

Optimisation de l'asservissement de la CVT électronique

par

Mathieu DOUCET

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 13 MARS 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mathieu Doucet, 2024



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Christian Belleau, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Philippe Roberge, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 FÉVRIER 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais, en premier lieu, remercier mon directeur de mémoire, Christian Belleau, pour sa supervision et son encadrement tout au long du projet. Ses connaissances dans son domaine sont inspirantes et m'ont permis d'en apprendre énormément durant mon projet. Ensuite, j'aimerais remercier Pascal Thibodeau pour avoir généreusement partagé ses connaissances sur les transmissions à variation continue (CVT) mécaniques et sa passion pour les véhicules tout-terrain, tant pendant ma maîtrise que durant mon baccalauréat.

Le projet n'aurait jamais été possible sans le soutien des membres de l'équipe Baja. Une mention spéciale à certains membres qui ont fait une différence dans le projet : Olivier Boisvert, pour sa contribution continue tout au long du projet, en fournissant des discussions approfondies sur la dynamique de la CVT que l'équipe souhaitait atteindre, ainsi que pour son soutien constant afin de maintenir le véhicule 2021 opérationnel ; Maxence Lafond, pour avoir implémenté la librairie SEGGER dans l'algorithme, permettant l'analyse dans le logiciel SystemView ; Émile Bernard, pour avoir passé des heures dans le prototype afin de développer et calibrer l'algorithme ; Nicolas Roy, pour m'avoir aidé à devenir meilleur en programmation embarquée et pour son aide à bien utiliser GitKraken. Les ressources de l'équipe ont également favorisé la réalisation du projet grâce à l'utilisation du prototype 2021 ainsi que de leur équipement, matériel et espace de travail.

Un remerciement important est adressé à l'École nationale d'aérotechnique (ÉNA) pour avoir mis à notre disposition leur piste pour effectuer les essais véhicules, et le dynamomètre pour réaliser la cartographie du moteur Kohler. Une mention spéciale à Emmanuel Chalifoux pour son assistance dans la préparation du dynamomètre pour le moteur du Baja.

Enfin, je voudrais remercier ma copine, Laurie, pour ses encouragements et son soutien tout au long de ce projet et de mon parcours universitaire.

Optimisation de l'asservissement de la CVT électronique

Mathieu DOUCET

RÉSUMÉ

Ce mémoire se concentre sur l'amélioration de l'algorithme de contrôle de l'*Electronic Variable Transmission* (EVT), une technologie brevetée et développée par des anciens membres de l'équipe Baja de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Alors que la mécanique et l'électronique du système ont bénéficié de nombreuses améliorations depuis leur création, l'asservissement n'a pas connu une évolution similaire. L'objectif de ce projet est donc de faire progresser l'algorithme de contrôle de l'EVT, en rectifiant les lacunes existantes et en optimisant les performances globales. Les améliorations apportées à l'algorithme se concentrent sur des techniques de commande classiques, non seulement pour en faciliter la compréhension et la maintenance par les étudiants de premier cycle, mais aussi pour offrir une base solide en vue de futures améliorations et de l'ajout de nouvelles fonctionnalités.

En intégrant un suivi de trajectoire avec un compensateur proportionnel-intégral et du *Gain scheduling*, l'algorithme a pu maintenir efficacement la cible du régime moteur, particulièrement sur l'asphalte. Sur des terrains plus représentatifs des conditions de compétition, l'écart d'erreur a été réduit à +/- 140 tours par minute (tr/min). Par ailleurs, l'implémentation d'un nouveau contrôleur pour le désengagement de la poulie motrice a nettement amélioré la maniabilité du véhicule, favorisant une meilleure reprise et réactivité. Cette évolution a contribué aux succès de l'équipe 2023, notamment en remportant trois premières places dans l'épreuve d'accélération. La séquence de décollage de l'EVT, générant une inertie supplémentaire au démarrage et maintenant le régime moteur sur la cible dès le début, a été un facteur déterminant dans ces victoires.

Mots-clés: CVT électronique, commande numérique, système embarquée

Optimization of the embedded control system of an electronic CVT

Mathieu DOUCET

ABSTRACT

This thesis focuses on improving the control algorithm of the Electronic Variable Transmission (EVT), a patented technology developed by former members of the Baja team from ÉTS. While the mechanical and electronic components of the system have undergone numerous improvements since their inception, the control system has not evolved similarly. The aim of this project is therefore to improve the EVT control algorithm by rectifying existing shortcomings and optimizing overall performance. The improvements made to the algorithm are based on classic control techniques, not only to facilitate understanding and maintenance by undergraduate students but also to provide a solid foundation for future enhancements and the addition of new features.

By integrating trajectory tracking with a proportional-integral compensator and Gain Scheduling, the algorithm has been able to effectively maintain the engine's target speed, especially on asphalt. On terrains more representative of competition conditions, the error margin was reduced to +/- 140 rpm. Moreover, the implementation of a new controller for the backshift of the drive pulley significantly improved vehicle maneuverability, enhancing responsiveness and recovery. This development contributed to the success of the 2023 team, notably by winning first place in the three acceleration events. The EVT's launch control, generating additional inertia at the start and maintaining the engine speed on target from the start, was a key factor in these victories.

Keywords: Electronic CVT, digital control system, embedded system

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTUALISATION DE BAJA SAE	3
1.1 Compétition Baja SAE	3
1.2 L'équipe du Baja ÉTS	5
1.3 La CVT électronique	6
1.3.1 La mécanique	7
1.3.2 Le contrôleur électronique	8
1.3.3 L'algorithme de contrôle	9
1.4 Cadre du projet	10
1.4.1 Problématiques	10
1.4.2 Objectifs	11
1.4.3 Contraintes	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	15
2.1 CVT mécanique	15
2.1.1 Introduction de la transmission à variation continue	15
2.1.2 Poulie réceptrice	17
2.1.3 Poulie motrice	20
2.1.3.1 Les masses de la poulie motrice	22
2.1.3.2 Phase d'embrayage de la CVT	22
2.1.4 Courroie	24
2.1.5 Contraintes et défis de la calibration d'une CVT	25
2.2 Recherche existant sur le concept de CVT électronique	26
2.2.1 Domaine de l'automobile	26
2.2.2 Domaine du VTT	29
CHAPITRE 3 ANALYSE APPROFONDIE DU FONCTIONNEMENT DE LA CVT SUR UN BAJA	31
3.1 Étude de la dernière itération de la EVT	31
3.1.1 Accélération	31
3.1.2 Désengagement et reprise	32
3.2 Étude de la CVT mécanique	34
3.3 Cartographie du moteur à combustion	37
CHAPITRE 4 OPTIMISATION DES OPÉRATIONS DE CONTRÔLE ET DE TRAITEMENT DE DONNÉES	41
4.1 Fréquence d'échantillonnage des tâches	41
4.2 Filtrage des signaux d'entrée	44
4.2.1 Filtrage du régime moteur	44

4.2.1.1	Obtention des échantillons	44
4.2.1.2	Filtrage numérique	46
4.2.1.3	Application du filtre numérique	49
4.2.2	Filtrage des signaux analogiques	51
4.3	Écriture sur clé USB	52
4.4	Outil d'analyse de données	54
CHAPITRE 5 OPTIMISATION DE LA COMMANDE NUMÉRIQUE DU RÉ-		
GIME MOTEUR		
5.1	Asservissement du moteur électrique	57
5.1.1	Contrôle du moteur électrique	57
5.1.2	Implémentation d'une boucle de rétroaction	59
5.1.3	Algorithme anti-dépassement pour intégrateur	62
5.1.4	Embrayage séquentiel	63
5.2	Asservissement du moteur à combustion	66
5.2.1	Implémentation d'une machine d'état	66
5.2.2	Stratégie de commande pour l'embrayage de la poulie motrice	71
5.2.2.1	Suivi de trajectoire	72
5.2.2.2	Compensateur PID	74
5.2.3	Stratégie de commande pour le désengagement de la poulie motrice	75
CHAPITRE 6 ÉVALUATION DES PERFORMANCE DE LA EVT		
6.1	Performance du système embarqué	79
6.2	Performance véhicule	83
6.2.1	Accélération	84
6.2.2	Reprise	87
6.2.3	Montée de côte	90
6.3	Comparaison entre EVT et CVT	93
6.3.1	Comparaison sur le même prototype	93
6.3.2	Comparaison en compétition	95
CONCLUSION		
99		
RECOMMANDATIONS		
101		
ANNEXE I	ESSAI DYNAMOMÈTRE	103
ANNEXE II	THÉORIE DU CONTRÔLE ET IMPLÉMENTATION	109
ANNEXE III	GRAPHIQUES SUPPLÉMENTAIRE	113
ANNEXE IV	CONDITIONS DES ESSAIS	115
LISTE DE RÉFÉRENCES		
117		

BIBLIOGRAPHIE120

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Influence des paramètres de calibration de la CVT Tirée de Thibodeau (2021, p.2) 25
Tableau 5.1	Relation entre l'entrée, le type de système et l'erreur statique Adaptée de Nise (2011, p. 353) 60
Tableau 5.2	Effet des gains sur le comportement d'un système de commande Tirée de University of Michigan et al. (2021) 61
Tableau 6.1	Comparaison des temps d'accélération entre EVT et CVTech sur différentes surfaces 93
Tableau 6.2	Résultat de l'épreuve d'accélération depuis 2017 Adaptée de SAE (2023) 96
Tableau 6.3	Classement et écarts des temps d'accélération du podium - 2023 97

