

*À nos familles*

## **Remerciements**

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos encadrants, M. Abdelbacet Mhamdi et Mme Wafa Sellami, pour le temps qu'ils ont généreusement consacré à notre formation et les précieuses informations qu'ils nous ont transmises avec intérêt et compréhension. Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à notre cher encadrant professionnel, M. Saber Youssef Hamdi, pour son suivi assidu tout au long de la période du projet.

Nous ne voudrions pas manquer l'occasion de remercier tous les enseignants et le personnel de l'Institut Supérieur des Études Technologiques de Bizerte pour leurs aides, leurs précieux conseils et leurs intérêts constants pour notre formation.

Enfin, nous souhaitons exprimer nos remerciements à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 État de l'art et problématique</b>	<b>3</b>
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil . . . . .	3
1.2 Étude des techniques antérieures . . . . .	3
1.2.1 La suspension passive . . . . .	4
1.2.2 Suspension adaptative . . . . .	7
1.3 Problématique . . . . .	10
1.4 Cahier des charges . . . . .	12
<b>2 Étude cinétique et choix des composants</b>	<b>14</b>
2.1 Étude cinétique et dynamique . . . . .	14
2.1.1 Calcul de la distance d'arrêt d'un véhicule . . . . .	14
2.1.2 La force centrifuge et son impact . . . . .	16
2.1.3 Calcul de la vitesse limite dans un virage . . . . .	16
2.1.4 Impact des ralentisseurs sur l'usager . . . . .	19
2.2 Choix des composants . . . . .	20
2.2.1 Choix de l'unité de commande (UCE) . . . . .	20
2.2.2 Choix des capteurs . . . . .	23
2.2.3 Choix de l'actionneur . . . . .	28
2.2.4 Choix de l'interface IHM . . . . .	30
2.3 Communication entre les composants . . . . .	31

<b>3 Conception et réalisation</b>	<b>33</b>
3.1 Principe de fonctionnement du système de suspension intelligent . . . . .	33
3.2 Conception mécanique . . . . .	34
3.2.1 Conception de l'effecteur . . . . .	34
3.2.2 Conception du socle . . . . .	37
3.2.3 . . . . .	38
3.3 Conception électronique et programmation . . . . .	38
3.3.1 Conception électronique . . . . .	38
3.3.2 Développement du programme . . . . .	43
3.4 Réalisation d'une simulation en trois dimensions de la route . . . . .	49
3.4.1 Configuration du capteur Lidar . . . . .	49
3.4.2 Modélisation 3D de la route . . . . .	50
3.5 Développement de l'interface homme-machine . . . . .	51
<b>Conclusion générale</b>	<b>55</b>
<b>Bibliographie et sitographie</b>	<b>55</b>
<b>Annexes</b>	<b>57</b>

# Table des figures

1.1	Modélisation d'un système de suspension . . . . .	4
1.2	Suspension passive . . . . .	5
1.3	Schémas descriptifs de la suspension adaptative magnétique . . . . .	9
1.4	Suspension adaptative par vanne . . . . .	10
1.5	Suspension adaptative multi vannes . . . . .	10
1.6	Diagramme de QQOQCCP . . . . .	11
1.7	Diagramme d'Ishikawa . . . . .	12
2.1	Calcul distance d'arrêt . . . . .	14
2.2	Courbes de décélération après freinage . . . . .	15
2.3	Les forces exercés sur un véhicules dans un virage . . . . .	18
2.4	Schémas descriptif de la relation entre le rayon de braquage et l'angle de braquage . . . . .	19
2.5	Familles d'ARM Cortex . . . . .	23
2.6	Shématisation d'un capteur gyroscope . . . . .	24
2.7	Principe de fonctionnement et architecture du capteur laser VL53L0X . . . . .	28
2.8	Moteurs pas à pas bipolaires et unipolaires . . . . .	29
2.9	Schématisation du pilote A4988 . . . . .	30
2.10	TFT TJC4827T043 . . . . .	31
3.1	Schéma synoptique . . . . .	34
3.2	Système vis écrou (arbre moteur) . . . . .	35
3.3	Système vis écrou (écrou moteur) . . . . .	35
3.4	Système vis-écrou . . . . .	36

3.5 Conception et assemblage de l'effecteur . . . . .	37
3.6 Conception du socle du robot . . . . .	38
3.7 Schématisation du circuit du premier étage (partie actionneur linéaire) . . . . .	39
3.8 Schématisation du circuit du premier étage (partie du moteur à courant continu) . . . . .	40
3.9 Schématisation du circuit du premier étage . . . . .	41
3.10 Schématisation du circuit du deuxième étage . . . . .	42
3.11 Algorigramme de fonctionnement des moteurs pas à pas . . . . .	43
3.12 Algorigramme de fonctionnement des moteurs à courant continu . . . . .	44
3.13 Algorigramme de fonctionnement du système de suspension . . . . .	44
3.14 Algorigramme de fonctionnement de scan de route et de l'interface . . . . .	45
3.15 Configuration des ports sur le logiciel STM32 IDE . . . . .	46
3.16 Extrait codé inscrit dans le logiciel STM32 IDE . . . . .	46
3.17 Test effectuée à la communication I2C du gyroscope . . . . .	47
3.18 Test effectuée à la communication UART du moniteur TFT . . . . .	47
3.19 Onglet "Live expressions" . . . . .	48
3.20 Moniteur série Hercules . . . . .	48
3.21 Principe de fonctionnement du capteur lidar . . . . .	49
3.22 Le référentiel de la route . . . . .	50
3.23 Modélisation d'un dos d'âne sur Matlab . . . . .	51
3.24 Menu principale . . . . .	51
3.25 Page des mesures du gyroscope . . . . .	52
3.26 Menu pour visualiser l'état des amortisseurs . . . . .	52
3.27 Menu de scan de route . . . . .	53
3.28 Menu de configuration des paramètres d'usine . . . . .	53
3.29 Menu de speedomètre . . . . .	54
3.30 Partie du programme téléversé dans le TFT . . . . .	54

# Liste des tableaux

1.1	Types de la suspension passive . . . . .	5
2.1	Classification des dos d'ânes . . . . .	20
2.2	Caractéristiques des microcontrôleurs . . . . .	21
2.3	Types de capteurs gyroscopes . . . . .	25
2.4	Caractéristiques des capteur laser . . . . .	27
3.1	Légende de la figure 3.5 . . . . .	37
3.2	Légende du socle du robot . . . . .	38

# Introduction générale

La sécurité routière est un enjeu majeur pour l'industrie automobile. Les systèmes de suspension des véhicules sont un élément clé pour garantir la sécurité et le confort des passagers. Cependant, les systèmes de suspension traditionnels sont souvent incapables de s'adapter aux conditions changeantes de la route, notamment dans les virages où la force centrifuge peut exercer une pression importante sur le châssis et les amortisseurs du véhicule. De plus, les obstacles sur la route peuvent causer des chocs importants qui peuvent endommager les cargaisons sensibles et mettre en danger la vie des passagers.

## Contexte et motivations

Dans ce contexte, notre projet de fin d'études consiste à développer une suspension active intelligente pour les véhicules. Cette suspension intelligente est conçue pour réagir en temps réel aux conditions de la route, ajustant le niveau du gyroscope pour maintenir le châssis stable et centré, tout en absorbant les chocs transmis aux amortisseurs. De plus, elle est équipée d'un système de détection et de scan de la route, ce qui permet une analyse préventive des obstacles rencontrés, pour une conduite plus sûre et plus confortable.

L'objectif de ce projet est de remplacer le système de suspension traditionnel par une suspension active intelligente, offrant une expérience de conduite plus confortable et plus sûre pour les passagers, ainsi qu'une meilleure protection pour les cargaisons sensibles.

## Plan du rapport

Notre rapport est divisé en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente l'état de l'art et la problématique liée aux systèmes de suspension traditionnels. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude cinétique et au choix des composants pour la suspension

active intelligente. Le dernier chapitre détaille la conception et la réalisation de notre prototype de suspension active intelligente.

# État de l'art et problématique

## Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une vision globale sur l'état d'art des systèmes de suspensions automobiles en mettant l'accent sur les différentes faiblesses de chaque variante, suivi d'une présentation de la problématique que nous avons confronté lors de notre projet afin d'en concevoir la solution adéquate.

### 1.1 Présentation de l'organisme d'accueil

Nous avons effectué notre stage au sein de la start-up émergente **SAB Robotics**, spécialisée dans le domaine de la robotique et de la conception mécanique de pièces pour différentes machines industrielles. Cette start-up tunisienne vise concevoir des pièces complexes et industrielles en utilisant des machines CNC. En plus de la conception de nouvelles pièces, **SAB Robotics** se focalise également sur la restauration et la modification de certaines machines CNC pour améliorer leurs performances et leur efficacité. La start-up est implantée dans la zone industrielle de Charguia 2, offrant ainsi un accès facile aux différentes entreprises et industries du secteur.

### 1.2 Étude des techniques antérieures

La vitesse et la condition de l'infrastructure sont les premières causes de mortalité routière dans le monde. Elles ne sont pas seulement des facteurs déclencheurs de l'accident, mais aussi des facteurs aggravants. Ceci nécessite la vigilance du conducteur et la compétence du véhicule à survivre les situations dangereuses qui se présentent. La suspension automobile occupe un rôle essentiel dans la tenue de route d'un véhicule, elle permet de maintenir le châssis en l'air au-dessus des roues. Elle relie celles-ci au châssis et garantit leur contact avec le sol. La suspension fonctionne de pair avec les amortisseurs. Ceux-ci

sont indispensables [1], car sans eux, la suspension ne pourrait pas assurer un confort de conduite et une sécurité optimale comme l'indique la figure 1.1.

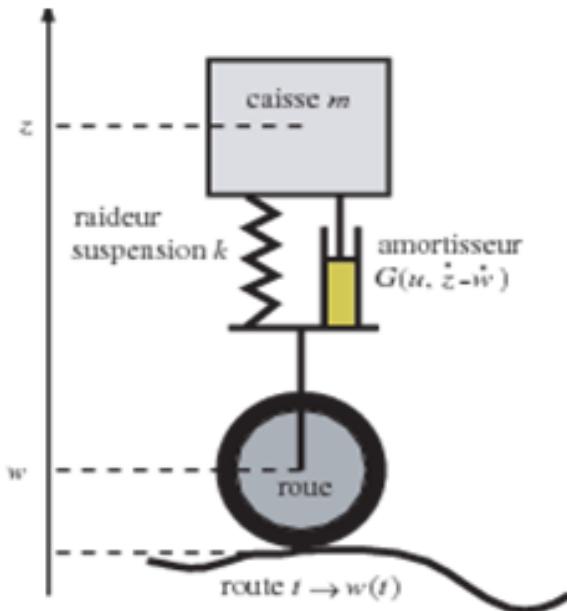


FIGURE 1.1 – Modélisation d'un système de suspension

On distingue deux types de suspensions : passives et adaptatives

### 1.2.1 La suspension passive

#### Principe de fonctionnement

En général, les systèmes de suspension passive sont composés d'un triangle, d'un ressort, d'une bras stabilisatrice, des biellettes et d'un amortisseur. La fonction de chaque composant est de s'assurer que le triangle soit utilisé pour connecter le système de roue avec le châssis et de supporter le poids du véhicule. Le ressort et l'amortisseur travaillent en synergie pour isoler l'oscillation de la carrosserie et contribuent ensuite à assurer le confort et la sécurité de conduite. L'intérêt de la bras stabilisatrice est de minimiser la différence de niveaux entre les deux côtés du véhicule pour obtenir une forme de stabilité dans les virages et assurer la contre réaction de l'amortisseur ayant être décompressé. Le rôle de biellettes est de connecter et transmettre le mouvement dans tous le système.

La suspension passive indépendante se diffère un peu de la suspension passive standard. Elle permet à chaque roue du même essieu de se déplacer verticalement indépendamment de l'autre du même train. Ceci en opposition avec un essieu rigide ou un système De Dion dans lequel les roues sont liées. La suspension passive peut être pneumatique ou

hydraulique ou mixte, comme signalé dans les fiches Auto [2].

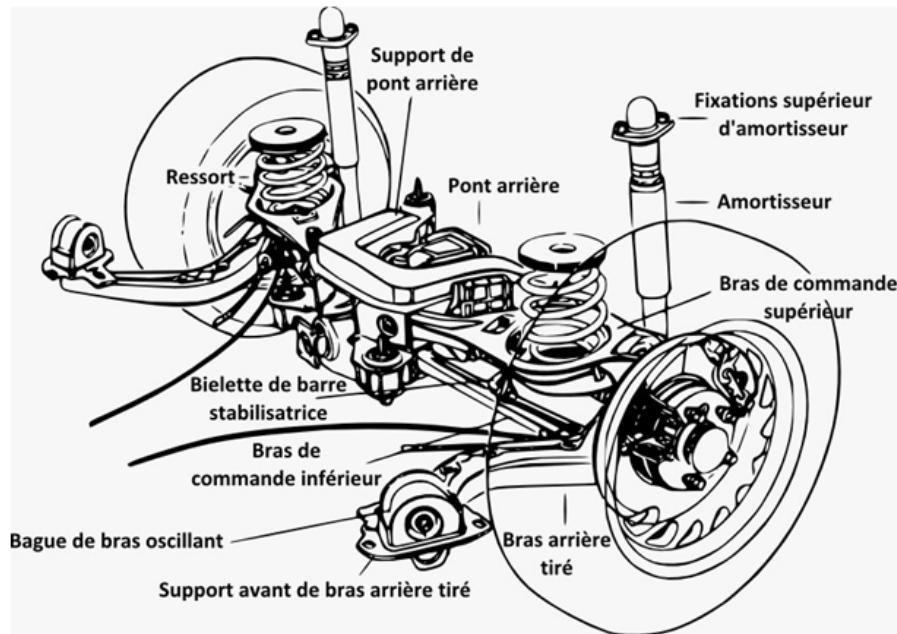


FIGURE 1.2 – Suspension passive

Le tableau 1.1 montre plusieurs variantes de cette suspension [3].

TABLE 1.1: Types de la suspension passive

	Description	Exemple
Suspension type MacPherson	<p>La suspension MacPherson est le schéma de suspension le plus fréquemment utilisé pour l'essieu avant, notamment pour les citadines et les voitures compactes etc. Le principe de conception a été optimisé avec l'ajout d'un triangle inférieur autorisant un bien meilleur guidage de la roue. La place au niveau du compartiment moteur étant limitée, la suspension de type MacPherson représente un bon compromis car, si elle nécessite de l'espace sur le plan vertical, elle reste très compacte sur les autres plans.</p>	<p>Peugeot 308, Renault Mégane, Volkswagen Golf BMW série 3 E36 Porsche 911</p>

Suspension type MacPherson à pivot indépendant	Ce type de suspension est surtout utilisée pour les versions sportives de berlines traction ayant à la base une suspension de type pseudo-MacPherson. De manière non exhaustive, En ajoutant un point de pivot entre le porte-moyeu et la jambe de force, les remontées de couples, néfastes à la précision de conduite, sont drastiquement réduites.	Renault Megane RS, la Ford Focus RS (Revoknuckle) Opel Insignia Opel Cascada (HiPerStrut)
Suspension à double triangulation	La suspension à double triangulation est couramment utilisée en compétition, sur des modèles sportifs ou dans un tout autre domaine, en tout-terrain .Elle se compose d'un triangle supérieur et d'un triangle inférieur (2 points d'attache côté châssis, un point d'attache côté moyeu) pour guider la roue.	Lamborghini Aventador, McLaren 650S Range Rover, Toyota Land Cruiser
Essieu arrière déformable ou de torsion	L'essieu arrière de torsion est le dispositif le plus couramment sur les berlines compactes traction. Il s'agit d'une suspension semi-indépendante. Les roues d'un même essieu sont reliées entre elles par une barre transversale. Cette barre est déformable dans une certaine mesure et permet donc une indépendance relative des mouvements de chaque roue.	Peugeot 308, Renault Mégane RS
Essieu arrière rigide de Dion	Il s'agit d'une suspension dépendante utilisée sur l'essieu moteur (les 2 roues d'un même essieu ont un mouvement dépendant l'une de l'autre). Fixé au châssis, le différentiel distribue la puissance aux deux roues d'un même essieu. Ces dernières sont reliées de manière rigide par une barre transversale de guidage.	Renault Twingo Smart Fortwo
Suspension multibras	Les suspensions multibras ne sont généralement utilisées que par les berlines routières tant à l'avant qu'à l'arrière. Concernant les voitures compactes, seules quelques modèles comptent une suspension multibras et à l'arrière seulement	Volkswagen Golf dont la puissance est supérieure à 120 chevaux -Ford Focus

## Inconvénients

Les inconvénients de la suspension passive proviennent principalement du poids dû à l'utilisation excessive de composants mécaniques, ainsi que du laxisme du temps de réponse du système aux obstacles, cette suspension ne permettant pas un réglage en temps réel du système car il n'absorbe pas la plupart des chocs importants. dernièrement nous avons l'existence d'une meilleure technologie. La suspension passive est désormais de second ordre. Bien sûr, cela ne signifie pas que la suspension passive est obsolète.

### 1.2.2 Suspension adaptative

La suspension adaptative atteint les mêmes objectifs plus efficacement en utilisant une technologie moderne.

#### Principe de fonctionnement

Lorsque les roues d'une automobile équipée de suspensions pilotées rencontrent une situation de conduite spécifique, les amortisseurs utiliseront les différentes données recueillies par certains capteurs intégrés au niveau des roues (*comme les capteurs anti-dérapages ou les capteurs de position verticale*), afin d'augmenter ou de réduire la pression dans certains amortisseurs.

Au delà de pouvoir régler le tarage de suspension et donc d'adapter le confort, le système électronique en profite pour aller beaucoup plus loin. En effet, pouvoir changer en une fraction de seconde les lois d'amortissement de chacun des amortisseurs permet de faire énormément de choses utiles comme énumérées dans [4, 5, 6].

En voici quelques exemples :

- En virage, le tarage de suspension se rigidifie sur le côté qui s'écrase afin de limiter justement l'écrasement de l'auto sur ses appuis. Du coup, la voiture aura tendance à limiter le tangage et le roulis.
- Sur route dégradée, le système adoucie et rigidifie plusieurs fois par secondes chaque amortisseur. De ce fait, grâce à un calculateur, les amortisseurs sont réglés à la volée pour limiter les secousses et les mouvements de caisse de haut en bas.
- La sécurité est accrue en cas de manœuvres brusques de type évitemen. En effet l'ESP et l'ABS fonctionnent conjointement avec la suspension pour optimiser encore plus la manière dont va se comporter l'auto. Le système permet donc de changer la loi d'amortissement selon le niveau d'enfoncement du piston.

