

- [1] Continental Automotive, Electronic Stability Control. <https://www.continental-automotive.com/en/solutions/safety-technologies/electronic-stability-control.html>
- [2] TRID : Transportation Research Information Database. <https://trid.trb.org/view/1023483>
- [3] Article sur Tandfonline. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15389580490269164>
- [4] Document de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/22/files/22ESV-000111.pdf>

A Annexe

A.1 Code MATLAB

Listing 3 – Code MATLAB du simulateur (extraits)

```
%Eteindre les lampes
app.SousvirageLamp.Color=[0.5, 0.5, 0.5];
app.SurvirageLamp.Color=[0.5, 0.5, 0.5];

% Param tres du vehicule
if app.QuadMF400HButton.Value==1
    m = 414; % Masse (kg)
    L = 1.28; % Empattement (m)
    Lf = 0.58; % Distance du centre de gravite l'avant (m)
    Lr = 0.7; % Distance du centre de gravite l'arriere (m)
    Cr = 63460; % Coefficient de frottement l'arriere (N/rad/s)
    Cf = 69740; % Coefficient de frottement l'avant (N/rad/s)
    Iz = 176; % Moment d'inertie autour de l'axe vertical passant par le centre de
    gravite (kg.m^2)
elseif app.MercedesClasseSButton.Value==1
    % Param tres pour une Mercedes Classe S
    m = 2000; % Masse (kg)
    L = 2.85; % Empattement (m)
    Lf = 1.4; % Distance du centre de gravite l'avant (m)
    Lr = 1.45; % Distance du centre de gravite l'arriere (m)
    Cr = 65000; % Coefficient de frottement l'arriere (N/rad/s)
    Cf = 75000; % Coefficient de frottement l'avant (N/rad/s)
    Iz = 1750; % Moment d'inertie autour de l'axe vertical passant par le centre de
    gravite (kg.m^2)
end

if app.SecButton.Value == 1 % Conditions de conduite se che active
    Cr = Cr * 1; % Aucun changement, maintient le coefficient de friction arriere (Cr)
    Cf = Cf * 1; % Aucun changement, maintient le coefficient de friction avant (Cf)
elseif app.MouillButton.Value == 1 % Conditions de conduite humide active
    Cr = Cr * 0.7; % Reduit le coefficient de friction arriere (Cr) de 30%
    Cf = Cf * 0.7; % Reduit le coefficient de friction avant (Cf) de 30%
elseif app.NeigeButton.Value == 1 % Conditions de conduite enneigee active
    Cr = Cr * 0.3; % Reduit fortement le coefficient de friction arriere (Cr)
    30%
    Cf = Cf * 0.3; % Reduit fortement le coefficient de friction avant (Cf) 30%
elseif app.VerglasButton.Value == 1 % Conditions de conduite verglacee active
    Cr = Cr * 0.1; % Reduit extr mement le coefficient de friction arriere (Cr)
    10%
    Cf = Cf * 0.1; % Reduit extr mement le coefficient de friction avant (Cf)
    10%
end

% Preparation des donnees de simulation
dt = app.dt; % Pas de temps (s)
Tf = app.Tf; % Duree de la simulation (s)
if dt == 0
    errordlg('Veuillez entrer une valeur numerique positive pour le pas de temps.', 'Erreur de saisie');
end

if Tf == 0
    errordlg('Veuillez entrer une valeur numerique positive pour la duree de la simulation.', 'Erreur de saisie');
end
T_ = 0:dt:Tf; % Vecteur temps
NbrPoint=length(T_); % Nombre de points
Tc_beta = 4; % Temps pour atteindre l'angle de braquage maximum en secondes
```

```
Tc_u = 4; % Temps pour atteindre la vitesse maximale en secondes
Temps=T_;

%Param tre d'entr es
