

Institut National des Sciences Appliquées - INSA Hauts-de-France

Master Ingénierie en Automatique, Homme et Mobilité

Algorithme de gestion de la transition du contrôle du véhicule entre le système de conduite autonome et le conducteur humain

Auteurs :

Mohamed Radjeb OUDAINIA
Lyes SAIDI

Encadrant :

M. chouki SENTOUH

Table des matières

Tables des matières	1
Listes des figures	2
Introduction générale	3
1 Vers une augmentation du niveau d'automatisation dans les véhicules	5
1.1 Introduction	5
1.2 L'automatisation de la conduite	5
1.3 La direction d'un véhicule	6
1.3.1 La direction classique	6
1.3.2 La direction assistée	6
1.3.3 La direction découpée "Steer by wire"	7
1.3.4 Modélisation de Steer by wire	8
1.3.5 les intérêts de steer by wire	10
1.4 Conclusion	10
2 Problématique	11
2.1 Introduction	11
2.2 Cahier des charges	11
2.3 La solution proposée	12
3 La construction du niveau décisionnel	14
3.1 introduction	14
3.2 Les critères de décisions	14
3.2.1 La disponibilité du conducteur	14
3.2.2 La position des mains sur le volant	16
3.3 L'algorithme de décisions	21
4 La commande par retour haptique	23
4.1 Introduction	23
4.2 Commande adaptative par retour haptique du modèle continu	23
4.2.1 Résultat de simulation sur modèle continu	25
4.2.2 Validation de la commande sur le simulateur CoCoVeA	27
4.3 Commande par retour haptique en appliquant un correcteur de type proportionnel	30
4.4 La commande PID à paramètres adaptatifs	32
4.5 Commande adaptative avec modèle de référence stabilisé	36
4.5.1 généralisation de la commande adaptative avec modèle de référence	39
4.6 La commande auto-vibratoire	40
4.7 Introduction	40
4.7.1 la commande par retour haptique du mode auto-vibratoire	41
4.8 Conclusion	42

5 Évaluation expérimentale de l'algorithme développer	44
5.1 Étude Expérimentale	44
5.1.1 Introduction	44
5.1.2 Participants	44
5.1.3 Protocole	44
5.2 Analyse des données et résultats	45
5.2.1 Analyse des données	45
5.2.2 Résultats	45
5.2.3 Conclusion	50
Conclusion et perspectives	52
Conclusion	52
Perspectives	53
Bibliographie	54

Table des figures

1.1	Schéma d'une direction à crémaillère	6
1.2	Schéma d'une direction assistée de type électrique	7
1.3	Schéma d'une direction steer by wire	7
1.4	Modèle équivalent de l'interface conducteur	8
1.5	: Modèle équivalent coté roues	9
2.1	Architecture horizontale de la répartition de la tâche de la conduite entre H/M .	12
2.2	Schéma explicatif de l'algorithme de gestion de la reprise en mains du véhicule par le conducteur	13
3.1	Le niveau d'alerte	15
3.2	Le niveau de l'endormissement	15
3.3	La mauvaise orientation du conducteur	16
3.4	Les bons positionnes des mains	17
3.5	Les mauvaises positionnes des mains	17
3.6	La toolbox Nftool pour la création du réseau de neurones	18
3.7	Base des données	18
3.8	Choix des pourcentages pour la création du réseau	19
3.9	Choix du nombre de neurones dans la couche cachée	19
3.10	Création du réseau de neurone	20
3.11	Schéma simulink du réseau de neurone	20
3.12	Les droites de régressions	21
3.13	Schéma explicatif de l'algorithme de décision	22
4.1	Schéma explicatif de la commande adaptative	23
4.2	Le diagramme de la commande adaptative à base d'un modèle de référence	25
4.3	Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue	26
4.4	Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue	27
4.5	La schéma de la commande après discréétisation	28
4.6	Les résultats obtenus après implémentation de la commande sur le simulateur CoCoVeA	28
4.7	La schéma de la commande après discréétisation et saturation	29
4.8	Les résultats obtenus après implémentation de la commande saturé sur le simulateur CoCoVeA	29
4.9	Le correcteur proportionnel pour garantir le retour au centre	30
4.10	La réponse du système face à la commande par un correcteur proportionnel	31
4.11	La réponse du système face à la commande par un correcteur proportionnel	32
4.12	Schéma de la commande par le correcteur PI à paramètres adaptatifs	33
4.13	La réponse du système face à la commande par un correcteur PI adaptatif	33
4.14	L'ajustement des paramètres du correcteur PI	34
4.15	schéma de la commande par correcteur PI adaptatif à rejet du couple conducteur	35
4.16	schéma de la commande par correcteur PI adaptatif à rejet du couple conducteur	35

4.17 schéma de la commande adaptative avec modèle de référence	37
4.18 La réponse du système face à la commande adaptative avec modèle de référence	37
4.19 L'ajustement des paramètres de la commande	38
4.20 La réponse du système face à la commande adaptative avec modèle de référence et le couple du conducteur	39
4.21 Les résultats de la généralisation de la commande adaptative avec modèle de référence	40
4.22 La visualisation de la disponibilité du conducteur	41
4.23 Les résultats de l'implémentation du mode auto-vibratoire	42
 5.1 Evaluation du confort de la conduite	46
5.2 Analyse du sentiment de sécurité	47
5.3 Les résultats sur l'analyse du sentiment de contrôle du véhicule	48
5.4 Évaluation de la charge de travail	49
5.5 Évaluation de la confiance dans l'algorithme	50

Introduction générale

En 2017 plus de 2 millions de véhicules ont été produits sur le territoire français [1], l'industrie automobile un des plus grands secteurs d'activité de l'industrie française. D'après l'institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), La France est le cinquième plus grand fabricant automobile de l'Union européenne (UE), avec 6,7 % de la production européenne en 2016 [2].

Il est évident que les enjeux économique national et international sur cette industrie sont colossaux , plusieurs usines voient le jour chaque année certaines sont de dimension surhumaine (la Giga factory de tesla en Chine avec une superficie de neuf mille mètres carrés) afin de satisfaire la demande en hausse exprimée par une clientèle en quête des dernières technologies qui sont ce font dans le domaine.

Il va sans dire que cette quête de nouvelles technologies alimentant l'industrie automobile est une conséquence directe des mortalités routière causé par les accidents de la route. En effet nous , les conducteurs sommes constamment à la recherche des dernières nouveautés permettant de pousser le niveau de sécurité à l'intérieur comme à l'extérieur du véhicule au niveau supérieur.

Cette course technologique s'est intéressée dans un premier temps à l'évolution technique autour du véhicule, le véhicule tel qu'on le connaît au jour d'aujourd'hui est le résultat de plusieurs années d'évolution technologique et d'exploit techniques mené par des chercheurs et des ingénieurs pluridisciplinaires.

L'évolution technique qu'a connue le véhicule a pointé du doigt un autre type de problème encore méconnu de l'industrie qui est l'erreur humaine, en effet , le conducteur lors de la tâche de la conduite est constamment soumis à un flux d'information , ce dernier a pour tâche d'étudier ce flux et prendre une décision en conséquence. Le conducteur fait alors du sense-making , ce dernier peut être vu comme une méthode qui permet de prendre les bonnes décisions simplement et rapidement.Ces décisions sont caractérisées par le fait qu'elles paraissent élémentaires pour le conducteur ce qui veut dire que le processus de la prise de décision est simplifié [3].

Le sense-making peut être influencé par la conscience de la situation du conducteur, cette dernière est son aptitude à percevoir , analyser et prendre une décision pour solutionner un problème donné.L'enjeu dans un contexte de conduite est que le conducteur prenne la bonne décision au bon moment.

L'enjeu sur le véhicule actuellement est de simplifier la prise de décision dans la conduite tout en prenant en compte l'action du conducteur qui doit être positionné comme opérateur actif dans l'architecture moderne du véhicule.

Dans ce contexte on pourrait penser que l'automatisation du véhicule et de la tâche de la conduite pourrait être envisagé comme une solution miracle au problème , cependant comment peut-on automatiser un véhicule et garder le rôle d'agent actif du conducteur ?

Organisation du rapport

Ce rapport est composé de cinq chapitres :

Chapitre 1 : vers une augmentation du niveau d'automatisation dans les véhicules

Ce chapitre soulève le problème causant l'accidentalité pour faire ensuite le développement de l'état de l'art des tentatives de résolution de ce problème.

L'automatisation à l'intérieur du véhicule s'est vu attribuée des niveaux qui seront explicités dans ce chapitre. L'évolution du système de direction qui est le fondement de ce rapport est retracé également dans son contenu.

Chapitre 2 : problématique

La problématique abordée par le rapport s'est vu attribuée le second chapitre où nous avons tenté d'expliquer l'importance de la gestion de la transition entre le mode automatique et le mode manuel lors de la conduite.

Une vision globale de la solution que nous avons tenté de mettre en place a été introduite grâce à une architecture de répartition de la tâche de la conduite entre le conducteur et l'autopilote.

Chapitre 3 : la construction du niveau décisionnel

L'algorithme de gestion du passage entre le mode automatique et le mode manuel s'est vu dans un premier temps enrichi par un niveau décisionnel. Les outils qui ont servi à la construction de ce niveau ont été explicité dans ce chapitre.

Le fonctionnement de la fonction décisionnelle ainsi que les conditions de passage d'un mode à un autre ont été expliquée et illustré également dans le chapitre 3.

Chapitre 4 : la commande par retour haptique

Ce chapitre explique la construction du bloc permettant d'assurer le retour haptique et l'orientation du volant selon l'angle à la roue. Il est question de retracer le chemin parcouru afin de mettre en place le correcteur assurant satisfaction du cahier des charges.

Chapitre 5 : évaluation expérimentale de l'algorithme développé

Dans ce dernier chapitre il s'agit d'accomplir la dernière phase du cycle en V, celle qui consiste à valider l'algorithme créé lors des chapitres 3 et 4.

Nous avons par le contenu de ce chapitre tenter d'expliquer comment nous avons œuvré afin de mettre en place un protocole expérimental permettant de valider l'algorithme. Les résultats obtenus suit au protocole ont été analysées pour conclure l'information sur l'efficacité de l'algorithme.

Conclusion et perspectives

Ce chapitre récapitule la démarche suivie dans ce rapport pour l'élaboration d'un algorithme de gestion de la transition qui permet de passer d'un mode automatique vers un mode manuel en toute sécurité. Il se termine en proposant des perspectives à ce travail pour de futures recherches.

Chapitre 1

Vers une augmentation du niveau d'automatisation dans les véhicules

1.1 Introduction

D'après l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR) ,un pourcentage très élevé allant jusqu'à "90%" des accident routiers sont provoquées par les facteurs humains à cause de "l'alcool, la vitesse, la fatigue, l'utilisation du téléphone... etc "[4].

L'erreur humaine est donc un des principaux facteurs à étudier pour réduire l'accidentalité .La réduction de l'accidentalité nécessite d'aider et d'assister le conducteur dans la tâche de conduite.L'assistance peut être faite par le déploiement à titre d'exemple des ADAS (Advanced driver-assistance systems)

Les ADAS collectent les informations internes et externes sur l'état du véhicule à l'aide des capteurs proprioceptifs et/ou extéroceptifs.

Un ADAS peut avoir un rôle passif ou actif , passif soit en informant et avertissant le conducteur , actif en agissant au niveau des actionneurs.

Au fur et à mesure du développement de ces systèmes d'assistance active, la conduite du véhicule s'oriente vers une automatisation de plus en plus avancée.

1.2 L'automatisation de la conduite

L'automatisation de la conduite est un processus continu qui démarre dès la mise en œuvre de systèmes automatisant une partie de la conduite jusqu'à l'automatisation complète.

Les impacts prévisibles en termes de sécurité routière sont différents suivant la répartition des tâches entre le conducteur et le véhicule.

La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) définit cinq niveaux d'automatisation [4] :

- Niveau 0 : Aucune automatisation. Le conducteur réalise l'ensemble des tâches de conduite.
- Niveau 1 : Assistance à la conduite.Une fonction aide le conducteur dans la conduite .
- Niveau 2 : Automatisation partielle. Une ou plusieurs fonctions aident le conducteur en assumant le contrôle combiné de la direction du véhicule et de l'accélération / décélération.
- Niveau 3 : Automatisation élevée. Le système de conduite automatisé accomplit l'ensemble des tâches de la conduite sous la supervision du conducteur qui doit être disponible pour intervenir et conduire au besoin.
- Niveau 4 : Automatisation complète. La voiture accomplit la totalité de la conduite sans la nécessité d'une intervention du conducteur. Elle peut même circuler seule, sans conducteur ni passager et aller chercher des passagers par exemple.

Les véhicules du futur seront comme l'avons déjà mentionné des véhicules fortement automatisés afin d'assister l'humain dans la tâche de la conduite. Cette objectif d'automatisation relève plusieurs questionnements notamment à la difficulté qui l'accompagne quand il s'agit d'automatiser un système critique.

Si l'on veut atteindre l'objectif de réduire l'accidentalité due aux facteurs humains, il est important de prendre en compte ces impacts potentiels dès la conception de ces systèmes. Parmi ces systèmes **la direction d'un véhicule**.

1.3 La direction d'un véhicule

1.3.1 La direction classique

Classiquement, la chaîne de direction est composée des éléments suivants (voir figure 1.1) [4] :

- Le volant qui permet au conducteur d'agir sur l'orientation des roues ;
- La colonne de direction qui transmet l'action du conducteur vers la crémaillère ;
- La crémaillère qui convertit la rotation de la colonne en translation latérale ;
- Les bielles de direction qui relient la crémaillère aux roues.

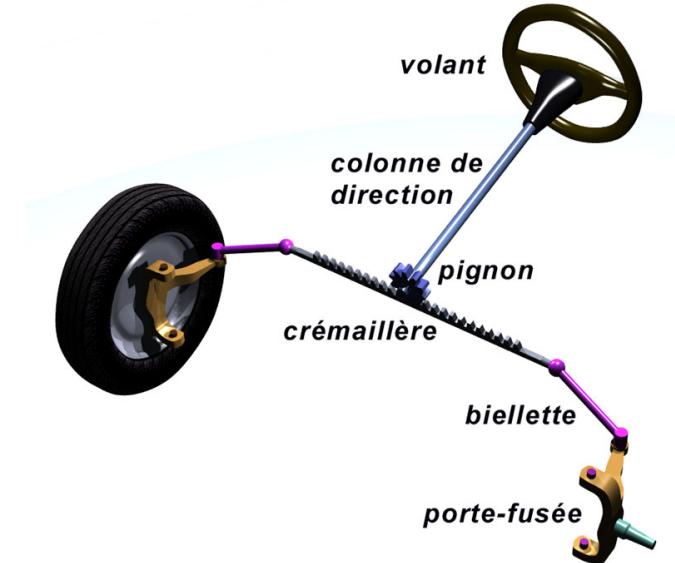


FIGURE 1.1 – Schéma d'une direction à crémaillère

Des systèmes d'assistance ont été graduellement introduits pour faciliter le contrôle de la chaîne de direction par le conducteur.

1.3.2 La direction assistée

Du fait des forces de frottement des pneumatiques sur la route, la force nécessaire pour braquer les roues peut être importante. Afin de diminuer l'effort à fournir par le conducteur pour braquer les roues, les systèmes de direction assistée intègrent des actionneurs électriques utilisant directement un moteur électrique qui ajoutent une quantité d'énergie contrôlée au mécanisme de direction pour compléter l'effort du conducteur [4].

La figure 1.2 montre un schéma explicatif de la direction assistée électriquement.

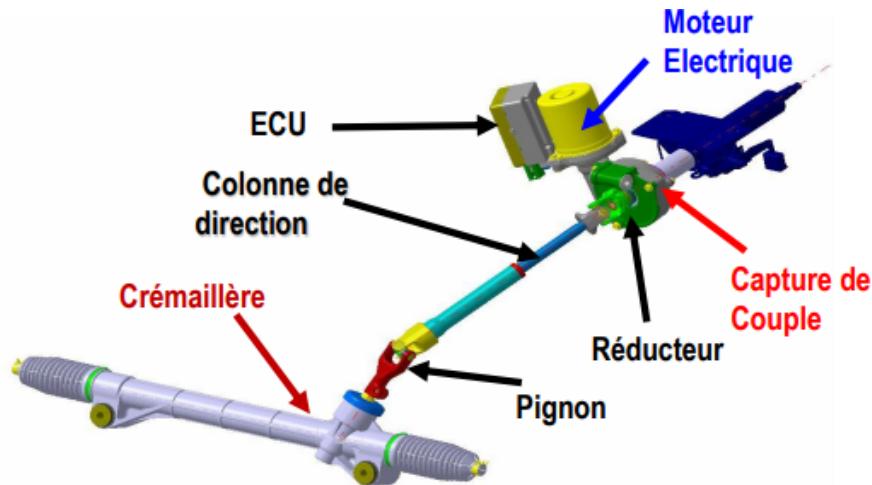


FIGURE 1.2 – Schéma d'une direction assistée de type électrique

Dans le cas où le système doit gérer complètement le contrôle du véhicule, il doit se désactiver temporairement dès que le conducteur intervient.

Le lien mécanique n'autorise donc pas un réel partage de la conduite entre le conducteur et l'auto-pilote. C'est pour pallier à cette problématique la, les directions découpées ont étées crées.

1.3.3 La direction découpée "Steer by wire"

Pour aller plus loin dans le partage de la conduite et simplifier l'action sur le braquage des roues avant, les constructeurs ont réfléchis à découpler complètement le volant des organes de braquage des roues. Ceci s'appelle le Steer By Wire (SBW)[4].

Le volant devient ainsi une interface permettant au conducteur de commander la trajectoire désirée, avec un retour haptique pour l'informer de la situation de conduite.

La consigne du conducteur est transmise à un contrôleur qui commande un actionneur électronique ou hydraulique afin d'appliquer l'angle de braquage désiré.

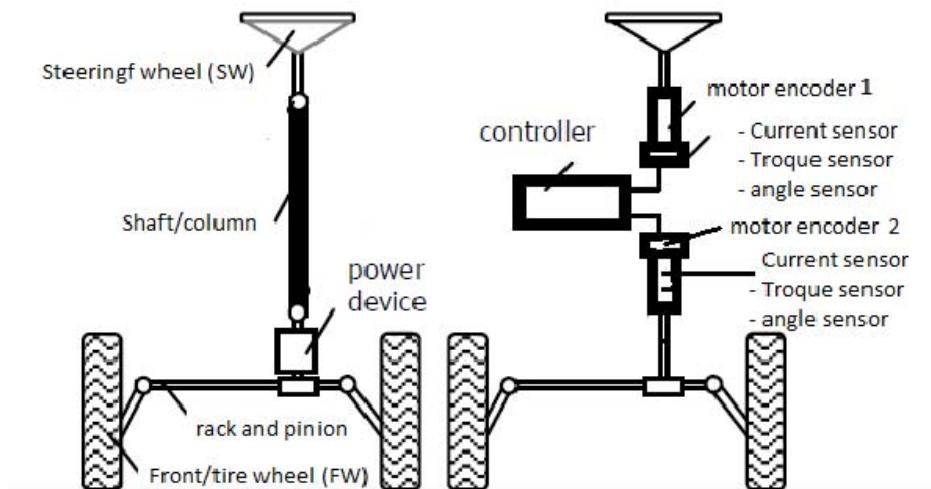


FIGURE 1.3 – Schéma d'une direction steer by wire

1.3.4 Modelisation de Steer by wire

Modélisation de l'interface conducteur

la figure 1.4 montre la partie interface conducteur de modèle de direction SBW

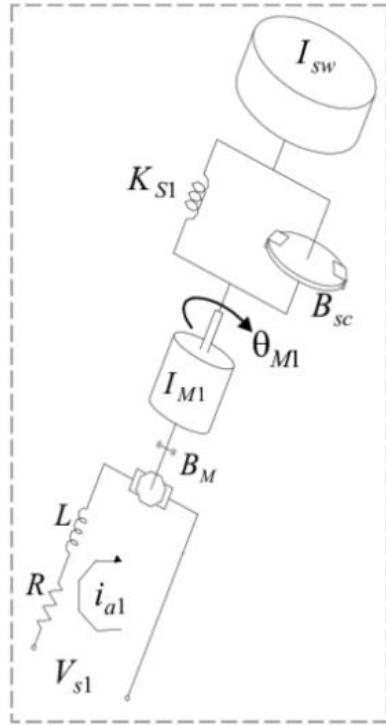


FIGURE 1.4 – Modèle équivalent de l'interface conducteur

Les équations [5] du modèle de la direction steer by wire coté interface conducteur sont développer ci dessous.