Les suspensions adaptatives peuvent être :

**Magnétiques** qui permettent d'augmenter ou de réduire le débit de liquide en fonction de l'intensité du courant électrique injecté dans l'aimant, grâce à la présence

d'électroaimants ou à la présence de particules métalliques dans le liquide hydraulique.

**Par vannes** qui modulent électroniquement le débit du liquide

### Système d'amortissement piloté magnétiquement

Le but est de pouvoir moduler la résistance du débattement du piston d'amortisseur en modulant le flux d'huile qui va de haut en bas. Plus on le limite, plus l'amortissement est sec.

Il s'agit d'ajouter à l'huile des particules magnétisées. Grâce à des électroaimants placés dans les canaux de circulation, on peut régler la vitesse du débit. Plus il y a de jus, plus l'aimant est puissant. Ceci aura une influence plus forte sur les particules présentes en suspension dans l'huile, comme illustré par la figure 1.3.

L'alignement des particules magnétiques permet de boucher plus ou moins intensément les conduites, et donc de rendre plus ou moins rigide le piston au niveau du débattement.

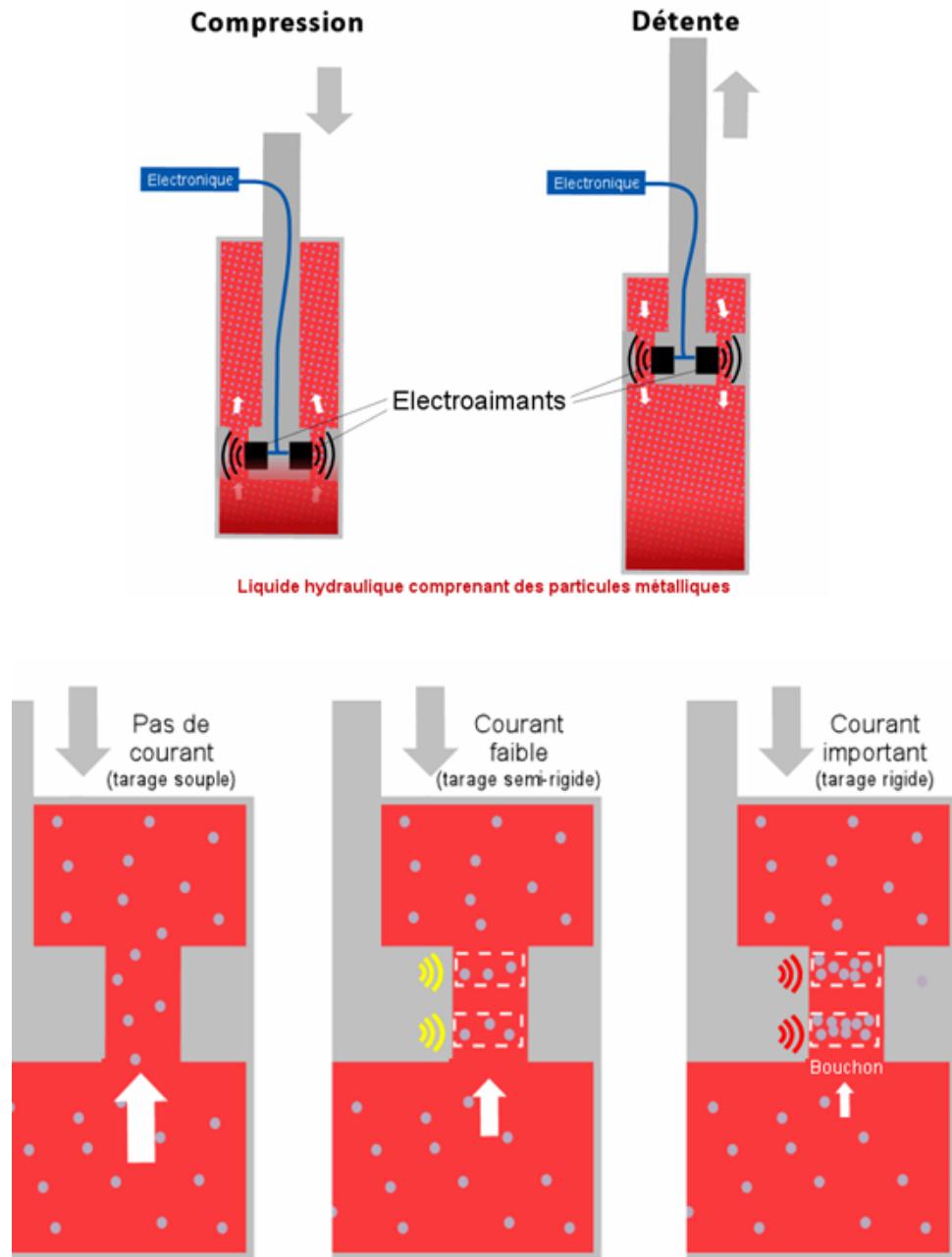


FIGURE 1.3 – Schémas descriptifs de la suspension adaptative magnétique

### Système d'amortissement adaptatif par vanne

Le principe est le même sauf qu'ici on ne modifie pas la fluidité du liquide grâce à des particules métalliques. En effet, il s'agit tout simplement de contrôler de petites vannes placées dans les canaux de circulation. Il s'agit donc d'ouvrir ou de fermer plus ou moins des petits robinets.

La vitesse du débit est effectuée par le compartiment situé à gauche. Dans celui-ci, passe une partie de l'huile et il suffit d'y intégrer un système de vannes pour moduler la vitesse

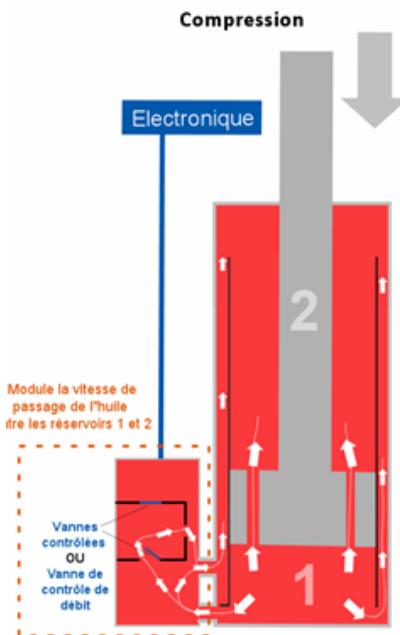


FIGURE 1.4 – Suspension adaptative par vanne

à laquelle l'huile pourra passer de bas en haut, comme l'indique la figure 1.4.

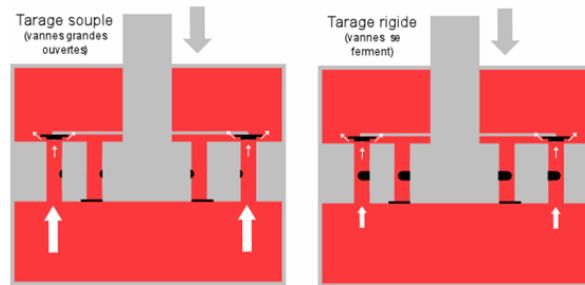


FIGURE 1.5 – Suspension adaptative multi vannes

### 1.3 Problématique

Toutes les techniques utilisées dans les systèmes de suspension passives et adaptatives ont tous des défauts communs comme :

- le poids excessif des composantes,
- le temps de réaction lent du système face à un obstacle,
- ils n'avertissent pas les passagers en cas de présence d'un danger,
- ils présentent une impuissance à s'adapter avec l'état de route en temps réel pour assister le contrôle du véhicule.

Le problème majeur réside dans l'incompétence des systèmes de suspensions modernes à prévenir les accidents de route mortels, qui sont causés par la mauvaise infrastructure, les virages dangereux, les dos d'âne non annoncés, ainsi que l'insouciance des conducteurs face à ces dangers. De plus, la mauvaise qualité des transports pose également des risques, notamment pour certaines cargaisons sensibles qui risquent l'explosion par excès d'agitation, et pour certains cas de blessures qui peuvent entraîner des complications (parturitions, fractures, etc.)

En observant les diagrammes des figures 1.6 et 1.7, nous analysons la problématique plus profondément.

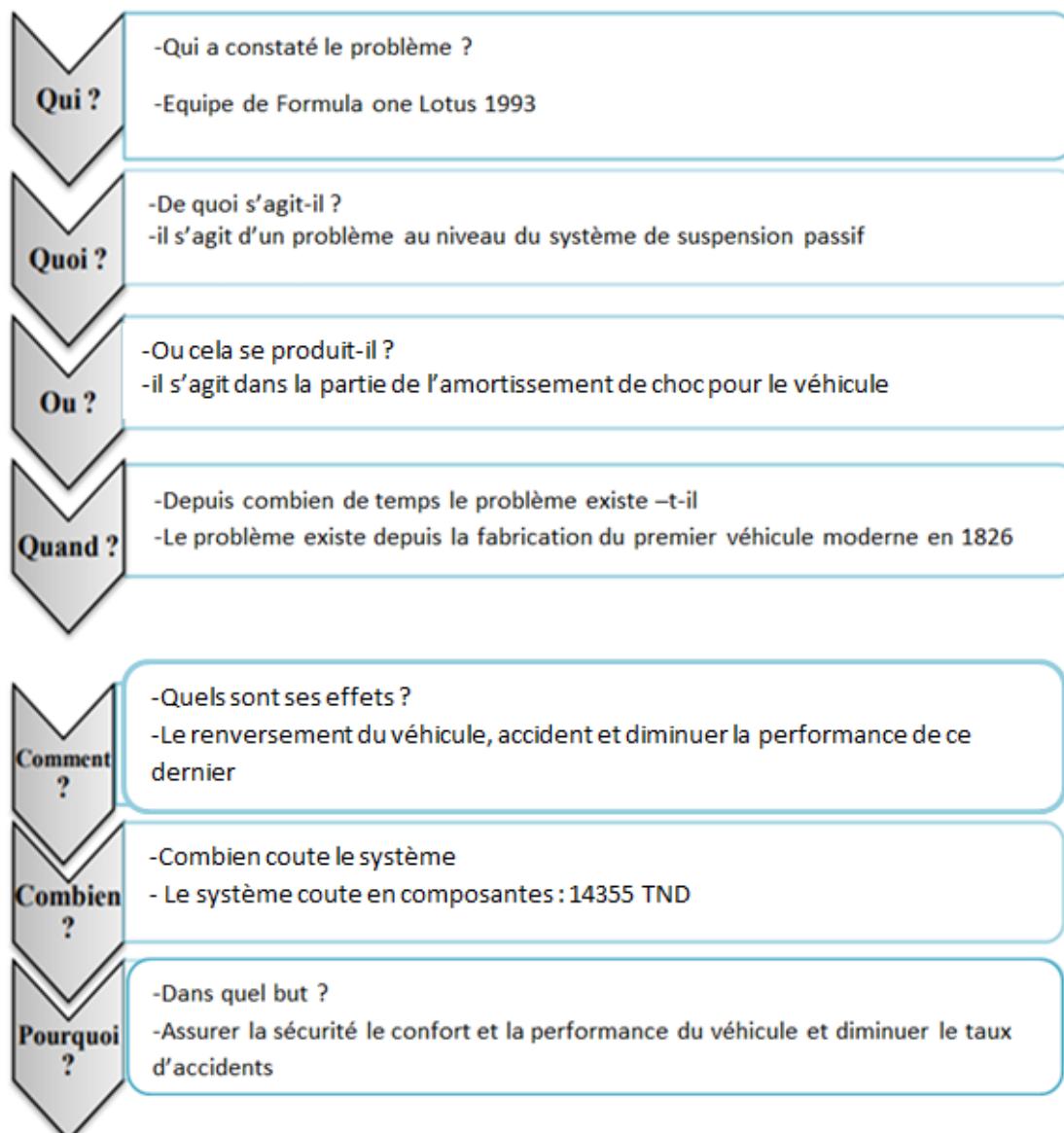


FIGURE 1.6 – Diagramme de QQOQCCP

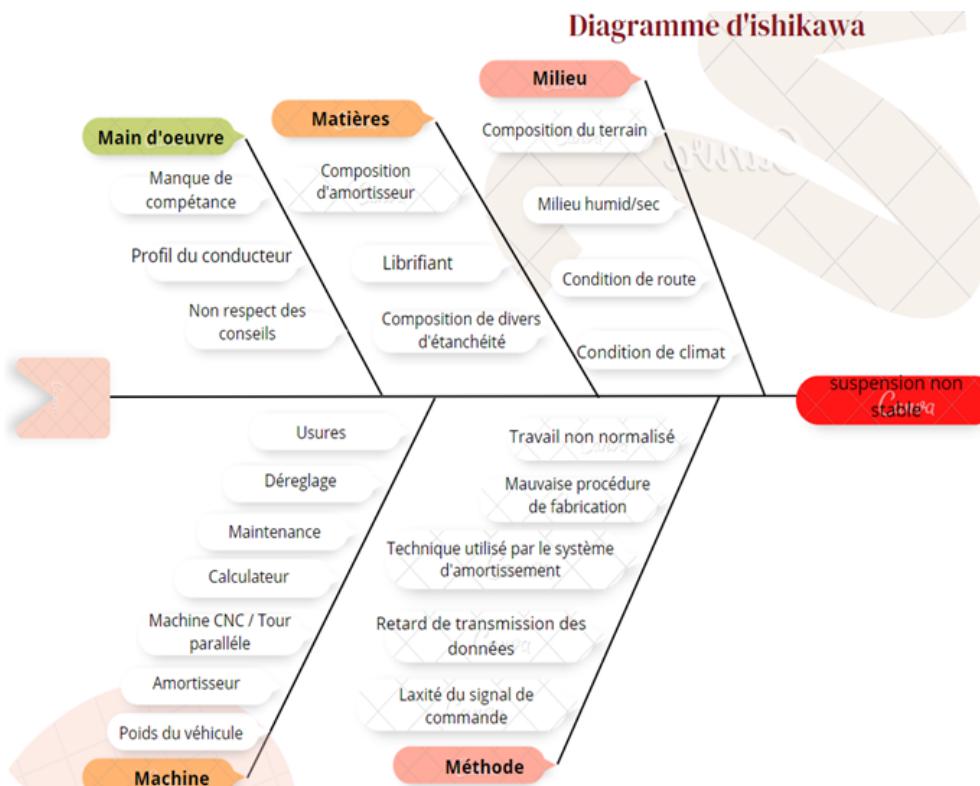


FIGURE 1.7 – Diagramme d’Ishikawa

## 1.4 Cahier des charges

Il s'agit d'améliorer les performances des systèmes de suspension des véhicules à travers l'introduction d'une suspension intelligente. Cette dernière pourra interagir avec le monde en temps réel avec un accès à une base de données sur l'état des routes et la présence d'obstacles et de virages dangereux. De plus, cette suspension intelligente détecte les renversements du véhicule et ajuste le niveau du gyroscope pour maintenir le châssis stable et le centre de gravité centré, même dans les virages qui peuvent générer des forces centrifuges élevées. Cette solution améliore considérablement les performances du système de suspension d'un véhicule, donnant aux passagers la liberté d'atteindre des vitesses élevées dans les virages tout en maintenant le confort et la sécurité. Cela représente une avancée majeure en matière de sécurité routière et offre une meilleure protection contre les accidents et les renversements de véhicules.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude approfondie sur l'état de l'art des systèmes de suspensions automobiles. Nous avons mis l'accent sur les différentes faiblesses et limites de chaque variante. Nous avons également présenté la problématique et nous avons énoncé le cahier des charges par la suite, à savoir le développement d'une suspension

active intelligente pour les véhicules.

Dans le chapitre qui suit, nous nous concentrerons sur l'étude dynamique et cinétique des systèmes de suspensions, en nous intéressant particulièrement au choix des composants. Cette étape est cruciale pour la conception d'une suspension active intelligente performante et efficace. En utilisant les connaissances acquises lors de notre étude de l'état de l'art, nous allons mettre en place une méthodologie rigoureuse pour la sélection des composants, en prenant en compte les contraintes techniques, économiques et environnementales.

# 2

## Étude cinétique et choix des composants

### Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous pencher sur l'étude approfondie de la dynamique et de la cinétique des forces exercées sur le système de suspension et la voiture. Nous allons également nous intéresser au choix méticuleux des composants pour notre projet de suspension active intelligente.

### 2.1 Étude cinétique et dynamique

#### 2.1.1 Calcul de la distance d'arrêt d'un véhicule

La distance d'arrêt pour un véhicule est la somme de la distance de réaction et de la distance de freinage, comme le montre la figure 2.1

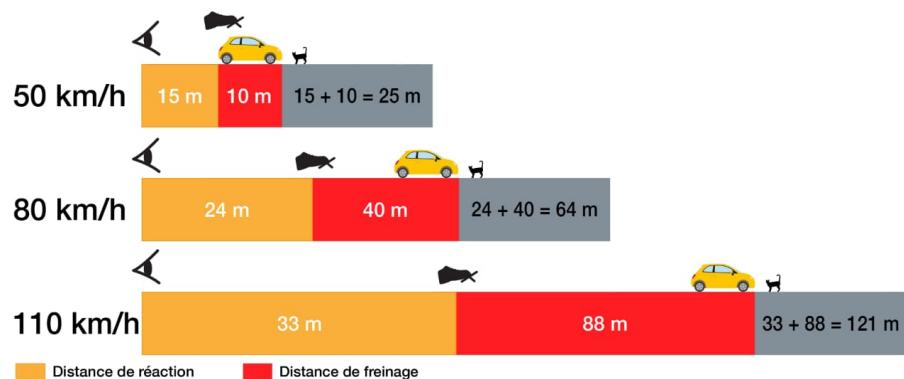


FIGURE 2.1 – Calcul distance d'arrêt

La distance de réaction est la distance parcourue pendant laquelle rien ne se passe et que

l'automobiliste continue à rouler à la même vitesse, avant de réagir en freinant.

En Europe, on adopte le standard de 1 seconde alors que les Américains comptent 2.5 secondes en moyenne, ce qui donne le schéma suivant pour les distances parcourues en fonction du temps de réaction. Toute altération de l'état du conducteur (*téléphone portable, fatigue, alcool, médicaments etc.*) rallonge le temps de réaction, et par conséquent la distance parcourue avant le freinage [7, 8].