% Demande l'utilisateur de sp cifier la vitesse lin aire et l'angle de braquage
vitesse = app.Vitesse;
angleBraquage = app.AngleDeBraquage;
% Convertit la vitesse lin aire de km/h      m/s
vitesse = vitesse * (1000 / 3600);
% Convertit l'angle de braquage de degr s      radian
angleBraquage = deg2rad(angleBraquage);
% Remplit les vecteurs d'entr e avec les valeurs sp cifi es par l'utilisateur
u_ = vitesse * ones(size(T_));
Beta_ = angleBraquage * ones(size(T_));
%D fintion d'une vitesse limite
Ulim = 5 ;
ulim = Ulim / 3.6; % Vitesse limite decinmatique en m. s 1

% Initialisation des variables
Vbeta = zeros(NbrPoint, 1);
Vu = zeros(NbrPoint, 1);
if app.VirageNormalButton.Value==1
    % Construction des entr es de vitesse et d'angle de braquage
    for i = 1:NbrPoint
        Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
        ;
        Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);
    end
elseif app.FreinageBrusqueButton.Value==1
    % Construction des entr es avec freinage brusque
    for i = 1:int64(8 / dt)
        Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);
    end
    % Calcul du freinage moins brusque
    deceleration_rate = 0.001; % Modifier le taux de d c l ration selon votre
    besoin
    for i = int64(8 / dt):NbrPoint
        Vu(i) = max(0, Vu(i-1) - deceleration_rate * u_(i) * ((Temps(i) - 8) / Tc_u)
        / sqrt(1 + ((Temps(i) - 8) / Tc_u)^2));
    end
    for i = 1:NbrPoint
        Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
        ;
    end
elseif app.EvitementdobstaclegaucheButton.Value==1
    obstacle_time = 2; % Temps auquel l'obstacle appara t ( titre d'exemple)
    avoidance_time = 6; % Temps auquel l' vitemen t commence ( titre d'exemple)

    for i = 1:NbrPoint
        Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
        ;
        Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);

        % Simulation de l' vitemen t d'obstacle      partir d'un certain moment
        if Temps(i) >= obstacle_time
            if Temps(i) >= avoidance_time
                Vbeta(i) = Vbeta(i) * 2; % Augmenter temporairement l'angle de
                braquage
                Vu(i) = Vu(i) ; % Augmenter temporairement la vitesse
            end
        end
    end
elseif app.GuidonnageButton.Value == 1
    % Simuler un comportement de guidonnage ou d'instabilit du volant
    instability_time = 5; % Temps auquel le guidonnage commence ( titre d'exemple)
    oscillation_frequency = 0.5; % Fr quence des oscillations du guidonnage (
```

```
titre d'exemple)

for i = 1:NbrPoint
    Vbeta(i) = Beta_(i) * (Temps(i) / Tc_beta) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_beta)^2)
    ;
    Vu(i) = u_(i) * (Temps(i) / Tc_u) / sqrt(1 + (Temps(i) / Tc_u)^2);

    % Simulation du guidonnage      partir d'un certain moment
    if Temps(i) >= instability_time
        %      partir du temps de guidonnage, introduisez des oscillations
        % incontr l es dans l'angle de braquage
        % Voici un exemple de mod lisation d'oscillations sinuso dales :
        amplitude = 0.1; % Amplitude des oscillations du guidonnage
        Vbeta(i) = Vbeta(i) + amplitude * sin(2 * pi * oscillation_frequency *