L'équation de l'accélération angulaire au volant est donnée par :

$$\ddot{\theta}_{sw} = \frac{1}{I_{sw}}(T_d - B_{Bc}(\dot{\theta}_{sw} - \dot{\theta}_{M1}) - K_{S1}(\theta_{sw} - \theta_{M1}) - T_{fr})$$

L'équation du déplacement angulaire du moteur est donnée par :

$$\ddot{\theta}_{M1} = \frac{1}{I_{sw}}(T_{M1} - B_{Bc}(\dot{\theta}_{M1} - \dot{\theta}_{sw}) - K_{S1}(\theta_{M1} - \theta_{sw}) - B_{M1}\dot{\theta}_{M1})$$

Avec :

θ_{sw} :angle au vouant.

θ_{M1} :angle du moteur.

Modélisation coté roues

la figure 1.5 montre la partie coté roues du modèle de direction SBW

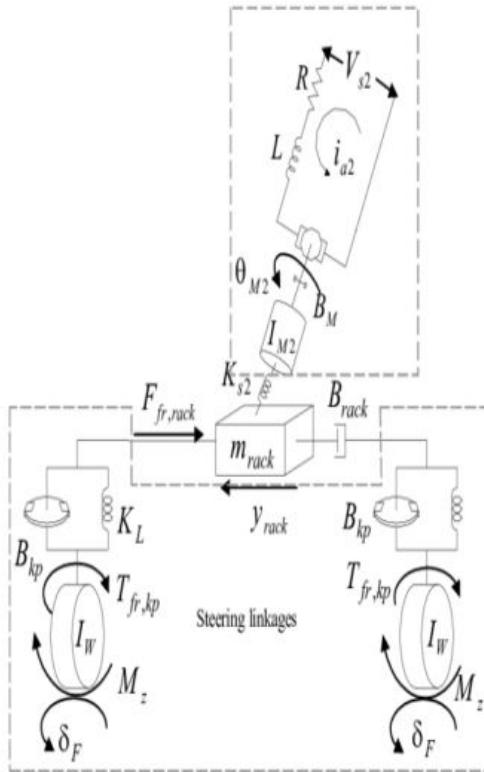


FIGURE 1.5 – : Modèle équivalent coté roues

Les équations [5] du modèle de la direction steer by wire coté roues sont développer ci dessous.
L'équation du déplacement angulaire du moteur :

$$\ddot{\theta}_{M2} = \frac{1}{I_{M2}}(-T_{M2} - K_{S2}(\theta_{M2} - \frac{y_{rack}}{r_p}) - B_{M2}\dot{\theta}_{M2})$$

L'équation du déplacement de la crémaillère :

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{rack} = & \frac{1}{m_{rack}}(-B_{rack}\dot{y}_{rack} - \frac{2K_{Lf}}{r_L}(\frac{y_{rack}}{r_L} - \delta_F) \\ & + \frac{K_{S2}}{r_p}(\theta_{M2} - \frac{y_{rack}}{r_p}) - F_{fr,rack}) \end{aligned}$$

L'équation au niveau de la roue :

$$\ddot{\delta}_F = \frac{1}{I_f}(-B_{kpf}\dot{\delta}_F - K_{Lf}(\delta_F - \frac{y_{rack}}{r_L}) - T_{fr,kpf} - M_z)$$

Sachant que :

y_{rack} :déplacement de crémaillère.

θ_{M2} :angle du moteur.

δ_F :angle à la roue.

1.3.5 les intérêts de steer by wire

Amélioration de la sécurité active et passive

Le SBW facilite l'intégration des systèmes d'assistances à la conduite [4] ce qui permet de limiter les erreurs humaines et d'accroître la sécurité du véhicule.

La colonne de direction dans les directions classiques peut en cas de crash frontal compresser la partie conducteur et causer des dommages.

Diminution de la masse du véhicule

L'industrie automobile fait partie des industries les plus polluantes au monde , la diminution de la consommation en carburant et la mise en avant des véhicules dit « vert » passe en premier par la modernisation des carrosseries des véhicules conventionnels et justement le SBW offre par sa masse réduite une option de qualité.

Diminution des coûts

La concurrence dans l'industrie automobile est de plus en plus rude en terme de coût/prix final du véhicule[4].

Les systèmes mécaniques en particulier les colonnes de direction sont développés individuellement pour chaque modèle du véhicule, alors que les SBW peuvent être identiques pour l'ensemble des flottes ce qui favorise les économies d'échelle et limite les coûts de développement.

1.4 Conclusion

Le véhicule du futur doit donc permettre une supervision assurée par le conducteur dans un contexte légal mais aussi en plus du mode de conduite automatique un mode manuel où l'opérateur peut reprendre la main sur son véhicule selon son besoin.

Le véhicule du futur soulève donc plusieurs questionnements concernant le partage de la responsabilité et de l'autorité entre opérateur humain et autopilote et ceci sans inclure les défis technologiques.L'exploitation de solutions technologiques telle que le SBW avec des algorithmes établissant le partage de la tâche de la conduite est donc une solution qui nous paraît prometteuse.

Chapitre 2

Problématique

2.1 Introduction

Les véhicules conventionnels avec leur unique mode de conduite manuel présentent donc des risques d'insécurité routière c'est pour cela que l'automatisation des véhicules commence à émerger et à se déployer progressivement.

L'automatisation d'un véhicule peut donc placer ce dernier dans contexte du niveau 4 ,c'est à dire sans supervision du conducteur ou dans un niveau 3 où il est stipulé que le conducteur est le seul responsable de la tâche de conduite et il doit donc superviser son véhicule.

On se place donc dans un contexte du niveau 4 où il existe un mode de conduite automatique responsable du véhicule sur certaines sections de la route.Un mode de conduite manuelle où la tâche de la conduite est assurée par le conducteur seul est également présent et qui peut être utilisé par le conducteur afin d'intervenir et conduire au besoin.

Ce contexte bien précis pose un problème lors de la reprise en mains du conducteur de son véhicule car dans le cas où le volant est centré et que la roue du véhicule est orientée avec un angle différent que celui du volant, **angle donné par le conducteur sur ce dernier risque de provoquer un léger dérapage ou pire encore un accident.**

Il est donc évident de l'importance qu'il faut accordé à cette reprise en mains et du danger qu'elle peut engendrer si elle est mal gérée.

2.2 Cahier des charges

Le rendu du projet doit être sous forme de blocs Simulink capable de gérer la reprise en mains du véhicule en toute sécurité et ceci selon les paramètres suivants :

- Il est indispensable d'éviter les sorties de voix lors de la reprise en mains.
- La reprise en mains ne peut être faite qu'une fois le conducteur est disponible et prêt à conduire son véhicule.
- L'algorithme doit assurer un retour haptique sur le volant proportionnel à l'orientation de la roue.
- En mode automatique le volant doit être centré autour du zéro.

2.3 La solution proposée

Afin de satisfaire le cahier des charges on se propose de développer **un algorithme capable d'évaluer la disponibilité du conducteur et de corriger grâce au retour haptique l'angle au volant** pour permettre une reprise en mains en toute sécurité.

L'algorithme de gestion de la transition du contrôle du véhicule entre le système de conduite autonome et le conducteur humain est composé de deux niveaux[6], un premier niveau stratégique chargé de prendre la décision concernant la disponibilité du conducteur et un niveau tactique chargé l'orientation du volant donc du véhicule comme est illustré par la figure 2.1

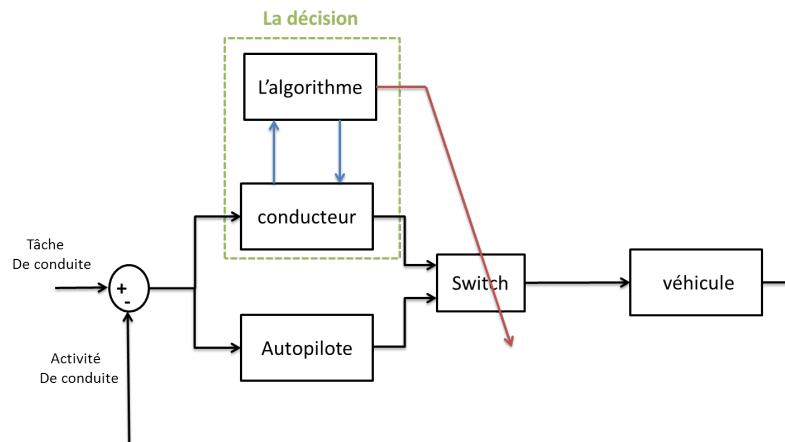


FIGURE 2.1 – Architecture horizontale de la répartition de la tâche de la conduite entre H/M

Dans un premier temps le conducteur conduit donc son véhicule en mode manuel car l'autopilote ne peut être actif qu'à partir d'un seuil de vitesse donné. Si le conducteur exprime le besoin de laisser la tâche de la conduite à l'autopilote l'information est donc communiquer à l'algorithme soit au niveau supérieur, ce dernier décide donc d'activer l'autopilote.

Si le conducteur exprime la volonté de reprendre la main sur son véhicule , l'algorithme est en effet sensible à ce voeux et met en route le mode de transition afin que le conducteur puisse reprendre son véhicule en toute sécurité.

La Figure 2.2 représente un schéma explicatif de l'algorithme proposé , où une décision est prise par le bloc de la commande décisionnelle selon l'état du conducteur par la suite selon la disponibilité de ce dernier un passage du mode automatique vers le mode transitionnel peut-être fait où une commande haptique s'active afin d'assurer le suivi de l'angle à la roue par l'angle au volant durant la durée d'activation de la transition.Finalement si le volant est correctement orienté le conducteur peut reprendre la totalité du contrôle sur son véhicule en toute sécurité.

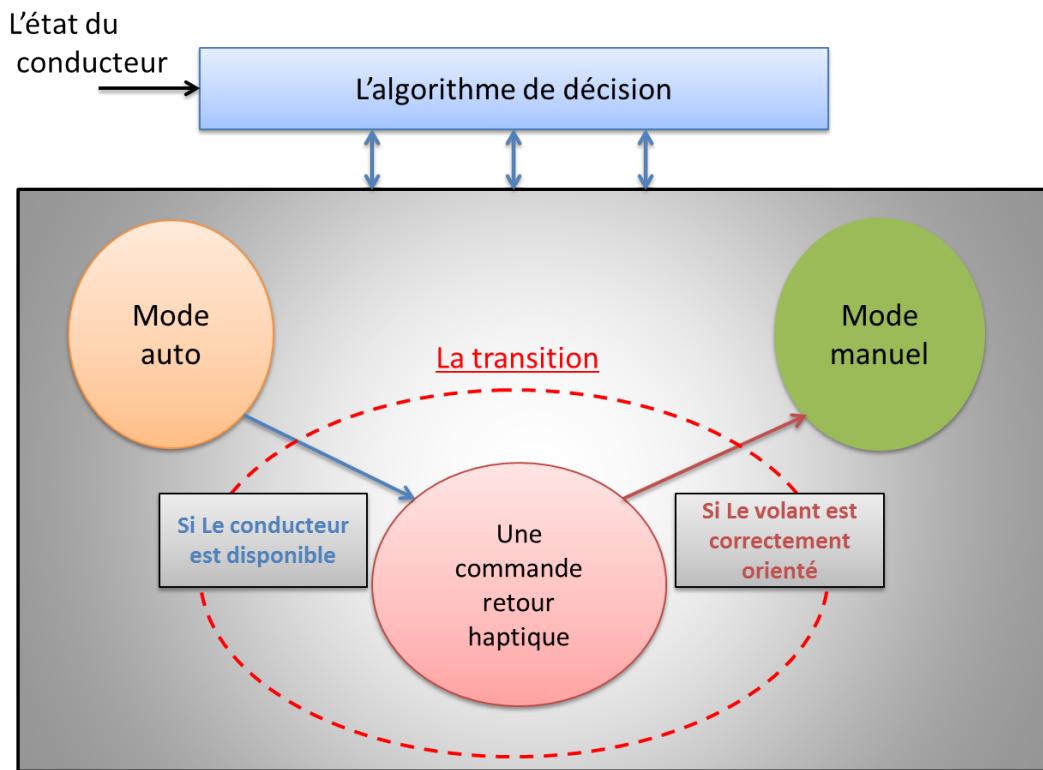


FIGURE 2.2 – Schéma explicatif de l'algorithme de gestion de la reprise en mains du véhicule par le conducteur

Chapitre 3

La construction du niveau décisionnel

3.1 introduction

L'algorithme proposé est composé d'une partie liée à la commande haptique du volant et d'une fonction décisionnelle chargée de déterminer l'information sur la disponibilité du conducteur.

La disponibilité du conducteur peut être vue comme une variable dynamique construite tout au long du cycle en récupérant des informations liées au conducteur , son positionnement et son niveau d'endormissement.

Dans cette section nous allons en premier temps présenté le système qui permet de visualiser et d'analyser l'état du conducteur soit le système de "Driver monitoring" ainsi que les variables qui participent activement à la disponibilité du conducteur pour ensuite mettre en place la fonction de disponibilité du conducteur , en parallèle nous allons expliquer la construction du réseau de neurones qui permet de détecter la position des mains du conducteur sur son volant.

3.2 Les critères de décisions

3.2.1 La disponibilité du conducteur

Le système de surveillance du conducteur "Driver monitoring" du constructeur continental a pour but de protéger le conducteur des manques d'attention temporaire lors de la tâche de conduite.

L'algorithme du driver monitoring est constitué de deux parties , une partie noté DDM qui analyse les yeux du conducteur à l'aide des deux sources / capteur infrarouge qui émettent des ondes infrarouges afin de détecter l'ouverture et la fermeture des yeux.La seconde partie quant à elle est notée DDS ou encore DIM qui analyse l'orientation de la tête du conducteur à l'aide de la caméra , cette dernière donne un signal qui après décryptage nous renseigne sur l'orientation du conducteur qui peut-être soit bien adapté au contexte de la conduite "On Road" ou non adapter "Off Road" .

Les informations délivrées par l'algorithme du driver monitoring sont récupérées grâce à un bus de type CAN pour les exploiter sous Matlab/simulink.

On définit donc une première variable *DDM_DIAG* qui nous renseigne sur les niveaux de l'endormissement du conducteur qui sont définis selon quatre niveaux :

- Le niveau d'alerte qui est considéré comme la non-somnolence (voir figure 3.1)
- Le second qui est représentative du niveau légèrement somnolent qui apparaît avec les premiers signes de l'endormissement.
- Le troisième niveau qui est le niveau précédent l'endormissement.

- Le quatrième et dernier niveau qui est l'endormissement (voir figure 3.2).

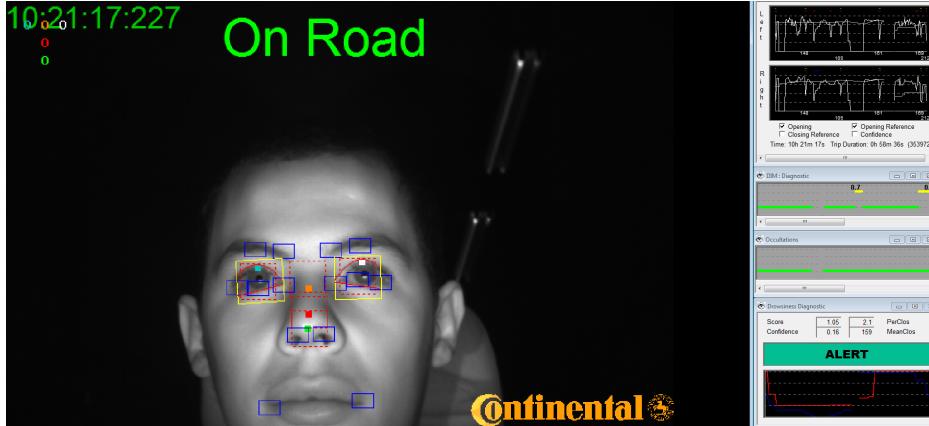


FIGURE 3.1 – Le niveau d'alerte

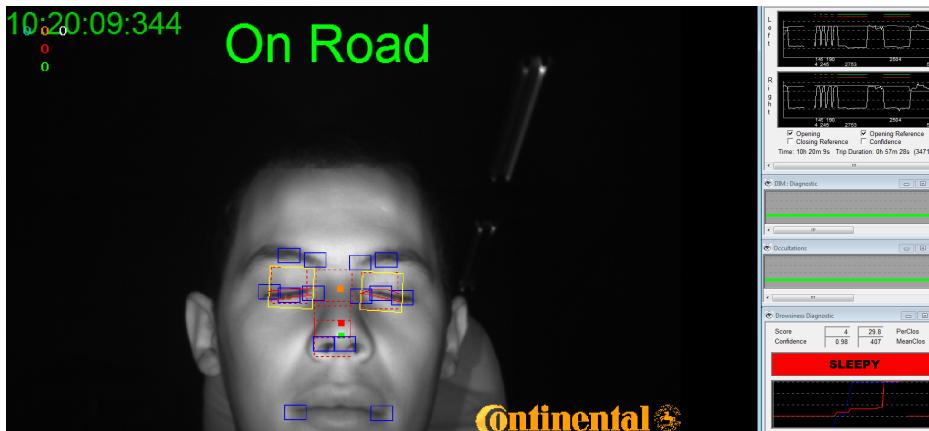


FIGURE 3.2 – Le niveau de l'endormissement

Cette variable est exploitée afin de créer une variable décisionnelle *DDM_binaire* de l'endormissement de type binaire [7], le conditionnement de cette variable est le suivant :

$$DDM_Binaire_i = \begin{cases} 1 & \text{si } DDM_DIAG \geq 2 \\ 0 & \text{si } DDM_DIAG < 2 \end{cases}$$

La seconde variable qui nous renseigne sur la durée de la mauvaise orientation de la tête du conducteur (voir figure 3.3) est repérée par *DIM_OFF_ROAD_DURATION*, cette dernière variable est traitée de telle sorte à ce qu'elle augmente exponentiellement avec le temps où le conducteur regarde loin de la scène de la route, mais qui diminue presque instantanément lorsqu'il se re-centre sur le champ visuel de la route. Ce comportement de distraction du conducteur est modélisé comme suit :

$$DIM_Continu = \frac{1}{1 + \exp(-a(DIM_OFF_ROAD_DURATION) \times b - c)}$$

Les paramètres a, b, c serviront pour imposer la durée de la convergence en exponentielle.