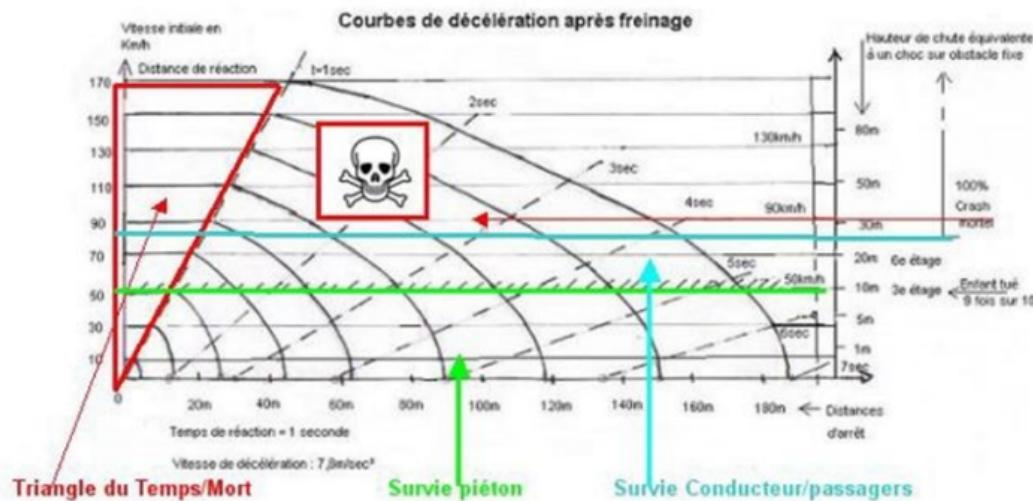


FIGURE 2.2 – Courbes de décélération après freinage

Il est possible de constater sur la figure 2.2 qu'avec un temps de réaction d'une seconde, à la vitesse de 30 km/h, la voiture s'arrête au bout de 13 mètres. A la vitesse de 50 km/h, la voiture commence seulement à freiner à 14 mètres (*distance qu'elle parcourt pendant une seconde avant que le conducteur réagisse*). L'impact sur un obstacle est donc quasiment à la vitesse de 50 km/h, ce qui signifie qu'un véhicule pesant 1 tonne pèsera 25 tonnes à l'impact. Dans ce cas le piéton ou le cycliste n'ont que peu de chances de survivre (*1 sur 10*).

La formule qui exprime la distance de réaction est :

$$Dr = \left( \frac{V}{10} \right) \times 3 \quad (2.1)$$

avec :

*Dr Distance de réaction en m*

*V Vitesse du véhicule en (km/h)*

Le calcul approximatif de la distance d'arrêt, on a le milieu qui joue un rôle important. Pour les routes sèches, cette distance est calculée en divisant la vitesse par 10 et en multipliant le chiffre obtenu par lui-même.

$$Das = \left(\frac{V}{10}\right)^2 \quad (2.2)$$

avec :

*Das* Distance d'arrêt pour une route sèche en m

*V* Vitesse du véhicule en (km/h)

Pour le cas d'une route humide c'est la distance d'arrêt d'une route sèche augmenté de sa moitié

$$Dah = Das + \left(\frac{V}{20}\right)^2 = \left(\frac{V}{10}\right)^2 + \left(\frac{V}{20}\right)^2 \quad (2.3)$$

avec :

*Dah* Distance d'arrêt pour une route humide en m

*Das* Distance d'arrêt pour une route sèche en m

*V* Vitesse du véhicule en (km/h)

Pour le cas d'une route humide, c'est la distance d'arrêt d'une route sèche augmenté de sa moitié

### 2.1.2 La force centrifuge et son impact

La force centrifuge se manifeste lorsqu'un corps est en mouvement circulaire. Elle tend à éloigner le corps du centre de courbure de sa trajectoire. Voici sa formule mathématique :

$$Fc = \frac{mv^2}{r} \quad (2.4)$$

*m* Masse du véhicule

*r* Rayon du virage (braquage)

*v* Vitesse constante du véhicule

Cela peut provoquer un dérapage. Tout comme l'énergie cinétique, doubler la vitesse revient à la quadrupler. Plus la courbe est serrée, plus la force centrifuge est importante. Dans ce cas, le risque de dérapage est très élevé [9].

### 2.1.3 Calcul de la vitesse limite dans un virage

La vitesse sur les virages est limitée en fonction des différentes conditions physiques : type de route, météo, courbure du virage ,inclinaison de la route et coefficient adhérence et autre . Malheureusement, une vitesse élevée est trop souvent une source d'accidents. Il est donc indispensable de revenir sur les règles prévues par le Code de la route et l'attention

dont doit faire preuve le conducteur pour adapter sa vitesse à une situation donnée, Pour obtenir la relation de vitesse limite on a besoin le deux relations suivantes [10, 11]

A l'équilibre on a la force du poids est égale :

$$F = m \times g \times \tan(\Phi + \beta) \quad (2.5)$$

*m Masse du véhicule*

*g 9.81m/s<sup>2</sup>*

*Φ Angle de frottement : tan Φ est égal à 0.3 pour sol mouillé et à 0.65 pour sol sec*

*β Angle de relèvement du virage (nul si virage à plat)*

L'expression de la force centrifuge :

$$Fc = \frac{mv^2}{r} \quad (2.6)$$

*R Rayon du virage (braquage)*

*V Vitesse constante du véhicule*

En roulant dans un virage, nous avons la première force *F* qui maintient le véhicule au sol et la force centripète qui maintient ce dernier en mouvement circulaire. Cette dernière est influencée par l'angle de frottement afin de provoquer un changement d'orientation du vecteur vitesse. Dans l'autre coté, on a la force centrifuge qui tire le véhicule vers l'extérieur. Pour que la voiture reste stable et ne perd pas sa trajectoire, il faut avoir  $Fc < F$  d'où l'expression de la vitesse limite dans ce cas prévient :

$$V < \sqrt{R \times g \times \tan(\beta + \Phi)} \quad (2.7)$$

Nous prenons l'exemple d'un virage à plat de  $R = 20m$  et sol sec. Il faut  $V < 40km/h$ . Dans les mêmes conditions sauf relèvement de  $15^\circ$ , il faut  $V < 53km/h$ .

Pour l'angle de frottement, il est calculé à partir du coefficient de frottement *f* roue/route, et on a  $f = \tan \Phi$ .

La figure 2.3 illustre la représentation physique des forces exercées sur le châssis de la voiture lorsqu'elle parcourt un virage.

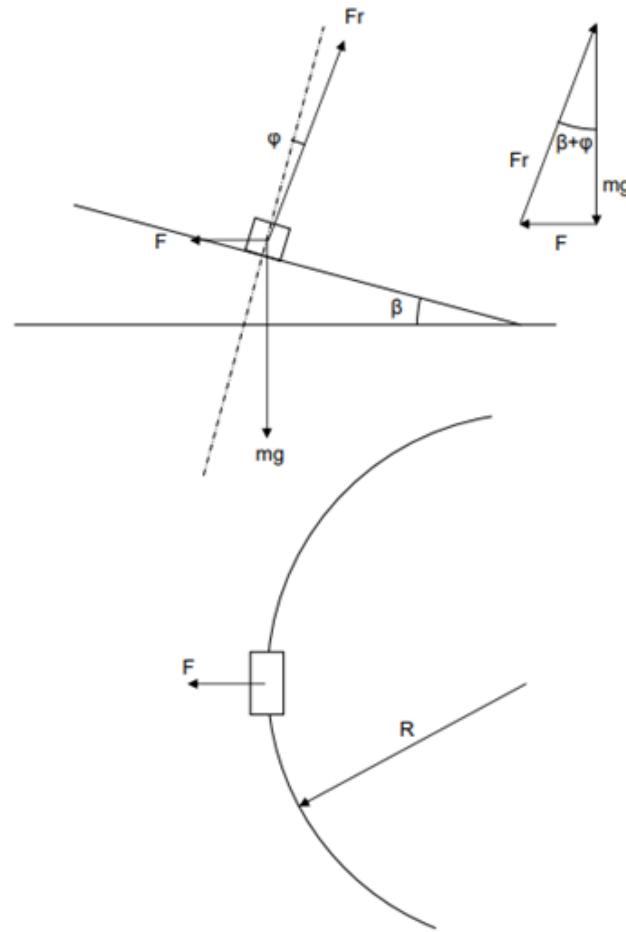


FIGURE 2.3 – Les forces exercés sur un véhicules dans un virage

### Détermination du rayon de braquage à partir du volant

Le rayon du braquage maximal est défini par le rayon de courbure du véhicule lorsque le volant est tourné au maximum. Il détermine le degré de maniabilité du véhicule et ajuste sa trajectoire dans les virages, facilitant ainsi les manœuvres. Enfin, pour notre étude, nous devons déterminer le rayon de braquage afin de pouvoir déterminer la vitesse maximale autorisée dans le virage.

Tout d'abord, l'angle de braquage actuel détermine l'angle de braquage approprié. La formule est donnée par l'équation 2.8 :

$$ABI = AVI \times \frac{ABM}{AVM} \quad (2.8)$$

*ABI Angle de braquage instantanée,*

*AVI Angle de braquage actuel doit être donné par l'utilisateur;*

*AVI Angle du volant instantanée,*

*AVM Angle de volant maximal (900 degrés : 2 tours et demi).*

Étant donné que certains véhicules possèdent actuellement un encodeur fixé au volant, nous extrayons des informations de ce dispositif pour déterminer l'angle de braquage instantané et calculer le rayon de braquage représenté ci-dessous en fonction des dimensions du véhicule :

$$R_{int} = \frac{H}{\tan(ABI \times \alpha)} - \frac{W}{2} \quad (2.9)$$

$$R_{ext} = \frac{H}{\tan(ABI \times \beta)} + \frac{W}{2} \quad (2.10)$$

*H Longueur du véhicule,*

*W Largeur du véhicule,*

*ABI × α Angle de braquage de la roue intérieur,*

*ABI × β Angle de braquage de la roue extérieur,*

*R<sub>int</sub> Rayon de braquage pour la roue intérieur;*

*R<sub>ext</sub> Rayon de braquage pour la roue extérieur.*

En se référant à la figure 2.4, nous pouvons constater la représentation géométrique du rayon de braquage.

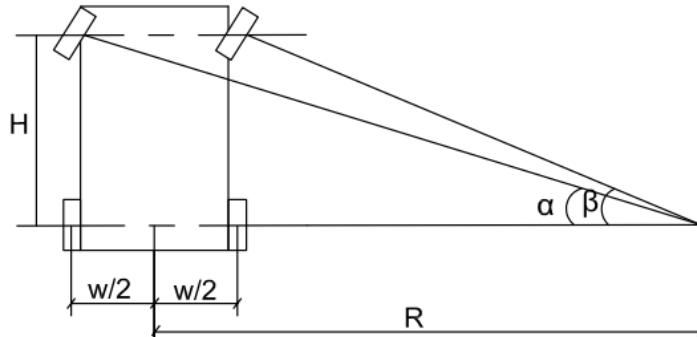


FIGURE 2.4 – Schémas descriptif de la relation entre le rayon de braquage et l'angle de braquage

#### 2.1.4 Impact des ralentisseurs sur l'usager

Un ralentisseur est un passage surélevé sur la chaussée destiné à faire ralentir les automobilistes. Il en existe différents types comme le dos-d'âne ou le ralentisseur trapézoïdale

qui peuvent être équipés d'un passage piéton ou non. Le ralentisseur est un élément de sécurité routière qui protège à la fois les conducteurs et les piétons [12, 13].

Le passage d'un dispositif surélevé engendre une accélération verticale qui crée un sentiment d'inconfort pour les personnes qui se trouvent dans le véhicule. Si la conception du ralentisseur est faite de manière à ce que l'accélération verticale n'augmente pas en même temps que la vitesse de franchissement, le conducteur ne verra aucune raison de ralentir lors du franchissement. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir des dispositifs ralentisseurs qui entraînent une valeur d'accélération verticale croissante avec la vitesse pratiquée.

Mais ce dispositif ne doit pas pour autant provoquer de danger pour les usagers. En résumé, pour qu'un ralentisseur soit efficace, il faut que l'accélération verticale :

- soit faible à faible vitesse de franchissement
- augmente fortement autour de la vitesse de référence
- ne diminue pas au-delà d'une certaine vitesse de franchissement
- soit inférieure à  $1g$  (soit  $9,81m/s^2$ )

Malheureusement, les différences entre les types de véhicules sont le principal problème lorsqu'on souhaite modéliser la relation accélération verticale, ralentisseur et véhicule. Il est en effet difficile d'établir une relation directe et unique entre profils de ralentisseur et accélération verticale qui soit applicable à tous types de véhicules.

Pour cela, on a regroupé les dos d'ânes en trois grandes catégories, résumées dans le tableau 2.1 en respectant les normes et les réglementations des ralentisseurs.

TABLE 2.1 – Classification des dos d'ânes

	Hauteur	Largeur	Longueur	vitesse préconisée par le constructeur
Dos d'âne réglementé	Entre 5cm et 10cm	Entre 42 et 50 cm	Environ 4m	30 km/h
Dos d'âne non réglementé	Entre 10cm et 20cm	Entre 42 et 50 cm	Environ 4m	10 km/h

## 2.2 Choix des composants

### 2.2.1 Choix de l'unité de commande (UCE)

Le choix d'un microcontrôleur dépend des besoins spécifiques du projet de développement. Il y a plusieurs critères à prendre en compte lors de la sélection d'un microcontrôleur :

**Performance** La performance du microcontrôleur dépend de la vitesse de son processeur, de la quantité de mémoire disponible, de la capacité de traitement des données et des périphériques intégrés.

**Consommation d'énergie** Pour les projets alimentés par batterie, il est important de choisir un microcontrôleur qui consomme peu d'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie.

**Coût** Le coût du microcontrôleur est un facteur important à prendre en compte, surtout pour les projets à grande échelle.

**Interfaces de communication** Il est important de choisir un microcontrôleur qui prend en charge les interfaces de communication nécessaires pour le projet, telles que les ports USB, les ports série, les interfaces Ethernet, etc.

**Bibliothèques et outils de développement** Si des bibliothèques et des outils de développement pour un microcontrôleur spécifique sont déjà disponibles, cela peut faciliter le développement et le débogage du code.

**Disponibilité et support** Il est important de choisir un microcontrôleur qui est largement disponible et qui bénéficie d'un support suffisant, afin de faciliter l'achat de composants et d'obtenir une assistance technique en cas de besoin.

Pour choisir le microcontrôleur le mieux adapté au projet, il est important de définir clairement les spécifications du projet et d'identifier les fonctionnalités requises telles que les entrées/sorties, la connectivité, le traitement de données et la gestion de la mémoire. Il est également important de classifier et d'étudier les caractéristiques de chaque cœur de microcontrôleur afin de connaître les avantages et les inconvénients de chacun. Cela permettra de faire un choix approprié pour le projet. Le tableau 2.2 peut être utilisé pour répertorier ces caractéristiques des différents microcontrôleurs.

TABLE 2.2: Caractéristiques des microcontrôleurs

Nom de micro-contrôleurs	Langage de programmation	Connectivité	Ports	Fréquence
Arduino	Peut être programmé en utilisant le langage de programmation Arduino	Une interface USB, une connectivité série,	Ils disposent de plusieurs ports d'entrée/sortie,	Une horloge de 16 MHz
STM 32	C/C <sup>++</sup>	Une interface USB, d'une connectivité série, I2C, spi, FSMC, UART, USART	Ils disposent de plusieurs ports d'entrée/sortie, RTOS	entre 48 MHz et 550 GHz
PIC	C Basic	Une interface série, USB, I2C, SPI, etc.	disposent de plusieurs broches d'entrée/sortie	entre 20 et 50 MHz.

Raspberry pi	Python c/c++ java scratch	HDMI, USB, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	un port GPIO pour l'entrée/sortie de signaux	entre 700 MHz et 1.5 GHz
ESP32	Python	une connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée	Ils disposent de plusieurs ports d'entrée/sortie,	une horloge de 240 MHz
PSOC	C/C <sup>++</sup>	USB,I2C, SPI, UART, CAN, LIN, etc	Ils disposent de plusieurs ports, des ports d'E/S numériques, des ports analogiques, des ports série, jusqu'à 72	entre 24 MHz et 80 MHz

L'Arduino est un microcontrôleur open-source populaire pour les projets de hobbyistes, tandis que le Raspberry Pi est un ordinateur monocarte populaire pour les projets de bricolage. Les microcontrôleurs PIC et ESP32 sont également des options similaires à l'Arduino. Cependant, Le STM32 est plus puissant et plus flexible que les microcontrôleurs d'entrée de gamme comme l'Arduino, et est préféré par les développeurs pour sa puissance de traitement, sa capacité de stockage et la disponibilité d'un large éventail de bibliothèques et d'outils de développement. Mais, il peut être plus difficile à utiliser pour les débutants en raison de sa complexité. Le choix du microcontrôleur dépendra des besoins ainsi que de la complexité requise pour le projet.

Dans notre projet, nous avons utilisé deux cartes STM32 différentes, la STM32F407ZGT6 et la STM446RE. La STM32F407ZGT6 a été utilisée pour piloter le système de suspension. Cette carte offre une grande flexibilité en termes de programmation, grâce à son processeur ARM Cortex-M4 comme le décrit la figure 2.5. De plus, elle dispose de nombreux périphériques intégrés, tels que des convertisseurs analogique-numérique, des interfaces de communication (SPI, I2C, UART), et des timers, ce qui nous permet de réduire les coûts et la complexité du système en évitant d'utiliser des composants externes. Grâce à cette carte, nous avons pu contrôler le système de suspension de manière efficace et précise.

La deuxième carte STM32, utilisée dans notre projet, est la STM32F446RE. Elle a été utilisée pour réagir avec le système de numérisation 3D. STM32F446RET6 à cœur Cortex-M4F cadencé à 180 MHz avec 512 Ko de mémoire flash et 128 Ko de SRAM. L'ART Accelerator™ intégré permet une exécution avec des états d'attente 0 à partir de la mémoire flash, ce qui permet une exécution plus rapide et plus efficace.

La carte NUCLEO-F446RE dispose également d'un débogueur/programmateur ST-LINK/V2-

1 avec connecteur SWD, ce qui facilite l'intégration et le débogage du code. Elle offre jusqu'à 20 interfaces de communication série, telles que USART, IrDA, I<sup>2</sup>C, SPI, SAI, CAN, USB, I<sup>2</sup>S, S/PDIF-Rx, SDIO et HDMI-CEC. Ces interfaces de communication permettent à la carte de communiquer avec une grande variété de périphériques, ce qui en fait représente une option idéale pour les projets nécessitant une connectivité étendue [14].



FIGURE 2.5 – Familles d'ARM Cortex

## 2.2.2 Choix des capteurs

### Choix du capteur gyroscopique

Les accéléromètres et les gyroscopes sont des capteurs couramment utilisés pour mesurer l'accélération et la rotation dans différentes applications, telles que les drones, les téléphones portables, les voitures, les avions et les dispositifs IoT portables. Le gyroscope est un capteur qui mesure la vitesse angulaire d'un corps en rotation, ce qui permet de déterminer l'angle d'inclinaison du corps sur lequel il est fixé. La figure 2.6 illustre les axes employés par le gyroscope.