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Rendu du prototype 2023 du Baja ÉTS 3
Figure 1.2	Système mécanique de la EVT du Baja ÉTS 6
Figure 1.3	Nomenclature de la poulie motrice du Baja ÉTS 7
Figure 1.4	Contrôleur électronique de la EVT du Baja ÉTS 9
Figure 2.1	Comparaison des embrayages de deux types de transmission Tirée de Aaen (2015, p. 9) 16
Figure 2.2	Nomenclature de la CVT Adapté de Aaen (2015, p. 5) 17
Figure 2.3	Variation de la force axiale selon le ratio de CVT Tirée de Aaen(2015, p. 15) 18
Figure 2.4	Rapport de force dans la rampe de rétroaction de couple Tirée de Aaen (2015, p. 16) 19
Figure 2.5	Embrayage et désengagement de la CVT Tirée de Aaen (2015, p. 36) 21
Figure 2.6	Variation de l'angle de la courbure d'une masse Tirée de Aaen (2015, p. 31) 22
Figure 2.7	Phases d'embrayage de la CVT Tirée de Aaen (2015, p. 22) 23
Figure 2.8	Possibilités de désalignement de la courroie de la CVT Tirée de Aaen (2015, p. 39) 24
Figure 3.1	Accélération du prototype en 2022 avec ancien algorithme 32
Figure 3.2	Désengagement et reprise de la EVT avec l'algorithme 2022 33
Figure 3.3	Comportement du prototype 2022 sur une piste 35
Figure 3.4	Panneau de contrôle du dynamomètre 38
Figure 3.5	Cartographie dynamométrique du moteur Kohler 39
Figure 4.1	Identification des éléments temporels du moteur à combustion 42
Figure 4.2	Données brutes du régime moteur en phase transitoire 45

Figure 4.3	Bandes du filtre passe-bas Adaptée de Muthukrishnan (2021)	47
Figure 4.4	Réponse en fréquence de filtre passe-bas Tirée de Bliley Technologies (2016)	49
Figure 4.5	Résultat du filtre passe-bas	50
Figure 4.6	Comparaison de l'erreur entre les deux applications du filtre moyennant	52
Figure 4.7	Exemple de fichier texte avec les données du véhicule	53
Figure 4.8	Délai d'écriture entre 100 et 200 cycles de données	54
Figure 5.1	Opération du contrôleur de moteur électrique avec le DRV8343 Tirée de Texas Instruments (2018, p. 23)	58
Figure 5.2	Schéma bloc du contrôle moteur en boucle fermée	59
Figure 5.3	Exemple de saturation par intégrateur Tirée de Åström (2002, p. 227)	63
Figure 5.4	Interface du volant en mode d'embrayage séquentiel	64
Figure 5.5	Évolution de la calibration de la boucle interne par embrayage manuel	65
Figure 5.6	Schéma bloc simplifié de l'algorithme	69
Figure 5.7	Activation de l'état anti-calage	71
Figure 5.8	Différentes équations mathématiques pour la trajectoire	74
Figure 5.9	Exemple d'une oscillation causée par l'intégrateur	75
Figure 5.10	Engagement involontaire de la poulie	77
Figure 5.11	Désengagement de la poulie selon la décélération du véhicule	78
Figure 6.1	Contexte des tâches et interruptions sur le banc d'essai	80
Figure 6.2	Temps d'exécution des tâches principale	81
Figure 6.3	Impact d'une interruption sur l'exécution d'une tâche	82
Figure 6.4	Temps d'exécution des interruptions	83
Figure 6.5	Accélération sur de l'asphalte	85

Figure 6.6	Accélération sur terrain boueux	85
Figure 6.7	Accélération avec séquence de décollage	87
Figure 6.8	Parcours pour la calibration reprise	88
Figure 6.9	Caractérisation de la reprise	89
Figure 6.10	Montée de côte de 14 %	91
Figure 6.11	Montée de côte de 18,2 %	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> , Convertisseur analogique-numérique
ÉNA	École nationale d'aérotechnique
ÉTS	École de technologie supérieure
EVT	<i>Electronic Variable Transmission</i>
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i> , Transmission à variation continue
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i> , Unité centrale de traitement
TPS	<i>Trottle Position Sensor</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
MCU	<i>MicroController Unit</i> , Microcontrôleur
BLDC	<i>BrushLess direct current</i> , Moteur à courant continu sans balais
PID	Proportionnel Intégral Dérivée
OOL	<i>Optimal Operating Line</i> , Ligne de fonctionnement optimal
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , Modulateur d'impulsion en Largeur
VTT	Véhicule tout-terrain

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

tr/min	Tours par minute
HP	<i>Horsepower</i> , Cheval-vapeur

INTRODUCTION

Depuis 2017, l'équipe de Baja de l'ÉTS se distingue aux compétitions de la *Society of Automotive Engineers* (SAE), en autres par son prototype de CVT électronique, la EVT. Cette transmission avancée, dotée d'un système de commande embarqué et actionné électriquement, permet une indépendance entre le régime moteur et la force exercée sur la courroie. Offrant une flexibilité supérieure par rapport à son homologue mécanique, la EVT influence considérablement la calibration et le comportement du véhicule. Toutefois, la fiabilité de ce système électronique complexe - comprenant un contrôleur, un système de gestion de puissance, une batterie et un alternateur - est essentielle. Les défis techniques rencontrés lors des compétitions antérieures révèlent la vulnérabilité du véhicule en cas de défaillance électronique. L'effort considérable requis pour maintenir la fonctionnalité du système, ainsi que la gestion de l'augmentation des composants à usiner, met en question la viabilité de la EVT lorsque son algorithme n'est pas en mesure d'obtenir la meilleure performance du système mécanique.

Dans ce contexte, l'optimisation de l'algorithme de l'EVT devient une priorité. En dépit de multiples révisions du matériel électronique du contrôleur et des améliorations mécaniques successives, l'asservissement de la EVT n'a pas connu une évolution parallèle. Ce projet cherche à combler cet écart, avec l'objectif d'améliorer à la fois la performance du système en termes d'accélération et d'expérience de conduite du pilote. L'approche adoptée implique une étude approfondie des techniques de commande numérique classiques, adaptées au contexte spécifique de la EVT.

L'ambition de ce projet est de rehausser l'asservissement de la EVT, maximisant ainsi l'efficacité du moteur à combustion. Cette amélioration aspire à combler les lacunes identifiées et à démontrer l'avantage concurrentiel que l'EVT peut apporter à l'équipe de Baja de l'ÉTS.

Ce travail se concentrera sur le développement et l'implémentation de l'algorithme sur le modèle de véhicule 2021, qui, bien qu'équipé du nouveau moteur, dispose uniquement de deux roues

motrices. À la fin du projet, l'algorithme optimisé sera transmis aux étudiants de premier cycle, accompagné d'explications claires ou d'une simplification des méthodes de commande complexes, afin d'assurer une compréhension et une utilisation aisées par l'équipe.

Le mémoire se structure en six chapitres clés. Le premier chapitre établit le contexte du Baja SAE et les contraintes principales encadrant le développement du véhicule, en se concentrant sur la EVT. Le deuxième chapitre aborde la compréhension d'une CVT mécanique et présente une revue de la littérature sur les CVT mécanique et électronique. Le troisième chapitre propose une analyse critique de la version actuelle de l'algorithme de l'EVT, identifiant ses défauts, et une analyse comparative avec une CVT mécanique pour corréler théorie et pratique. Le quatrième chapitre se consacre à la vérification et à l'implémentation adéquate des périphériques du système embarqué, ainsi qu'à la filtration et à l'ajustement des signaux d'entrée. Le cinquième chapitre concerne l'optimisation et le développement de l'algorithme, avec des améliorations spécifiques des boucles de contrôle interne et externe, et la structure de l'algorithme. Enfin, le sixième chapitre offre une évaluation complète du système développé pour mesurer et analyser les améliorations en termes de performance.

CHAPITRE 1

CONTEXTUALISATION DE BAJA SAE

Le Baja est un prototype de véhicule tout terrain conçu et fabriqué par des équipes étudiantes. L'illustration du Baja 2023 de l'équipe de l'ÉTS est présentée à la figure 1.1. Chaque équipe participante débute sur un pied d'égalité avec le même moteur à combustion de 10 chevaux. Afin d'avoir un véhicule qui se démarque des autres, chaque sous-système doit être à la fois léger et fiable, offrant la meilleure efficacité tout en conservant son intégrité structurelle. L'objectif est de créer un véhicule performant, maniable et robuste. Pour y parvenir, une attention minutieuse est portée à chaque aspect de la conception et de l'ingénierie du véhicule, en veillant à ce que chaque sous-système contribue à l'excellence globale du prototype.



Figure 1.1 Rendu du prototype 2023 du Baja ÉTS

1.1 Compétition Baja SAE

Chaque année, la *Society of Automotive Engineers* (SAE) organise trois compétitions de Baja aux États-Unis, auxquelles participent jusqu'à 100 équipes universitaires et collégiales. La compétition s'étend sur quatre jours et comprend des épreuves statiques et dynamiques. Dans la

catégorie statique, on retrouve une présentation d'entrepreneuriat portant sur l'organisation d'un évènement fictif, un rapport des coûts du prototype et la présentation de conception où l'équipe partage le cycle d'ingénierie du projet. Ensuite, la catégorie d'évènements dynamiques met le véhicule à l'épreuve. On y trouve une accélération sur 100 pieds, un parcours de manoeuvrabilité, un parcours mettant en valeur la suspension et la traction du véhicule, un évènement de couple (tel qu'un tir chargé ou une montée de pente) et enfin, une course d'endurance de quatre heures. Un nombre de points est attribué à chaque épreuve. L'équipe qui accumule le plus de points remporte chaque compétition, et celle qui a cumulé le plus de points pendant la saison remporte le trophée Mike Shmitt, un prix prestigieux dans le monde du Baja.

Avant de pouvoir participer aux épreuves de la compétition, le véhicule Baja doit passer par trois inspections. La première concerne le moteur, où le régulateur est ajusté pour que le régime moteur sans charge soit de 3 800 tr/min. Ensuite, une inspection complète du véhicule est réalisée pour s'assurer que le prototype respecte toutes les réglementations. Enfin, il y a une vérification des freins en mouvement. Le système de freinage doit être capable de bloquer les quatre roues du véhicule en mouvement. Tout ce processus est supervisé par des inspecteurs.

La réussite de l'inspection technique est le premier jalon de la compétition. Elle se traduit par l'obtention de l'autocollant *Passed Tech*, qui atteste que le véhicule est autorisé à participer à la compétition. L'autocollant est également un engagement envers les inspecteurs et les autres concurrents, confirmant que le véhicule soumis à l'inspection sera identique durant la compétition. En d'autres termes, aucune modification du véhicule n'est permise par la suite. Les modifications non autorisées comprennent le remplacement des amortisseurs ou de leurs ressorts, la modification des poids ou des ressorts de la transmission à variation continue ainsi que le changement des ratios dans la ligne cinématique. En cas de défaillance, la pièce défectueuse doit être remplacée par un équivalent. Des ajustements peuvent être apportés au véhicule dans la mesure où aucune pièce n'est remplacée. Par exemple, l'ajustement de la précharge des ressorts d'amortisseurs pour adapter la dynamique du véhicule en prévision de l'épreuve suivante est autorisé.