Les deux variables *DIM_continu* et *DIM_binaire* sont utilisées pour générer la variable de surveillance de l'état du pilote qui elle sera la variable décisionnelle notée *DRIVER_STAR* qui est donnée par la formule suivante :

$$DRIVER_STATE = DIM_Continu + (1 - DIM_Continu)(1 - \exp(-\frac{DDM_Binaire_i}{0.1}))$$

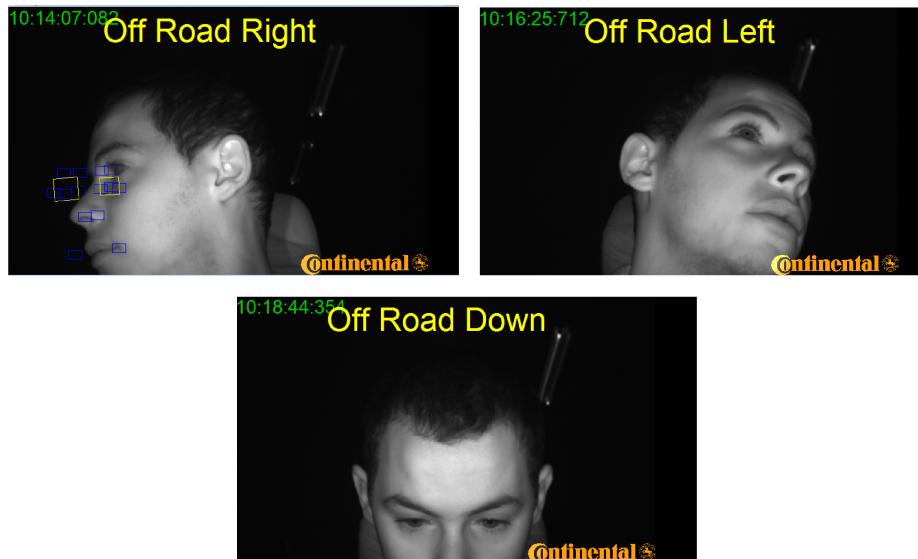


FIGURE 3.3 – La mauvaise orientation du conducteur

3.2.2 La position des mains sur le volant

Afin de permettre une reprise en mains du véhicule par le conducteur on impose la présence de ses deux mains sur le volant en plus de sa disponibilité.

Le volant du simulateur est équipé d'un capteur permettant de fournir l'information sur la présence d'une main sur le volant , le capteur en question est un fil en cuivre sensible au toucher envoyant sur une carte de type RASPBERRY une fréquence ,il est divisé en cinq sections à fréquences différentes.

Afin de permettre une reprise en mains du véhicule sauf en cas de bon positionnement des mains du conducteur nous avons identifié les fréquences propres à ses positions.

Une base de données a été créée sur la base des bonnes et mauvaise positions comme le montre le groupe de figures (3.4,3.5) qui sera exploité afin de crée le réseau de neurones capable de fournir l'information sur la position des mains.



FIGURE 3.4 – Les bons positionnes des mains



FIGURE 3.5 – Les mauvaises positionnes des mains

Création du réseau de neurones

La création du réseau de neurones est faite sous matlab/simulink à l'aide de la toolbox "Nftool".

Après avoir importé les données pour la création du réseau , on procède au lancement de la toolbox , une première fenêtre s'ouvre (voir figure 3.6).

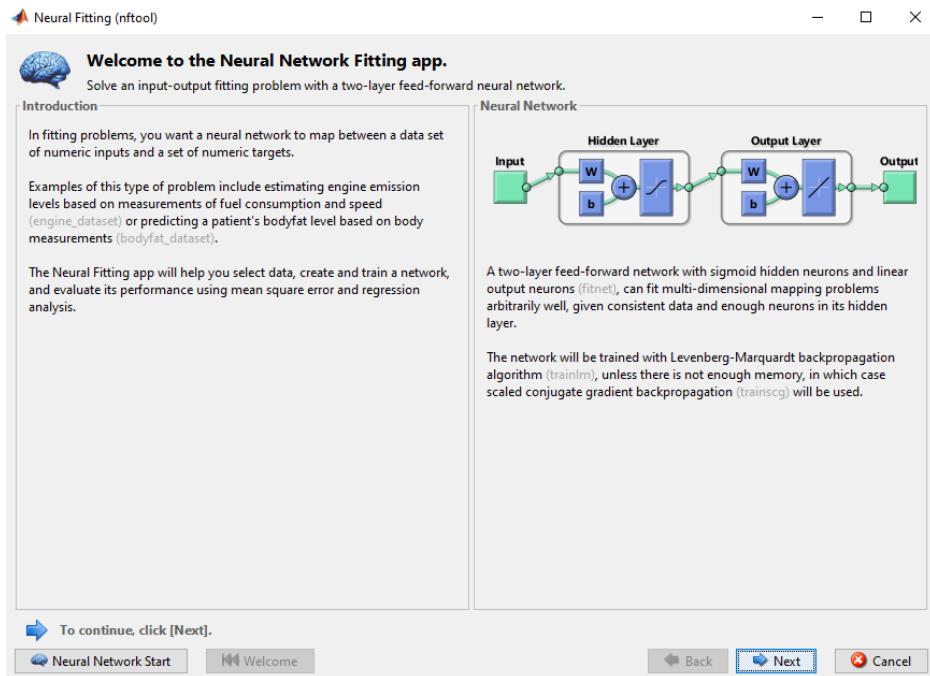


FIGURE 3.6 – La toolbox Nftool pour la création du réseau de neurones

Afin de lancer la création du réseau on accède en premier temps au répertoire des données , on choisit nos données en entrée et la base de l'apprentissage notée "target" comme le montre la figure 3.7

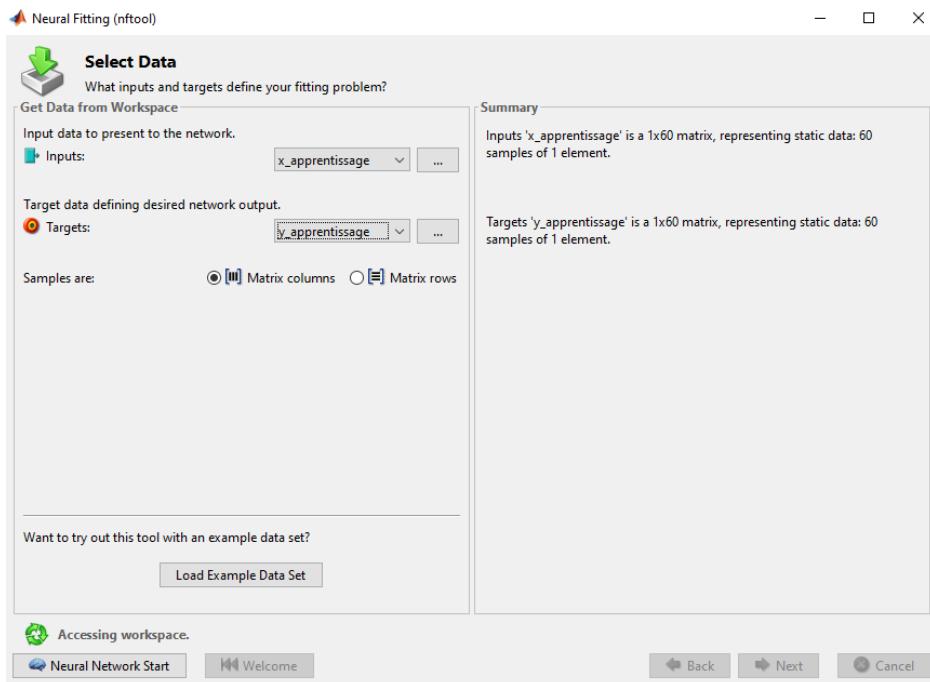


FIGURE 3.7 – Base des données

La toolbox nous offre la possibilité de choisir le pourcentage des données qu'on veut utiliser pour la création , le test du réseau créé et enfin de le valider, on a donc choisi de réserver 70% pour effectuer la création et ce qui en reste 30% pour le test et la validation du réseau créé

comme le montre la figure 3.8.

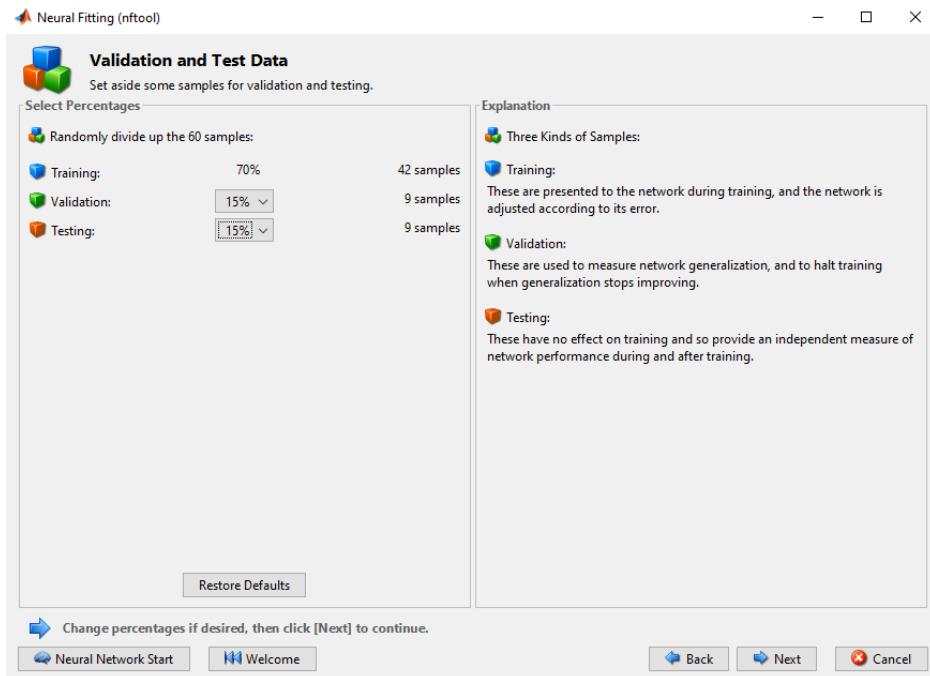


FIGURE 3.8 – Choix des pourcentages pour la création du réseau

L'avant-dernière étape dans la configuration de la toolbox est de choisir le nombre de neurones qu'on veut utiliser dans la couche cachée dudit réseau , cette valeur est obtenue expérimentalement (nous avons choisi d'utiliser dix neurones dans la couche cachée car c'est la valeur pour laquelle nous avons obtenu les meilleurs résultats).

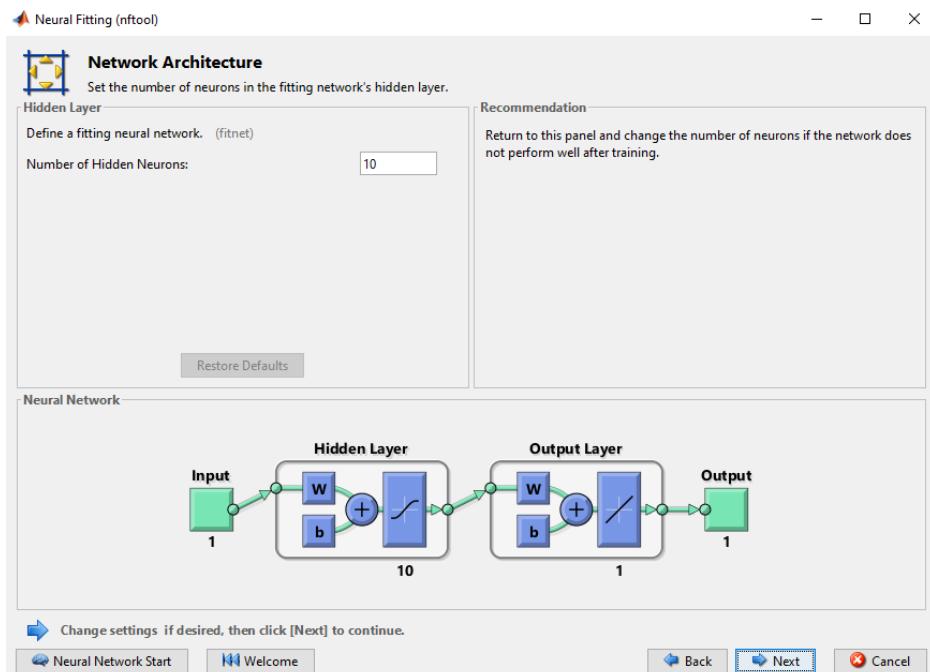


FIGURE 3.9 – Choix du nombre de neurones dans la couche cachée

Finalement, on procède à l'étape finale qui est la création du réseau en sélectionnant **Train** sur la fenêtre en figure 3.10

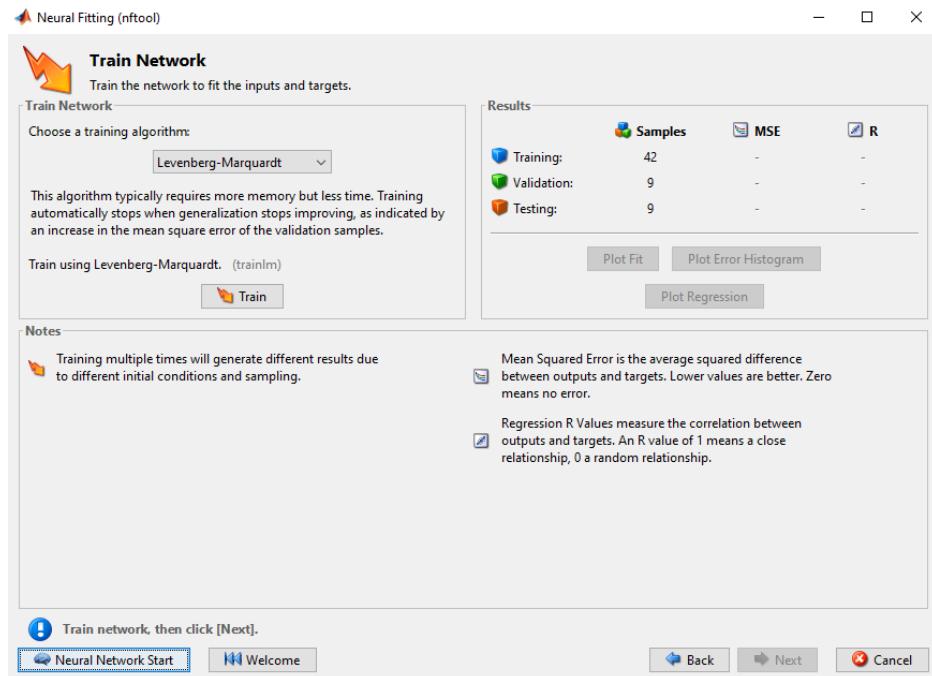


FIGURE 3.10 – Création du réseau de neurone

Étant donné que nous travaillons sous simulink on a trouvé plus simple d'exporter le réseau créé sous format de schéma simulink comme le montre la figure 3.11 Pour valider le réseau comme nous avons mentionné plus haut nous allons utiliser la toolbox pour ce faire on export le réseau créé sur le workspace pour le récupérer par la suite.

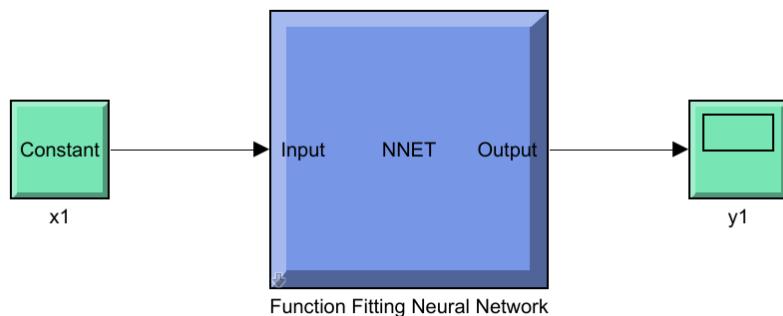


FIGURE 3.11 – Schéma simulink du réseau de neurone

Validation du réseau de neurones créé

Afin de valider le réseau créé on s'appuie sur les droites de régressions en figure 3.12 qui montre que lors de l'entraînement du réseau toutes données récupérée depuis la base de donnée ont été placées soit à 1 soit à -1 conformément au but "target", concernant le test , la droite de

régression montre aussi que les données utilisée pour le test sont elles aussi soit à 1 soit à -1 ce qui est conforme au but.



FIGURE 3.12 – Les droites de régressions

3.3 L'algorithme de décisions

Afin que le conducteur puisse reprendre le contrôle sur son véhicule on lui impose d'avoir les deux mains sur le volant en plus de sa disponibilité qui comme nous l'avons déjà définit , elle comprend l'endormissement du conducteur et l'orientation de sa tête.

La logique de décision comprend trois états :

- **Le mode manuel** : La tâche de la conduite est assurée uniquement par l'action du conducteur , ainsi c'est au conducteur d'orienter le volant afin que la roue suit la route.
- **Le mode automatique** : un contrôleur bas niveau assure l'orientation de la roue selon la trajectoire , le volant est entièrement découplé de la roue et reste centré tout au long de l'activation de ce mode.
- **Le mode de transition** : le contrôle du véhicule est assuré par le contrôleur bas niveau selon la trajectoire .Une commande assurant un retour haptique sur le volant est calculée et injectée sur ce dernier dans le but d'orienter le conducteur et le préparer à reprendre le contrôle de son véhicule d'une manière sécurisée.

Le passage entre les trois états précédents est fait de la manière suivante :

- Si le conducteur est en mode de conduite manuelle , il doit appuyer sur un bouton afin de basculer vers un mode de conduite automatique.
- Si le contrôle du véhicule est assuré par le contrôleur bas niveau et le conducteur montre le besoin de reprendre le contrôle de son véhicule, il doit donc remettre ses mains sur le volant et positionner sa tête en direction de la route , c'est ainsi que la phase de transition est entamée et où une commande haptique est injectée au volant afin de corriger l'orientation du volant et de préparer le conducteur.
- Le passage de l'état de transition au monde manuel est fait si la différence entre l'angle au volant et celui de la roue ne dépasse pas ϵ qui garantit le bon positionnement dans la voie donc éviter les sorties de voies.

Un mode de conduite vient s'ajouter aux trois cités plus haut qui est le mode auto-vibratoire et ceci afin d'accroître la sécurité dans l'accomplissement de la tâche de la conduite.

Si le conducteur est en mode manuel mais que ce dernier dépasse le seuil d'endormissement

autorisé , un passage en **mode auto-vibratoire** est fait où l'orientation des roues est faite par le même contrôleur bas niveau cité plus haut(voir mode automatique).De plus d'assurer un retour au centre du volant.Une commande haptique est injectée au volant qui sera sous forme de vibrations.Ces dernières auront pour but de réveiller le conducteur.

Un passage en mode automatique pure est prévu si le conducteur lâche le volant (on ne détecte plus ses deux mains).

Le passage du mode auto-vibratoire vers le mode de transition est effectué si les deux mains du conducteur sont correctement positionnées et le non endormissement de ce dernier est détecté par le driver monitoring.

La figure 3.13 montre un schéma explicatif de la logique de décision explicité plus haut.