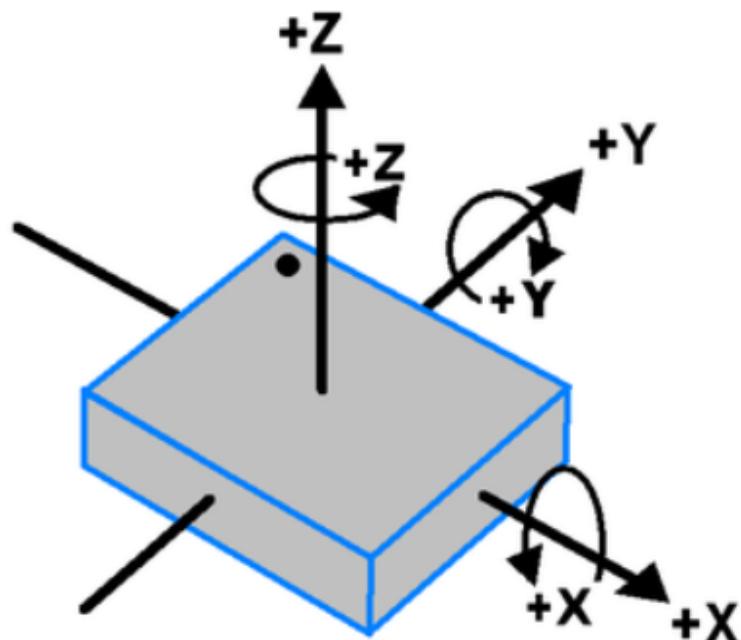
Le choix du capteur gyroscopique dépendra de plusieurs facteurs, notamment :

**Caractéristiques du système** Il est important de choisir un capteur gyroscopique qui convient aux exigences spécifiques du système. Les spécifications importantes à prendre en compte peuvent inclure la plage de mesure, la résolution, la précision, la stabilité et la réponse en fréquence.

**Type de mouvement** Le choix du capteur gyroscopique dépendra du type de mouvement (*angulaires ou linéaires*).

**Environnement d'utilisation** Il est important de choisir un capteur gyroscopique qui convient aux conditions environnementales dans lesquelles il sera utilisé.

**Coût** Le choix du capteur gyroscopique dépendra également du budget. Il est donc important de trouver un équilibre entre les spécifications requises et le coût.



### Orientation et la polarité de la rotation

FIGURE 2.6 – Shématisation d'un capteur gyroscope

Il existe plusieurs types et modèles différents de capteurs gyroscopiques. Nous mentionnons quelques exemples dans le tableau 2.3.

TABLE 2.3 – Types de capteurs gyroscopes

Type de capteur	Caractéristiques	Type de mouvement	Environnement d'utilisation	Coût	Exemple de modèle
Gyroscope à MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)	Petit, léger, faible consommation d'énergie, haute sensibilité, faible coût.	Mesure les mouvements angulaires et linéaires.	Convient pour une utilisation dans des environnements peu exigeants, tels que les smartphones, les drones, les jouets RC, etc.	Relativement peu coûteux	MPU6050 de InvenSense, L3GD20 de STMicroelectronics.
Gyroscope à fibre optique	Haute précision, grande stabilité, large plage de mesure, faible dérive.	Mesure les mouvements angulaires.	Convient pour une utilisation dans des environnements exigeants, tels que les avions, les navires, les satellites, etc.	Relativement élevé	FOG-120 de KVH Industrie, VG170 de Honeywell.
Gyroscope à quartz	Haute précision, grande stabilité, large plage de mesure, faible dérive.	Mesure les mouvements angulaires.	Convient pour une utilisation dans des environnements exigeants, tels que les avions, les navires, les satellites, etc	Relativement élevé.	QRS116 de Systron Donner, QRS11 de Northrop Grumman.
Gyroscope à résonance magnétique	Haute précision, grande stabilité, faible bruit, faible consommation d'énergie	Mesure les mouvements angulaires	Convient pour une utilisation dans des environnements exigeants, tels que les avions, les navires, les satellites, etc.	Relativement élevé.	MRG101 de Colibrys, TG-1000 de Applied Geomechanics.
Gyroscope à coriolis	Haute précision, grande stabilité, faible bruit, large plage de mesure.	Mesure les mouvements angulaires et linéaires	Convient pour une utilisation dans des environnements exigeants, tels que les avions, les navires, les satellites, etc	Relativement élevé	ADXRS646 de Analog Devices, ITG-3701 de InvenSense.

Le choix d'un capteur gyroscopique de types MEMS et d'un module MPU6050 est idéal pour le prototype de notre projet. Tout d'abord, les capteurs MEMS sont très sensibles et précis, ce qui permet une mesure précise des mouvements et des rotations. De plus,

ils sont très compacts, légers et consomment peu d'énergie, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans un prototype compact. En ce qui concerne le module MPU6050, il est équipé à la fois d'un accéléromètre et d'un gyroscope, ce qui permet une mesure des mouvements linéaires et angulaires. De plus, il est doté d'un processeur intégré, facilitant ainsi son intégration dans des systèmes plus complexes. Enfin, le module MPU6050 est relativement peu coûteux par rapport à d'autres solutions de capteur gyroscopique, ce qui en fait un choix économique.

### **Choix du capteur de distance**

Nous avons réalisé une étude comparative entre différents capteurs de distance pour la numérisation 3D. Il existe plusieurs types qui utilisent différentes technologies de mesure pour effectuer certaines tâches spécifiques. Dans le cadre de notre projet, nous avons sélectionné la technologie laser. Pour déterminer le choix le plus approprié de ce capteur, nous avons analysé plusieurs critères clés pour chaque élément, notamment la précision, la vitesse, la portée, la prise en charge de la couleur et le coût. Le tableau 2.4 énumère leurs caractéristiques.

TABLE 2.4 – Caractéristiques des capteur laser

Nom du capteur	Description	Plage de mesure	Précision	Interface de communication	Vitesse de mesure	Angle de vue
Capteur de distance laser lidar	Mesurent la distance en utilisant un faisceau laser qui est projeté sur la cible et détecté par le capteur.	De quelques mètres à plusieurs kilomètres	De l'ordre du millimètre ou moins	Ethernet, RS-232, USB, etc.	Jusqu'à plusieurs milliers de mesures par seconde	Souvent supérieur à 180 degrés
Capteur de distance laser à temps de vol	Mesurent la distance en mesurant le temps nécessaire pour qu'un signal lumineux soit réfléchi sur la cible et revienne au capteur.	De quelques mètres à plusieurs centaines de mètres	De l'ordre du millimètre ou moins	USB, RS-232, I2C etc	Jusqu'à plusieurs milliers de mesures par seconde	Souvent inférieur à 60 degrés
Capteur de distance laser triangulaire	Mesurent la distance en utilisant la triangulation laser, où un faisceau laser est projeté sur la cible et la position de la cible est calculée en fonction de l'angle de réflexion.	De quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres	De l'ordre du millimètre ou moins	USB, RS-232, etc.	Jusqu'à plusieurs milliers de mesures par seconde	Souvent inférieur à 30 degrés
Capteur de distance laser à balayage	Mesurent la distance en utilisant un système de balayage pour balayer une zone plus large et mesurer la distance en fonction de la position du faisceau laser.	De quelques mètres à plusieurs centaines de mètres	De l'ordre du millimètre ou moins	Ethernet, RS-232, USB, etc	Jusqu'à plusieurs centaines de mesures par seconde	Souvent supérieur à 180 degrés

Le capteur de distance laser VL53L0X est un choix approprié pour la numérisation de

routes en raison de ses spécifications techniques et de ses avantages fonctionnels. Tout d'abord, ce capteur (TOF) est compact et facile à intégrer dans des systèmes embarqués tels que des robots ou des drones. Il est également abordable et convient à des budgets restreints.

En termes de spécifications techniques, le capteur de distance laser VL53L0X a une portée allant jusqu'à 2 mètres avec une précision allant jusqu'à 1,5 mm. Cela signifie qu'il peut capturer des données précises sur des surfaces de route de différentes tailles et formes.

De plus, le capteur VL53L0X est capable de fonctionner dans des conditions de faible luminosité, ce qui le rend idéal pour la numérisation de routes dans les environnements obscures. Il utilise également une technologie de mesure de temps de vol (ToF) pour mesurer la distance, ce qui lui permet de capturer des données à une vitesse élevée [15]. La figure 2.7 illustre l'architecture et le principe de fonctionnement du capteur VL53L0X.

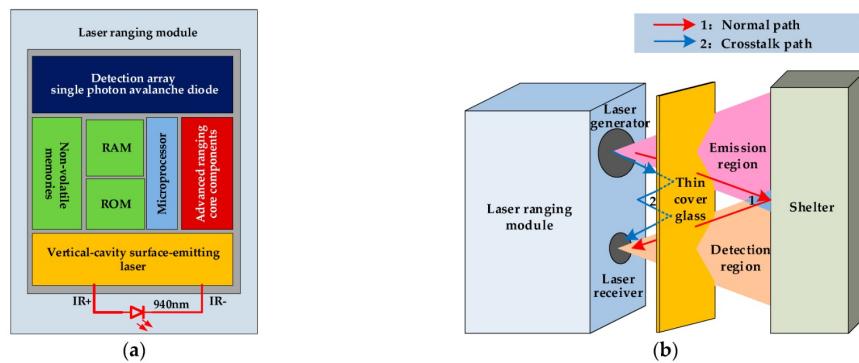


FIGURE 2.7 – Principe de fonctionnement et architecture du capteur laser VL53L0X

Dans la réalisation de notre projet, on a complémenter le capteur VL53L0X par deux capteurs ultrason HC-SR04. En utilisant les deux types de capteurs, on peut combiner les avantages de chacun pour obtenir une meilleure précision et une couverture plus large de l'environnement.

### 2.2.3 Choix de l'actionneur

Différents types d'actionneurs sont disponibles sur le marché, tels que les servomoteurs, les moteurs pas à pas, les moteurs à courant continu, les vérins électriques et les moteurs linéaires.

Le choix d'un moteur pas à pas peut être une bonne option car le but c'est le contrôle précis du mouvement de rotation . Ils sont également capables de maintenir une position sans consommer d'énergie supplémentaire.

Il existe deux types de moteur pas à pas : unipolaires et bipolaires, comme illustré par la figure 2.8. Bien qu'ils partagent certaines similitudes, ils présentent également des différences significatives en termes de conception, de fonctionnement et de performances.

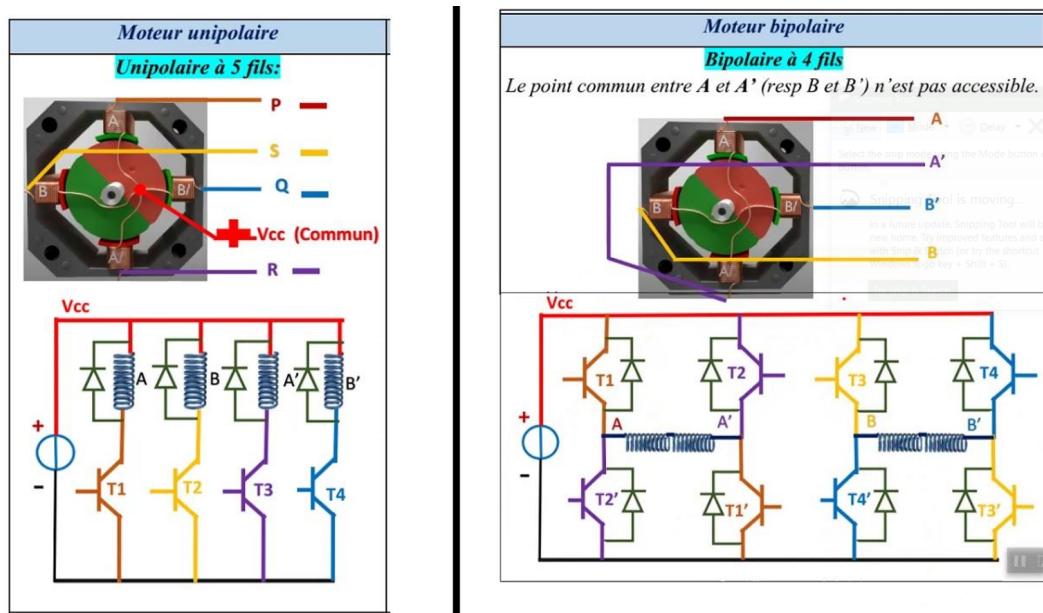


FIGURE 2.8 – Moteurs pas à pas bipolaires et unipolaires

Dans notre projet, le choix d'un moteur pas à pas bipolaire est adéquat pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ils offrent une forte puissance de couple à basse vitesse, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant un positionnement précis. D'autre part, les moteurs pas à pas bipolaires sont généralement plus puissants et plus efficaces que les moteurs pas à pas unipolaires. Ils sont ainsi adaptés pour les applications nécessitant une force plus importante. De plus, ils sont disponibles dans une large gamme de tailles et de puissances pour répondre à différents besoins. Cela signifie qu'on peut choisir le moteur pas à pas bipolaire qui convient le mieux, en fonction de la charge maximale, de la vitesse de déplacement et de la précision de positionnement nécessaires.

La vitesse de rotation est un élément clé dans le choix de l'actionneur pour la modélisation du système de suspension intelligent. Le moteur pas à pas bipolaire Nema 14 semble être une option appropriée, car il offre une vitesse maximale de 3000 tours par minute et un couple de maintien de 13.7N.cm, ce qui devrait permettre au système de réagir rapidement aux variations de la route. De plus, le pas angulaire de  $1.8^\circ$  ( $+/-5$  et le nombre de pas de 200 devraient permettre une précision de mouvement suffisante pour atteindre les angles nécessaires. Enfin, le voltage standard de 12V et le dimensionnement compact du moteur sont également des avantages pour un prototype de ce type [16].

Pour commander un moteur Nema 14, l'utilisation d'un pilote est nécessaire. Il existe plusieurs choix de pilotes, et dans notre cas, nous avons opté pour le A4988. Ce pilote est capable de fournir jusqu'à 2A de courant par bobine du moteur cela signifie que si on utilise un moteur pas à pas bipolaire à deux phases, le A4988 peut fournir jusqu'à 4A de courant au total. Ceci est suffisant pour le Nema 14 qui fait appel à une intensité de courant de 1A par phase. De plus, le A4988 disposant d'un contrôle de courant réglable, permet d'optimiser le fonctionnement du moteur pour des performances maximales. En

ajustant le courant fourni au moteur, il est possible de réduire la chaleur et le bruit générés, tout en garantissant le mouvement précis et fluide du moteur. La figure 2.9 illustre la schématisation du driver A4988 .

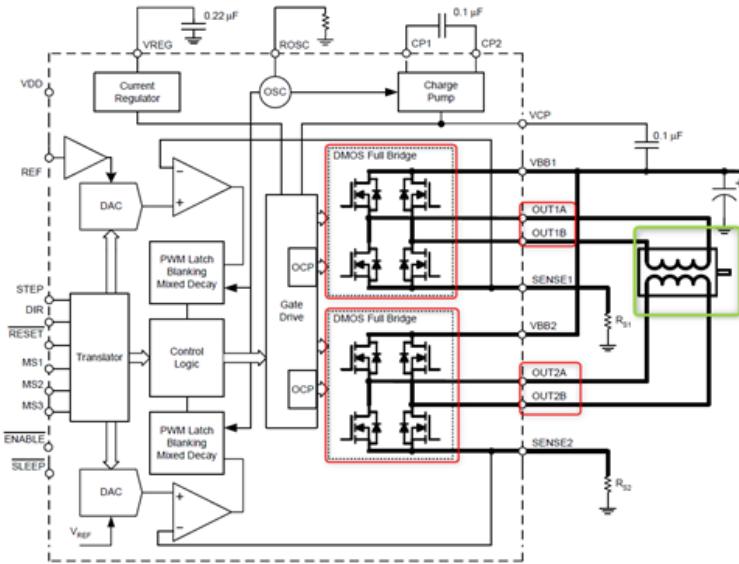


FIGURE 2.9 – Schématisation du pilote A4988

#### 2.2.4 Choix de l'interface IHM

Le choix de l'interface IHM est crucial dans la conception d'un système électronique car elle assure la communication entre l'utilisateur et le système. Les écrans TFT (*Thin Film transistor*) sont souvent un choix approprié pour cette tâche en raison de leur disponibilité sur le marché et de la variété des modèles disponibles [17].

En outre, les écrans TFT offrent généralement des fonctionnalités supplémentaires telles que des modules de touches intégrés et des microcontrôleurs pour faciliter la programmation et soulager la charge sur l'UCE (*unité centrale de traitement*). Pour choisir un écran TFT, il est important de considérer la taille, la résolution, la luminosité, le contraste, le temps de réponse, l'angle de vue et l'interface. Le coût et la disponibilité de l'écran sont également des facteurs à prendre en compte.

Dans notre cas, nous avons choisi le TFT TJC4827T043, un écran TFT de haute qualité offrant de nombreux avantages. Avec une résolution de  $480 \times 272$  pixels et une luminosité de  $400cd/m^2$ . Cet écran offre une qualité d'affichage supérieure à celle des écrans LCD traditionnels. Son temps de réponse de  $25ms$  en fait un choix idéal pour les applications nécessitant une mise à jour rapide de l'affichage.

L'écran tactile capacitif intégré permet une interaction facile et intuitive avec l'utilisateur, tandis que son contraste élevé le rend adapté à des applications nécessitant des couleurs précises et un affichage clair. De plus, il possède des fonctionnalités supplémentaires telles que des interfaces utilisateur graphiques conviviales, des microcontrôleurs intégrés et un

logiciel de conception d'interfaces utilisateur.

Les écrans TFT ont également une consommation d'énergie relativement faible par rapport à d'autres types d'écrans. Enfin, ils sont durables et résistants aux chocs et aux vibrations. La figure 2.10 montre un aperçu de cet écran.