1.2 L'équipe du Baja ÉTS

Le Baja ÉTS participe aux compétitions de la SAE depuis près de 35 ans. L'équipe a toujours obtenu d'excellentes performances sur la scène internationale, se classant régulièrement parmi les cinq premières. De fait, en 2005, l'ÉTS a remporté une première place au classement général des trois compétitions, l'exploit n'a jamais été reproduit depuis. L'héritage de l'équipe est fort et sert de motivation aux membres pour continuer à briller et maintenir le standard établi depuis sa création.

L'ÉTS se distingue des autres équipes par son innovation constante, apportant des améliorations à son véhicule chaque saison. Ces concepts novateurs ont marqué les autres équipes, et voici quelques exemples notables, accompagnés des raisons qui les différencient :

- Transmission avec mécanisme de marche arrière : Peu d'équipes utilisent une marche arrière pour simplifier leur conception ;
- Panneaux esthétiques en plastique thermoformé : Le thermoformage permet de créer des formes plus attrayantes et confère au véhicule un aspect plus achevé, lui donnant l'apparence d'un produit fini ;
- Systèmes électroniques personnalisés : Dans un contexte de compétition largement axé sur la mécanique, peu d'équipes possèdent les connaissances nécessaires pour équiper leur Baja de systèmes électroniques ;
- Utilisation de deux joints universels pour transmettre la puissance à l'avant du véhicule : Lorsque la SAE a imposé une transmission intégrale, l'ÉTS a conçu une configuration novatrice basée sur les deux joints universels pour contourner le pilote. Cette approche a permis de préserver les performances d'un véhicule à deux roues motrices. Cette année-là, tandis que toutes les autres équipes ont adopté une transmission de puissance sous le châssis ou le siège, la configuration mise au point par l'ÉTS s'est démarquée sur la grille de départ. L'année suivante, les équipes concurrentes se sont inspirées du concept de l'ÉTS.

L'innovation la plus marquante de Baja ÉTS est la conception et réalisation de la CVT électronique. Avant la saison 2017, l'équipe exploitait une CVT pour le véhicule tout-terrain de la marque CVTech. Afin de demeurer compétitive sur le circuit de Baja, l'équipe a décidé de développer son propre modèle de CVT. S'appuyant sur ses connaissances en électronique et l'engouement d'explorer de nouvelles limites, cinq membres de l'équipe ont créé la EVT. Le modèle de CVT actionné par un moteur électrique ainsi que sa méthode de contrôle était suffisamment novateur pour déposer un brevet (US20180172150A1). Les membres inventeurs ont également fondé une entreprise appelée B-CINQ.

1.3 La CVT électronique

La EVT du Baja ÉTS est composée de cinq éléments principaux : la poulie motrice, la poulie réceptrice, la courroie, l'actionneur électrique et le contrôleur. La courroie et la poulie réceptrice sont similaires à celles que l'on trouve dans une CVT mécanique. La nouveauté réside dans la méthode de déplacement du plateau mobile de la poulie motrice, qui est réalisée par l'actionneur électrique, en fonction des instructions du contrôleur. L'ensemble du système est illustré à la figure 1.2.

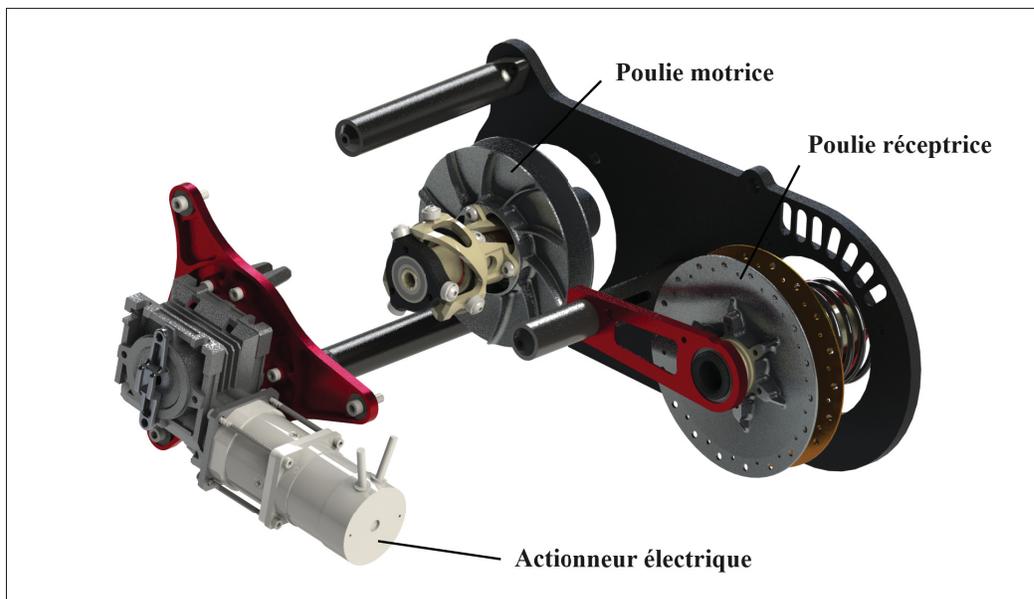


Figure 1.2 Système mécanique de la EVT du Baja ÉTS

1.3.1 La mécanique

La poulie motrice, illustrée à la figure 1.3, est composée de deux plateaux, dont l'un est fixé à l'arbre moteur. Le deuxième plateau se déplace pour effectuer le changement de ratio de la transmission. Le plateau mobile est installé sur la came interne et son déplacement est limité par la trajectoire de la came. La came interne glisse le long de l'arbre moteur à l'aide de paliers lisses afin de réduire les frottements. Le positionnement du plateau mobile est contrôlé par la came externe et l'étoile. Lorsque l'étoile effectue une rotation en sens antihoraire, la came externe se déplace linéairement et rapproche le plateau mobile vers le plateau fixe. Une rotation totale de 70° est nécessaire pour couvrir toute la plage des ratios. Lorsque la EVT doit se désengager, l'étoile est tournée dans le sens horaire. Pendant un bref moment, le roulement n'est plus en contact avec la came externe. Le plateau mobile est alors en mesure de revenir à sa position de repos grâce à la tension dans la courroie. La composante qui positionne l'étoile et assure la liaison mécanique avec l'actionneur est la trompette. L'actionneur est un ensemble comprenant un moteur à courant continu sans balais (BLDC), un réducteur planétaire et une vis sans fin.

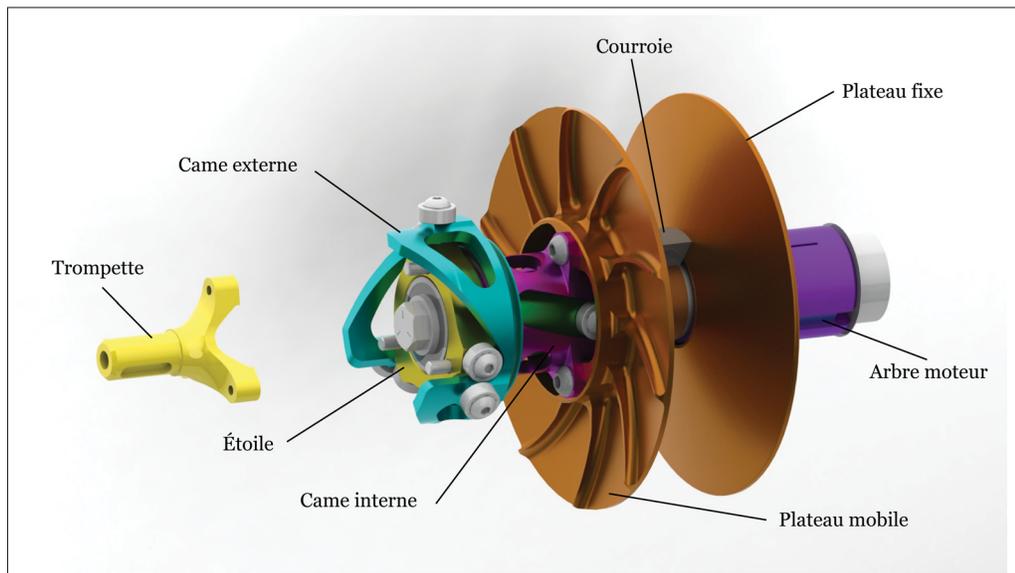


Figure 1.3 Nomenclature de la poulie motrice du Baja ÉTS

La géométrie des plateaux de poulie est responsable des ratios de la CVT. Les ratios correspondent au rapport de vitesse entre la poulie motrice et la poulie réceptrice. Les concepteurs de CVT

doivent prendre en considération le ratio de la boîte d'engrenage ainsi que le diamètre des roues lors de la conception de la géométrie. Le ratio maximal détermine la vitesse maximale limitée par la puissance du moteur, tandis que le ratio minimal influence le couple offert aux roues lors du décollage. Une plage de ratios étendue est nécessaire pour obtenir de bonnes performances du véhicule. Cependant, des contraintes physiques peuvent parfois limiter l'obtention des ratios souhaités.

Il convient de souligner que la géométrie des poulies est responsable de déterminer la vitesse maximale du véhicule. Par conséquent, une CVT mécanique et une EVT ayant les mêmes rapports de transmission atteindront la même vitesse une fois que le groupe motopropulseur aura atteint son régime permanent. Ce qui distingue ces deux types de transmissions réside dans leur mécanisme de régulation du rapport de transmission et dans la vitesse à laquelle ce rapport peut être modifié. Il est à noter que la capacité à modifier rapidement le rapport de transmission peut conférer un avantage de performance à la EVT.

1.3.2 Le contrôleur électronique

Le contrôleur de la EVT joue un rôle central dans le système en recueillant les signaux, en hébergeant le microcontrôleur (MCU) et en exécutant les commandes au moteur électrique. Comme illustré à la figure 1.4, le contrôleur est constitué de deux circuits imprimés superposés. Le circuit supérieur est chargé de la logique, tandis que celui du bas comprend les transistors de puissance qui alimentent le moteur électrique.