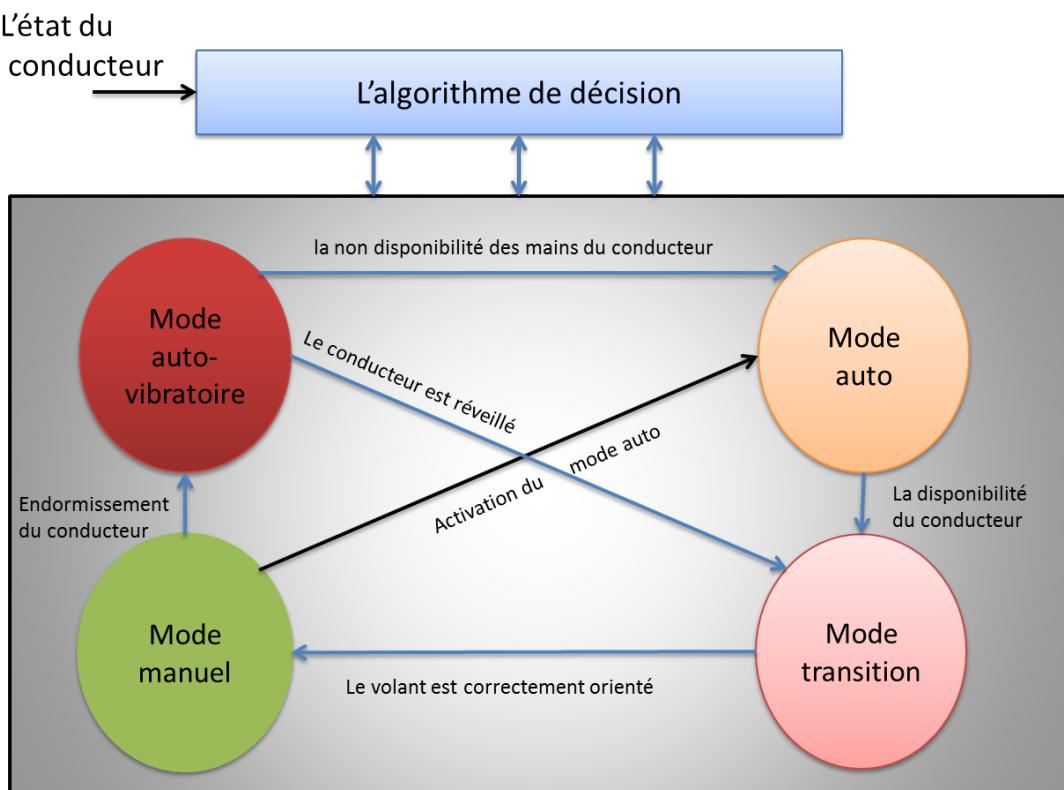


FIGURE 3.13 – Schéma explicatif de l'algorithme de décision

Chapitre 4

La commande par retour haptique

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent il était question d'expliquer la fonction décisionnelle et le fonctionnement de l'algorithme. Le mode de transition qui comme vous l'avez remarqué utilise une commande haptique qui assure la bonne orientation du volant par rapport à l'angle à la roue.

Dans ce chapitre il s'agit donc de développer une commande permettant d'assurer l'orientation du volant tout en respectant l'action du conducteur sur le volant, cette dernière doit aussi garantir une reprise en main du véhicule par le conducteur en toute sécurité.

4.2 Commande adaptative par retour haptique du modèle continu

A partir de la consigne qui est l'angle au niveau de la roue un modèle de référence permettant de convertir la consigne en angle désiré au niveau du volant.

En parallèle la consigne récupérée à la roue sera injecté dans le contrôleur qui donnera la commande qui sera appliquée au volant, la sortie du système de direction est alors comparée avec celle obtenue par le modèle de référence pour créer une consigne en erreur. Elle sera à son tour injectée dans le mécanisme d'ajustement qui lui fournira les paramètres au contrôleur afin de pouvoir adapter la commande.

Un schéma explicatif illustrant la commande adaptative est représenté en figure 4.1.

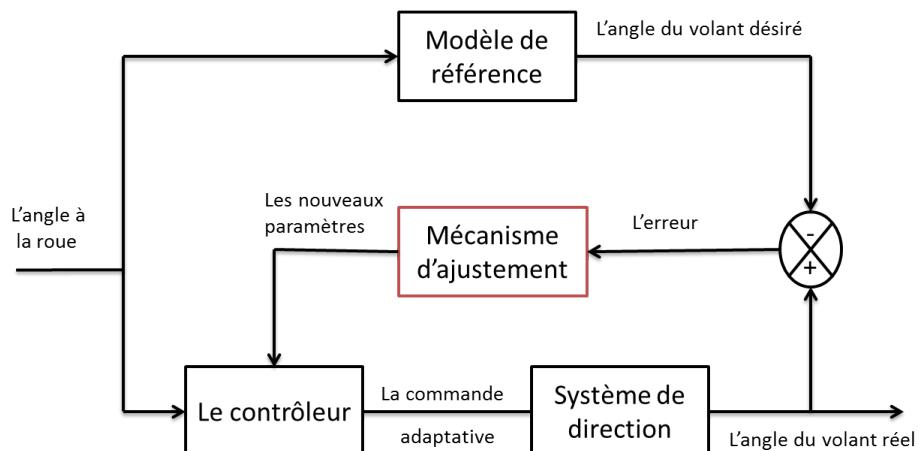


FIGURE 4.1 – Schéma explicatif de la commande adaptative

Le modèle du système de direction peut être simplifié [8] par l'équation suivante :

$$J_s \ddot{\theta} = -B_s \dot{\theta} + U$$

On procède à l'écriture du modèle sous forme de représentation d'état.

Le modèle d'état du système de direction est le suivant :

$$\begin{aligned} sys &= \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_s}{J_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_s} \end{pmatrix} U \\ y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \end{cases} \\ sys &= \begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -286.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 50 \end{pmatrix} U \\ y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \end{cases} \end{aligned}$$

Afin de pouvoir assurer l'ajustement des paramètres nous nous sommes basé sur la théorie des équations de Lyapounov [9], la section suivante présente le développement de ces équations.

L'équation qui permet de régir de comportement d'un système est la suivante :

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu$$

La réponse désirée est décrite par le modèle suivant :

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y + b_m u$$

Avec :

$a_m > 0$ et le signal de référence (angle à la roue) est borné.

Le régulateur est alors écrit sous la forme :

$$u = \theta_1 u_c - \theta_2 y$$

L'erreur de poursuite est :

$$e = y - y_m$$

Comme on veut minimiser l'erreur de poursuite il est donc naturel d'établir le modèle mathématique propre de ladite erreur :

$$\frac{de}{dt} = -a_m e - (b\theta_2 + a - a_m) + (b\theta_1 - b_m) u_c$$

On construit un mécanisme d'ajustement qui agira sur les paramètres θ_1 et θ_2 , on suppose $b\gamma > 0$ et on introduit la fonction quadratique dite fonction de Lyapounov suivante :

$$V(e, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_2 + a - a_m)^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_1 - b_m)^2 \right)$$

La dérivée peut s'écrire alors sous la forme :

$$\frac{dV}{dt} = e \frac{de}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt}$$

Après simplification on obtient donc :

$$\frac{dV}{dt} = -a_m e^2 + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \left(\frac{d\theta_2}{dt} - \gamma y e \right) + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \gamma y e \right)$$

Si les paramètres sont modifiés selon les lois ci-dessous :

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma ye$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \gamma ye$$

On obtient donc :

$$\frac{dV}{dt} = -a_m e^2$$

La première dérivée de la fonction de Lyapounov est donc une fonction semi-définie négative ce qui implique que la fonction primitive est notamment décroissante $V(t) < V(0)$ et donc e, θ_1 et θ_2 sont bornées à leurs tours.

Le schéma suivant montre le diagramme de la commande adaptative à base d'un modèle de référence construite par la théorie de Lyapounov.

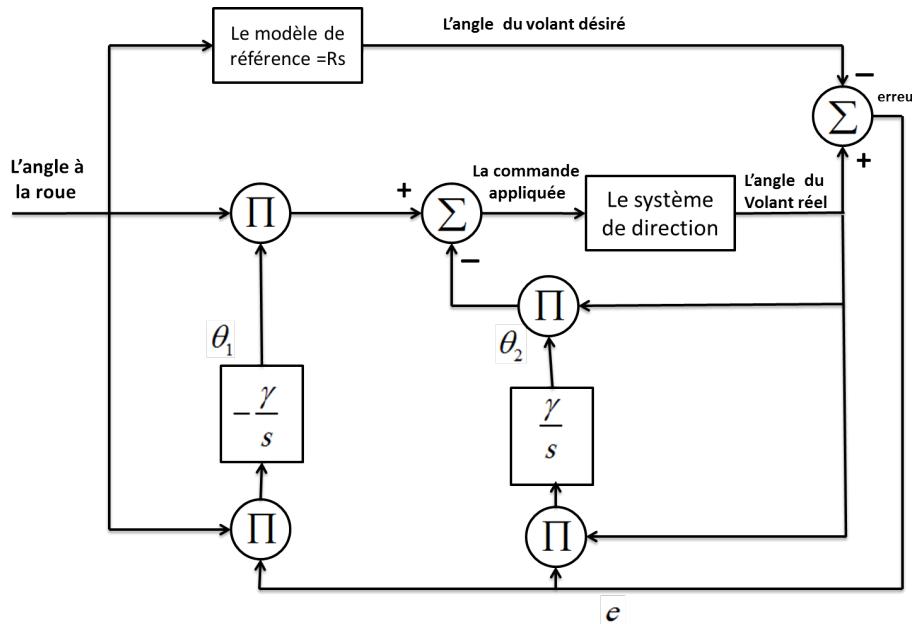


FIGURE 4.2 – Le diagramme de la commande adaptative à base d'un modèle de référence

où le modèle de référence est gain Rs permettant de convertir l'angle de la roue vers l'angle au volant équivalent.

4.2.1 Résultat de simulation sur modèle continu

La commande développée plus haut a été construite sous matlab/simulink et appliquée sur un modèle d'un véhicule doté d'une direction assistée de type "steer by wire".

Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue sont présentés sur la figure suivante :

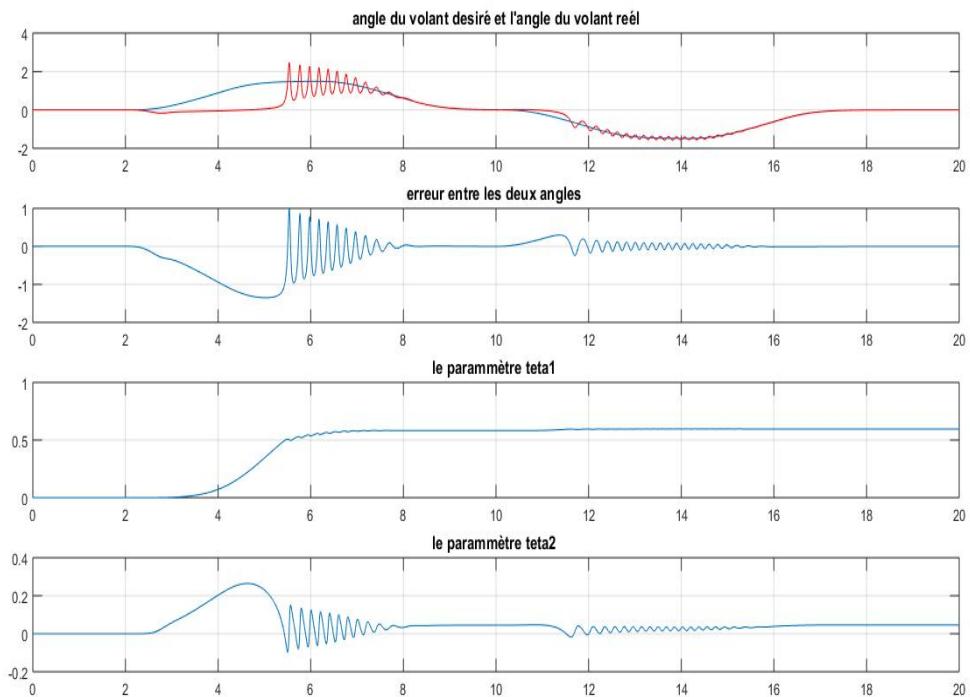


FIGURE 4.3 – Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue

On constate que l'angle du volant montre des oscillations avant convergence et ceci peut être expliqué par le processus d'ajustement sur lequel se base la commande adaptative. En effet le temps de convergence des deux paramètres θ_1 et θ_2 fait qu'un retard de convergence de la réponse face à la consigne est aperçu.

Afin de pallier à ce problème créé par le retard de convergence nous avons initialisé les deux paramètres d'ajustement θ_1 et θ_2 à des valeurs proches de leurs valeurs finale à la convergence de la commande.

Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue sont présentés sur la figure suivante :

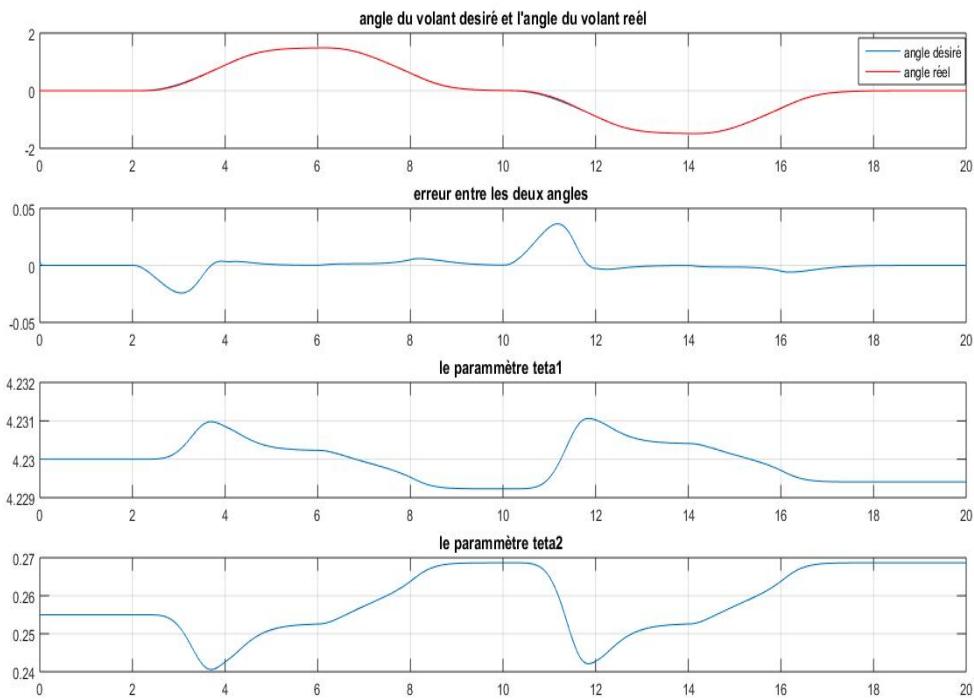


FIGURE 4.4 – Les résultats de la simulation face à une consigne de l'angle à la roue

On constate que l'angle du volant est superposé par rapport à la consigne c'est à dire l'angle du volant désirer. L'erreur entre les deux angles (l'angle réel et l'angle désiré) est appréciable quant à elle (elle est de l'ordre de 1%).

4.2.2 Validation de la commande sur le simulateur CoCoVeA

Après avoir répondu aux spécifications du cahier des charges sous simulation à l'aide du modèle continu, il s'agit donc de valider la commande adaptative à l'aide du simulateur CoCoVeA.

Afin de pouvoir implémenter la commande que nous avons développée sur le simulateur il fallait en premier temps discréétiser la commande.

Discréétisation de la commande La commande que nous avons développée utilise des intégrateurs continus , afin de la discréétiser on se doit de les remplacer par des intégrateurs discrets. Le mécanisme d'ajustement discret est le suivant :

$$\theta_1 = \frac{-\gamma e u_c}{z - 1}$$

$$\theta_2 = \frac{\gamma e y}{z - 1}$$

Le schéma figure 4.5 montre la discréétisation de la commande.

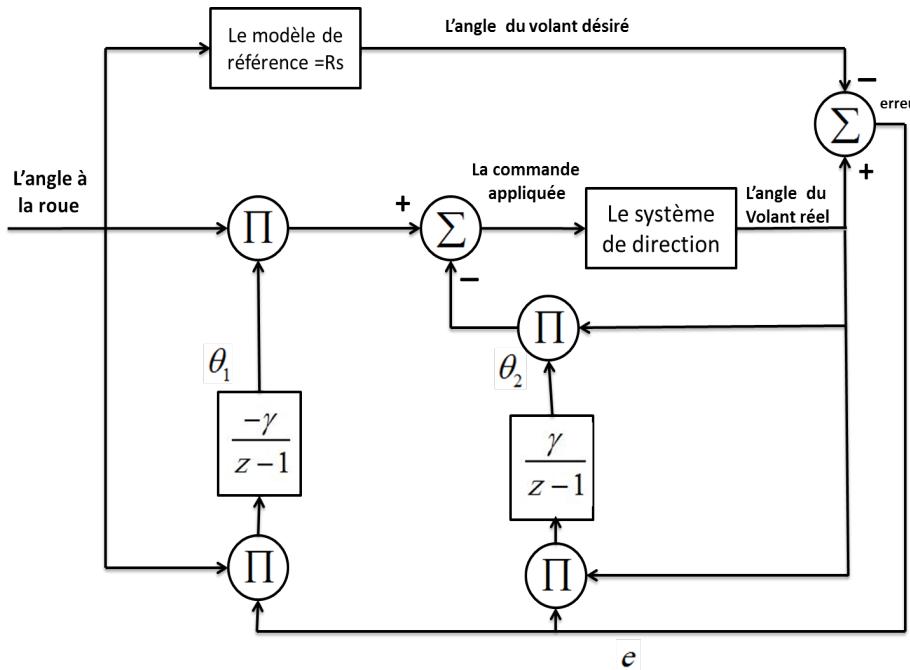


FIGURE 4.5 – La schéma de la commande après discréétisation

Les résultats récupérés après implémentation de la commande sont montrés dans la figure 4.6

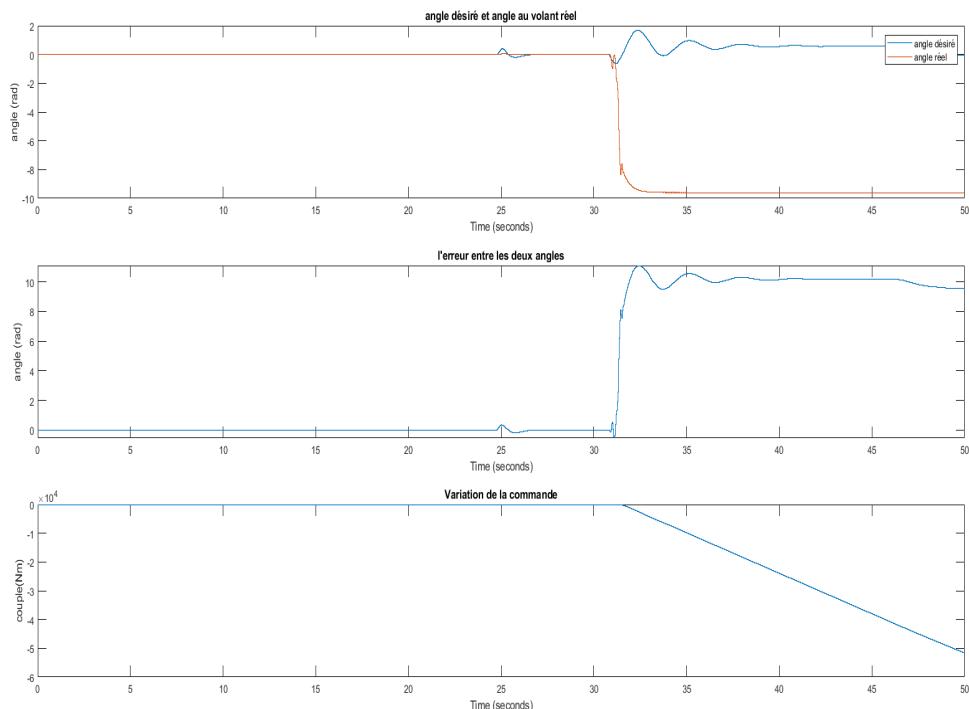


FIGURE 4.6 – Les résultats obtenus après implémentation de la commande sur le simulateur CoCoVeA

On remarque que l'angle au volant ne suit pas l'angle de référence soit l'angle à la roue, de plus , le volant est un système physique dont l'orientation est limitée, ceci dit la commande que nous avons développée ne prend pas en considération cette limitation.