- Resolution :480 x 272
- 16M Flash, 2KByte RAM, 65k colors

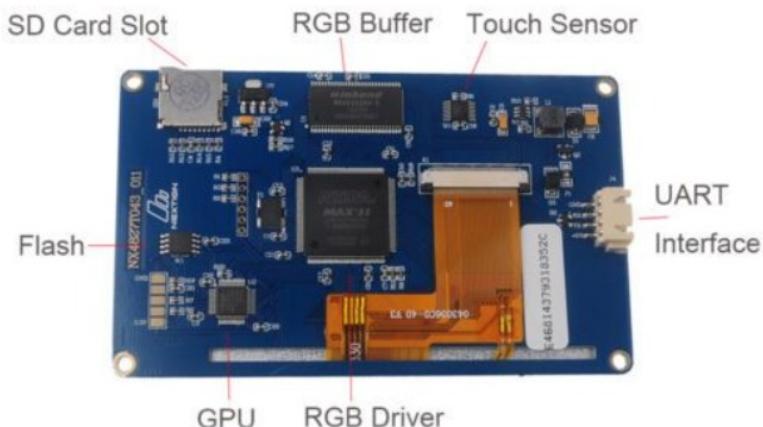


FIGURE 2.10 – TFT TJC4827T043

### 2.3 Communication entre les composants

Nous avons choisi d'utiliser le protocole de communication I2C entre les capteurs et la carte STM32 en raison de ses nombreux avantages, tels que sa facilité de mise en œuvre, sa rapidité de transmission de données précises et cohérentes, sa communication bidirectionnelle et sa faible consommation d'énergie. De plus, la possibilité de connecter plusieurs composants électroniques à un même bus de données offre une grande flexibilité pour l'extension future de notre système.

Pour l'affichage sur l'écran TFT, nous avons utilisé la communication UART pour sa transmission rapide et fiable de données sans erreurs. L'UART offre également une communication bidirectionnelle précise, crucial pour un affichage en temps réel. De plus, elle offre une grande flexibilité pour l'affichage du contenu sur l'écran TFT grâce à la possibilité d'envoyer des commandes de contrôle pour modifier l'affichage.

Enfin, nous avons utilisé les entrées/sorties GPIO de la carte STM32 pour interagir avec d'autres composants électroniques de notre système. Les GPIO offrent une grande flexibilité pour la configuration des broches en entrée ou en sortie, permettant ainsi un contrôle précis des actionneurs .La figure 3.1 présente une illustration de ces communications.

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis de réaliser une analyse approfondie des forces et des phénomènes physiques qui agissent sur la voiture dans chaque situation dangereuse, ainsi que des vitesses recommandées pour chaque scénario. Nous avons également dimensionner les composants que nous utiliserons pour la conception de notre suspension active intelligente. Le prochain chapitre sera consacré à la phase de conception et de réalisation de notre prototype. Cette étape crucial nous permettra de concrétiser les résultats de nos analyses et de nos choix de composants, en produisant un modèle de suspension active intelligente fonctionnel et performant.

# 3

## Conception et réalisation

### Introduction

Ce chapitre est dédié à la conception et à la réalisation de notre solution. Nous détaillerons toutes les étapes nécessaires pour la mise en place concrète de notre système de suspension intelligente et de scan routier, en montrant comment les différents composants interagissent.

### 3.1 Principe de fonctionnement du système de suspension intelligent

Le schéma synoptique 3.1 que nous avons élaboré présente de manière claire et organisée les différentes étapes de notre système. Le processus débute avec les capteurs qui mesurent l'état de la route et du châssis de la voiture. Les données collectées sont transmises à la carte STM32, qui remplit le rôle du contrôleur et procède au traitement des informations avant de donner des ordres aux actionneurs pour la réalisation d'actions spécifiques. Les effecteurs interviennent par la suite pour produire une transformation de mouvement des actionneurs. Enfin, les résultats de traitement sont affichés sur un interface TFT, qui permet une visualisation claire et concise des informations collectées.

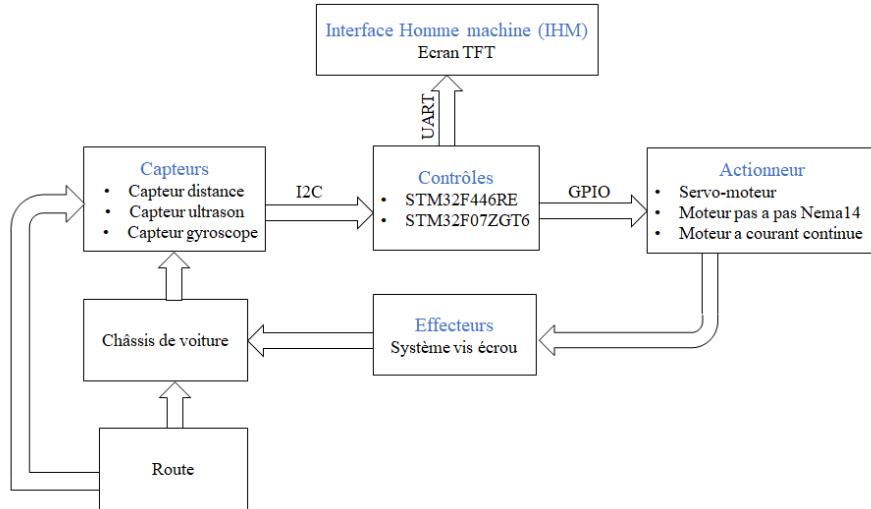


FIGURE 3.1 – Schéma synoptique

## 3.2 Conception mécanique

### 3.2.1 Conception de l'effecteur

Dans le cas du prototypage du système de suspension intelligent, il est nécessaire de modéliser les amortisseurs à actuation hydraulique avec un système qui effectue un mouvement de translation en fonction de l'information fournie par l'UCE. Dans la partie précédente, nous avons choisi l'actionneur qui effectue un mouvement de rotation en fonction de l'angle pré calculé. Le problème maintenant est de transformer ce mouvement en un mouvement de translation. En effet, pour transformer le mouvement rotatif du moteur pas à pas en un mouvement linéaire de translation, il est nécessaire d'utiliser un système mécanique approprié.

Parmi les systèmes mécaniques disponibles, le système vis-écrou est souvent utilisé car il offre une grande fiabilité et permet d'exercer des forces et des pressions importantes. Ce système est composé d'une vis et d'un écrou qui se déplacent l'un par rapport à l'autre pour convertir le mouvement rotatif en un mouvement linéaire. Le fonctionnement du système vis-écrou est simple : lorsque la vis tourne, elle entraîne l'écrou qui se déplace le long de la vis. En fonction de la géométrie de la vis et de l'écrou, le mouvement de rotation de la vis est transformé en un mouvement de translation de l'écrou [?].

Ce système présente l'avantage de pouvoir être utilisé pour des mouvements de précision, car il permet de contrôler la distance parcourue par l'écrou avec une grande précision. De plus, il est également possible d'utiliser des vis et des écrous de différentes tailles pour adapter le système à différents niveaux de charges et de vitesses de déplacement. Ce système est aussi relativement simple à utiliser et nécessite peu d'entretien. Il est relativement peu coûteux par rapport à d'autres systèmes mécaniques de mouvement linéaire. Dans certains systèmes, c'est la vis qui joue le rôle d'organe moteur, et dans ce cas, le mouvement

de rotation de la vis se transforme en un mouvement de translation pour l'écrou, comme présenté par la figure 3.2.

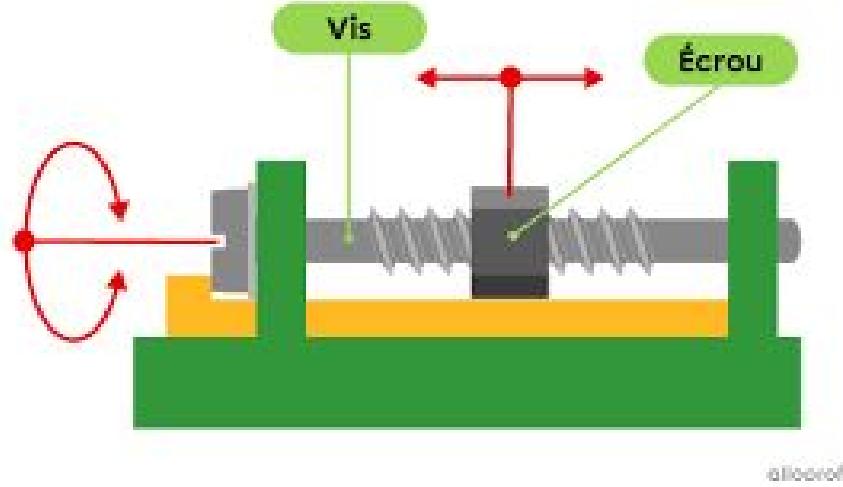


FIGURE 3.2 – Système vis écrou (arbre moteur)

Dans d'autres systèmes, tel que celui de la figure 3.3, c'est plutôt l'écrou qui constitue l'organe moteur. Dans ce cas, le mouvement de rotation de l'écrou se transforme en mouvement de translation pour la vis.

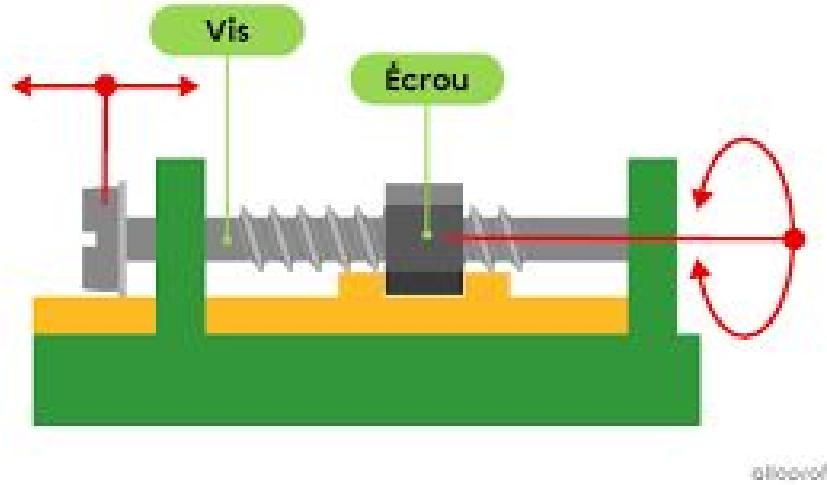


FIGURE 3.3 – Système vis écrou (écrou moteur)

Un système vis-écrou peut être représenté par le schéma 3.4.

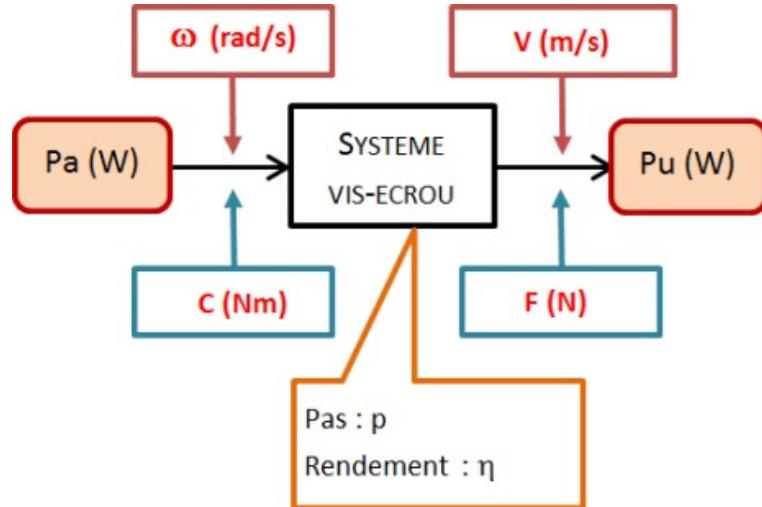


FIGURE 3.4 – Système vis-écrou

**Entrée** Énergie de rotation, caractérisée par une vitesse angulaire  $\omega$  et un couple  $C$ .

**Sortie** Énergie de translation, caractérisée par une vitesse linéaire  $V$  et une force  $F$ .

#### Paramètres

1. Le pas (*déplacement relatif (en m) pour une rotation d'un tour)*,
2. Le rendement (*faible pour une vis à billes, important pour une vis classique*).

L'écrou avance d'un pas pour 1 tour de vis, soit  $2\pi$  radians. On obtient ainsi une longueur parcourue :

$$L = p \times \frac{\alpha}{2\pi} \quad (3.1)$$

où  $\alpha$  dénote l'angle parcourue. En dérivant, on obtient la relation entre vitesses suivante :

$$V = p \times \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.2)$$

Nous avons choisi d'utiliser une tige filetée de pas  $8mm/tour$ , accompagnée d'un accouplement flexible T5/T8, pour transmettre le mouvement rotatif entre l'arbre moteur et la tige filetée. Cet accouplement permet de compenser les désalignements entre ces deux arbres, notamment les désalignements angulaires, parallèles et axiaux. Nous avons également installé un palier KP08 fixé dans une plateforme pour guider le mouvement de rotation et minimiser les vibrations. La vitesse linéaire maximale de notre système est de  $400mm/s$ . La figure 3.5 illustre la conception et l'assemblage de l'effecteur.

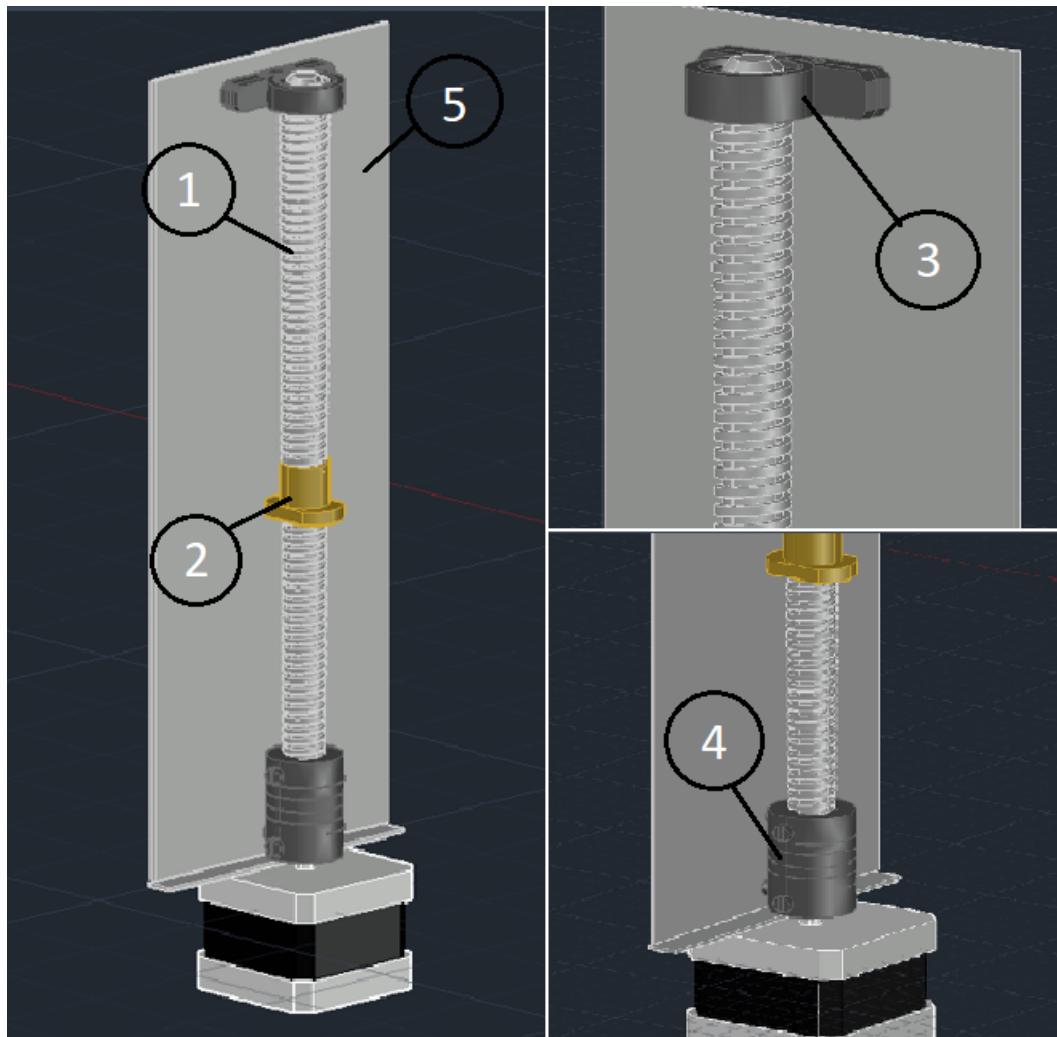


FIGURE 3.5 – Conception et assemblage de l'effecteur

Le tableau 3.1 décrit la nomenclature de la figure 3.5.

TABLE 3.1 – Légende de la figure 3.5

Numéro du composant	Nom du composant	Quantité
1	Tige filetée T8	1
2	Écrou T8	1
3	Palier KP08	1
4	Accouplement T5/T6	1
5	Support	1

### 3.2.2 Conception du socle

Notre prototype comporte deux étages :

- le premier étage consiste à modéliser la suspension, le bas de caisse et les roues du véhicule,

- le deuxième étage modélise le châssis et la carrosserie du véhicule où les passagers et le conducteur sont assis.

On a choisi de réaliser ces plateformes avec du plexiglas pour éviter les courts circuits qui peuvent se générer en cas de mal isolation des fils. La figure 3.6 illustre la conception du socle avec le logiciel Autocad.

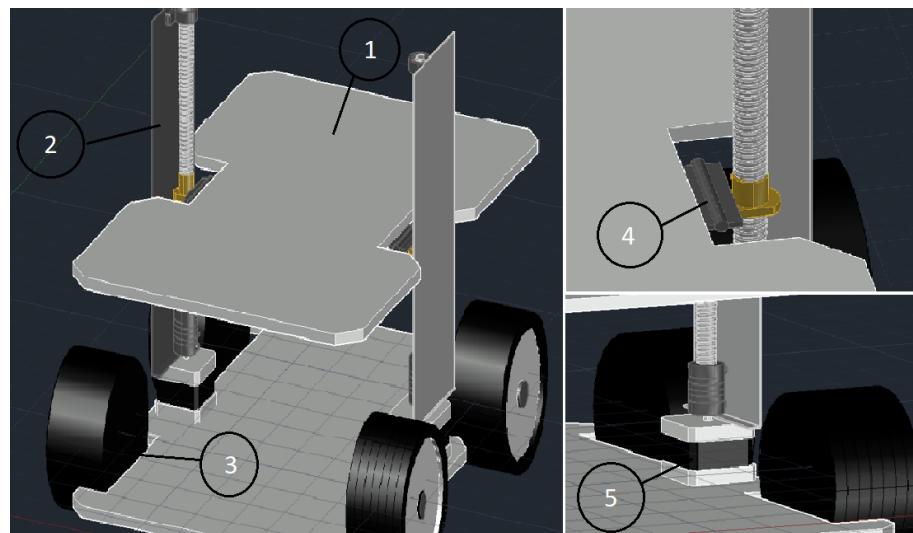


FIGURE 3.6 – Conception du socle du robot

Le tableau 3.2 décrit la nomenclature de la figure 3.6

TABLE 3.2 – Légende du socle du robot

Numéro du composant	Nom du composant	Quantité
1	Plateforme	2
2	Effecteur	2
3	Roue	4
4	Charnière	2
5	Moteur pas à pas Nema 14	2

### 3.2.3

## 3.3 Conception électronique et programmation

### 3.3.1 Conception électronique

En raison de la complexité des tâches, qui peut diminuer les performances et la stabilité du fonctionnement général du système, nous avons décidé de diviser notre application en deux cœurs.