L'asservissement de la EVT repose sur l'acquisition de trois données essentielles : la position de l'accélérateur (mesurée par un potentiomètre), l'emplacement de la poulie motrice (également mesuré par un potentiomètre) et le régime moteur (détecté grâce à un capteur à effet Hall). Les signaux provenant des deux potentiomètres sont lus par le convertisseur analogique numérique (ADC) intégré au microcontrôleur, tandis que le régime moteur est calculé dans une routine d'interruption.

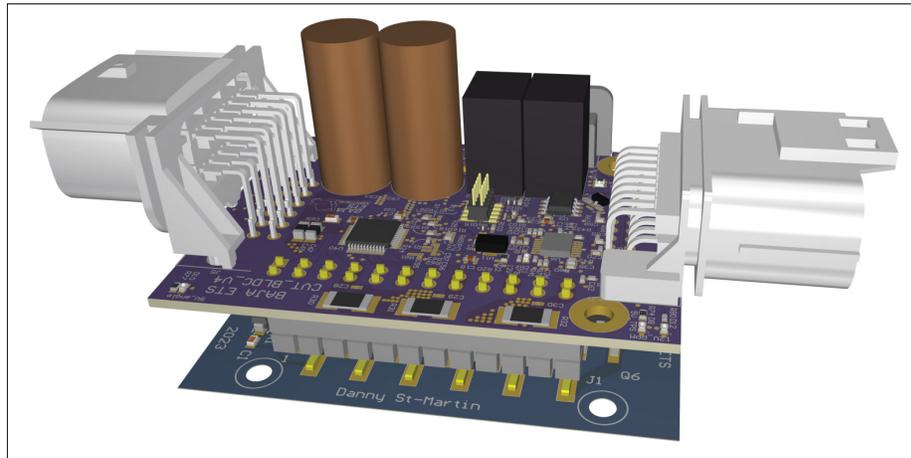


Figure 1.4 Contrôleur électronique de la EVT du Baja ÉTS

Deux autres signaux d'entrée sont présents pour enrichir les conditions de fonctionnement de l'asservissement : un bouton poussoir sur le volant pour la séquence de décollage (*Launch control*) et un interrupteur à pression situé sur le maître-cylindre des freins. De plus, le contrôleur intègre une deuxième entrée pour un capteur à effet Hall, destiné à l'acquisition de la vitesse de la poulie réceptrice ou des roues. Toutefois, cette donnée n'a jamais été intégrée dans l'algorithme de contrôle.

Le pilotage du moteur électrique est géré par un circuit intégré spécialisé. Les seules commandes nécessaires consistent à ajuster la vitesse en modifiant le rapport cyclique du modulateur d'impulsion en largeur (PWM). De plus, il est possible de sélectionner la direction de la rotation grâce à un signal numérique.

1.3.3 L'algorithme de contrôle

L'algorithme conçu par les anciens membres de l'équipe comportait trois états principaux : neutre, vitesse de marche et course. La condition qui dictait l'état était la position de l'accélérateur, aussi nommé TPS pour *trottle position sensor*. Si l'accélérateur était inférieur à 25 %, le régime moteur augmentait, mais la poulie motrice restait au repos. Lorsque l'accélérateur dépassait 25 % mais ne dépassait pas 50 %, la position de la poulie était fixée selon une fonction linéaire

par rapport à la position de l'accélérateur. Cet état facilitait le déplacement du véhicule à basse vitesse dans les zones de vitesse de marche. Dans le dernier état, le contrôle du régime moteur entrainait en jeu. Dans cette configuration, la valeur de l'accélérateur était utilisée pour déterminer la consigne du régime moteur en se référant à une table de correspondance. Cette table était établie à partir de la cartographie du moteur à combustion interne, élaborée par l'équipe à la suite d'essais dynamométriques réalisés en 2016 (résultats détaillés dans l'annexe I).

La consigne de régime moteur était ensuite transmise au premier compensateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) avec rétroaction, ainsi qu'une trajectoire. Cette première boucle de régulation était chargée de déterminer la position idéale de la poulie motrice. Cette position idéale devenait la consigne de la deuxième boucle de contrôle, qui était responsable du positionnement de la poulie motrice. Le deuxième compensateur était un contrôleur PD avec rétroaction sur la position de la poulie.

La fonctionnalité de *Launch control* est une caractéristique unique à la CVT électronique, offrant un avantage significatif par rapport à une CVT classique. Lorsque le bouton est enfoncé, la poulie motrice s'ouvre indépendamment de l'état des autres capteurs. Cela permet au pilote d'augmenter le régime moteur à la vitesse correspondante à la plage de la puissance maximale du moteur tout en maintenant le véhicule immobile. Lorsque le pilote est prêt à démarrer, la CVT s'engage, et la puissance de sortie du moteur augmente rapidement jusqu'à sa puissance maximale, favorisant ainsi une accélération optimale.

1.4 Cadre du projet

1.4.1 Problématiques

Ce mémoire s'attache à résoudre une question cruciale : la EVT offre-t-elle une performance supérieure à une CVT mécanique traditionnelle dans le contexte exigeant de BAJA SAE ? Avant d'entreprendre l'évaluation comparative de ces deux systèmes de transmission, il est impératif d'optimiser l'algorithme de contrôle de la EVT. Actuellement, cet algorithme présente des

problèmes qui ont un impact direct sur l'expérience du conducteur. Parmi ces problèmes, on relève une oscillation perceptible du véhicule lors de l'accélération, une décélération brusque du véhicule lors de la libération de l'accélérateur, et une réactivité lente dans les virages au moment de reprendre l'accélération. Ces défauts ont été identifiés par les pilotes eux-mêmes comme des freins majeurs aux performances du véhicule, rendant la conduite plus technique et complexe. Le comportement actuel du véhicule est loin d'être à la hauteur de son potentiel, ce qui nécessite une courbe d'apprentissage prolongée pour que les pilotes se sentent à l'aise avec ce système.

1.4.2 Objectifs

L'objectif du projet est d'établir une nouvelle méthodologie de commande pour la CVT électronique, en vue d'améliorer les performances du Baja de l'ÉTS. Cela répond à un besoin essentiel : rendre la conduite du véhicule plus accessible, de sorte que le pilote n'ait pas à se soucier de ses performances lors de l'endurance de 4 heures, où la fiabilité et la fluidité de conduite sont essentielles. La réussite de cet objectif passe par trois étapes distinctes. La première consiste à comprendre le comportement requis d'une CVT, en combinant la théorie et la pratique. Cette étape inclut une revue de la littérature sur les CVT, l'analyse du comportement actuel de la EVT, et une comparaison avec une CVT sur un prototype Baja.

La deuxième étape implique le développement d'une nouvelle méthode de commande de la vitesse du moteur. Elle nécessitera l'adaptation des principes issus de la littérature scientifique et de l'industrie au contexte spécifique de Baja SAE. Enfin, la dernière étape vise à répondre à la question essentielle : la EVT est-elle supérieure à une CVT mécanique ? Pour cela, une calibration sera effectuée sur le prototype de 2021, en comparant la performance de la CVT mécanique avec l'algorithme développé dans le cadre de ce projet.

Les retombées de ce projet visent à transférer les connaissances acquises sur la CVT électronique au sein de l'équipe Baja. L'implémentation d'un système embarqué bien conçu et documenté permettra aux futurs membres de l'équipe de mieux maîtriser le projet. Cependant, les connaissances des étudiants de premier cycle en matière d'asservissement se limitent à la commande

linéaire. Afin d'assurer la pérennité du projet et de faciliter la calibration du système sur les futurs véhicules, l'utilisation de la commande non linéaire est exclue.

1.4.3 Contraintes

La principale contrainte du projet réside dans l'implémentation d'une loi de commande sans bénéficier d'un modèle complet du système. La complexité inhérente à la modélisation de la courroie a jusqu'à présent empêché le développement d'un modèle exhaustif. La création d'un tel modèle nécessiterait un projet de recherche à part entière. En conséquence, la conception de l'algorithme doit s'effectuer sans ce modèle. Cependant, l'accès au prototype de 2021 est autorisé pour le développement et la calibration de l'algorithme. Au moment d'entamer le développement, seuls les modèles de 2021 et 2022 étaient disponibles. Le modèle de 2023, alors en cours de fabrication, n'aurait été accessible que de manière limitée en raison de sa participation aux compétitions. Bien que le modèle de 2022 soit équipé d'un 4 roues motrices, il a été jugé préférable d'utiliser le modèle de 2021, doté du moteur Kohler, pour le développement. Pour les essais, l'utilisation du stationnement intérieur de l'ÉTS est permise en soirée. La piste de l'ÉNA offre un cadre de test idéal, offrant des conditions plus proches de celles rencontrées en compétition.

Une autre contrainte concerne le matériel électronique. La dernière révision du circuit électronique a eu lieu avant le début de ce projet. Il serait préférable de ne pas apporter de modifications majeures, étant donné que l'équipe électronique est engagée dans ses propres projets. Cependant, des adaptations pour l'ajout de capteurs ou d'autres signaux sont envisageables si elles contribuent à améliorer la régulation du système.