            Temps(i));
        % Vous pouvez ajuster l'amplitude et la fr quence pour modifier l'effet
        % du guidonnage
    end
end
elseif app.VitesseconstanteButton.Value == 1
    % Construction des entr es pour un virage      vitesse constante
    for i = 1:NbrPoint
        Vu(i) = u_(i);
        if Temps(i) >= 5 && Temps(i) <= 13
            Vbeta(i) = Beta_(i) * ((Temps(i) - t0) / 2) / sqrt(1 + ((Temps(i) - t0) /
                2)^2);
        elseif Temps(i) < 5
            t0 = Temps(i);
        end
    end
end
% Initialisation des variables
Thetapp_0 = 0;
Thetap_0 = 0;
Theta_0 = 0;
Deltap_0 = 0;
Delta_0 = (Lr / (Lr + Lf)) * Vbeta(1);
Deltaf_0 = 0;
Deltar_0 = 0;
Deltaf_sat = 5;
Deltar_sat = 5;
da_0 = abs(Deltaf_0) - abs(Deltar_0);

% Initialisation des variables de position
Bx_0 = 0;
By_0 = 0;
Gx_0 = Bx_0 + Lr * cos(Theta_0 + Delta_0);
Gy_0 = By_0 + Lr * sin(Theta_0 + Delta_0);
Ax_0 = Bx_0 + (Lr + Lf) * cos(Theta_0 + Beta_(1) + Delta_0);
Ay_0 = By_0 + (Lr + Lf) * sin(Theta_0 + Beta_(1) + Delta_0);

% Initialisation des variables de vitesse en A, B et G selon x et y
VBx_0 = Vu(1);
VBy_0 = 0;
VB_0 = Vu(1); % Norme de la vitesse sur la roue arri re
VGx_0 = 0;
VGy_0 = 0;
VAx_0 = 0;
VAY_0 = 0;

% Initialisation des variables d'acc l ration en A, B et G selon x et y
ABx_0 = 0;
ABy_0 = 0;
AGx_0 = 0;
AGy_0 = 0;
```

```
AG_0 = 0;
AAx_0 = 0;
AAy_0 = 0;

% Initialisation des vecteurs de variables d' tat
Thetapp = zeros(NbrPoint, 1);
Thetap = zeros(NbrPoint, 1);
Theta = zeros(NbrPoint, 1);
Thetapp(1) = Thetapp_0 * 180 / pi;
Thetap(1) = Thetap_0 * 180 / pi;
Theta(1) = Theta_0 * 180 / pi;

Deltap = zeros(NbrPoint, 1);
Delta = zeros(NbrPoint, 1);
Delta_r = zeros(NbrPoint, 1);
Delta_f = zeros(NbrPoint, 1);
DA = zeros(NbrPoint, 1);
Deltap(1) = Deltap_0 * 180 / pi;
Delta(1) = Delta_0 * 180 / pi;
DA(1) = da_0;

Ff = zeros(NbrPoint, 1);
Fr = zeros(NbrPoint, 1);
Ff_sat = zeros(NbrPoint, 1);
Fr_sat = zeros(NbrPoint, 1);

R = zeros(NbrPoint, 1);

Bx = zeros(NbrPoint, 1);
By = zeros(NbrPoint, 1);
Gx = zeros(NbrPoint, 1);
Gy = zeros(NbrPoint, 1);
Ax = zeros(NbrPoint, 1);
Ay = zeros(NbrPoint, 1);
Bx(1) = Bx_0;
By(1) = By_0;
Gx(1) = Gx_0;
Gy(1) = Gy_0;
Ax(1) = Ax_0;
Ay(1) = Ay_0;

VBx = zeros(NbrPoint, 1);
VBy = zeros(NbrPoint, 1);
VGx = zeros(NbrPoint, 1);
VGy = zeros(NbrPoint, 1);
VAx = zeros(NbrPoint, 1);
VAy = zeros(NbrPoint, 1);
VBx(1) = VBx_0 * 3.6; % Conversion en km/h
VBy(1) = VBy_0 * 3.6;
VGx(1) = VGx_0 * 3.6;
VGy(1) = VGy_0 * 3.6;
VAx(1) = VAx_0 * 3.6;
VAy(1) = VAy_0 * 3.6;

ABx = zeros(NbrPoint, 1);
ABy = zeros(NbrPoint, 1);
AGx = zeros(NbrPoint, 1);
AGy = zeros(NbrPoint, 1);
AAx = zeros(NbrPoint, 1);
AAy = zeros(NbrPoint, 1);

cpt=0;

for i = 2:NbrPoint
    if Vu(i) <= ulim
        % Calcul des angles de lacet et de drive globaux
```

```
Thetap_1 = Vu(i) * tan(Vbeta(i)) / (Lr + Lf);
Theta_1 = Theta_0 + dt * Thetap_1;
Delta_1 = (Lr / (Lr + Lf)) * Vbeta(i);
% Calcul des vitesses
VBx_1 = Vu(i);
VBy_1 = 0;
VGx_1 = VBx_1 / cos(Delta_1);
VGy_1 = Lr * Thetap_1 / sin(Delta_1);
VAx_1 = VBx_1 / cos(Vbeta(i));
VAy_1 = (Lr + Lf) * Thetap_1 / sin(Vbeta(i));

% Calcul du rayon de courbure
[Deltar_1, Deltaf_1] = AngleDeriveAvantArriere(Delta_1, Thetap_1, ...