Dans le premier cœur, nous avons commandé deux moteurs pas à pas Nema 14 afin qu'ils puissent effectuer la correction de l'angle capté par le gyromètre dans l'étage du châssis du

robot. Cependant, lors de ce processus, nous avons rencontré des parasites captés par le capteur lors des vibrations du socle à grande vitesse. Pour éviter ces parasites nous avons divisé les échantillons en deux intervalles :  $[-90; -3 \cup 3; 90]$  (*vitesse rapide*) et  $[-3; 3]$  (*vitesse faible*).

Dans le premier intervalle, la correction du niveau du châssis se fait à une vitesse basse étant donné que l'angle attendu est proche de 0. Dans le deuxième intervalle, la vitesse sera plus rapide. Cette méthode nous permet d'améliorer la sensibilité ainsi que la précision de la régulation. La figure 3.7 décrit la conception électronique et le câblage des éléments nécessaires pour effectuer cette tâche.

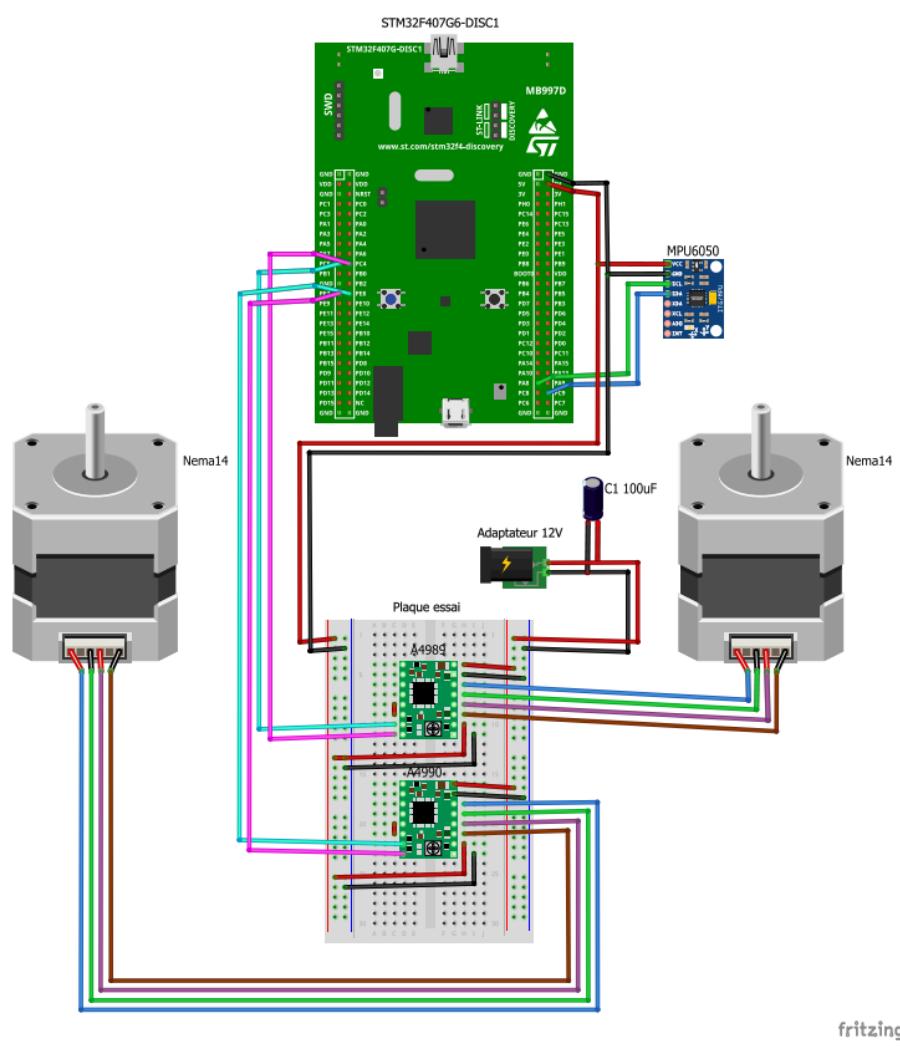


FIGURE 3.7 – Schématisation du circuit du premier étage (partie actionneur linéaire)

Pour simuler le parcours du véhicule, nous avons commandé deux moteurs à courant continu à travers le module Bluetooth HC-06. Nous avons implémenté les données de vitesse de ces roues pour faire défiler l'axe Y de la modélisation 3D de la route. La schématisation 3.8 décrit le câblage de ce circuit.

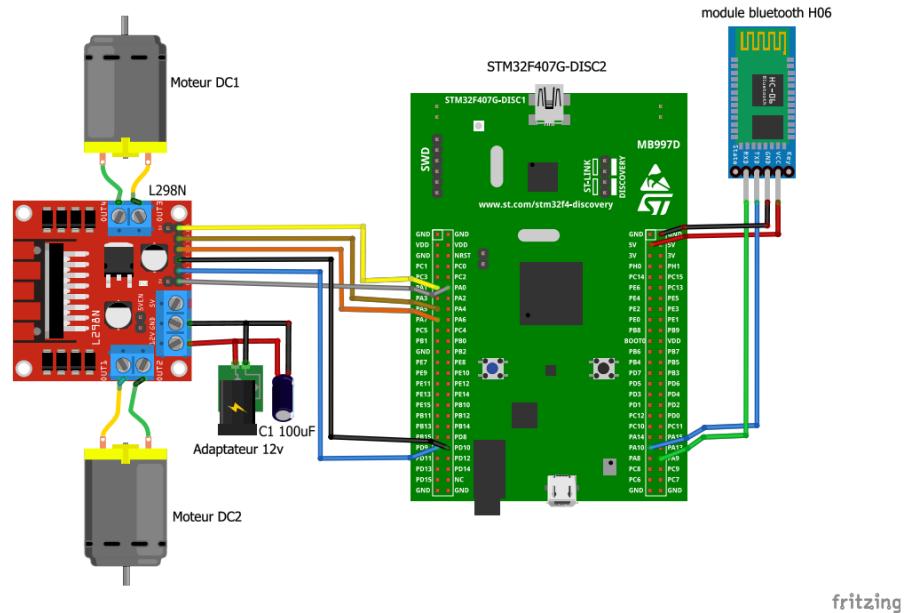


FIGURE 3.8 – Schématisation du circuit du premier étage (partie du moteur à courant continu)

La figure 3.9 démontre la finalisation de la conception électrique pour le premier étage du prototype

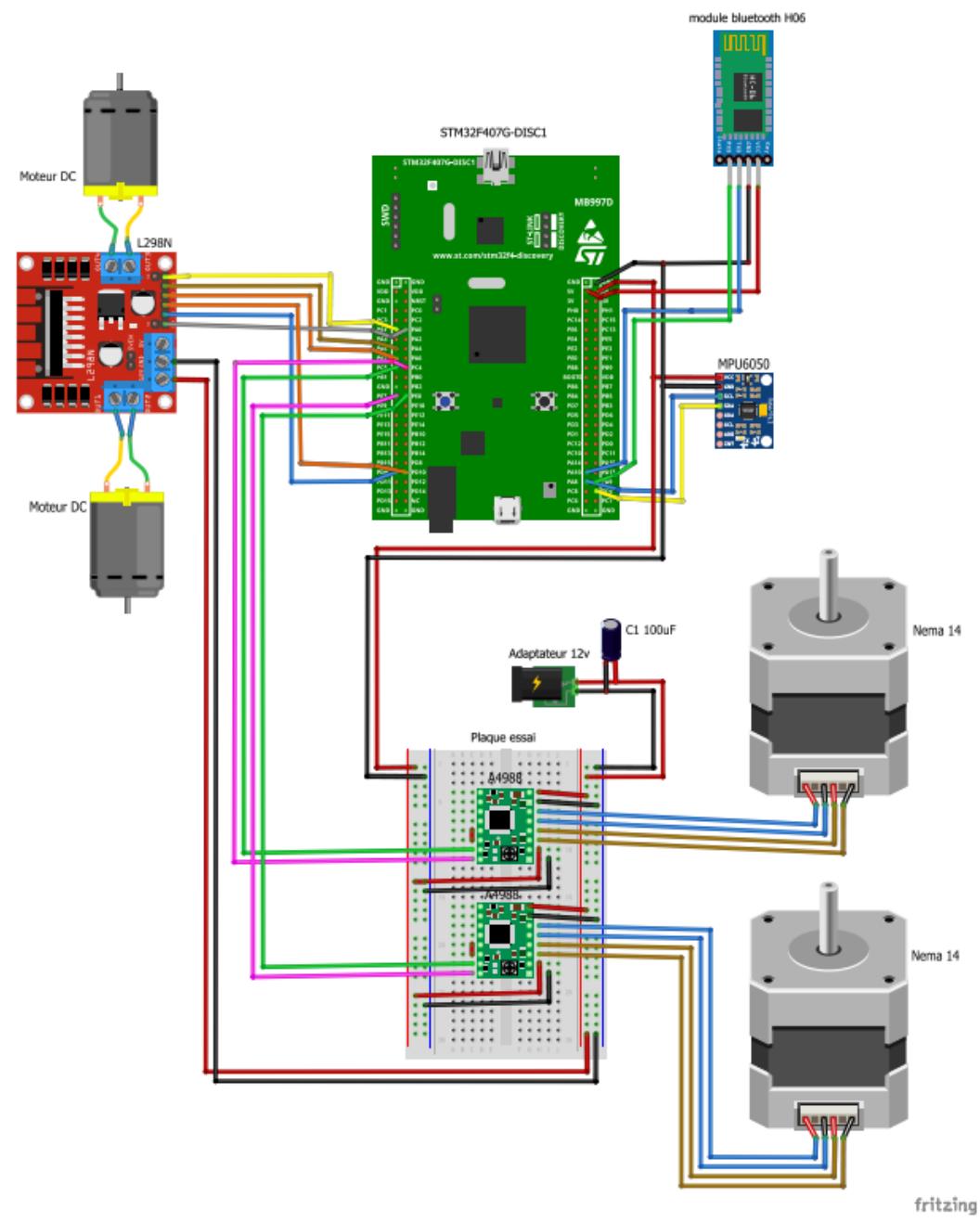


FIGURE 3.9 – Schématisation du circuit du premier étage

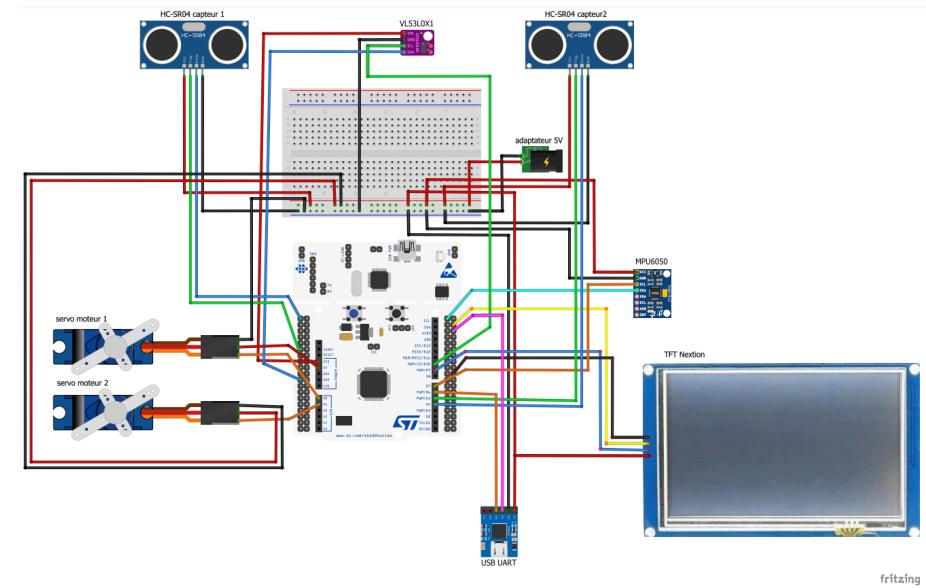


FIGURE 3.10 – Schématisation du circuit du deuxième étage

Pour réaliser un système de scan de route, il est nécessaire d'utiliser un capteur de distance capable de balayer toute la largeur de la voiture. Ce balayage est effectué par un servomoteur qui tourne de 180 degrés dans les deux directions. Le capteur est conçu pour avoir un angle de vue variable en fonction de la vitesse du véhicule, et cet angle est contrôlé par un deuxième servomoteur tournant selon l'angle  $\alpha$  calculé.

Bien que le capteur TOF soit capable de détecter des distances importantes, il est parfois nécessaire d'utiliser des capteurs supplémentaires pour détecter les obstacles plus proches de la voiture. Pour cela, deux capteurs à ultrasons ont été utilisés. En fonction de l'emplacement choisi, ces capteurs peuvent être placés à l'avant, à l'arrière ou sur les côtés du châssis. Ainsi, en combinant les données obtenues à partir du capteur laser et des capteurs à ultrasons, il est possible d'obtenir une image plus complète de l'environnement .

Afin de permettre une interaction entre le conducteur et la voiture, il est nécessaire de mettre en place une interface à l'aide d'un écran TFT. Cette interface permettra également d'obtenir l'état des amortisseurs , visualiser l'inclinaison du châssis et de recevoir des alertes en cas de présence d'obstacles. Il serait également intéressant de connaître la vitesse limite recommandée dans ces situations.

Pour faciliter la transmission de ces informations, il est possible de les envoyer de la carte STM32 F446RE à l'écran TFT via un port USB UART. Grâce à cette interface, le conducteur peut obtenir des informations en temps réel sur l'état de la route et de la voiture, ce qui contribue à améliorer la sécurité et la qualité de la conduite. La figure 3.10 illustre la schématisation du circuit du deuxième étage.

### 3.3.2 Développement du programme

Nous avons préparé des diagrammes afin de visualiser de manière claire et précise les différentes étapes du processus, ainsi que les relations et les interactions entre les différents éléments du système. Elles permettent également de déterminer les conditions nécessaires à la réalisation de chaque étape et d'anticiper les éventuels problèmes ou dysfonctionnements.

L'algorigramme de la figure 3.11 illustre le fonctionnement du moteur pas à pas en fonction de l'angle du gyromètre.

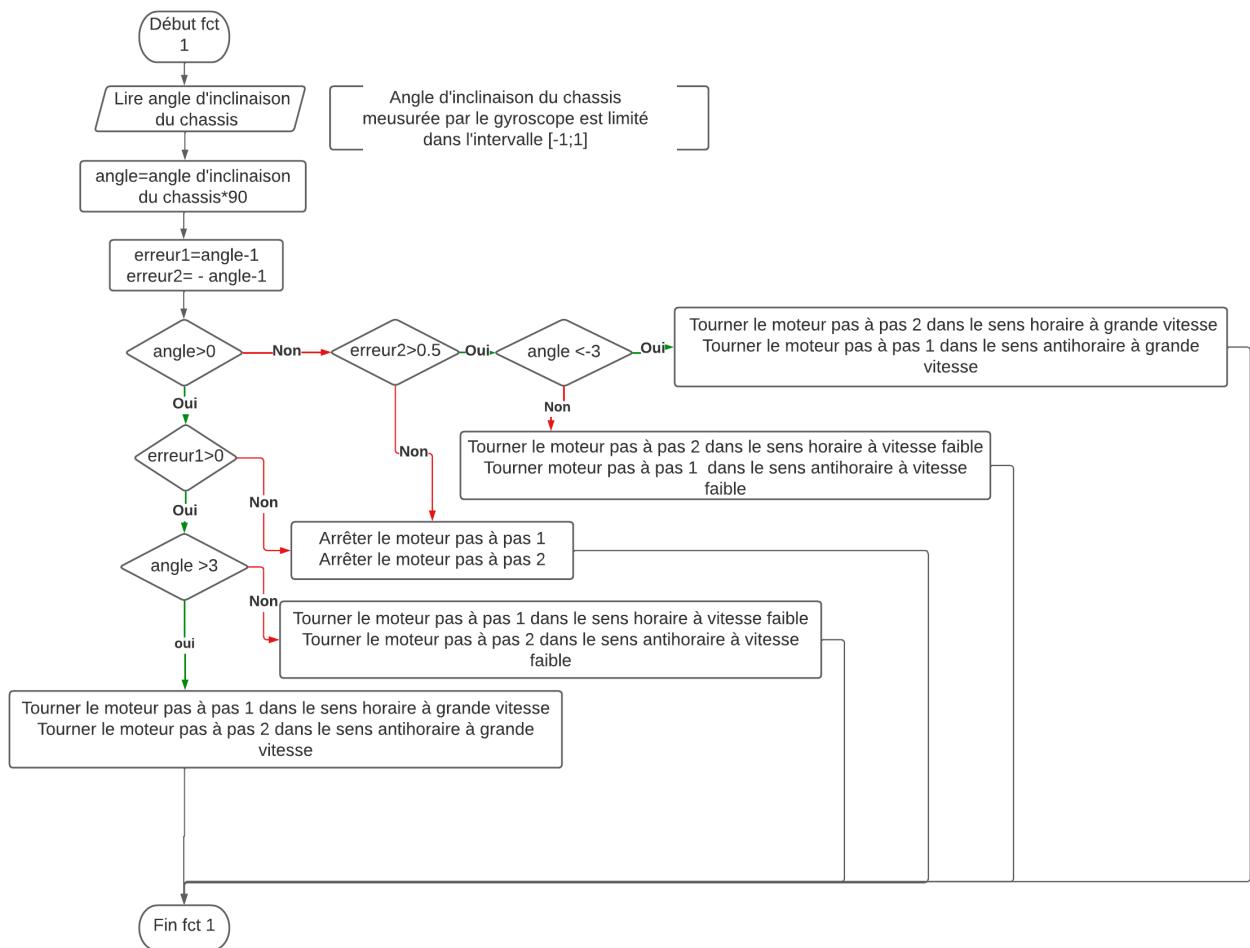


FIGURE 3.11 – Algorigramme de fonctionnement des moteurs pas à pas

Le diagramme présenté dans la figure 3.12 décrit le mode de fonctionnement d'un moteur à courant continu contrôlé via Bluetooth pur simuler l'avancement du véhicule. La figure 3.13 illustre les différentes étapes du programme de la carte F407 qui agit en tant que maître pour les deux programmes esclaves présentés précédemment.