Afin de pallier à ce problème nous avons saturé la commande de telle sorte à borner l'orientation du volant afin qu'il reste dans sa limite acceptable d'orientation.

Le schéma en figure 4.7 montre la saturation de la commande.

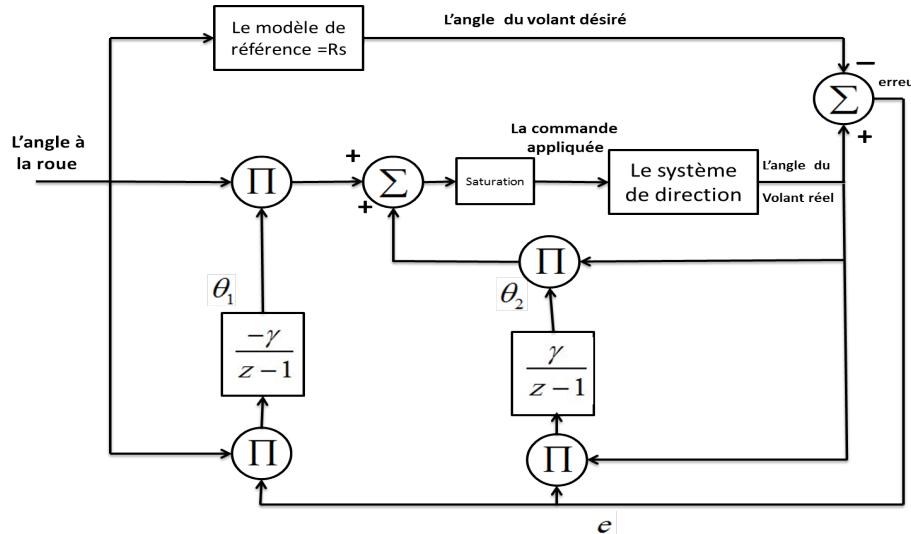


FIGURE 4.7 – La schéma de la commande après discréétisation et saturation

Les résultats de la simulation obtenus sont illustrés sur la figure suivante :

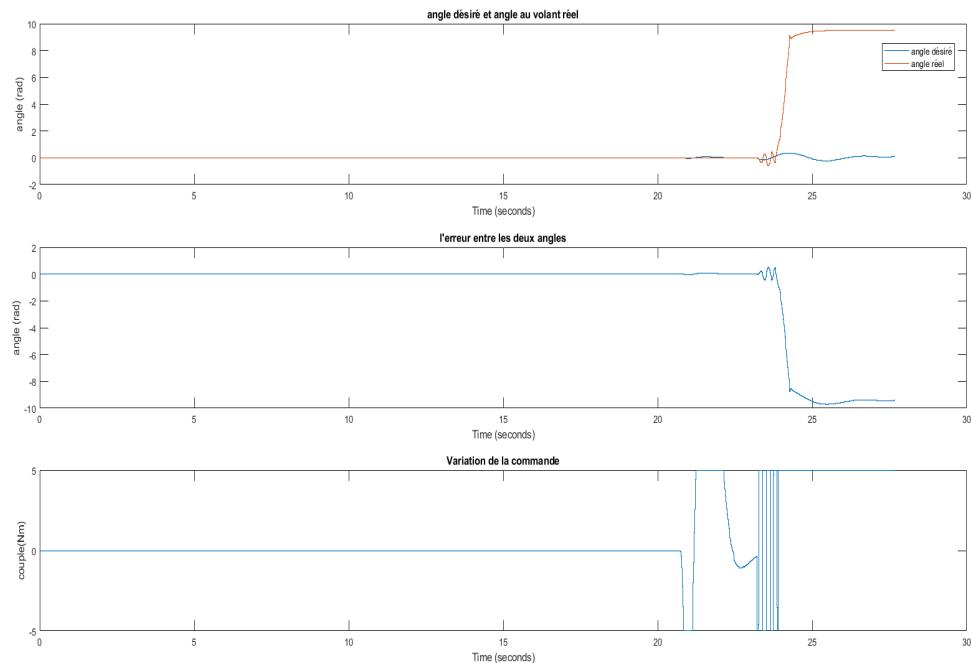


FIGURE 4.8 – Les résultats obtenus après implémentation de la commande saturé sur le simulateur CoCoVeA

On constate après saturation de la commande que l'objectif de suivi de l'angle de référence par le volant n'est pas assuré par cette commande.

La commande que nous avons développée dans cette section paraît selon les premiers résultats de simulation qu'elle satisfait nos objectifs, cependant vu que le volant est un système physique avec ses propres limitations, il s'est avéré inconcevable d'appliquer cette commande elle ne prend pas en compte cette limitation physique sur le volant. Ceci dit nous avons tenté de résoudre cette problématique en saturant la commande mais cette dernière a fait que la commande n'atteint la valeur nécessaire pour assurer la bonne orientation du volant, cette approche de commande telle qu'elle n'est donc pas intéressante sur un système tel que celui qu'on étudie et c'est pour cela d'autre approche de commande seront explorées dans les sections suivantes.

4.3 Commande par retour haptique en appliquant un correcteur de type proportionnel

Une des approches les plus simples à mettre en place en automatique est le correcteur *PID*, qui est un correcteur basique et simple à calculer. Qui permet en général d'avoir des solutions qui se rapprochent du but le plus rapidement.

Pour notre cas nous avons commencé à implémenter un correcteur de type proportionnel *P* dont le gain a été réglé expérimentalement.

Ce correcteur s'est vu implémenter en premier temps pour garantir un retour au centre du volant en mode automatique comme le montre le schéma en figure 4.9

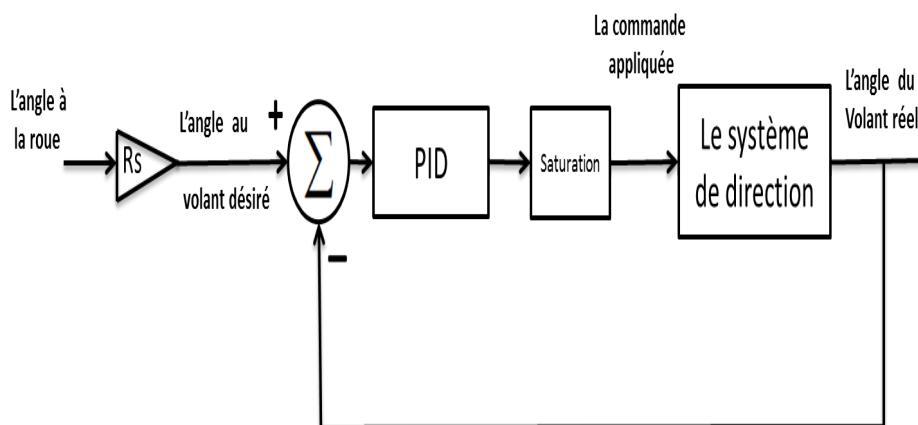


FIGURE 4.9 – Le correcteur proportionnel pour garantir le retour au centre

Les résultats de son application sur le simulateur CoCoVeA en mode automatique sont illustrés sur la figure suivante :

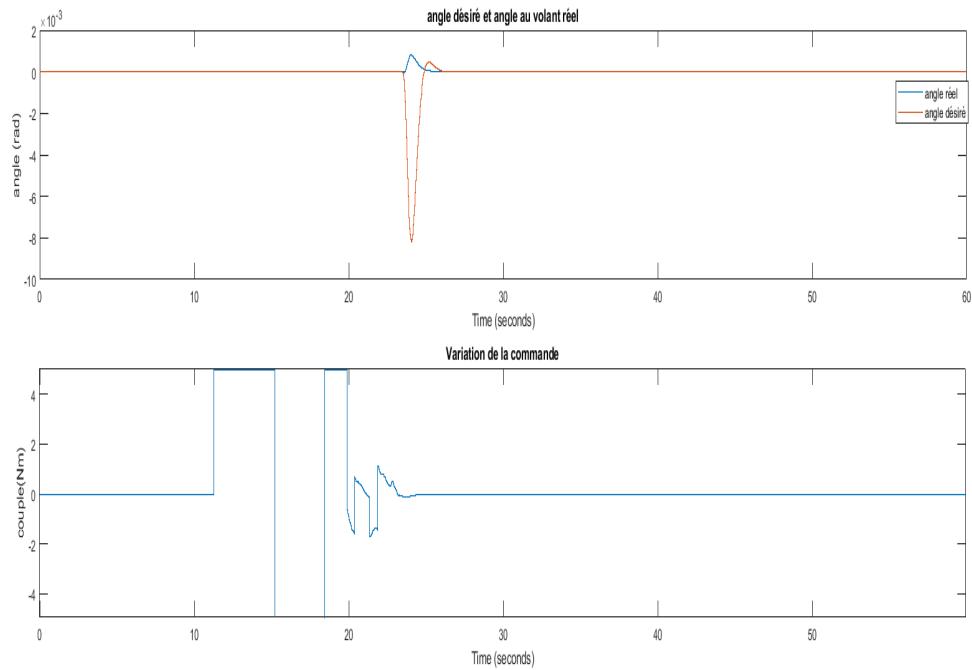


FIGURE 4.10 – La réponse du système face à la commande par un correcteur proportionnel

L’activation du mode automatique est faite à l’instant $t = 23s$ on peut remarquer un régime transitoire précédent une convergence de la réponse soit l’angle au volant vers la consigne désirée $consigne = 0 \text{ rad}$

Après avoir vérifié que le correcteur proportionnel pouvait donner des résultats conformes aux objectifs fixés par le mode automatique, nous avons tenté de l’implémenter dans le bloc qui gère la transition et ceci afin qu’il garantit le suivi de l’angle à la roue par l’angle au volant.

Pour ce faire nous avons changé la consigne qui cette fois passe de $consigne = 0 \text{ rad}$ à $consigne = angle_{reference}$ comme le montre le schéma en figure 4.9

Les résultats de la simulation en mode transition sont donnés par la figure 4.11

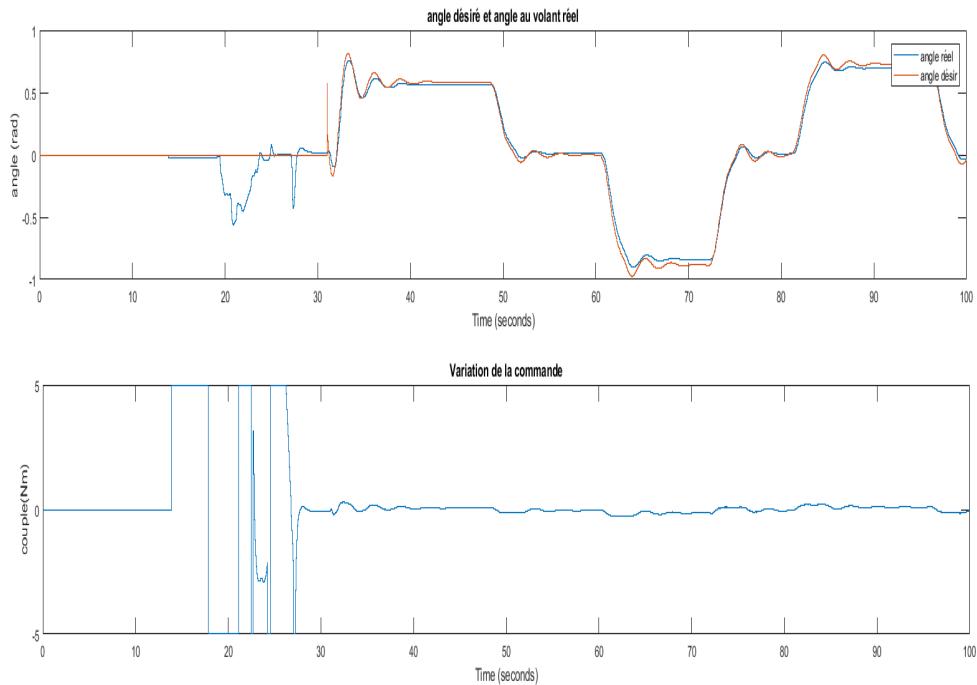


FIGURE 4.11 – La réponse du système face à la commande par un correcteur proportionnel

Le mode de transition est activé sur la figure 4.11 à l'instant $t = 31s$ où l'on peut voir que le volant se met à suivre l'angle de référence c'est à dire l'angle à la roue , concernant la commande une saturation est toute de même nécessaire.

Après avoir manipulé le simulateur CoCoVeA lors de l'implémentation du correcteur proportionnel nous avons constaté que l'action du correcteur n'est faite qu'en absence du couple conducteur , en effet, si vous appliquez un couple T_d quand vous êtes en transition, vous n'allez donc pas ressentir le retour haptique qui doit être sous forme de correction de l'angle au volant .Ce correcteur ne respect donc pas le cahier des charges imposé concernant le retour haptique.

Après avoir constaté que le correcteur proportionnel pouvait assurer le suivi de l'angle de la roue par le volant si le conducteur n'intervient pas en mode de transition il nous a paru intéressant de reprendre cette approche *PID* de commande et d'ajouter l'action du conducteur.

4.4 La commande PID à paramètres adaptatifs

Pour cette commande nous avons repris le mécanisme d'ajustement des paramètres par la commande adaptative ceci en l'appliquant sur le correcteur *PI* pour ajuster le gain du proportionnel et celui de l'action intégrale.

$$u = \theta_1 e + \theta_2 \frac{e}{z - 1}$$

Ce mécanisme s'appuie sur la théorie de la commande adaptative qui est développée par les équations suivantes :

$$\theta_1 = \frac{-\gamma e u_c}{z - 1}$$

$$\theta_2 = \frac{\gamma e y}{z - 1}$$

Le schéma explicatif de cette commande est montré en figure 4.12

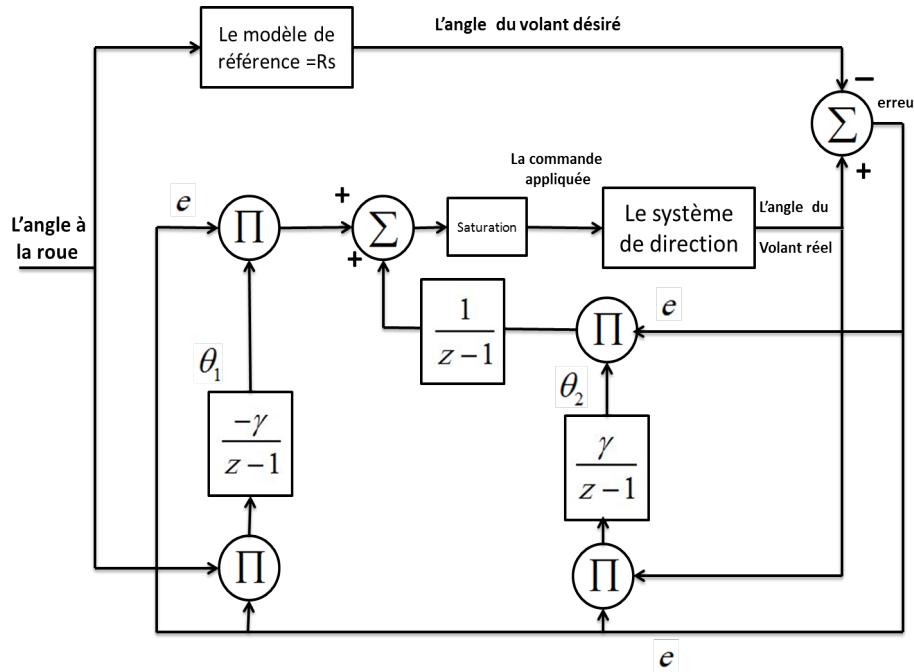


FIGURE 4.12 – Schéma de la commande par le correcteur PI à paramètres adaptatifs

Les résultats de l'implémentation sur le simulateur CoCoVeA sont illustrés par la figure 4.13

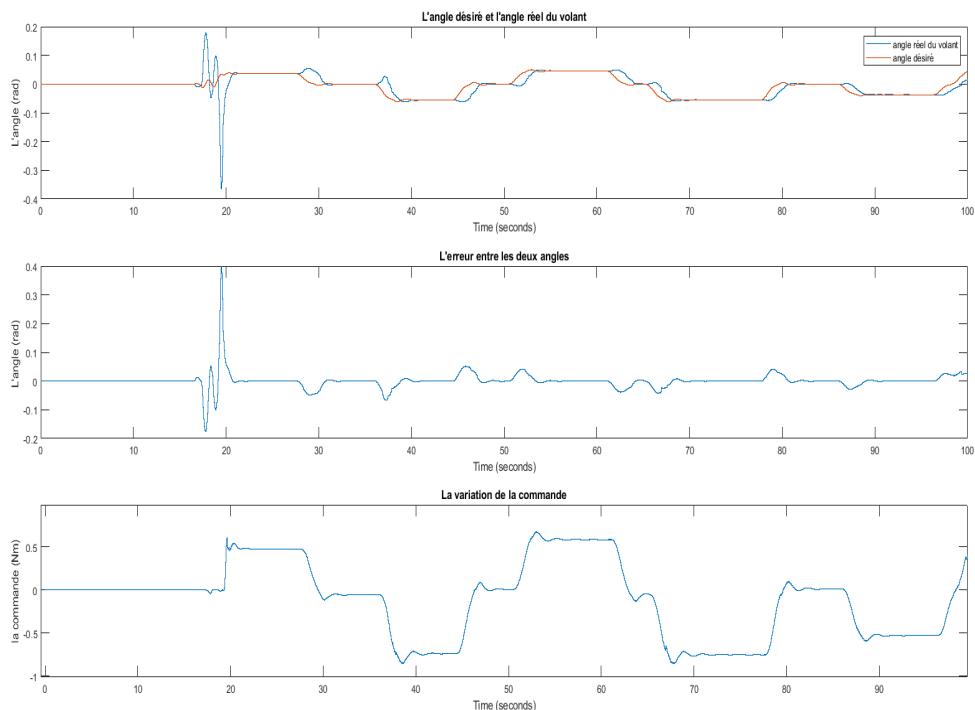


FIGURE 4.13 – La réponse du système face à la commande par un correcteur PI adaptatif

Le suivi de la référence par l'angle au volant est fait mais avec un certain retard , qui correspondant au temps nécessaire que prend le mécanisme d'ajustement pour affiner les paramètres θ_1 et θ_2 comme le montre la figure 4.14.