    Vbeta(i), Vu(i), Lf, Lr);
R_1 = L/(Vbeta(i)+ Deltaf_1- Deltar_1);
R(i) = R_1;
R_0 = R_1;

da_1 = abs(Deltaf_1) - abs(Deltar_1);
DA(i) = da_1 * 180 / pi;
% Calcul des positions
Bx_1 = Bx_0 + VBx_1 * cos(Theta_1 + Vbeta(i)) * dt;
By_1 = By_0 + VBy_1 * sin(Theta_1 + Vbeta(i)) * dt;
Gx_1 = Gx_0 + VGx_1 * cos(Theta_1 + Vbeta(i)) * dt;
Gy_1 = Gy_0 + VGy_1 * sin(Theta_1 + Vbeta(i)) * dt;
Ax_1 = Ax_0 + VAx_1 * cos(Theta_1 + Vbeta(i) + Deltaf_0) * dt;
Ay_1 = Ay_0 + VAy_1 * sin(Theta_1 + Vbeta(i) + Deltaf_0) * dt;

Bx(i) = Bx_1;
By(i) = By_1;
Gx(i) = Gx_1;
Gy(i) = Gy_1;
Ax(i) = Ax_1;
Ay(i) = Ay_1;

% Calcul des accélérations
ABx_1 = (Vu(i) - Vu(i-1)) / dt;
ABy_1 = Vu(i) * Thetap_1;
AGx_1 = -Lr * Thetap_1^2 / sin(Delta_1);
AGy_1 = Vu(i) * Thetap_1 / cos(Delta_1);
AAx_1 = -(Lr + Lf) * Thetap_1^2 / sin(Vbeta(i));
AAy_1 = Vu(i) * Thetap_1 / cos(Vbeta(i));

ABx(i) = ABx_1 / 9.81;
ABy(i) = ABy_1 / 9.81;
AGx(i) = AGx_1 / 9.81;
AGy(i) = AGy_1 / 9.81;
AAx(i) = AAx_1 / 9.81;
AAy(i) = AAy_1 / 9.81;

Delta_r(i) = Deltar_1 * 180 / pi;
Delta_f(i) = Deltaf_1 * 180 / pi;

% Mise à jour des variables
Thetap_0 = Thetap_1;
Theta_0 = Theta_1;

Deltaf_0 = Deltaf_1;
Deltar_0 = Deltar_1;

Delta_0 = Delta_1;

Bx_0 = Bx_1;
By_0 = By_1;
Gx_0 = Gx_1;
```

```
Gy_0 = Gy_1;
Ax_0 = Ax_1;
Ay_0 = Ay_1;

VBx_0 = VBx_1;
VBy_0 = VBy_1;
VGx_0 = VGx_1;
VGy_0 = VGy_1;
VAx_0 = VAx_1;
VAy_0 = VAy_1;

ABx_0 = ABx_1;
ABy_0 = ABy_1;
AGx_0 = AGx_1;
AGy_0 = AGy_1;
AAx_0 = AAx_1;
AAy_0 = AAy_1;

else
    % Calcul des coefficients de la matrice A et du vecteur B
    [A, B] = Coefficient(m, Iz, Vu(i), Lf, Lr, Cf, Cr);
    % Calcul des angles de d rive et de lacet
    [Thetapp_1, Thetap_1, Theta_1, Deltap_1, Delta_1] = ...