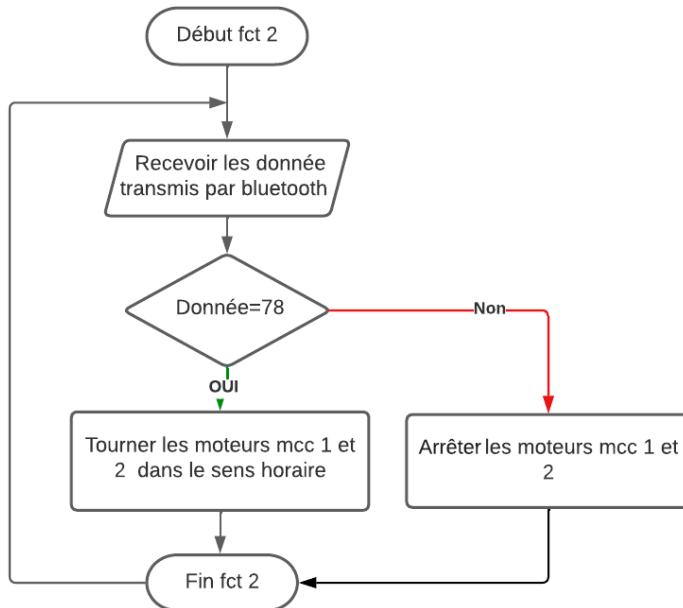


FIGURE 3.12 – Algorigramme de fonctionnement des moteurs à courant continu

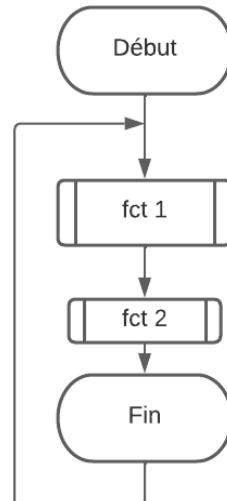


FIGURE 3.13 – Algorigramme de fonctionnement du système de suspension

La figure 3.14 met en évidence le programme de la carte F446, qui décrit les différentes étapes de fonctionnement du système de balayage routier ainsi que les données transmises et reçues par l'interface TFT.

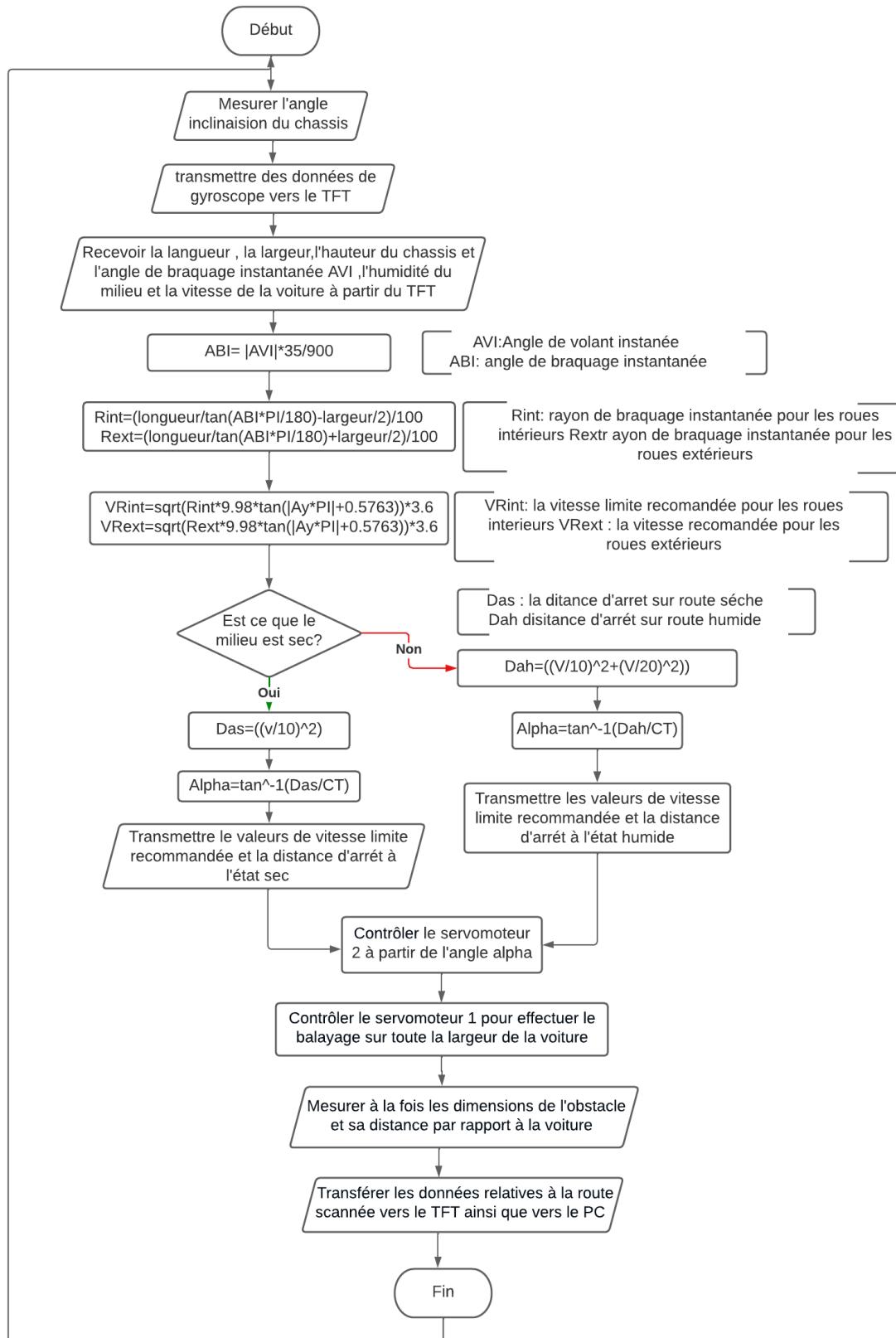


FIGURE 3.14 – Algorigramme de fonctionnement de scan de route et de l'interface

Afin de traduire nos algorigrammes en langage de programmation adapté à la carte STM32, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel STM32CubeIDE. Ce logiciel est spécialement conçu pour la programmation des microcontrôleurs de la famille STM32, ce qui nous a permis de réaliser une programmation efficace et précise de notre système. Grâce à STM32CubeIDE, nous avons pu traduire notre logigramme en code source, qui a ensuite été compilé et téléchargé sur la carte STM32. Comme indiqué par les figures 3.15 et 3.16, nous avons utilisé STM32CubeIDE pour programmer une partie essentielle de notre système, en assurant une programmation précise et cohérente. Le code présenté dans la figure ci-après est une partie de la programmation que nous avons réalisée avec STM32CubeIDE

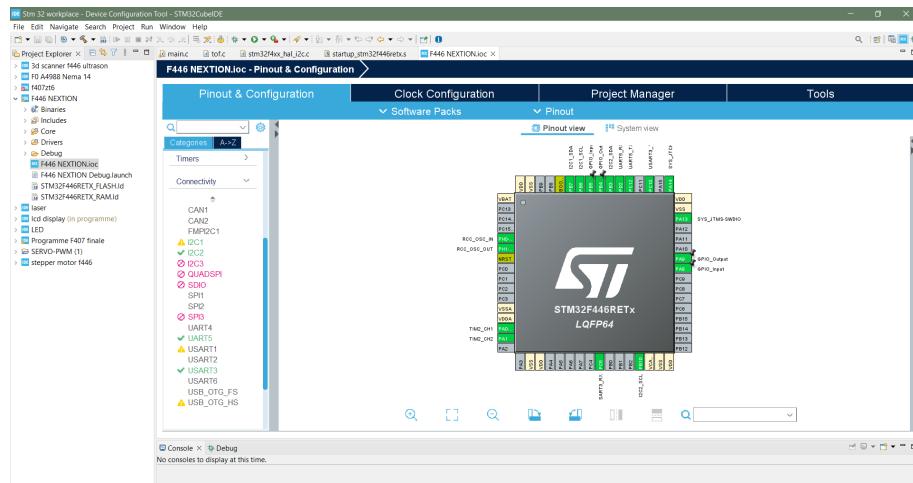


FIGURE 3.15 – Configuration des ports sur le logiciel STM32 IDE

```

278 /* Initialize all configured peripherals */
279 HAL_GPIO_Init();
280 HAL_I2C_Init();
281 HAL_USART_Init();
282 HAL_I2C2_Init();
283 HAL_USART3_Init();
284 HAL_TIM_Base_Init();
285 HAL_TIM2_Init();
286 /* USER CODE BEGIN 2 */
287 /*MPU6000 Init*/
288 HAL_I2C_Receive_IT(&huart5, RxData, 8);
289 HAL_TIM_Pwm_Start(&htim1, TIM_EGRNSEL_1);
290 HAL_TIM_Pwm_Start(&htim1, TIM_EGRNSEL_2);
291 //t0dInit(); // set long range mode (up to 2m)
292 HAL_TIM_Base_Start(&htim1);
293 //t0dInit();
294 HAL_GPIO_WritePin(TRIG_PORT, TRIG_PIN, GPIO_PIN_RESET);
295 // set 2
296 HAL_GPIO_WritePin(TRIGL_PORT, TRIGL_PIN, GPIO_PIN_RESET);
297 /* USER CODE END 2 */
298
299 /* Infinite loop */
300 /* USER CODE BEGIN WHILE */
301 while (1)
302 {
303     ident= RxData/1000;
304     if (ident==1)
305         (longueur= fmod (RxData,1000));
306     if (ident==2)
307         (largeur= fmod (RxData,1000));
308     if (ident==3)
309         (hauteur= fmod (RxData,1000));
310 }

```

FIGURE 3.16 – Extrait codé inscrit dans le logiciel STM32 IDE

Pour tester et assurer le bon fonctionnement de notre programme et du système, nous avons utilisé l'oscilloscope numérique comme méthode pour vérifier le matériel, comme indiqué dans les figures 3.17 et 3.18

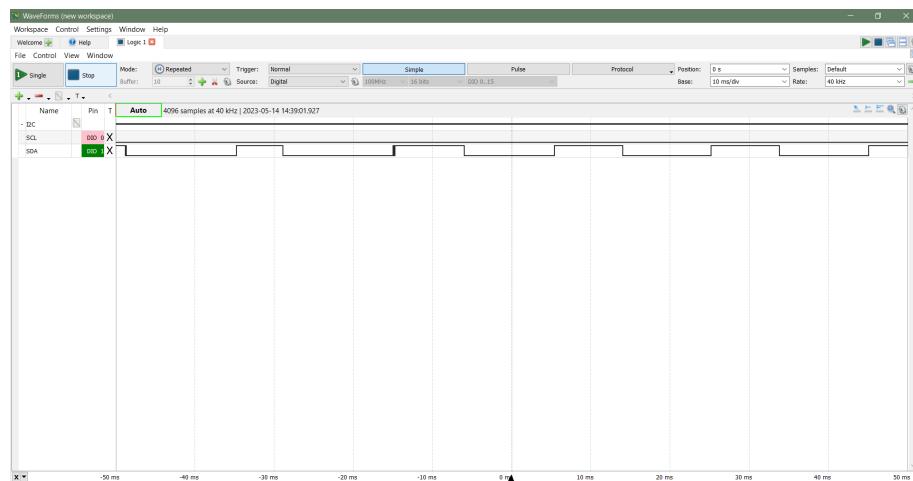


FIGURE 3.17 – Test effectué à la communication I2C du gyroscope

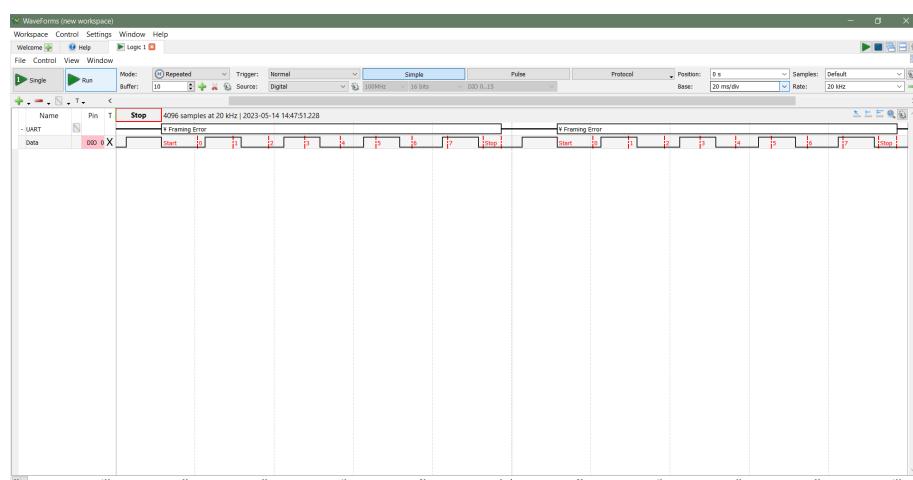


FIGURE 3.18 – Test effectué à la communication UART du moniteur TFT

Afin de garantir le bon fonctionnement de notre programme, nous avons eu recours à deux méthodes de vérification. Tout d'abord, nous avons utilisé l'onglet "Live Expressions" présent dans l'environnement de développement intégré STM32 illustré par la figure 3.19. Nous avons également utilisé un programme de surveillance série tel que le logiciel Hercules, présenté par la figure 3.20, pour s'assurer que les données échangées entre notre système et l'ordinateur sont correctes. Ces deux méthodes complémentaires nous ont permis de valider le fonctionnement de notre programme de manière fiable et exhaustive.

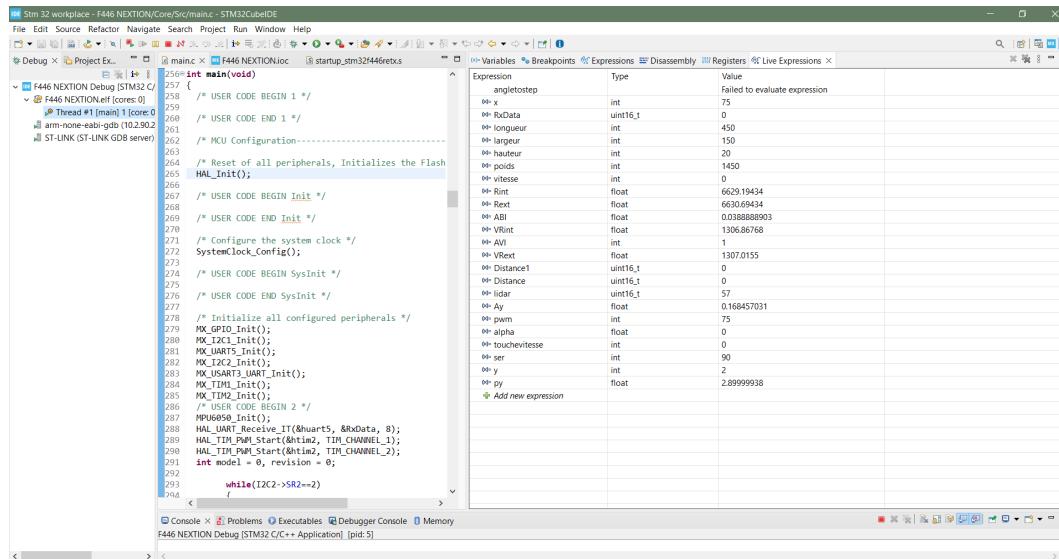


FIGURE 3.19 – Onglet "Live expressions"

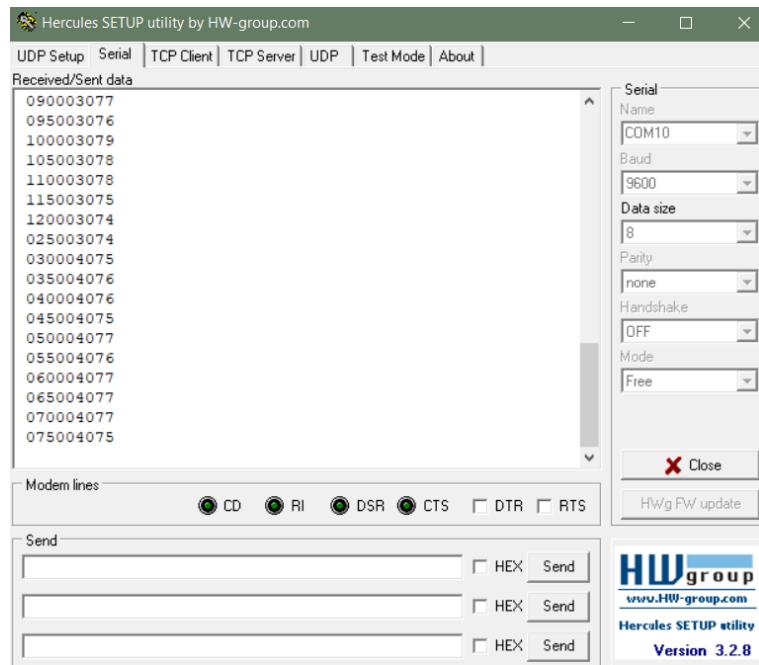


FIGURE 3.20 – Moniteur série Hercules

## 3.4 Réalisation d'une simulation en trois dimensions de la route

### 3.4.1 Configuration du capteur Lidar

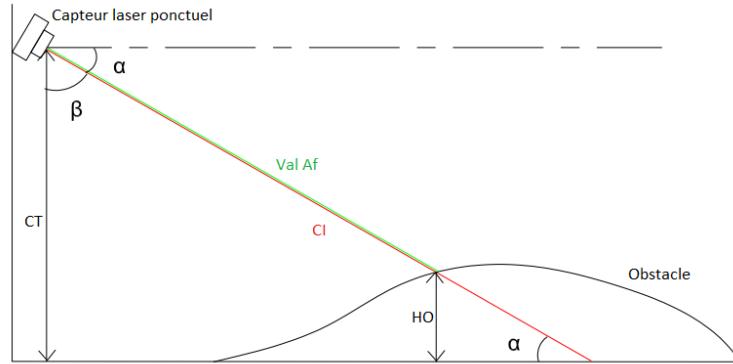


FIGURE 3.21 – Principe de fonctionnement du capteur lidar

**CI** Distance mesurée par le capteur sans la présence d'obstacle,

**HO** Hauteur de l'obstacle,

**CT** Distance entre le capteur et la terre,

**ValAf** Valeur affiché instantanée du capteur .

Le capteur Lidar est une technologie de télédétection qui projette des faisceaux laser pour mesurer les distances et les formes des objets dans un environnement. Il est souvent utilisé dans les véhicules autonomes pour détecter les obstacles sur la route et pour aider le véhicule à naviguer en toute sécurité.