Enfin, les règles émises par la SAE imposent certaines contraintes. La plus significative est le changement du moteur effectué par la SAE peu de temps avant le début de ce projet. L'intégration du nouveau moteur Kohler fait donc partie intégrante de ce projet. De plus, le respect des règlements de la SAE, publiés annuellement, impose des contraintes particulières à la conception

de l'algorithme. Les articles concernés sont extraits de la révision C de la version 2023 du règlement :

- Article B.2.7. : Le moteur doit demeurer entièrement d'origine (à l'exception des modifications approuvées) sous tous les aspects et inclure le kit de conversion Baja SAE.
- Article B.2.7.9. : Le moteur Kohler est équipé d'un régulateur de vitesse. Lorsque l'arbre moteur est libre, la vitesse du régulateur ne doit pas excéder 3 800 tr/min.
- Article B.2.7.10. : Toute modification de la vitesse de ralenti est autorisée, Kohler recommande 1 800 tr/min \pm 50 tr/min.
- Article B.2.7.16. : Le moteur peut être équipé d'un alternateur approuvé pour générer de l'énergie électrique. Les seuls alternateurs autorisés sont ceux spécifiés par Kohler pour le modèle de moteur. Des alternateurs de 3, 10 et 18 ampères sont disponibles.
- Article B.7.2. : *Throttle-by-wire* ou tout autre contrôle de l'accélérateur électronique est explicitement interdit.
- Article B.10.5. : Les véhicules peuvent être équipés d'instruments pour fournir des informations opérationnelles ou de performance au conducteur. Tous les instruments du véhicule doivent être inclus dans le rapport des coûts.
- Article C.2.6.1 : Une fois qu'un véhicule a réussi l'inspection technique, sa configuration ne peut pas être modifiée.
- Article C.2.6.4 : Les ajustements mineurs autorisés par les règles ainsi que l'entretien normal du véhicule et les réglages ne sont pas considérés comme des modifications.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La grande majorité des véhicules Baja participant aux compétitions, soit plus de 95 %, sont équipés d'une transmission à variation continue mécanique. Ce type de transmission est largement disponible sur le marché des véhicules tout-terrain. La transmission de couple sans interruption est également un choix adapté au contexte de Baja SAE. La présente revue de la littérature se concentre sur le comportement et le rôle d'une CVT mécanique dans la chaîne cinématique. Par la suite, une attention particulière sera portée à la CVT électronique, avec objectif de réunir les concepts clés utilisés dans l'industrie automobile à partir d'articles scientifiques et de brevets.

2.1 CVT mécanique

La facilité d'incorporation d'une CVT mécanique est l'une des raisons de sa popularité sur les pistes de Baja. Le système composé uniquement de deux poulies et d'une courroie offre aux équipes la possibilité de propulser aisément leur véhicule. Malgré la simplicité du système, une mauvaise compréhension de son comportement mènera à une calibration inadéquate, entraînant ultimement de mauvaises performances du véhicule.

2.1.1 Introduction de la transmission à variation continue

La plage de régime d'un moteur à combustion est limitée pour produire un couple suffisant. Par conséquent, une transmission est nécessaire pour combler les besoins de couple et de vitesse du véhicule. La transmission gère la vitesse et la charge en ajustant le ratio entre le moteur et les roues au bon moment.

Les transmissions automatiques et manuelles sont équipées de plusieurs vitesses avec des ratios fixes. Lors d'un changement de vitesse, le régime moteur chute brusquement, comme illustré dans la figure 2.1a, en raison de l'ajout d'un couple supérieur au moteur. Cette dynamique n'est pas idéale pour certains véhicules, notamment les motoneiges qui se promènent sur des terrains

de haute résistance. Une motoneige équipée d'une transmission à vitesse perdrait trop de vitesse au moment du changement de ratio.

La CVT mécanique se distingue par une puissance ininterrompue et la capacité de s'ajuster à toutes les conditions de charge (Aaen, 2015, p. 4). Comme le montre la figure 2.1b, le nombre infini de ratios entre le minimum et le maximum permet une accélération graduelle du véhicule. Cela donne à la CVT un avantage distinct par rapport aux transmissions conventionnelles.

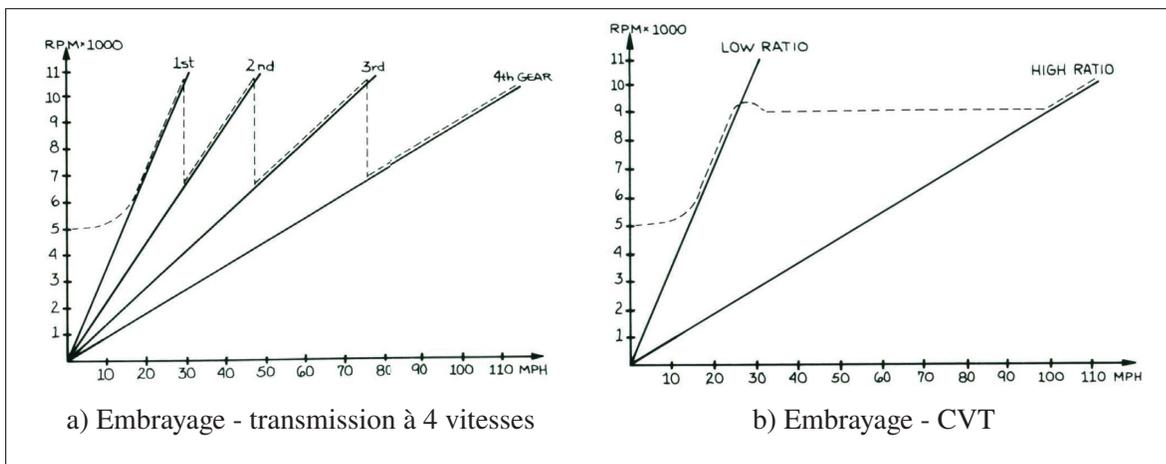


Figure 2.1 Comparaison des embrayages de deux types de transmission
Tirée de Aaen (2015, p. 9)

Le graphique présenté à la figure 2.1b est un diagramme de vitesse. L'axe horizontal représente la vitesse du véhicule et l'axe vertical représente le régime du moteur. Les deux lignes pleines sont les ratios minimum et maximum de la CVT, tandis que la ligne pointillée représente le régime moteur lors d'une accélération du véhicule. Ce graphique est un outil pour les concepteurs et calibreurs afin de comprendre le comportement de la transmission. Il est particulièrement important durant la calibration pour connaître l'impact de chaque ajustement de paramètre.

Par la suite dans cette section, on explorera plus en détail le fonctionnement des deux poulies de la CVT mécanique : la poulie réceptrice et la poulie motrice. Chaque sous-section abordera le rôle de chaque poulie dans la transmission, ainsi que leur comportement. On examinera également la fonction des différentes pièces illustrées dans la nomenclature du système, présentées à la figure 2.2.

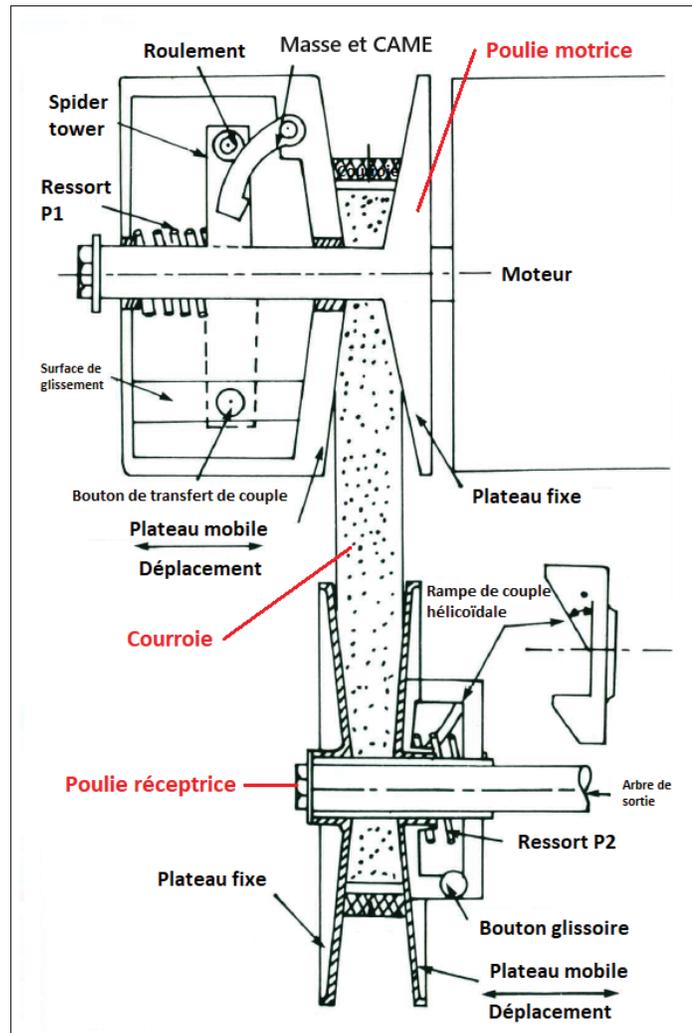


Figure 2.2 Nomenclature de la CVT
Adapté de Aaen (2015, p. 5)

2.1.2 Poulie réceptrice

L'objectif primaire de la poulie réceptrice, également nommé poulie menée ou poulie secondaire, est d'appliquer une force axiale suffisante sur la courroie pour transmettre le couple requis. Cependant, le couple transmis par la poulie réceptrice varie en fonction du rapport du système. Par exemple, dans une transmission avec un rapport de 3 : 1 (minimum) et 0.75 : 1 (maximum), la différence de couple est d'un ordre de quatre. Par conséquent, au ratio minimum, la courroie

doit recevoir quatre fois plus de force de pincement pour transmettre le couple nécessaire dans le système.

Cependant, la surface de la courroie en contact avec la poulie a un impact sur la force de pincement requise par la poulie réceptrice. En raison de la géométrie de poulie et le rayon de la courroie, il est estimé qu'il y a deux fois plus de surface de contact au ratio minimum entre la poulie et la courroie. Par conséquent, la poulie doit seulement ajuster la pression sur la courroie d'un ratio de deux (Aaen, 2015, p. 16). Le graphique 2.3 démontre la pression requise sur la courroie lors de l'embrayage.

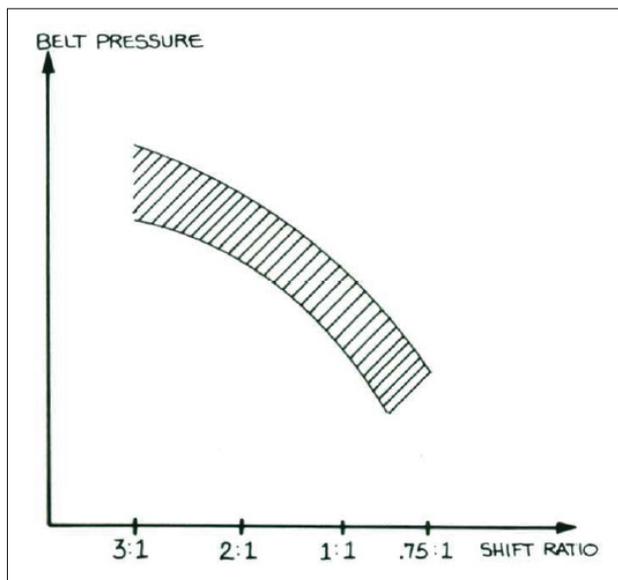


Figure 2.3 Variation de la force axiale
selon le ratio de CVT
Tirée de Aaen(2015, p. 15)

Pour pallier cette variation, la poulie est munie d'une rampe de rétroaction de couple (*torque feedback ramp*). La forme de la came permet de transformer une partie du couple reçu dans la poulie en force de pincement sur la courroie. Ainsi, lorsque le couple transmis à la poulie réceptrice est élevé, une force plus importante est appliquée à la courroie. La figure 2.4 schématise le système des forces sur la rampe de rétroaction. On remarque que plus l'angle de la rampe (α) est grand, plus la force axiale (S) est petite. En raison de sa sensibilité aux variations de couple,

la poulie réceptrice est réactive au couple. En d'autres termes, cette poulie réagit au changement de couple. De plus, la came sert également à compenser pour les variations subies en demande de couple, causées par une augmentation de poids ou une montée de pente.