        AngleLacetDerive(Thetap_0, Theta_0, Delta_0, Vbeta(i), A, B, dt);
    [Deltar_1, Deltaf_1] = AngleDeriveAvantArriere(Delta_1, Thetap_1, ...
        Vbeta(i), Vu(i), Lf, Lr);
    % Calcul des forces Ff et Fr
    Ff_1 = -Cf * Deltaf_1;
    Fr_1 = -Cr * Deltar_1;
    % Saturation des forces
    if abs(Deltaf_1) > Deltaf_sat * pi / 180
        Ffsat_1 = -Cf * Deltaf_sat * sign(Deltaf_1) * pi / 180;
    else
        Ffsat_1 = -Cf * Deltaf_1;
    end
    if abs(Deltar_1) > Deltar_sat * pi / 180
        Frsat_1 = -Cr * Deltar_sat * sign(Deltar_1) * pi / 180;
    else
        Frsat_1 = -Cr * Deltar_1;
    end
    % Calcul des positions des roues Avant (A) et Arri re (B) et du Centre de
    % gravit (G)
    Bx_1 = Bx_0 + Vu(i) * dt * cos(Theta_1 + Deltar_1);
    By_1 = By_0 + Vu(i) * dt * sin(Theta_1 + Deltar_1);
    [Gx_1, Gy_1, Ax_1, Ay_1] = Position(Bx_1, By_1, Theta_1, Deltaf_1, Delta_1,
        Lf, Lr);
    % Calcul des vitesses en A, B et G
    [VGx_1, VGy_1] = VitesseEnG(Vu(i), Delta_1);
    [VAx_1, VAy_1, VBx_1, VBy_1] = VitesseAvantArriere(Vu(i), Delta_1, ...
        Deltaf_1, Deltar_1, Vbeta(i), Thetap_1, Lf, Lr);
    % Calcul des acc lations en A, B et G
    AGx_1 = (-Ff_1 * sin(Vbeta(i))) / m;
    AGy_1 = (Fr_1 + Ff_1 * cos(Vbeta(i))) / m;
    AG_1 = sqrt(AGx_1^2 + AGy_1^2);
    AAx_1 = (VAx_1 - VAx_0) / dt;
    AAy_1 = (VAy_1 - VAy_0) / dt;
    ABx_1 = (VBx_1 - VBx_0) / dt;
    ABy_1 = (VBy_1 - VBy_0) / dt;
    % Calcul du rayon de courbure
    VB_1 = sqrt(VBx_1^2 + VBy_1^2);
    R_1 = L/(Vbeta(i)+ Deltaf_1- Deltar_1);
    % Calcul de la diff rence entre les angles de d rive avant et arri re
    da_1 = abs(Deltaf_1) - abs(Deltar_1);
    if da_1>0
        Cf=Cf*max((1-cpt), 1/Vu(i));
        cpt=cpt+0.00000001;
```

```
end
if da_1>2
    Cf=Cf*(1-cpt);
    cpt=cpt+0.01;
end
if da_1<0
    Cr=Cr*max((1-cpt), 1/Vu(i));
    cpt=cpt+0.00000001;
end
% Incorporation dans les vecteurs de sortie
Thetapp(i) = Thetapp_1 * 180 / pi;
Thetap(i) = Thetap_1 * 180 / pi;
Theta(i) = Theta_1 * 180 / pi;
Deltap(i) = Deltap_1 * 180 / pi;
Delta(i) = Delta_1 * 180 / pi;
Delta_r(i) = Deltar_1 * 180 / pi;
Delta_f(i) = Deltaf_1 * 180 / pi;
DA(i) = da_1 * 180 / pi;
Ff(i) = Ff_1;
Fr(i) = Fr_1;
Ff_sat(i) = Ffsat_1;
Fr_sat(i) = Frsat_1;
Bx(i) = Bx_1;
By(i) = By_1;
Gx(i) = Gx_1;
Gy(i) = Gy_1;
Ax(i) = Ax_1;
Ay(i) = Ay_1;
VBx(i) = VBx_1 * 3.6;
VBy(i) = VBy_1 * 3.6;
VGx(i) = VGx_1 * 3.6;
VGy(i) = VGy_1 * 3.6;
VAx(i) = VAx_1 * 3.6;
VAy(i) = VAy_1 * 3.6;
ABx(i) = ABx_1 / 9.81;
ABy(i) = ABy_1 / 9.81;