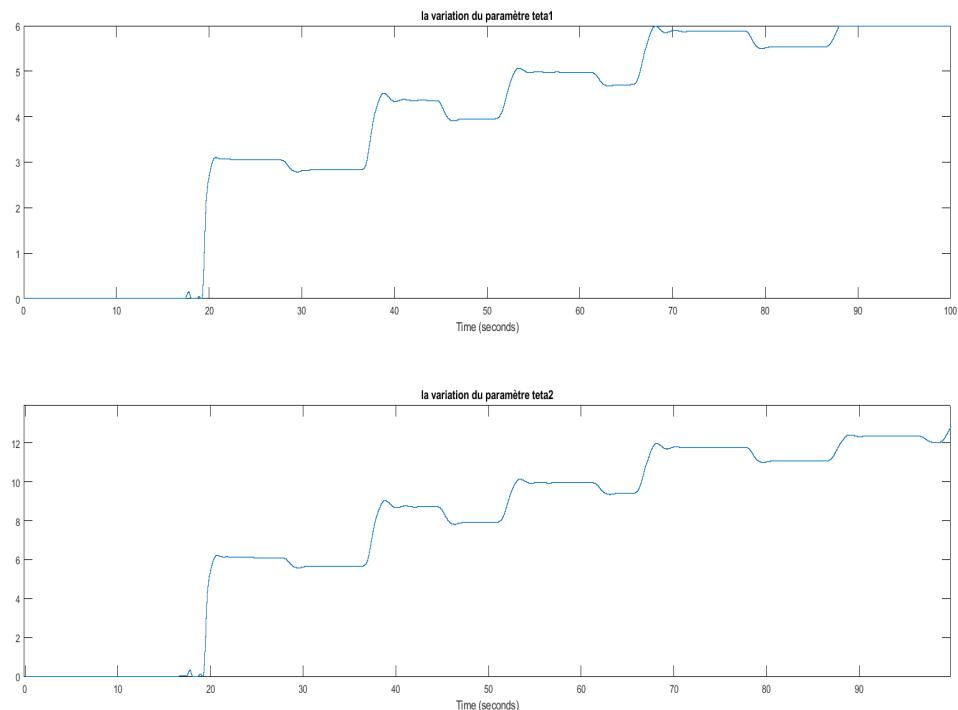


FIGURE 4.14 – L'ajustement des paramètres du correcteur PI

Après avoir implémenté et tester la commande sous le simulateur nous avons remarqué que le même problème que présent le correcteur proportionnel est soulevé par cette commande ;c'est à dire que le retour haptique ne peut être fait qu'en cas d'absence du couple conducteur.Nous avons alors introduit le couple conducteur en action inverse.Ceci aura pour effet de compenser l'action du couple conducteur appliqué sur le volant comme le montre le schéma en figure 4.15

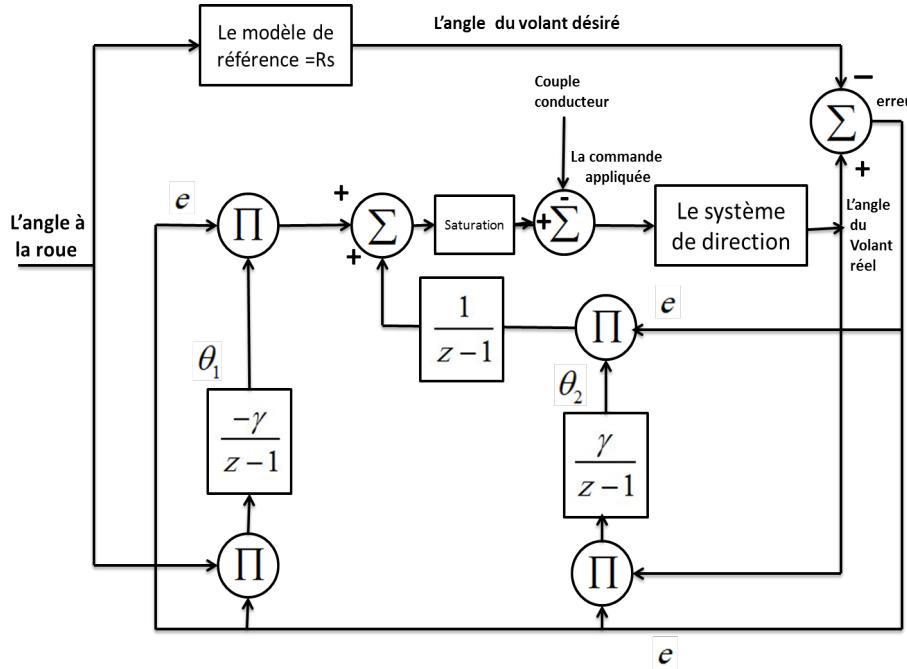


FIGURE 4.15 – schéma de la commande par correcteur PI adaptatif à rejet du couple conducteur

La figure 4.16 montre les résultats de l'implémentation de la commande sous le simulateur CoCoVeA.

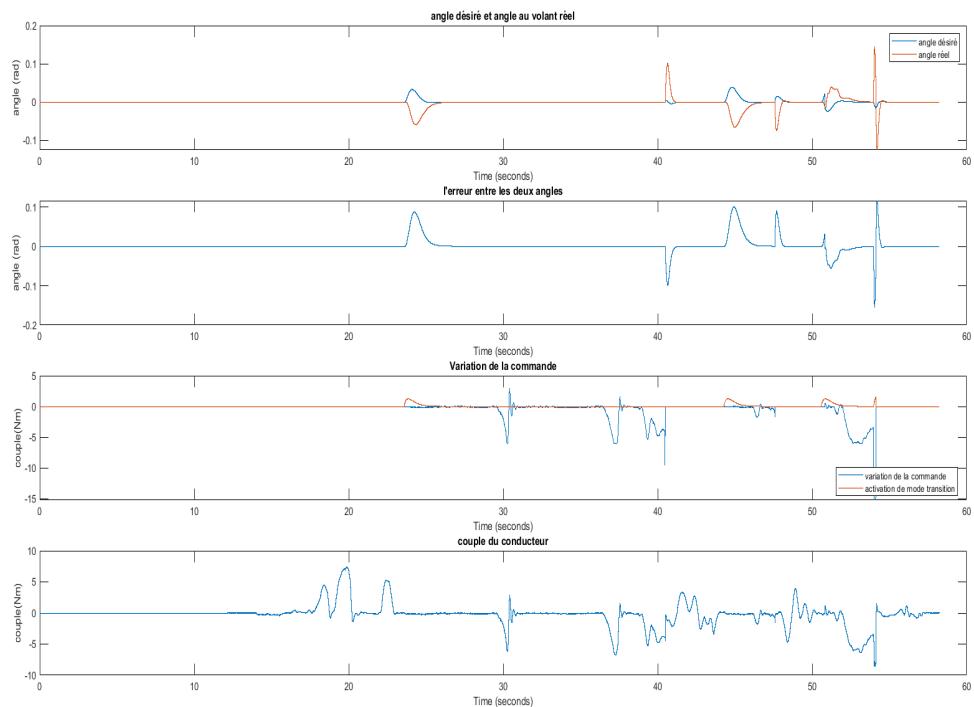


FIGURE 4.16 – schéma de la commande par correcteur PI adaptatif à rejet du couple conducteur

L'activation du mode de transition est faite aux instants $t_1 = 23s, t_2 = 44s, t_3 = 51s$ et

$t_4 = 54s$ où l'on a remarqué qu'un retour haptique est assuré par la commande ceci dit dans le cas où le couple conducteur est appliqué dans le sens inverse de l'angle de référence la commande réagit brusquement et tente d'éliminer la résultante du couple conducteur pour ensuite corriger l'orientation du volant comme on peut le voir à l'instant $t_4 = 54s$ où l'angle au volant passe par les deux extrémités afin de rejeter le couple conducteur pour ensuite suivre la référence.

L'inconvénient de cette commande est la puissance de sa réaction et ceci s'accentue lors de l'application du couple conducteur , de plus, parfois elle présente des sorties de voie du véhicule ce qui est un comportement dangereux si on considère un système critique comme une voiture.Cette commande est donc non satisfaisante du cahier des charges fixé plus haut.

4.5 Commande adaptative avec modèle de référence stabilisé

La commande développée dans cette section s'appuie sur la théorie de la commande adaptative et du mécanisme d'ajustement des paramètres du correcteur cependant un modèle de référence stabilisé a été intégré dans le calcul de la commande.

Le modèle de référence est le modèle discret de la direction assistée simplifie qui peut être exprimé par les équations suivantes :

$$sys_d = \begin{cases} \begin{pmatrix} \theta(k-1) \\ \theta(k-2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.003491 \\ 0 & 3.619e^{-13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta(k) \\ \theta(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.01684 \\ 0.1745 \end{pmatrix} U \\ y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} \theta(k) \\ \theta(k-1) \end{pmatrix} \end{cases}$$

Le calcul des valeurs propres du modèle nous permet de constater que le système possède un pôle qui le met à la limite de la stabilité :

$$poles = \{1, 0\}$$

Pour pallier à ce problème on se propose de stabilisé le modèle en appliquant un placement de pôles correspondant aux équations suivantes :

$$U = \beta u_c - K \begin{pmatrix} \theta(k) \\ \theta(k-1) \end{pmatrix}$$

Ce modèle stabilisé est considéré comme le modèle de référence de la commande adaptative.où la consigne du modèle est l'angle de référence (angle à la roue amener au volant) comme le montre le schéma explicatif en figure 4.17

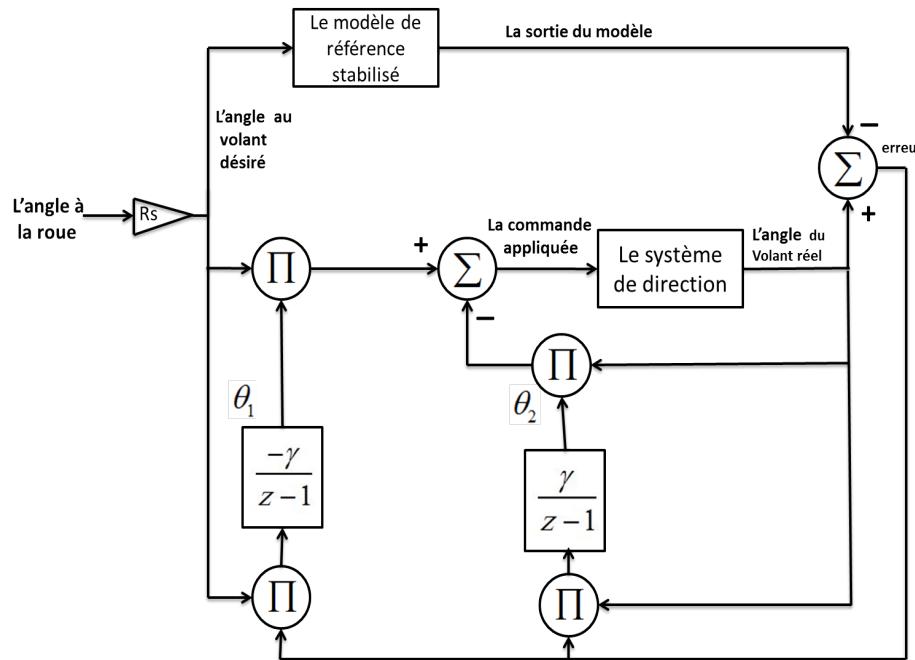


FIGURE 4.17 – schéma de la commande adaptative avec modèle de référence

Les résultats de l'implémentation sur le simulateur CoCoVeA sont illustrés par la figure 4.18

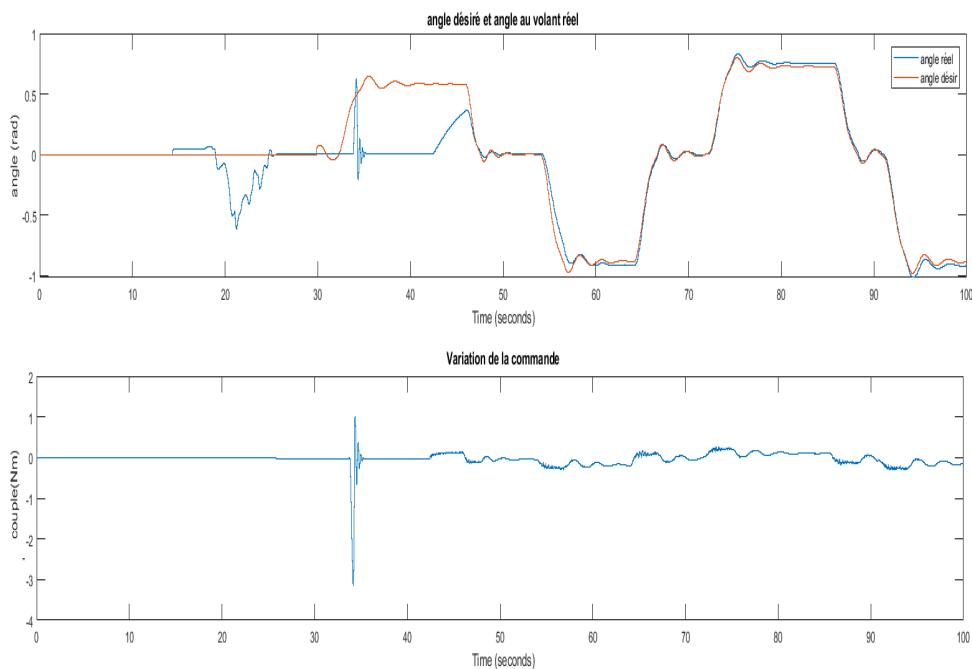


FIGURE 4.18 – La réponse du système face à la commande adaptative avec modèle de référence

L'application de la commande sans la présence du couple conducteur est faite à l'instant $t = 42s$ où l'on peut voir que l'angle au volant suit l'angle de référence avec un certain retard à

la convergence ceci causé par le temps que prend le mécanisme d'ajustement comme le montre la figure 4.19

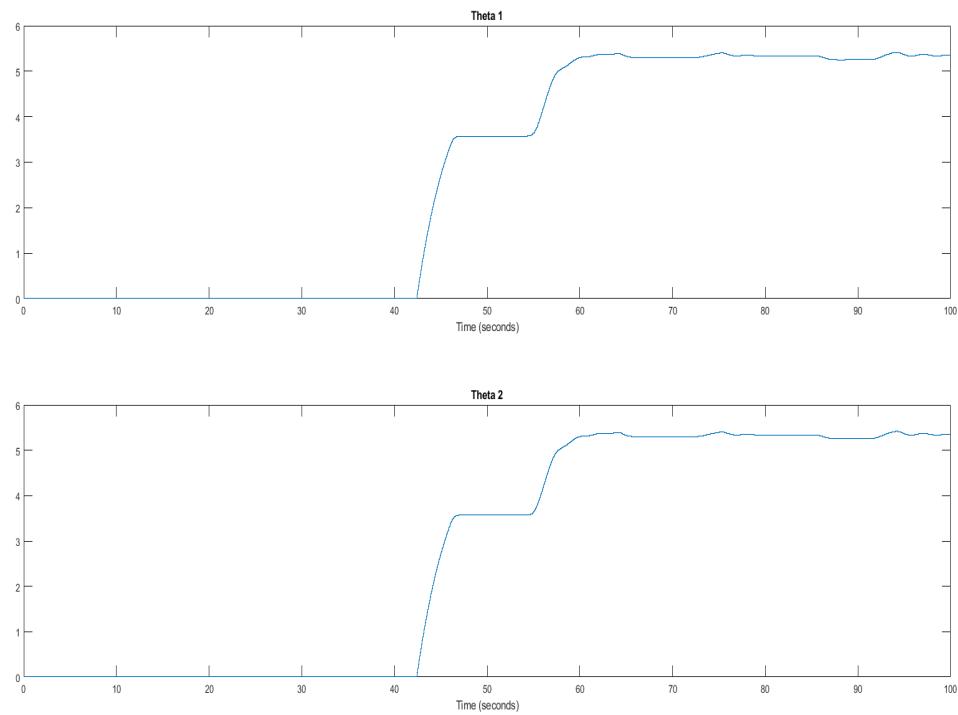


FIGURE 4.19 – L'ajustement des paramètres de la commande

L'application de la commande avec la présence du couple conducteur est faite à l'instant $t = 42s$, $t = 55s$ et $t = 85s$ où l'on peut voir que l'angle au volant suit l'angle de référence comme le montre la figure 4.20 ceci nous permet de dire que cette commande assure le retour haptique de l'angle au volant.

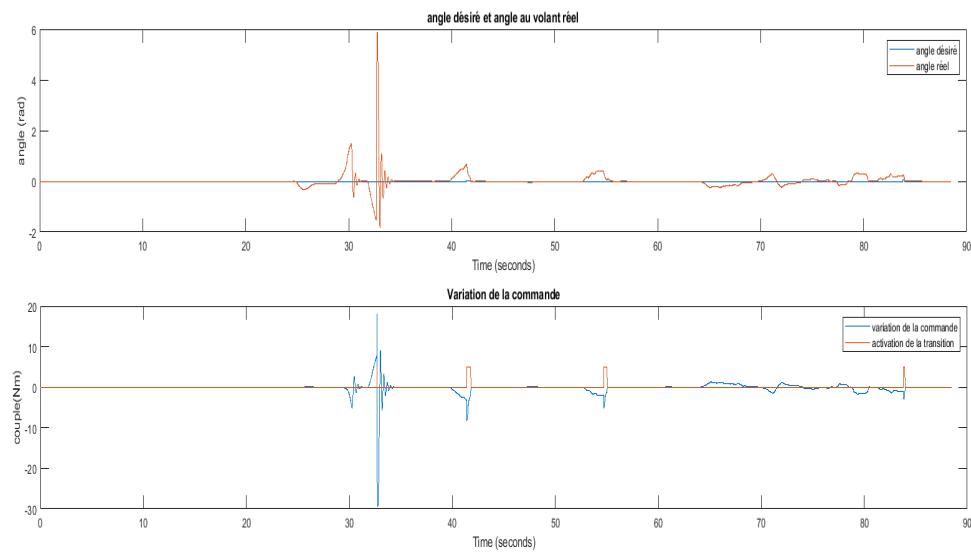


FIGURE 4.20 – La réponse du système face à la commande adaptative avec modèle de référence et le couple du conducteur

4.5.1 généralisation de la commande adaptative avec modèle de référence

Après avoir validé la commande dans le mode de transition on a voulu généraliser cette méthode et l'appliquer au mode de conduite automatique et ceci afin d'assurer le retour au centre du volant.

Une fonction est donc créée afin de changer l'angle de référence en fonction du mode de conduite sur lequel le conducteur se place, les résultats de l'implémentation de la commande sont donc illustrés par la figure 4.21

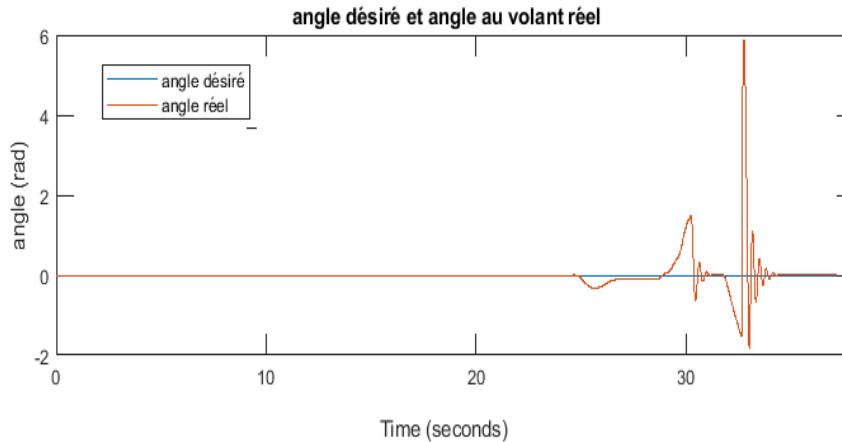


FIGURE 4.21 – Les résultats de la généralisation de la commande adaptative avec modèle de référence

Le mode automatique est donc actif à l'instant $t = 31s$ où l'on peut voir que l'angle suit la référence , l'application de perturbations sur le volant afin de tester la robustesse de la commande en ce mode est perçu à partir de l'instant $t = 33s$ où le volant réagit conformément à nos attentes c'est à dire qu'il continu à suivre l'angle de référence au régime permanent.