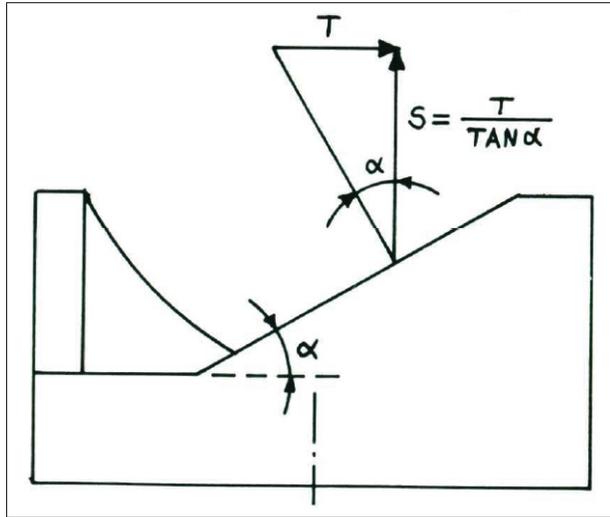


Figure 2.4 Rapport de force dans la rampe de rétroaction de couple
Tirée de Aaen (2015, p. 16)

La deuxième composante qui exerce une pression sur la courroie est le ressort P2 (voir figure 2.2). P2 est normalement précontraint pour aider la courroie à revenir à sa position de repos lors du désengagement. Ce ressort peut fonctionner en torsion ou en compression, selon la conception de la poulie. La constante du ressort P2 joue un rôle important dans la calibration de la transmission. Elle détermine la vitesse à laquelle les plateaux mobiles des deux poulies se déplacent lors d'une accélération véhicule.

La force appliquée sur la courroie par la poulie réceptrice (F_R) est représentée dans l'équation 2.1. F_{CC} est la force de pincement générée par la rampe de rétroaction de couple (S dans la figure 2.4 et F_{R2} représente la force du ressort P2.

$$F_R = F_{CC} + F_{R2} \quad (2.1)$$

L'importance du pincement généré au niveau de la poulie réceptrice ne peut être sous-estimé, car il joue un rôle crucial dans l'efficacité globale du système. Lorsque le pincement de la courroie est inférieur à la limite du coefficient de friction avec les plateaux, la courroie commence à glisser, générant ainsi une chaleur significative. Ce phénomène se traduit par une perte d'efficacité et de performance. À l'inverse, un pincement excessif peut entraîner l'étirement et le pliage de la courroie, réduisant ainsi l'efficacité de la transmission et la durée de vie de la courroie.

La limite de pincement nominale correspond au niveau de pincement requis pour empêcher le glissement de la courroie dans des conditions normales, comme le déplacement du véhicule sur un terrain plat. Aaen recommande un pincement de la courroie 30 % supérieur à la valeur nominale pour assurer l'absence de glissement dans la poulie réceptrice, même lorsque le véhicule est soumis à des chargements additionnels (Aaen, 2015, p. 17). Cette marge de sécurité garantit une performance optimale du système, même dans des conditions de fonctionnement plus exigeantes.

2.1.3 Poulie motrice

Les fabricants de CVT utilisent divers mécanismes pour actionner leur poulie motrice. Cependant, chaque poulie comprend un plateau fixe, un plateau mobile, un ressort (P1) et un système de masse et came. Le principe de base de chaque modèle est de générer une force radiale par effet centrifuge à l'aide des masses. Le système de came transforme ensuite cette force radiale en une force axiale pour déplacer l'ensemble mobile vers un ratio inférieur. Le plateau mobile, dans sa position de repos, représente le ratio minimum de la transmission. Un déplacement complet de l'ensemble mobile vers l'ensemble fixe correspond à la plage de ratios disponible jusqu'au ratio maximal. Il est courant d'observer des ratios de 3 :1(min) et 0.75 :1(max) (Aaen, 2015, p. 12).

La poulie motrice (également appelée menante ou primaire) est responsable de maintenir le régime moteur constant. Cette tâche est accomplie par un équilibre des forces entre le ressort de

la poulie motrice P1 (F_{R1}) et la force centrifuge générée par les masses en rotation (F_B). La force motrice résultante appliquée sur la courroie est donnée par l'équation 2.2.

$$F_M = F_B - F_{R1} \quad (2.2)$$

Deux seuils importants se trouvent dans le diagramme de vitesse (figure 2.5). La première est la vitesse de rotation d'engagement qui se retrouve à 5 000 tr/min et le deuxième est la vitesse d'embrayage à 9 000 tr/min (également appelée régime d'opération). La vitesse d'engagement est déterminée par la tension préalable du ressort P1 lors de son installation. Une vitesse d'engagement plus basse permet un décollage plus progressif. Cependant, cette vitesse doit être suffisamment élevée pour que le moteur produise un couple suffisant afin de mettre le véhicule en mouvement. La deuxième vitesse importante est le régime d'embrayage. Ceci correspond à la vitesse à laquelle la transmission commence à passer à un ratio plus élevé. Corréler la vitesse d'embrayage avec la plage de puissance maximale du moteur entraîne un meilleur rendement à la sortie de la poulie réceptrice.

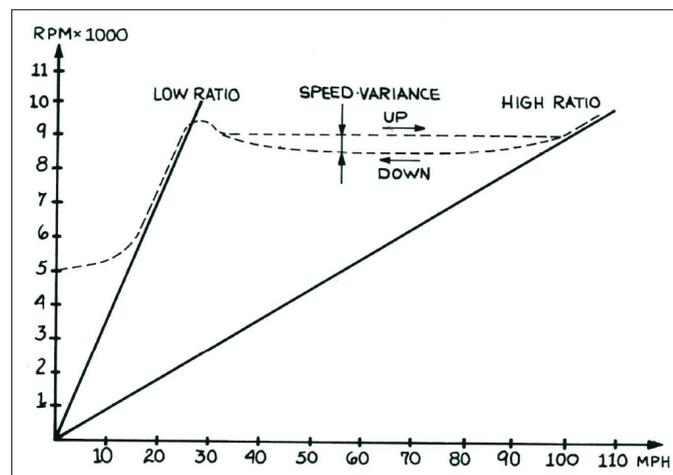


Figure 2.5 Embrayage et désengagement de la CVT
Tirée de Aaen (2015, p. 36)

2.1.3.1 Les masses de la poulie motrice

Il est connu que le coefficient de friction nécessaire pour éviter un glissement de la courroie varie selon le ratio. La rampe rétroactive sur la poulie réceptrice contribue à la variation du couple. Cependant, les masses et leur géométrie jouent un plus grand rôle pour satisfaire cette exigence. En réalité, c'est la courbure de la masse et l'angle créé en contact avec le roulement qui influence la pression que la courroie reçoit par la poulie motrice. La figure 2.6 illustre les différents angles d'une masse selon la position du plateau mobile. Au début de l'embrayage lorsque la force requise pour déplacer la courroie est élevée, l'angle de courbure est grand, ce qui entraîne une force axiale élevée. L'angle de la courbure diminue lors de l'embrayage pour suivre la demande de la poulie réceptrice.

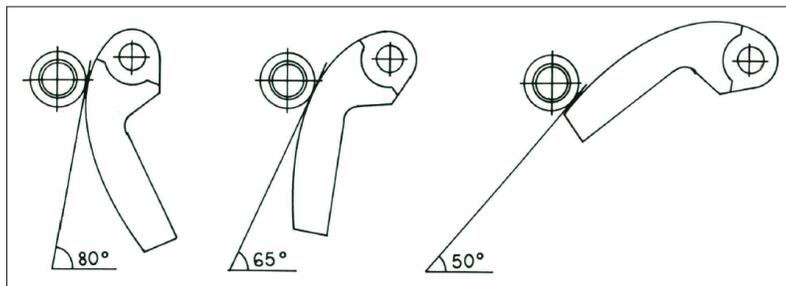


Figure 2.6 Variation de l'angle de la courbure d'une masse
Tirée de Aaen (2015, p. 31)

2.1.3.2 Phase d'embrayage de la CVT

La séquence d'embrayage qui permet au véhicule d'être au repos et de se rendre à sa vitesse maximale peut être visualisée sur le graphique 2.7. Dans la première phase A, le véhicule est au repos. Toute vitesse motrice inférieure à la vitesse d'engagement (point B) sera insuffisante pour actionner la transmission. Cette plage permet d'accommoder les variations de vitesse lorsque le moteur est au ralenti (*idle*). Dès que le régime atteint la vitesse d'engagement, la force centrifuge dépasse le préchargement du ressort P1 de la poulie motrice. Dans la phase C, le plateau mobile entre en contact avec la courroie jusqu'à ce qu'il n'y ait aucun glissement. Malgré le glissement, le contact initial entre le caoutchouc et les plateaux réussit à mettre le véhicule en mouvement.