AGx(i) = AGx_1 / 9.81;
AGy(i) = AGy_1 / 9.81;
AG(i) = AG_1 / 9.81;
AAx(i) = AAx_1 / 9.81;
AAy(i) = AAy_1 / 9.81;
R(i) = R_1;
% Mise jour des variables
Thetapp_0 = Thetapp_1;
Thetap_0 = Thetap_1;
Theta_0 = Theta_1;
Delta_0 = Delta_1;
Deltaf_0 = Deltaf_1;
Deltar_0 = Deltar_1;
da_0 = da_1;
Ff_0 = Ff_1;
Fr_0 = Fr_1;
FrSAT_0 = Frsat_1;
Ffsat_0 = Ffsat_1;
Bx_0 = Bx_1 ;
By_0 = By_1 ;
Gx_0 = Gx_1 ;
Gy_0 = Gy_1 ;
Ax_0 = Ax_1 ;
Ay_0 = Ay_1 ;
R_0 = R_1 ;
VBx_0 = VBx_1 ;
VBy_0 = VBy_1 ;
VB_0 = VB_1 ;
VGx_0 = VGx_1 ;
VGy_0 = VGy_1 ;
```

```
VAx_0 = VAx_1;
VAy_0 = VAy_1;
ABx_0 = ABx_1;
ABy_0 = ABy_1;
AGx_0 = AGx_1;
AGy_0 = AGy_1;
AG_0 = AG_1;
AAx_0 = AAx_1;
AAy_0 = AAy_1;
end
end

% Définition des sorties
UIAxes1=app.UIAxes;
UIAxes2=app.UIAxes2;
UIAxes3=app.UIAxes3;
UIAxes4=app.UIAxes4;
UIAxes5=app.UIAxes5;
%UIAxes6=app.UIAxes6;
%UIAxes7=app.UIAxes7;
%UIAxes8=app.UIAxes8;
UIAxes9=app.UIAxes9;
UIAxes10=app.UIAxes10;

% Sorties affichages
% Cr éation du graphique avec les deux axes y
yyaxis(app.UIAxes, 'left');
plot(app.UIAxes, Temps, Delta);
ylabel(app.UIAxes, 'Angle(deg)');
hold(app.UIAxes, 'on');
yyaxis(app.UIAxes, 'right');
plot(app.UIAxes, Temps, Thetap);
ylabel(app.UIAxes, 'VitesseAngulaireLacet(deg/s)');
xlabel(app.UIAxes, 'Temps(s)');
title(app.UIAxes, 'Angle de la rive globale et vitesse angulaire Lacet');
legend(app.UIAxes, 'Angle de la rive globale', 'Vitesse angulaire Lacet');
hold(app.UIAxes, 'off');

hold(app.UIAxes2, 'on');
plot(app.UIAxes2, Temps, Delta_f);
plot(app.UIAxes2, Temps, Delta_r);
plot(app.UIAxes2, Temps, Delta, 'LineStyle', '--');
xlabel(app.UIAxes2, 'Temps(s)');
ylabel(app.UIAxes2, 'Angle(deg)');
title(app.UIAxes2, 'Angle de la rive avant, arrière et global');
legend(app.UIAxes2, 'Angle de la rive avant', 'Angle de la rive arrière', 'Angle de la rive Global');
hold(app.UIAxes2, 'off');

hold(app.UIAxes10, 'on');
plot(app.UIAxes10, Ax, Ay, Gx, Gy, Bx, By);
xlabel(app.UIAxes10, "Position en x(m)");
ylabel(app.UIAxes10, "Position en y(m)");
title(app.UIAxes10, "Position des roues et du centre de gravité");
legend(app.UIAxes10, "Position roue avant", "Position centre de gravité", "Position roue arrière");
axis(app.UIAxes10, 'equal');
hold(app.UIAxes10, 'off');

plot(app.UIAxes3, Temps, Vu * 3.6)
xlabel(app.UIAxes3, 'Temps(s)')
ylabel(app.UIAxes3, 'Vitesse lin aire(km/h)')
title(app.UIAxes3, 'Vitesse d''entrée')
legend(app.UIAxes3, 'off')
```

```
plot(app.UIAxes4, Temps, Vbeta * 180 / pi)
xlabel(app.UIAxes4, 'Temps(s)')
ylabel(app.UIAxes4, 'Angle de braquage(deg)')