4.6 La commande auto-vibratoire

4.7 Introduction

Le conducteur dans son véhicule peut parfois présenter des signes de fatigue liée à sa forte charge de travail ou / et sa non-aptitude à la conduite ceci peut être détecté par l'endormissement , en effet un conducteur fatigué après avoir fourni de l'effort lors de la tâche de la conduite sur une durée plus au moins longe ou encore qui ne peut pas assurer la tâche de la conduite d'une manière sur peut être détecter par le système de driver monitoring. De ce fait nous avons pensé à une méthode afin de sortir le conducteur de son état d'endormissement et attirer son attention sur sa conscience de la situation qui se dégrade s'il présente des signes de sommeil.

Nous avons à cet effet utilisé une commande par retour haptique sur le volant qui consiste à injecter des vibrations sur le volant afin de réveiller le conducteur et/ou le sensibiliser au danger qu'il court.

4.7.1 la commande par retour haptique du mode auto-vibratoire

Afin de détecter l'endormissement du conducteur on exploite la donnée du driver monitoring prévu à cet effet.

La donnée *DDM – DIAG* nous renseigne sur le niveau de l'endormissement du conducteur comme nous l'avons expliquée dans la section sur la disponibilité du conducteur.

On exploite cette donnée pour définir les niveaux acceptables et les non acceptable , de ce fait nous avons convenu que si le conducteur commence à présenter des signes d'endormissement ce qui correspond au niveau légèrement somnolent un passage au mode auto-vibratoire s'effectue.

Une fois le conducteur est passé en mode auto-vibratoire, il ressentira des vibrations sur son volant , ce dernier sera centré et découplé des roues. Concernant le bas niveau, entre autres l'orientation des roues elle sera assurée par le contrôleur bas niveau le même que celui assurant le mode automatique d'où l'appellation auto.

Afin d'assurer la reprise en mains du véhicule , le conducteur doit garder ses deux mains sur son volant et être éveillé, une fois que l'état de l'endormissement revient à son seuil acceptable, le conducteur pourra reprendre en mode manuel et ceci en passant bien entendu par le mode de transition qui assure le passage entre les deux modes en toute sécurité.

Les résultats de l'implémentation de ce mode sur le simulateur CoCoVeA sont illustrés par les figures 4.22 et 4.23 qui montrent l'effet de cette commande sur l'orientation du volant et sur l'endormissement du conducteur.

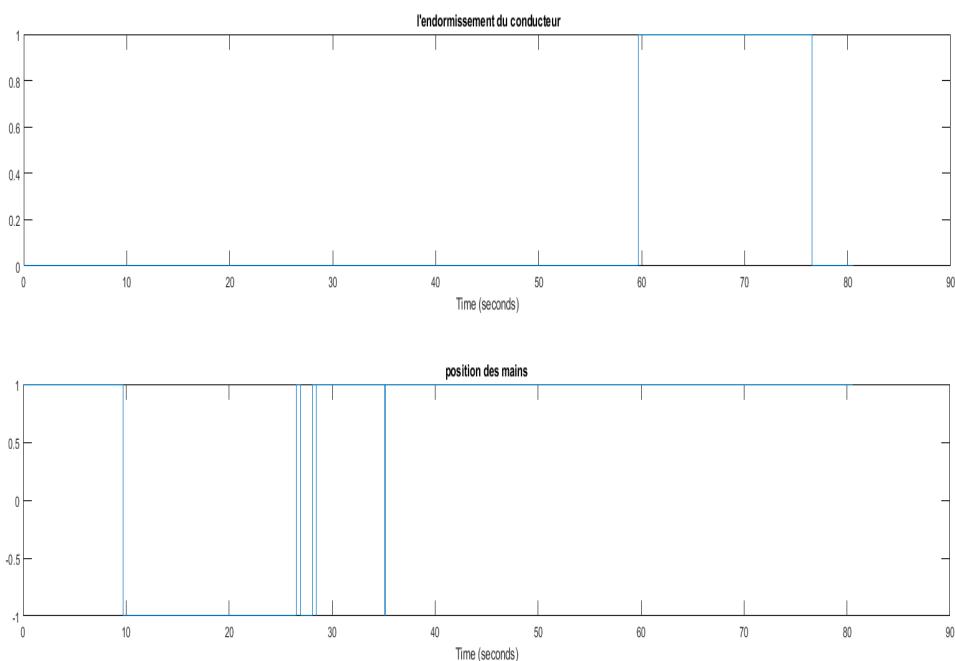


FIGURE 4.22 – La visualisation de la disponibilité du conducteur

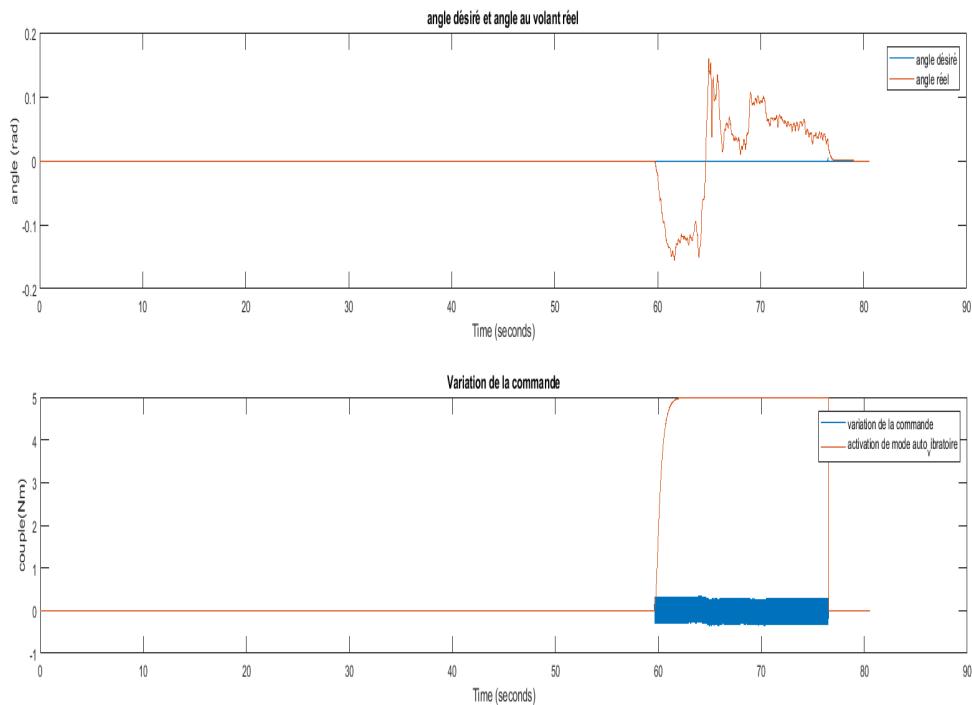


FIGURE 4.23 – Les résultats de l’implémentation du mode auto-vibratoire

Où l’on peut voir que le conducteur présente des signes d’endormissement à l’instant $t = 59s$ où la variation indicatrice de l’état du conducteur passe de 0 à 1 même si ce dernier garde ses deux mains sur le volant ,comme on peut le constater sur la figure 4.22. Cet endormissement permet donc le passage du mode manuel au mode auto-vibratoire par le changement de l’angle de référence qui passe à $consigne = 0$ afin d’effectuer le retour au centre.Les vibrations sur le volant sont présentées par la figure 4.23 plus particulièrement sur la partie présentant la commande où l’en voit que cette dernière qui effectue des passages de [0.3 à –0.3] tout au long de l’activation du mode auto-vibratoire.

A l’instant $t = 77s$, l’état éveillé du conducteur est détectée , ainsi donc le passage du mode auto-vibratoire au mode manuel est effectué , ceci se traduit donc par l’annulation de la commande vibratoire à cet instant.

4.8 Conclusion

La commande assurant le retour haptique sur le volant permettant d’orienter le volant selon l’angle à la roue s’est vu dans un premier temps développer sur le modèle continu du système de direction, la commande résultante a été par la suite implémenter sur le simulateur, où des problèmes ont été détecter notamment parce que cette dernière ne prend pas en considération les limitations sur le volant.

Afin à résoudre cette problématique nous avons en effet pensé à saturer la commande cependant le résultat n’était pas en accord avec nos attentes.

Un correcteur de type proportionnel à été développer par la suite afin résoudre la problématique.Le correction permettait en effet de garantir l’orientation du volant cependant quand il était question de rajouter le couple conducteur, le contrôleur montrait des résultats qui ne sont pas en accord avec nos objectifs de ce qui du retour haptique.

Nous avons par la suite exploité notre idée primaire qui était de créer le retour haptique avec une commande adaptative mais cette fois en l'hybridant avec un correcteur de type *PID* après avoir vu que le proportionnel pouvait être une partie de la solution, la commande ainsi était construite et implémentée sur le simulateur où elle a montré de bons résultats cependant nous avons vu que parfois lors de l'utilisation de cette commande on pouvait faire des sorties de voie.

Après avoir remarqué que le modèle du système de direction présentait un pôle qui le mettait à la limite de la stabilité. L'ajout d'une commande permettant de stabiliser ce dernier nous parut importante. Une commande qui consistait à effectuer un placement de pôle s'est ajoutée. Le modèle de référence stabilisé obtenu est connecté avec le mécanisme d'ajustement caractéristique de la commande adaptative pour former ce qu'on a appelé la commande adaptative à base de modèle de référence stabilisé, cette commande nous a paru après implémentation et validation sur le simulateur CoCoVeA comme la commande qui satisfait le mieux le cahier des charges.

Pour finir après avoir fixé la structure de la commande assurant le mode de transition nous avons travaillé sur sa généralisation afin qu'elle puisse assurer le mode automatique également. Un mode s'est vu ajouter dans ce chapitre à l'algorithme qui permet de gérer les situations d'en-dormissement du conducteur.

Chapitre 5

Évaluation expérimentale de l'algorithme développer

5.1 Étude Expérimentale

5.1.1 Introduction

Il a été démontré que l'algorithme développé permet d'assurer un passage entre un mode automatique et un mode manuel en toute sécurité ,cependant il est intéressant de tester l'acceptabilité de l'algorithme par les conducteurs et le degré de confiance qu'il accorde à ce dernier.

Ce contexte nous donc motivé à mener une étude expérimentale afin d'évaluer la performance de l'algorithme en temps réel quand il est utilisé par des conducteurs tiers.L'objectif est donc d'évaluer l'impact que peut avoir l'action haptique sur le conducteur , son acceptabilité de cette action mais surtout son influence sur la charge de travail de ce dernier.

Dans cette section nous avons tenté d'explorer l'idée d'utiliser plusieurs informations dont nous disposant sur le conducteur afin de lui permettre de reprendre le contrôle de son véhicule après un passage par un mode automatique d'une manière sûre et rapide.

L'expérience s'est déroulé autour du simulateur CoCoVeA.Le simulateur a été donc préparé afin d'enregistrer les variables liées à la performance du conducteur , tel que le couple qu'il applique sur le volant et l'écart par rapport à la voie.Ces variables serviront en outre à étudier et analyser l'impact de l'algorithme sur la performance du conducteur.

5.1.2 Participants

Quatre participants d'un age de moyen de 27 ans ± 7 ans ont participé à l'étude.La majorité étaient des conducteurs expérimentés et avait une moyenne 4 ans d'année de conduite.Ils ont rapporté un kilométrage annuel moyen de 10000 Km.Sachant qu'aucun d'eux n'était habitué à faire des tâches secondaires lors de la tâche de conduite comme écrire des messages en conduisant [10].

5.1.3 Protocole

L'étude à été menée sur un cycle autoroutier à deux voies qui d'une longueur approximant les 3 Km , le circuit est composé de plusieurs sections certaines sont droite,d'autre présentant des virages avec rayon de courbures variables.Aucune densification de trafic n'a été prévu lors de l'expérience , les sujets ont reçus comme consigne de conduire sur la voie du milieu.De ce qui est de la vitesse , la manipulation de la boîte de vitesse a été laissée libre selon l'envie du conducteur.

Les participants à l'étude ont donc reçu après avoir exprimé leur consentement pour participer à cette expérience une brève présentation du simulateur ainsi qu'une phase de familiarisation

avec les différents algorithmes et modes de conduite.

Suite à la familiarisation avec le simulateur, l'étude s'est déroulée en deux étapes .La première étape consistait à conduire en mode manuel uniquement mais aussi de basculer dans la deuxième et troisième phases en mode automatique afin de tester le mode de transition qui sera assuré respectivement par la commande PI adaptatif et l'adaptive avec modèle de référence.De plus les conducteurs recevront la consigne de désorienter le volant volontairement durant ces deux phases là.La seconde étape consiste donc à refaire ce que les conducteurs avaient fait dans la première étape mais avec une tâche supplémentaire (écrire un message sur son téléphone) qui vient s'ajouter dans cette étape. Après chaque étape le participant devait répondre à un questionnaire.

Le questionnaire auquel les participants devait répondre est composé en trois section , une première section qui a pour but de recueillir des informations globales sur le conducteur et sur sa conduite.La seconde section contient des questions sur le confort de conduite , le sentiment de sécurité et la charge de travail pour l'expérience sans tâche supplémentaire.La dernière section du questionnaire, contient les mêmes questions que ceux de la section deux mais cette fois pour une conduite avec tâche supplémentaire qui consiste à écrire un message en plus de la tâche de conduite.

5.2 Analyse des données et résultats

5.2.1 Analyse des données

La performance du conducteur est donc évaluée en récupérant des mesures sur le simulateur et sur matlab/simulateur, afin de pouvoir comprendre le comportement du conducteur on récupère des données en temps réel sur le simulateur tel que la distance parcourue , le couple que le conducteur applique sur le volant et la vitesse de braquage appliquée sur ce dernier , de plus des mesures telles que l'écart par rapport à la voie et à la route sont récupérées afin de détecter les sorties de voie et les sorties de route.

En parallèle des données telles que la disponibilité du conducteur , son endormissement et la position de ses mains sont enregistrés et tracés par matlab à la fin de chaque manipulation, on notera que les instants de passage du conducteur d'un mode à un autre ont été enregistré.

Les cinq premiers indicateurs de cette expérience sont le confort de conduite , la sensation de sécurité , le sentiment de contrôle du véhicule , la charge de travail et la confiance que le conducteur accord au système, les valeurs de ces indicateurs sont obtenus grâce au questionnaire (section 5.1.3),ces mesures sont exploitées sous forme de moyenne qui permettra de comprendre l'influence de l'algorithme sur un indicateur donné.

5.2.2 Résultats

Les mesures prises lors de l'expérience ont été analysées afin de tenter de comprendre l'influence de l'algorithme sur divers paramètres accompagnant la tâche de la conduite.

La figure 5.1 présente l'évolution moyenne du confort des conducteurs lors de l'expérience et ceci sans et avec une tâche supplémentaire.

Evaluation du confort de conduite

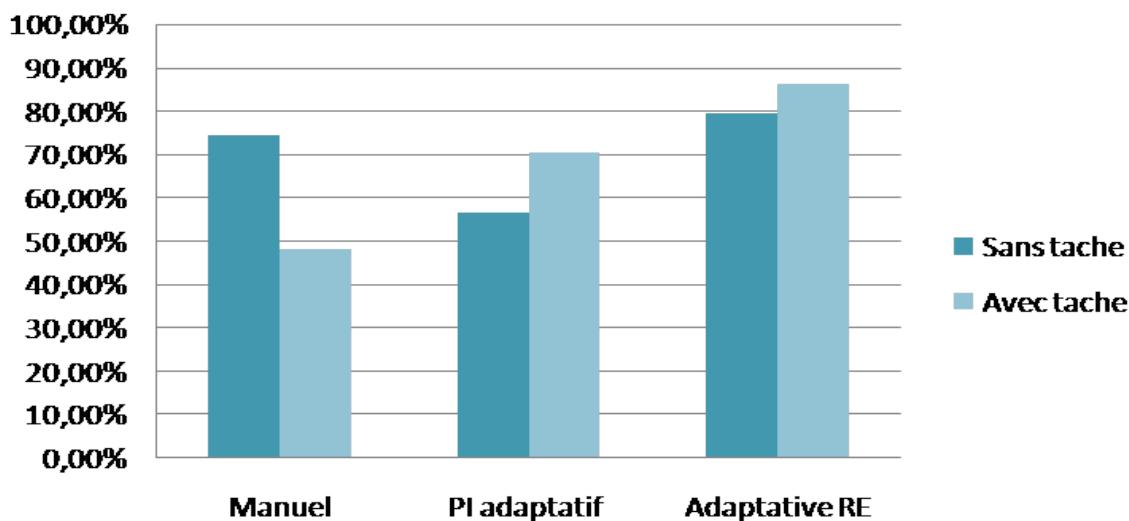


FIGURE 5.1 – Evaluation du confort de la conduite

On peut remarquer que pour le mode manuel le confort de conduite est supérieur pour l'expérience sans tâche supplémentaire , ce dernier pourrait en effet présenter des difficultés qui conduisent à la détérioration du sentiment du confort , l'utilisation de l'algorithme permettant d'assurer la transition permet comme on pouvait s'attendre à améliorer le confort de conduite dans le cas où le conducteur doit en plus de la conduite effectué d'autres tâche en parallèle.On note également le sentiment de conduite est meilleur pour l'algorithme assurant la transition avec la commande adaptative avec modèle de référence.

Le sentiment de sécurité lors du déroulement de la tâche de conduite à été étudier également lors cette expérience , les résultats obtenus sont représentés sur la figure 5.2

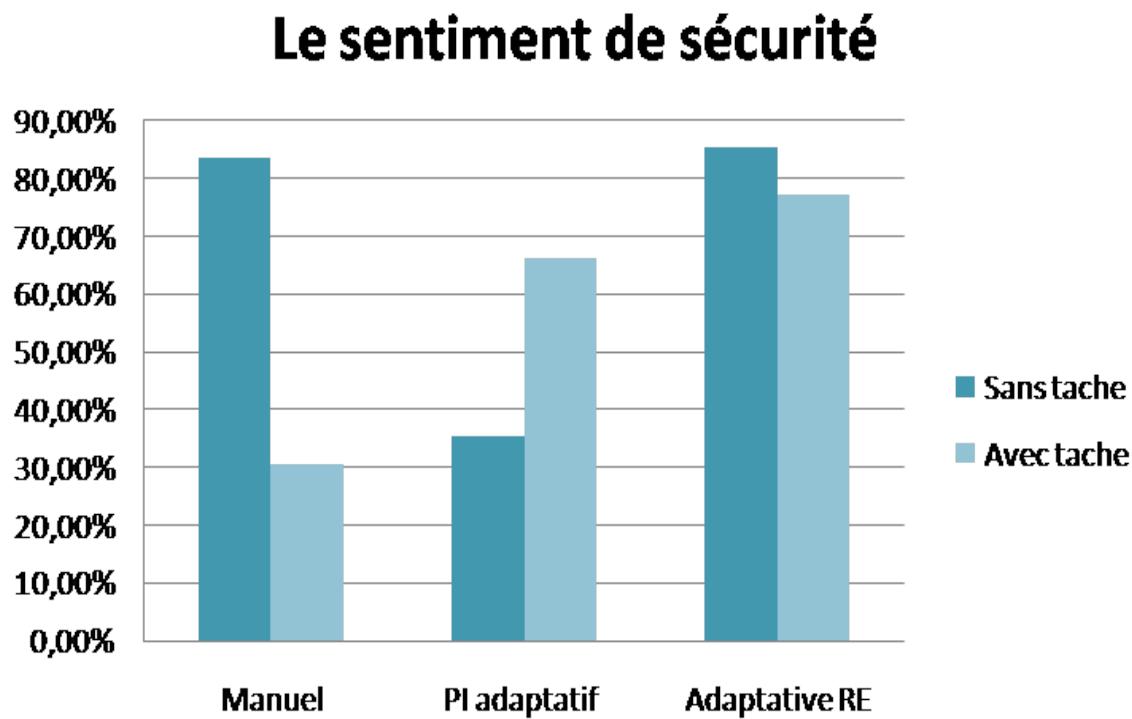


FIGURE 5.2 – Analyse du sentiment de sécurité

Le conducteur se sent en sécurité comme on peut s'attendre quand il est concentré uniquement sur la tâche de conduite (sans tâche supplémentaire), cependant quand on lui demande d'effectuer une tâche autre que la conduite en mode manuel ce sentiment est fortement influencé en baisse, la présence du mode automatique et le pouvoir qu'a le conducteur de passer d'un mode à un autre selon le besoin améliore ce sentiment, cependant on remarque que les meilleurs résultats ont été obtenus pour l'algorithme assurant la transition avec la commande haptique basée sur la commande adaptative avec modèle de référence, en effet, comme nous l'avons expliqué en section(section de la commande), cette commande permet au conducteur de rester sur la même voie même en cas de mauvaise orientation du volant sur un virage par exemple.