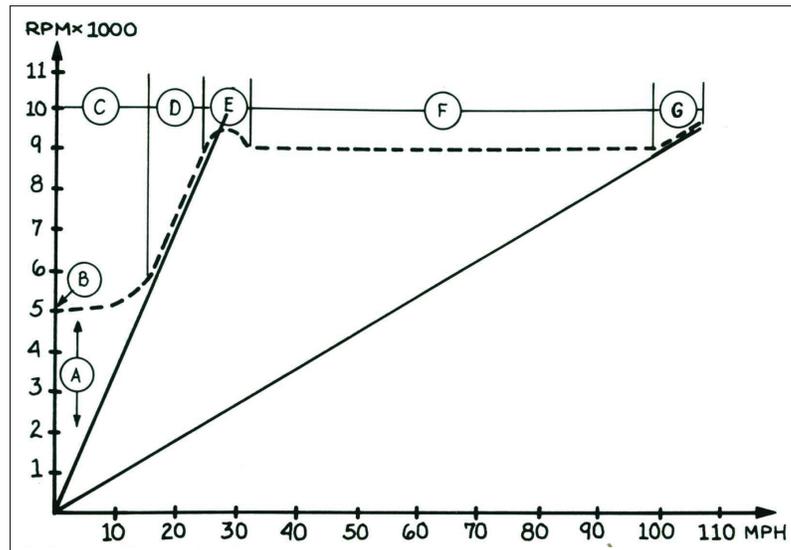


Figure 2.7 Phases d'embrayage de la CVT
Tirée de Aaen (2015, p. 22)

La phase D permet au régime d'augmenter jusqu'à la cible, tout en demeurant au ratio minimum de la géométrie. Lors de cette accélération motrice, la force centrifuge prend une plus grande importance. Au moment où le point d'embrayage est atteint (point E), la force résultante F_M de l'équation 2.2 devient supérieure à la force F_R de l'équation 2.1. Les plateaux mobiles de chaque poulie commencent à se déplacer pour changer le ratio de la transmission. Le dépassement de régime au point E est causé par la friction statique lors du déplacement initial des masses.

La courbe d'embrayage (phase F) a lieu suite à l'atteinte du point d'embrayage. Durant l'embrayage, la force centrifuge dépasse la force du ressort P1 ainsi que la force résultant de la poulie réceptrice. Une bonne calibration va permettre au régime d'opération d'être constant, directement dans la plage de puissance du moteur. L'angle de cette droite est influencé par la constante du ressort P2.

La dernière phase de l'embrayage est l'accélération libre (G). Ici, la CVT atteint le ratio final et la vitesse du moteur continue de s'emballer jusqu'à la vitesse maximale limitée par la puissance motrice. Cependant, certains véhicules n'atteignent pas l'accélération libre. En fait, si l'on désire avoir une meilleure accélération, on peut réduire le ratio de la boîte de réduction. Un plus petit

ratio provoque une augmentation du couple, au détriment de la vitesse maximale. Ceci est un compromis à faire durant la conception.

2.1.4 Courroie

Les courroies utilisées sur les circuits de Baja sont typiquement de la forme d'un V. Elles sont fabriquées en caoutchouc renforcé par une corde en Kevlar.

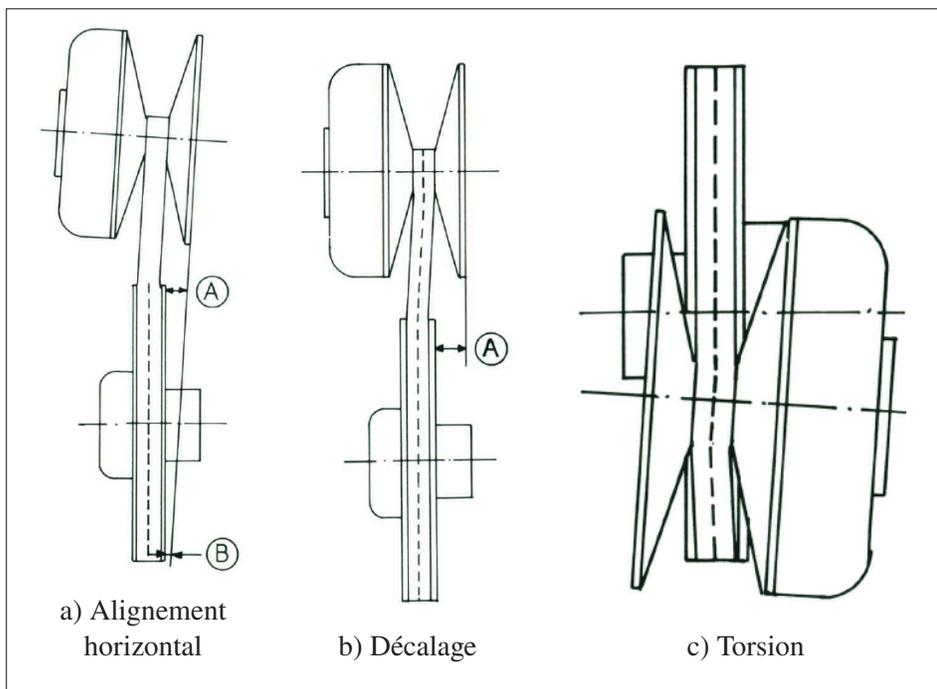


Figure 2.8 Possibilités de désalignement de la courroie de la CVT
Tirée de Aaen (2015, p. 39)

La courroie joue un rôle crucial dans le système pour deux raisons. Premièrement, elle assure la transmission de couple entre les deux poulies. Deuxièmement, elle affecte l'efficacité du système. Des poulies mal alignées créent une charge supplémentaire sur la courroie, ce qui réduit l'efficacité du système et la durée de vie de la courroie (Aaen, 2015, p. 39). La figure 2.8 illustre trois situations où une courroie peut être désalignée en raison d'une mauvaise installation des poulies. Il est important de veiller à une installation précise des poulies pour obtenir les performances optimales de la transmission CVT.

2.1.5 Contraintes et défis de la calibration d'une CVT

La calibration d'une CVT mécanique comporte à la fois des caractéristiques simples et restrictives. Avec seulement trois paramètres à ajuster, une personne ayant une bonne maîtrise de la CVT peut réaliser une calibration en une journée. Les paramètres à prendre en compte sont le poids des masses et les constantes des ressorts P1 et P2. Cependant, la contrainte majeure réside dans le fait que la calibration doit répondre aux exigences de toutes les épreuves et types de terrains. Par exemple, lors d'une épreuve de montée de pente, il peut être souhaitable d'avoir un ressort P2 avec une constante plus élevée. Cependant, la force supplémentaire générée par le ressort plus rigide entraînera des pertes d'efficacité de la courroie lors des épreuves nécessitant moins de couples.

La calibration de CVT est un sujet peu exploré dans cette revue. Il existe plusieurs bonnes ressources utiles, telles que le rapport de projet de fin d'étude intitulé « Ajustement de la transmission à variation continue du Mini-Baja ÉTS » rédigé par Gabriel C. Bourassa (2005). CVTech a également mis à la disposition des équipes un document nommé « Calibration CVT ». Les principaux éléments de ce document sont résumés dans le tableau 2.1.

Paramètre	Direction du changement	Effet au système
Constante P1	↑	augmente la vitesse d'engagement
	↓	réduit la vitesse d'engagement
Constante P2	↑	augmente la pente d'embrayage
	↓	réduit la pente d'embrayage
Masse	↑	réduit le point d'embrayage
	↓	augmente le point d'embrayage

Tableau 2.1 Influence des paramètres de calibration de la CVT
Tirée de Thibodeau (2021, p.2)

Lorsqu'on examine un diagramme de vitesse (figure 2.1b ou 2.7), on repère trois instants où le régime d'opération ne correspond pas à la vitesse de puissance motrice maximale. Le premier moment se produit lors de l'engagement, où le mécanisme de la poulie motrice engage la courroie dès que la vitesse d'engagement est atteinte. Augmenter la vitesse d'engagement permet de se rapprocher du régime de fonctionnement optimal, mais cela entraîne un décollage plus brusque.

Le deuxième moment est le point d'embrayage, où un dépassement se produit en raison de la friction statique lors du déplacement initial des masses. Bien que cela puisse être atténué par une bonne calibration, un certain dépassement reste inévitable. Le troisième moment survient lorsque le ratio maximum est atteint et le moteur a suffisamment de couple pour augmenter le régime moteur au-delà du régime d'opération. Parmi les trois instants présentés, les deux premiers sont ceux où la CVT électronique peut offrir des améliorations de performance par rapport à la CVT mécanique.

2.2 Recherche existant sur le concept de CVT électronique

Les CVT sont utilisées dans divers types de véhicules et de machines. Cette revue de littérature se concentrera principalement sur les CVT dans le domaine de l'automobile et des véhicules tout-terrain (VTT). L'abondance de recherches dans le domaine automobile en fait un sujet d'intérêt particulier, susceptible d'apporter des stratégies de contrôle et de conception qui pourraient être appliquées à la recherche en cours.

2.2.1 Domaine de l'automobile

Dans le secteur automobile, l'une des principales motivations est l'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier pour réduire la consommation de carburant. Étant donné que les moteurs à combustion interne ont atteint la limite de leur efficacité, les efforts de recherche se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité des transmissions (Nuri, Hudha & Rahman, 2022, p. 660). En théorie, l'utilisation d'une CVT dans une automobile permet à la transmission de suivre une ligne de fonctionnement optimale (OOL). Cette ligne inclut des conditions telles que la position de l'accélérateur, le régime moteur et la charge, de manière à optimiser l'efficacité énergétique du moteur. Les premiers modèles de CVT dans les automobiles étaient actionnés par un système hydraulique, comme illustré dans le brevet de Nissan (Abo, Yamamoto, Sato & Suzuki, 2001). Cependant, ce type d'actionneur est énergivore, lourd et difficile à asservir en raison de la non-linéarité de l'hydraulique (Nuri et al., 2022, p. 660), ce qui limitait la capacité à suivre l'OOL.

Pour remédier à ces limitations des générations précédentes de CVT automobiles à système hydraulique, de nombreuses recherches visent à améliorer ce système. Veenhuizen et al. ont proposé de remplacer la pompe hydraulique par un système d'actionneur à servomoteur (Veenhuizen et al., 2004). D'autres recherches ont même envisagé de remplacer l'ensemble du système hydraulique par des actionneurs électromécaniques purs, comme dans le cas de la EMCVT proposée par Zhang, qui utilise deux actionneurs mécaniques, une boîte d'engrenages et un moteur à courant continu (Zhang, Zhai, Zhao & Chen, 2011). D'autres projets similaires incluent la CVT EMPACT (Klaassen, 2007).