title(app.UIAxes4, 'Angle de braquage en entr e')
legend(app.UIAxes4, 'off')

plot(app.UIAxes5, Temps, DA)
xlabel(app.UIAxes5, 'Temps(s)')
ylabel(app.UIAxes5, 'Angle(deg)')
title(app.UIAxes5, 'Diff rence des angles de d rive avant et arri re')
legend(app.UIAxes5, 'off')

% plot(app.UIAxes6, Temps, AGx, Temps, AGy)
% xlabel(app.UIAxes6, 'Temps (s)')
% ylabel(app.UIAxes6, 'Acc l ration (G)')
% title(app.UIAxes6, 'Acc l ration au centre de gravit en fonction du temps')
% legend(app.UIAxes6, 'Acc l ration longitudinale', 'Acc l ration transversale')

% plot(app.UIAxes7, Temps, R)
% xlabel(app.UIAxes7, 'Temps (s)')
% ylabel(app.UIAxes7, 'Rayon de courbure (m)')
% title(app.UIAxes7, 'Distance du rayon de courbure')
% legend(app.UIAxes7, 'off')
%
% plot(app.UIAxes8, Delta_f * pi / 180, Ff, Delta_r * pi / 180, Fr)
% xlabel(app.UIAxes8, 'Angle de d rive (rad)')
% ylabel(app.UIAxes8, 'Force de d rive lat rale (N)')
% title(app.UIAxes8, 'Force de d rive lat rale avant et arri re')
% legend(app.UIAxes8, 'Force de d rive lat rale avant', 'Force de d rive lat rale arri re')

plot(app.UIAxes9, Delta_f * pi / 180, Ff_sat, Delta_r * pi / 180, Fr_sat)
xlabel(app.UIAxes9, 'Angle de d rive(rad)')
ylabel(app.UIAxes9, 'Force de d rive lat rale(N)')
title(app.UIAxes9, 'Force de d rive lat rale avant et arri re avec saturation')
legend(app.UIAxes9, 'Force de d rive lat rale avant satur e', 'Force de d rive lat rale arri re satur e')

if DA(end)>0
    app.SousvirageLamp.Color= [1, 0, 0];
end
if DA(end)<0
    app.SurvirageLamp.Color= [1, 0, 0];
end

function [Matrice, Vecteur] = Coefficient(Masse, MomentInertieLacet, VitesseLineaireG
, EmpattementAvant, EmpattementArriere, RigiditeDriveAvant, RigiditeDriveArriere)

a11 = -((RigiditeDriveAvant * (EmpattementAvant^2) + RigiditeDriveArriere * (
EmpattementArriere^2)) / (VitesseLineaireG * MomentInertieLacet));
a12 = (RigiditeDriveArriere * EmpattementArriere - RigiditeDriveAvant *
EmpattementAvant) / MomentInertieLacet;
a21 = ((RigiditeDriveArriere * EmpattementArriere - RigiditeDriveAvant *
EmpattementAvant) / (Masse * VitesseLineaireG^2))-1;
a22 = -((RigiditeDriveArriere + RigiditeDriveAvant) / (Masse * VitesseLineaireG));

Matrice = [a11, a12; a21, a22];

b1 = RigiditeDriveAvant * EmpattementAvant / MomentInertieLacet;
b2 = RigiditeDriveAvant / (Masse * VitesseLineaireG);

Vecteur = [b1; b2];
end

function [AccelerationLacet_1, VitesseLacet_1, AngleLacet_1, VitesseDeriveGlobal_1,
AngleDeriveGlobal_1] = AngleLacetDerive(VitesseLacet_0, AngleLacet_0,
```