La figure 3.21 illustre le processus de mesure des dimensions des obstacles sur la route avec un capteur Lidar qui est assez complexe, car il implique plusieurs étapes de balayage et de calibration. La première étape consiste à installer le capteur à un endroit optimal sur le véhicule, comme le toit, pour obtenir une portée de balayage maximale. Ensuite, le capteur doit balayer l'axe  $x$  à un angle  $\beta$  fixe pour mesurer tout au long la largeur du véhicule et permet ainsi d'obtenir une référence de la route sans obstacle. Cette étape est cruciale pour que le système puisse détecter les obstacles avec précision.

Une fois que la référence de la route est établie, il est nécessaire de calibrer l'angle  $\beta$  pour que la distance balayée soit toujours supérieure à la distance d'arrêt en fonction de la vitesse instantanée. Cela permet au système de détecter les obstacles à temps pour que le véhicule puisse, en conséquence, réagir et éviter une collision.

Enfin, une fois que le système est calibré, il peut scanner la route en temps réel et détecter les bosses et les trous. Les valeurs scannées sont comparées au référentiel de la route pour visualiser l'infrastructure et assurer une conduite en toute sécurité.

### 3.4.2 Modélisation 3D de la route

Dans cette section, nous allons nous pencher sur les résultats de la numérisation Lidar. Une fois que les dimensions de l'obstacle ont été reçues, il est nécessaire de les attribuer à des variables afin de pouvoir les utiliser ultérieurement dans l'algorithme. Tout d'abord, nous devons affecter les axes correspondants à notre représentation pour savoir comment modéliser la route sur un référentiel.

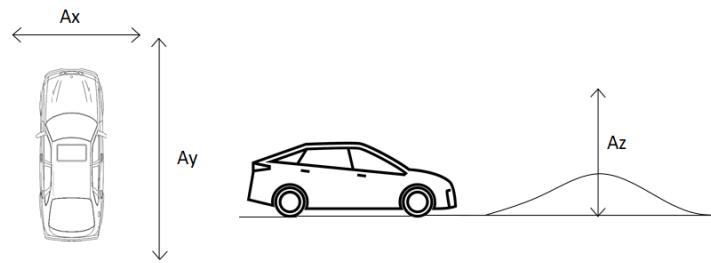


FIGURE 3.22 – Le référentiel de la route

Une fois les dimensions de l'obstacle attribuées à des variables, il est possible de les organiser en utilisant un référentiel. Dans ce cas, les axes du référentiel peuvent être définis comme suit :

**Axe x** représente la largeur de la voiture,

**Axe y** représente la distance scannée,

**Axe z** représente la hauteur de l'obstacle.

En attribuant des valeurs aux dimensions de l'obstacle pour chaque axe du référentiel, il est possible de créer une représentation en trois dimensions de l'obstacle, ce qui facilite le traitement des données par l'algorithme. Les données obtenues à partir du Lidar peuvent ainsi être utilisées pour détecter et alléger les secousses lors de la conduite. Pour effectuer la modélisation 3D de la route, nous avons utilisé le logiciel Matlab qui nous a permis de représenter graphiquement nos données avec la fonction `surf(x,y,z)`. Cette dernière permet de générer une surface, et de lier ces points obtenus. La figure 3.23 représente un dos d'âne scanné modélisée par ce logiciel.

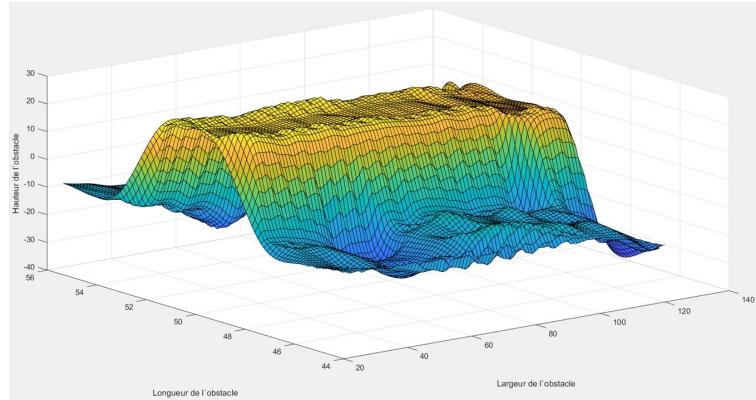


FIGURE 3.23 – Modélisation d'un dos d'âne sur Matlab

### 3.5 Développement de l'interface homme-machine

Dans le cadre de notre projet, la mise en place d'une interface entre le conducteur et le système de suspension est une étape cruciale pour garantir une personnalisation aisée et une configuration sans avoir besoin de reprogrammer les paramètres du système. Cette interface permet également aux constructeurs de diagnostiquer les erreurs plus rapidement et plus efficacement.

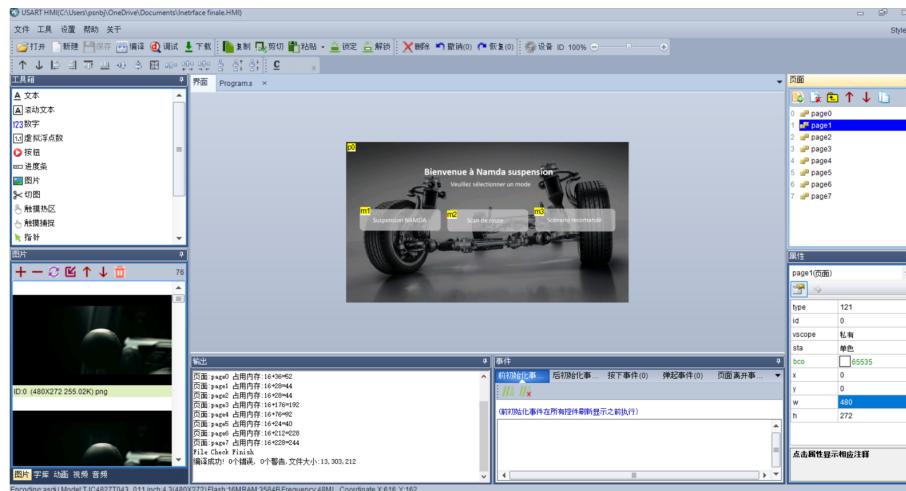


FIGURE 3.24 – Menu principale

La figure 3.24 présente le menu principal, où nous proposons trois boutons de lien différents :

- l'un permet d'accéder au menu de la suspension Namda,
- le second donne accès au menu de scan de la route,
- et le troisième permet d'accéder aux scénarios recommandés.

Le menu de la suspension Namda présente quant à lui deux boutons distincts, l'un pour visualiser les données transmises par le gyroscope, tel que représenté sur la figure 3.25, et

l'autre pour afficher en temps réel l'état des amortisseurs et leur niveau, comme présenté sur la figure 3.26.

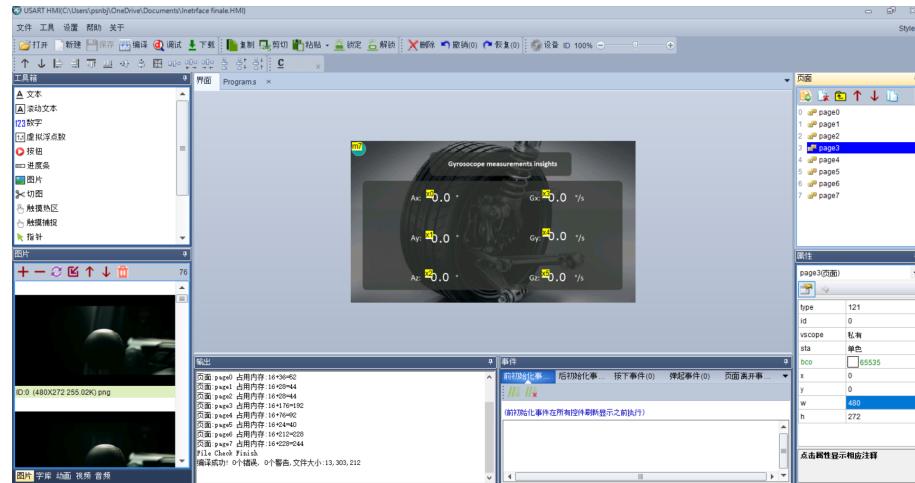


FIGURE 3.25 – Page des mesures du gyroscope

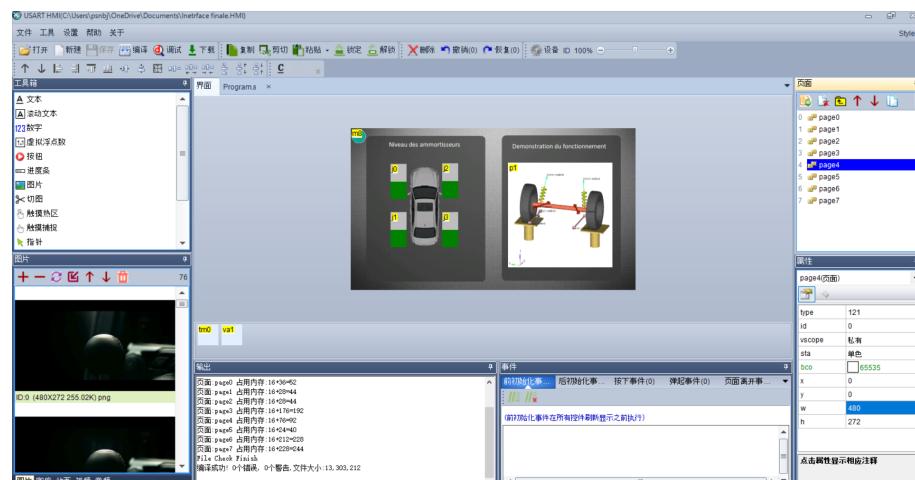


FIGURE 3.26 – Menu pour visualiser l'état des amortisseurs

Le menu de scan de route est principalement composé des dimensions de l'obstacle scanné, de la distance scannée et de l'allure de l'obstacle. Comme on peut le voir dans l'image 3.27

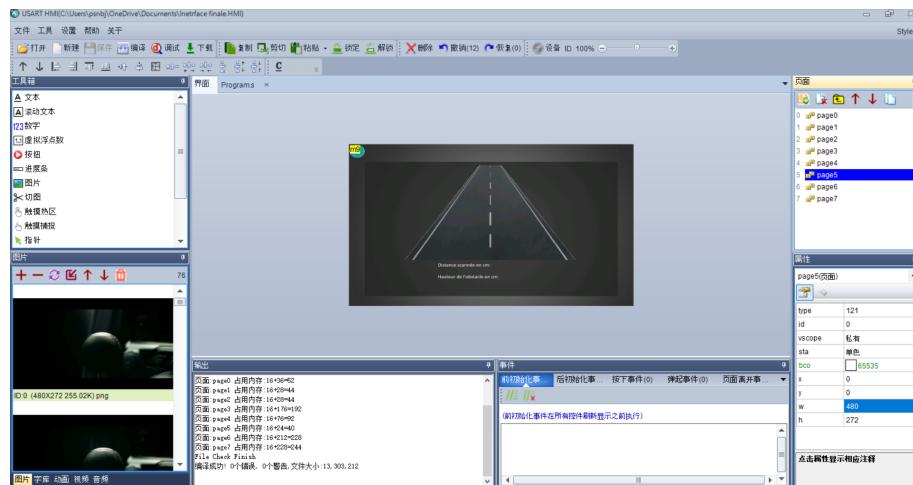


FIGURE 3.27 – Menu de scan de route

Quant au menu des scénarios recommandés, il est composé de deux pages :

- une première pour la configuration des paramètres d'usine tel que démontré dans l'image 3.28,
- et une seconde pour simuler un tableau de bord d'une voiture en mouvement et les différentes données qui s'affichent pendant la conduite comme l'illustre la figure 3.29

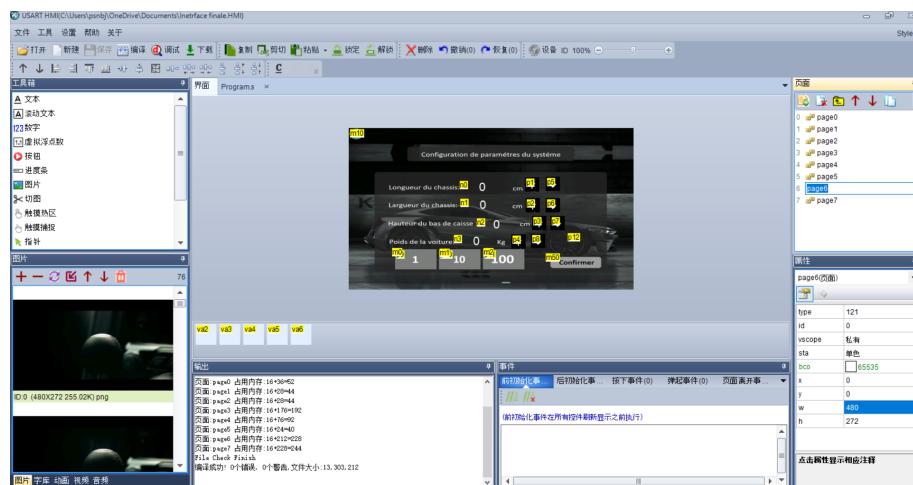


FIGURE 3.28 – Menu de configuration des paramètres d'usine



FIGURE 3.29 – Menu de speedomètre

Lors du développement de notre interface homme-machine (IHM), nous avons utilisé le logiciel USART HMI, qui est un clone du logiciel GUI Nextion Editor conçu pour les écrans TJC. Ce logiciel nous a permis de concevoir et de programmer l'interface pour alléger la carte STM32 et de bénéficier du microcontrôleur intégré dans les écrans TFT TJC (Figure 3.30).

```

总可用内存: 3594
全局内存占用: 16
图片总大小: 12,845,768
字库总大小: 16,250
页面 page0 占用内存: 16*36*62
页面 page1 占用内存: 16*28*44
页面 page2 占用内存: 16*28*44
页面 page3 占用内存: 16*17*192
页面 page4 占用内存: 16*76*92
页面 page5 占用内存: 16*24*40
页面 page6 占用内存: 16*212*228
页面 page7 占用内存: 16*228*244
File Check Finish
编译成功! 0个错误, 0个警告, 文件大小: 13,303,212

```

FIGURE 3.30 – Partie du programme téléversé dans le TFT

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes étapes de conception mécanique et électrique, ainsi que le développement du programme et les diagrammes qui décrivent le fonctionnement du système. Nous avons également construit une interface homme-machine pour permettre à l'utilisateur de communiquer avec le système de manière intuitive et conviviale.

## Conclusion générale

Nous rappelons que notre système de suspension active intelligente permet de régler le niveau gyrométrique du véhicule afin de maintenir le châssis stable, même dans les virages à grandes vitesses. Il est également équipé d'un système de détection et de scan de la route pour analyser les obstacles et remédier aux problèmes de façon préventive. Notre système contribue également à l'amélioration des performances, la stabilité en particulier, des véhicules, réduire le taux d'accidents sur la route et offrir une conduite plus agréable et sécurisée pour les passagers et les conducteurs.

Nous sommes convaincus que notre système de suspension active intelligente peut apporter une valeur ajoutée à l'industrie automobile en matière d'innovation technologique et de sécurité routière. Il est également capable de s'adapter à différents types de véhicules.

En outre, nous envisageons planter notre système de suspension active intelligente dans une voiture réelle et d'ajouter une option qui permet d'envoyer un SMS à la police ou à une personne désignée par le conducteur en cas d'accident. Nous souhaitons également communiquer avec Google Maps pour utiliser notre système afin de connaître l'emplacement des obstacles et des dos d'âne.

# Bibliographie et sitographie

- [1] AVATARCAR, « Les principaux types de suspension automobile ». <https://www.avatacar.com/blog/mecanique-auto/types-suspension-automobile/>, mars 2023.
- [2] FICHES-AUTO, « Fonctionnement des suspensions et amortisseurs ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-863-amortisseur-et-suspension.php>, avril 2023.
- [3] GUILLAUMEDARDING, « Dossier : les principaux types de suspension automobile ». <https://www.guillaumedardding.fr/dossier-les-principaux-types-de-suspension-automobile-2883821.html>, jan. 2015.
- [4] S.-M. SONG et K. J. WALDRON, *Machines That Walk The Adaptive Suspension Vehicle*. MIT Press, 2002.
- [5] ORNIKAR, « Les suspensions pilotées des automobiles ». <https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/roues/suspension-pilotee-automobiles>, jan. 2023.
- [6] FICHES-AUTO, « Suspension pilotée / amortissement adaptatif : fonctionnement ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1574-amortissement-pilote-suspension-adaptative.php>, fév. 2023.
- [7] CODEPERMIS, « Code de la route en tunisie ». <https://www.codepermis.net/fr/LeconsContenus/view>, jan. 2023.
- [8] VELOBUC, « Distance d'arrêt ». <http://velobuc.free.fr/freinage.html>, juil. 2009.
- [9] LAROUSSE, « La force centrifuge et son impact sur un véhicule dans un virage ». <https://www.larousse.fr/encyclopedie/animations/Forcecentrifuge/1100252>, fév. 2023.

- [10] STYCH, « Notions sur les aspects dynamiques ». <https://www.stych.fr/code/regles-de-circulation-8/notions-sur-les-aspects-dynamiques-261>, mars 2023.
- [11] FUTURA-SCIENCE, « Calcul de la vitesse max dans un virage ». <https://forums.futura-sciences.com/physique/91886-calcul-de-vitesse-max-un-virage.html> : :text=Refév. 2023.
- [12] CERTU, « Les ralentisseurs :état de l'art et effets dynamiques ». <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1018642.pdf>, août 2009.
- [13] VROOMLY, « Ralentisseur :rôle,types,panneau ». <https://www.vroomly.com/blog/ralentisseur-role-types-panneau/>, mars 2023.
- [14] STM32, « Stm32 32-bit arm cortex mcus ». <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>, mars 2023.
- [15] LETMEKNOW, « Capteur de distance vl53l0x tof ». <https://letmeknow.fr/fr/fr/mouvements-et-positions/1323-capteur-de-distance-vl53l0x-tof-791954231335.html>, mai 2023.
- [16] REICHELT, « Fiche technique nema14 ». <https://www.reichelt.com/fr/fr/moteur-pas-pas-nema-14-1-8-0-4-a-8-v-nema14-01-p269220.html?CCOUNTRY=443LANGUAGE=frr=1>, mars 2023.
- [17] NEXTION, « Discovery series introduction ». <https://nextion.tech/discovery-series-introduction/>, mai 2023.
- [18] LAROUSSE, « Energie cinétique ». <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers>, jan. 2023.
- [19] PEDAGOGIE, « Système vis-écrou ». <http://pedagogie.ac-limoges.fr/stisi/accueil/FichesConnaissances/>, mars 2023.