Le troisième critique analysé est le sentiment du contrôle du véhicule qui est représenté sur la figure 5.3.

Le sentiment de contrôle du véhicule

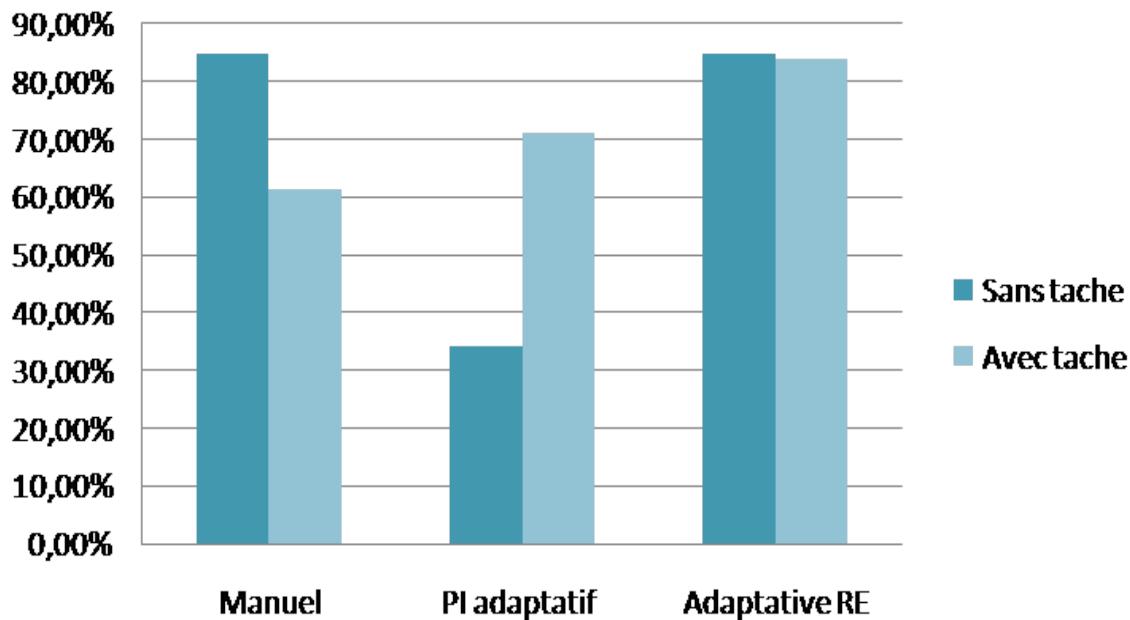


FIGURE 5.3 – Les résultats sur l'analyse du sentiment de contrôle du véhicule

Le sentiment de contrôle du véhicule est bien entendu meilleur pour les conducteurs quand on leurs demande de se concentrer uniquement sur la conduite du véhicule sans tâche supplémentaire, mais ce qui est intéressant pour une commande à retour haptique est qu'elle soit bien calibrée afin qu'elle ne crée pas une frustration chez le conducteur lors de son action de plus le but ici est d'avoir une valeur acceptable de ce sentiment même en cas de présence d'une tâche supplémentaire, on peut remarquer que les résultats obtenus pour la commande adaptative avec modèle de référence sont approximativement égaux pour l'expérience avec et sans tâche supplémentaire, ce qui nous laisse penser donc que le conducteur apprécie la présence de l'algorithme dans les deux cas de figure.

La charge de travail moyenne des conducteurs est évaluée lors de l'expérience, les résultats obtenus sont tracés sur la figure 5.4.

Evaluation de la charge de travail

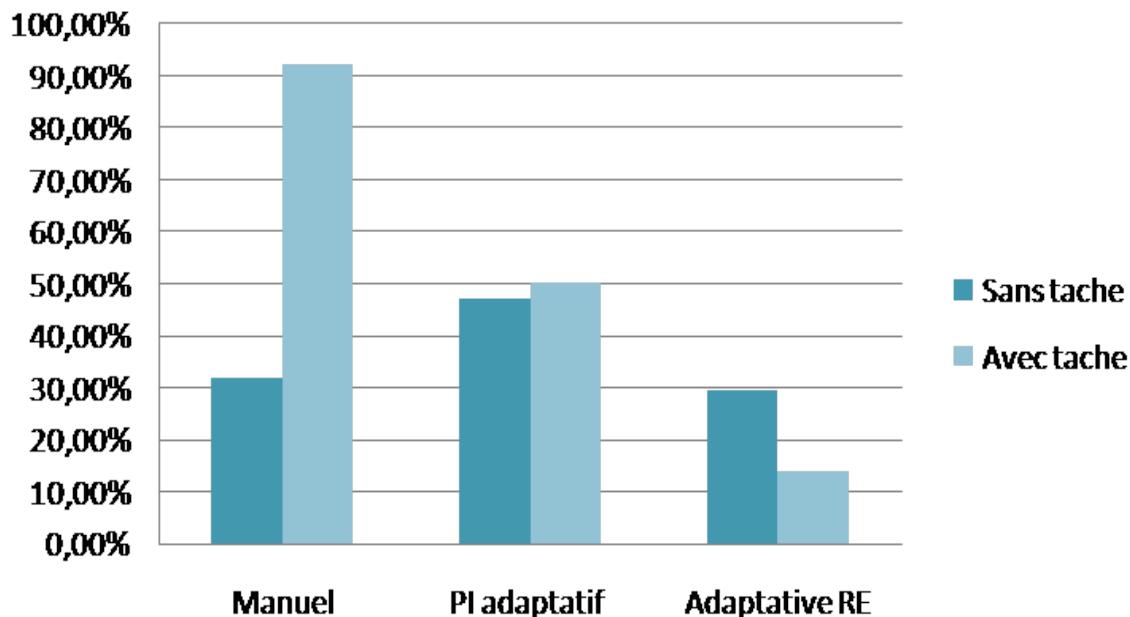


FIGURE 5.4 – Évaluation de la charge de travail

L'ajout de la tâche supplémentaire lors de la seconde phase de l'expérience fait que la charge de travail augmente comme on pouvait s'attendre, ceci-dit on remarque pour le mode manuel cette dernière augmente presque au triple de sa valeur quand le conducteur avait que la conduite comme unique tâche , en effet, il est très compliqué de contrôler le véhicule et d'écrire un message en parallèle.On peut remarquer également que l'algorithme assurant le retour haptique par la commande adaptative avec modèle de référence permet de réduire la charge de travail du conducteur quand il est accompli des tâches annexes à la conduite.

Le dernier indicateur tiré du questionnaire auquel les participants ont répondu est la confiance qu'il accorde à l'algorithme comme le montre la figure 5.5

Evaluation de la confiance

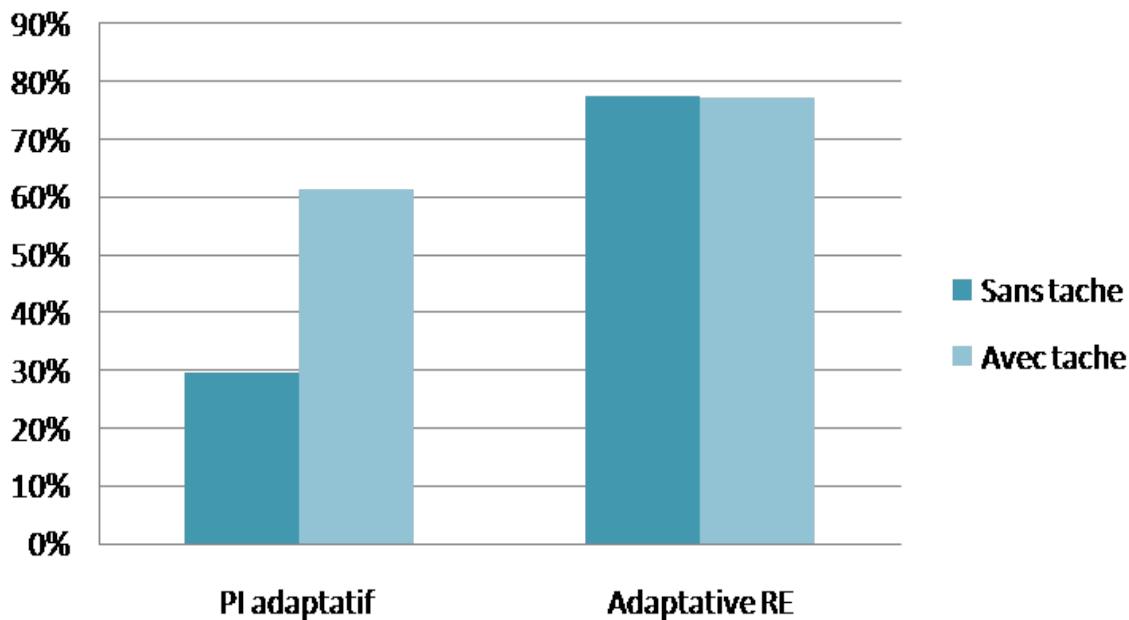


FIGURE 5.5 – Évaluation de la confiance dans l'algorithme

Les conducteurs ont tous pu développer une relation de confiance très appréciable avec l'algorithme utilisant la commande adaptative avec modèle de référence stabilisé, en effet ce dernier permettant aux conducteurs de basculer d'un mode à un autre sans risque de plus que sa capacité à renvoyer un retour haptique adéquat au niveau du volant permettant de sentir l'orientation du volant.

5.2.3 Conclusion

Durant la conception de l'algorithme assurant une bonne orientation du volant par retour haptique il a été démontré que la commande adaptative avec modèle de référence permettait de satisfaire au mieux les exigences fixées par le cahier des charges. Dans ce chapitre il a été question d'étudier le comportement des conducteurs face à cet algorithme mais aussi de déterminer son influence sur la tâche de conduite.

L'étude a révélé que l'algorithme influence d'une manière positive des indicateurs qui peuvent avoir une relation directe à la tâche de conduite comme le contrôle du véhicule où l'on a vu que ce dernier reste invariable par rapport au mode manuel et ceci avec ou sans tâche annexée ajoutée, ce qui nous permet de dire que le mode de transition pourrait avoir toutes ses chances pour être perçu comme un véritable outil d'aide pour le conducteur ce qui facilite d'autant plus la création de relation de confiance entre le conducteur et l'algorithme.

De ce qui est des indicateurs basés sur le conducteur, comme le confort de la conduite ressentie par le conducteur où encore la charge de travail que ce dernier accumule lors ses différentes tâches y compris la conduite, l'influence de l'algorithme ne peut qu'être positif, sachant que ce dernier est conçu pour améliorer le confort au volant mais surtout que l'action du retour haptique s'adapte selon le mode de conduite du conducteur un point qui a été fortement apprécié par les participants à l'expérience, il va sans dire que la charge de travail qui accompagne la conduite est un des critères clés de cette étude où nous avons tenté par notre

expérience de démontré que nous pouvons stabiliser la variation de cette dernière autour d'une valeur qui permet au conducteur de gérer au mieux la supervision du véhicule s'il a des tâches annexes à effectuer où à conduire son véhicule d'une manière sûre 'il présente le désire et la capacité d'accomplir la tâche de la conduite.

Conclusion et perspectives

conclusion

Les travaux présentés dans ce rapport ont abordés le traitement du passage d'un mode automatique vers un mode manuel dans un véhicule équipé d'une direction de type steer by wire.Nous sommes penchés afin de résoudre la problématique accompagné par ce passage en prenant en compte les points suivants :

- Le conducteur doit garder son rôle d'agent actif dans l'architecture de décision.
- Une orientation du volant doit être faite lors du mode de transition selon l'angle à la roue et ceci en exploitant le retour haptique assuré par la direction steer by wire.
- La disponibilité et l'aptitude du conducteur doivent être prises en compte afin de lui permettre de prendre le contrôle sur son véhicule.
- L'algorithme développé doit assurer la transition entre les deux modes toute sécurité.

Le chapitre 1 a fait l'état de l'art de l'automatisation des véhicules en explicitant les différents niveaux parut comme une conséquence de l'évolution du véhicule.On s'est par la suite donné comme ligne directrice d'explorer les différents types de direction qu'on peut retrouver dans les véhicules en partant des directions mécaniques conventionnelles qui à cause de leurs limitations dans le contexte de l'automatisation de la conduite ont permis à l'invention des directions découpées "steer by wire".

La problématique a été abordée dans le chapitre 2 où il avait été question de positionner notre projet en fixant un cahier des charges.Ce chapitre s'est vu clore par la mise en place sous forme d'architecture de coopération entre l'humain et le système d'aide en précisant le rôle du niveau décisionnel et ses spécifications.

Le chapitre 3 est venu comme réponse à la conclusion du chapitre 2, où nous avons dans un premier temps explicité le matériel dont nous disposant afin de mettre en place la fonction décisionnelle.Cette dernière qui a était abordée en détail dans la suite de ce chapitre en développant l'algorithme permettant d'assurer la transition et activer la commande permettant la correction de l'angle au volant.Pour conclure ce chapitre nous avons expliqué la logique de décision que nous avons mise en place.

La commande par retour haptique actionnée dans le mode de transition qui plus loin a était généralisée pour s'étendre au mode automatique a était mise en place dans le chapitre 4.Ce chapitre peut être vu comme le parcours temporel que nous avons emprunté lors de la création de ladite commande, en effet dans un premier temps nous avons adopté la commande adaptative sur le simulateur continu cependant au moment où il était question de la mettre en place sur le simulateur CoCoVeA cette dernière présentait bien des problèmes.Par la suite nous avons exploré la voie des correcteurs simples en automatique par l'application du proportionnel, ce dernier permet de garantir le suivi mais il ne prenait guère l'action du conducteur, à ce sujet, nous avons hybridé le mécanisme adaptatif avec le correcteur *PI*.Les résultats de cette hybridation étaient proches des spécifications du cahier des charges mais un dernier point et pas des moindres fut non satisfait .En effet ce correcteur pouvait parfois présenter des sorties de voie, un comportement qu'on pouvait nullement accepter.

Un retour aux bases de l'automatique nous a alerté sur la présence d'un pôle plaçant le

système à la limite de la stabilité, il nous a paru donc élémentaire de placer ce pôle là dans une zone stable par le bas du placement de pôle.Une commande par retour de l'état a été ainsi développée pour le modèle dynamique simplifier de la direction découplée, ce dernier qui après la stabilisation fut considéré comme le nouveau modèle de référence pour le mécanisme de la commande adaptative.Un retour à la case départ étant ainsi nécessaire afin de développer de nouveau ce mécanisme qui finalement a permis de satisfaire au mieux le cahier des charges.

Suite aux résultats plutôt satisfaisants de ce contrôleur nous nous sommes poser la question sur l'efficacité du contrôleur P qui assurait auparavant le retour au centre du volant lors du mode automatique, nous nous sommes mis donc à cogiter sur l'aspect de généralisation de la commande que nous avons développé pour assurer la transition pour qu'elle puisse également assurer le retour au centre en mode automatique.

Pour clôturer ce chapitre nous nous amusé en ajoutant un quatrième mode de conduite qui est le mode auto-vibratoire, ce dernier permet de gérer le cas où le conducteur présent de l'endormissement au volant de son véhicule.

La dernière étape du cycle en V soit la validation a été abordée dans le chapitre 5.Un protocole expérimental a été mener dans l'optique de confirmer dans un premier temps l'efficacité de l'algorithme et conclure sur l'acceptabilité de ce dernier auprès des conducteurs, en effet idée de départ de cette approche est qu'après avoir répondu aux spécifications du cahier des charges il était donc question d'avoir la preuve que notre algorithme pouvait permettre une assistance du conducteur dans la tâche de conduit et qu'une relation de confiance entre ce dernier et l'algorithme pouvait s'établir.

Perspectives

Notre travail sur ce projet en particulier l'étape de la validation de l'algorithme nous a permis d'apprécier sa simplicité et son adaptabilité vis-à-vis des différents modes de conduite qui caractérisent chaque conducteur.Cependant on reste persuadé de la possible évolution toute en gardant la simplicité de l'algorithme.

En effet,L'aspect d'adaptation et apprentissage du réseau de neurones pourrait être une première voie à explorer afin d'adapter au mieux le comportement de l'algorithme et de le personnalisé à la guise du conducteur.

La latence qu'a le dispositif de driver monitoring nous laisse penser que son changement par un dispositif ayant un meilleur temps de réponse améliore la performance de l'algorithme.Il va sans dire qu'augmenter la précision des différentes détections permettent d'avoir un meilleur comportement de la fonction de décision mais surtout d'améliorer la confiance entre l'humain (conducteur) et l'agent artificiel.

Toujours dans l'optique de renforcer la relation de confiance conducteur / agent artificiel ,l'ajout d'une variable décisionnel sur la position du corps du conducteur pourrait être un atout d'envergure pour l'amélioration du niveau décisionnel.

Une dernière perspective qui cette fois nous vient du questionnaire qui a servi au protocole expérimental.L'ajout d'un *IHM* qui permet de communiquer entre l'agent artificiel et le conducteur dans le but de le tenir au courant des dernières actions entreprises par l'agent mais aussi d'accroître la conscience de la situation du conducteur.

Bibliographie

- [1] Alain-Gabriel Verdevoye,(2018,16 mars), « **Comment Renault et PSA ont délocalisé leur production automobile** » , challenges.fr
- [2] **L'industrie automobile** ,(2019,26 mars),consulté sur le site :
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3676838?sommaire=3696937>
- [3] Patrick millot and Guy A.Boy,(2012), **humain-machine cooperation :A solution for life critical systems** ?,IOS Press,41(2012)4552-4559
- [4] Vincent JUDALET,**Architecture robuste de control pour un système by wire en partage avec le conducteur**,Paris-Saclay,pp2 ,pp16,2016
- [5] Mohd ZAIDI Mohd Tumari,(2017),**The vehicle steer by wire conrol system by implementing PID controller**,Tecknikal Malaysia Melaka
- [6] Patrick MILLOT , **Ergonomie des systèmes hommes-machine**,éd hermes ,2013
- [7] Chouki Sentouh ,Anh-Tu Nguyen, Mohamed Amir Benlouci and Jean-Christophe Papieul ,() **Driver automation cooperation oriented approach for shared control of lane keeping assist systems**,IEEE Transaction on control systems technology
- [8] Chouki Sentouh ,(2019 ,13 septembre),**Avancement du projet algorithm de gestion de la transition du contrôle du véhicule entre le système de conduite autonome et le conducteur humain** ,Présentation du projet pour nexteer.
- [9] Cherki Brahim,(2019 ,29 juin),**Théorie de lyaponov** ,Présentation de cours sur la commande adaptative,école supérieure en sciences appliquées (ESSAT TLemcen).
- [10] Mohamed Amir Benlouci ,(2018, 6 avril) **Coopération homme-machine multi-niveau entre le conducteur et un système d'automatisation de la conduite** ,p186.