```
AngleDeriveGlobal_0, AngleBraquage, matrice, vecteur, pas)
AccelerationLacet_1 = matrice(1, 1) * VitesseLacet_0 + matrice(1, 2) *
    AngleDeriveGlobal_0 + vecteur(1) * AngleBraquage;
VitesseLacet_1 = VitesseLacet_0 + pas * AccelerationLacet_1;
AngleLacet_1 = AngleLacet_0 + pas * VitesseLacet_1;

VitesseDeriveGlobal_1 = matrice(2, 1) * VitesseLacet_0 + matrice(2, 2) *
    AngleDeriveGlobal_0 + vecteur(2) * AngleBraquage;
AngleDeriveGlobal_1 = AngleDeriveGlobal_0 + pas * VitesseDeriveGlobal_1;
end

function [AngleDeriveArriere_1, AngleDeriveAvant_1] = AngleDeriveAvantArriere(
    AngleDeriveGlobal_1, VitesseLacet_1, AngleBraquage, VitesseLineaireG,
    EmpattementAvant, EmpattementArriere)
AngleDeriveAvant_1 = AngleDeriveGlobal_1 - AngleBraquage + (EmpattementAvant *
    VitesseLacet_1 / VitesseLineaireG);
AngleDeriveArriere_1 = AngleDeriveGlobal_1 - (EmpattementArriere * VitesseLacet_1 /
    VitesseLineaireG);
end

function [PositionGx_0, PositionGy_0, PositionAx_0, PositionAy_0] = Position(
    PositionBx_0, PositionBy_0, AngleLacet_0, AngleDeriveAvant_0, AngleDeriveGlobal_0
    , EmpattementAvant, EmpattementArriere)
PositionGx_0 = PositionBx_0 + EmpattementArriere * cos(AngleLacet_0 +
    AngleDeriveGlobal_0);
PositionGy_0 = PositionBy_0 + EmpattementArriere * sin(AngleLacet_0 +
    AngleDeriveGlobal_0);

PositionAx_0 = PositionBx_0 + (EmpattementAvant + EmpattementArriere) * cos(
    AngleLacet_0 - AngleDeriveAvant_0);
PositionAy_0 = PositionBy_0 + (EmpattementAvant + EmpattementArriere) * sin(
    AngleLacet_0 - AngleDeriveAvant_0);
end

function [VitesseGx_1, VitesseGy_1] = VitesseEnG(VitesseLineaireG ,
    AngleDeriveGlobal_1)
VitesseGx_1 = VitesseLineaireG * cos(AngleDeriveGlobal_1);
VitesseGy_1 = VitesseLineaireG * sin(AngleDeriveGlobal_1);
end

function [VitesseAX_1, VitesseAY_1, VitesseBX_1, VitesseBY_1] = VitesseAvantArriere(
    VitesseLineaireG, AngleDeriveGlobal_1, AngleDeriveAvant_1, AngleDeriveArriere_1,
    AngleBraquage, VitesseLacet_1, EmpattementAvant, EmpattementArriere)
VitesseAX_1 = (VitesseLineaireG * cos(AngleDeriveGlobal_1)) / (cos(AngleDeriveAvant_1
    + AngleBraquage));
VitesseAY_1 = (VitesseLineaireG * sin(AngleDeriveGlobal_1) + EmpattementAvant *
    VitesseLacet_1) / (sin(AngleDeriveAvant_1 + AngleBraquage));

VitesseBX_1 = (VitesseLineaireG * cos(AngleDeriveGlobal_1)) / (cos(
    AngleDeriveArriere_1));
VitesseBY_1 = (VitesseLineaireG * sin(AngleDeriveGlobal_1) - EmpattementArriere *
    VitesseLacet_1) / (sin(AngleDeriveArriere_1));
end
```