Les CVT à double actionneur, présentes dans les publications de l'industrie automobile, sont particulièrement intéressantes. L'actionneur de la poulie motrice est responsable de contrôler le rapport de transmission, tandis que le deuxième actionneur gère le pincement de la courroie pour éviter son glissement (Klaassen, 2007, p. 125). Ce contrôle indépendant de la poulie réceptrice permet d'éviter un pincement excessif constant sur la courroie, ce qui est une réalité dans les CVT mécaniques, comme discuté dans la section 2.1.2 (Klaassen, 2007, p. 114). Cependant, ce type de système apporte une complexité accrue en matière de contrôle et de matériel. Malgré cela, l'équipe de Baja Cal Poly a réussi à développer un prototype de CVT électronique à double actionneur (Hardy, Bernick, Capdevila & Perry, 2019), qui a même obtenu de bons résultats en compétition (7^e place à Oshkosh et Oregon en 2023).

Il est important de noter que les CVT dans les automobiles diffèrent de celles des VTT à plusieurs égards. Tout d'abord, la puissance à transmettre est plus élevée dans les voitures, ce qui nécessite l'utilisation de courroies métalliques (Klaassen, 2007, p. 4). Les CVT automobiles visent à être aussi efficaces que possible pour améliorer la consommation de carburant des conducteurs. En revanche, les conducteurs de VTT ordinaires ne se préoccupent généralement pas de leur consommation de carburant ni de tirer le maximum de puissance de leur véhicule. Seuls les professionnels et les passionnés cherchent à exploiter pleinement les performances de leur VTT. Un autre aspect de différenciation entre les deux est le type de surface d'application. Les voitures sont généralement conduites sur l'asphalte (la plupart du temps en Amérique du Nord), une surface qui n'est pas propice au glissement des roues. En revanche, les VTT passent la majorité

de leur temps sur des terrains de gazon, terre et roche. Malgré ces différences, il est possible de tirer profit de la littérature automobile pour la recherche sur les CVT du Baja.

Il est essentiel de reconnaître que le système de commande est non linéaire en raison des comportements de la courroie en caoutchouc sous différentes pressions et températures, ainsi que le comportement du pneu sous différentes surfaces. Ce phénomène est confirmé dans l'article *Adaptive Neural Network Optimization Control of ICE for Vehicle with Continuously Variable Transmission* (Ariyono, Tawi, Jamaluddin, Hussein & Supriyo, 2007, p. 1). Ariyono et al. reconnaissent cette non-linéarité du système et proposent une approche basée sur une commande d'optimisation avec un réseau de neurones adaptatif. Les simulations menées dans le cadre de ce projet ont montré que le régime moteur du véhicule pouvait être asservi de manière efficace à la cible sélectionnée.

L'équipe de recherche du projet Baja de Cal Poly a également exploré l'utilisation de réseaux de neurones. L'avantage qu'ils ont souligné est que ce système de contrôle peut s'adapter à différents environnements, un aspect utile dans le contexte tout-terrain. Cependant, les inconvénients qu'ils ont évoqués sont que ce système nécessite du temps pour s'adapter au système mécatronique, qu'il n'est pas garanti de converger, ce qui est inacceptable dans le cadre de Baja, et qu'il empêche les utilisateurs (les étudiants de l'équipe) de comprendre le fonctionnement de l'embrayage de la CVT (Hardy et al., 2019, p. 24). Par conséquent, Cal Poly a exclu l'utilisation du réseau de neurones. L'une des raisons évoquées était que, lors des compétitions, les véhicules doivent être prêts à être utilisés immédiatement, ce qui n'est pas compatible avec une transmission qui doit apprendre le terrain en cours d'épreuve (Hardy et al., 2019, p. 29).

Une autre technique de contrôle examinée et simulée par l'équipe de Cal Poly est la logique floue. Ce contrôleur a obtenu de bons résultats dans leur matrice de décision, car il ne nécessite pas de modèle de processus pour fonctionner et est robuste (Hardy et al., 2019, p. 29). Cependant, Cal Poly a exclu ce type de contrôleur après avoir obtenu de mauvais résultats en simulation. En revanche, Kim et Vachtsevanos ont obtenu de meilleurs résultats avec la logique floue de la méthode « Takagi-Sugeno-Kang ». Ils ont réussi à contrôler un système non linéaire (la CVT) en

utilisant des compensateurs linéaires à chaque règle (Kim & Vachtsevanos, 2000, p. 154). Suite à leurs conclusions, ils ont suggéré d'utiliser leur méthodologie pour le développement d'un régulateur anticipatif (Kim & Vachtsevanos, 2000, p. 155).

En dépit de la non-linéarité du système de commande, il existe de l'espoir pour les techniques de commande classiques. Guzzella et Schmid ont rapporté peu de succès avec la commande classique seule. Cependant, la combinaison de la commande classique avec la planification des gains s'est avérée viable (Guzzella & Schmid, 1995, p. 54). La planification des gains est également utilisée dans la CVT EMPACT pour augmenter la robustesse du système de commande (Klaassen, 2007, p. 85). Klaassen a subdivisé la planification des gains en trois sections : bas, moyen et élevé. Cette planification pourrait influencer une commande pour l'engagement, l'embrayage et le désengagement dans le cadre du projet. Des résultats ont montré que les performances étaient meilleures lorsque les gains étaient différents dans chaque direction (Nuri et al., 2022, p. 665). Enfin, un contrôle sur l'activation de l'intégrateur peut également s'avérer pertinent. Klaassen a obtenu de meilleurs résultats lorsque l'intégrateur était désactivé pour des désengagements rapides et pour la transmission de faible couple (Klaassen, 2007, p. 101).

2.2.2 Domaine du VTT

Il existe très peu de littérature sur les eCVT dans les véhicules tout-terrain. Pour obtenir des informations, il est nécessaire de se tourner vers les brevets publiés par les fabricants de VTT ou de CVT. Les entreprises telles que CVTech, Polaris et BRP ont publié des brevets sur ce sujet, bien que chacune d'entre elles n'ait pas encore commercialisé de modèle de eCVT. Cependant, il semble y avoir un intérêt croissant pour cette variante de transmission. L'un des avantages potentiels est la possibilité d'offrir plusieurs modes de conduite au consommateur. CVTech partage dans leur brevet que la eCVT offre au conducteur l'option de modes tels que normal, travail, sport ou manuel (Roberge, Levasseur et Brind'Amour, 2011, p. 9).

Les brevets regorgent de fonctionnalités liées à la eCVT, certaines faciles à mettre en œuvre, tandis que d'autres nécessitent trop d'efforts dans le contexte du Baja SAE. La liste suivante répertorie certains éléments pertinents pour la présente recherche, et d'autres que l'équipe pourrait se servir comme inspiration :

- L'idée présentée dans le brevet *Electronically controlled continuously variable transmission with torque limiting system and method thereof* vise à limiter le couple subi par la ligne cinématique lorsque le véhicule atterrit après un saut. Cette tâche commence lorsque le système détecte que le véhicule est en l'air à l'aide de capteurs de suspension, d'antiroulis et d'accéléromètre. Ensuite, le système de commande ajuste la vitesse des roues pour correspondre à celle au moment du décollage, garantissant ainsi qu'il n'y a pas de différence de vitesse à l'atterrissage (Roberge, Levasseur & Mercier, 2011, p.1).
- Le contrôleur de régime moteur du brevet de Polaris utilise l'accélération du véhicule pour sélectionner la vitesse à laquelle la poulie motrice doit se déplacer pour atteindre sa prochaine position (Krosschell et al., 2016, p. 49).
- Dans le deuxième brevet de CVTech, le concept d'une *launch control* automatique est présenté, sans nécessité d'un bouton poussoir. Lorsque la pédale d'accélérateur est enfoncée, le contrôleur attend que le régime moteur cible soit atteint avant d'engager la eCVT (Roberge, Levasseur & Brind'Amour, 2011, p. 22).

La revue de la littérature a éclairé notre compréhension des connaissances essentielles nécessaires pour comprendre le fonctionnement de la CVT et son rôle crucial dans l'optimisation des performances des véhicules. Elle a également révélé les avancées de la recherche dans le domaine des CVT électroniques, tant dans l'industrie automobile que dans le domaine des VTT. Cela nous permettra d'aborder de manière plus approfondie les problématiques identifiées au cours du premier chapitre et de les analyser en relation avec une CVT mécanique, comme nous le détaillerons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

ANALYSE APPROFONDIE DU FONCTIONNEMENT DE LA CVT SUR UN BAJA

Le premier chapitre a exposé les problèmes remarqués par les pilotes concernant le comportement du véhicule. Ce chapitre vise à mettre en lumière ces problèmes en s'appuyant sur les données recueillies à partir d'un prototype utilisant la version 2022 de l'algorithme, dans le but de mieux comprendre les phénomènes nécessitant des améliorations. Ensuite, une seconde étude est menée sur un prototype Baja équipé d'une CVT mécanique afin de mieux appréhender son comportement lors de différentes épreuves. Enfin, une analyse du moteur Kohler est réalisée sur un dynamomètre pour mieux comprendre ce nouveau moteur imposé par la compétition et procéder à la calibration appropriée pour la EVT.

3.1 Étude de la dernière itération de la EVT

Les deux problématiques soulevées se situent au niveau de l'accélération du véhicule et de sa décélération. Chacun de ces cas spécifiques sera analysé dans les prochaines sous-sections dans le but de comprendre l'origine des problématique du système.

3.1.1 Accélération

La première composante à évaluer sur l'ancien système est l'accélération du véhicule. Cette analyse est rendue possible grâce aux données produites en 2022 lors de la calibration de la EVT. Ces données sont illustrées dans la figure 3.1. La figure contient le régime moteur et la cible du régime moteur dans le cadran du haut, et la position de la poulie motrice ainsi que sa cible dans le cadran du bas.

La figure 3.1 présente deux éléments préoccupants qui limitent la performance du système. Tout d'abord, on constate un manque de filtrage sur le signal du régime moteur. L'état actuel du signal comporte beaucoup de bruit à haute fréquence, rendant difficile la détermination de la valeur réelle du régime moteur. De plus, ce bruit est également transmis dans le système de commande, car l'erreur est composée d'une cible fixe et d'une valeur actuelle très bruitée. Le bruit se propage

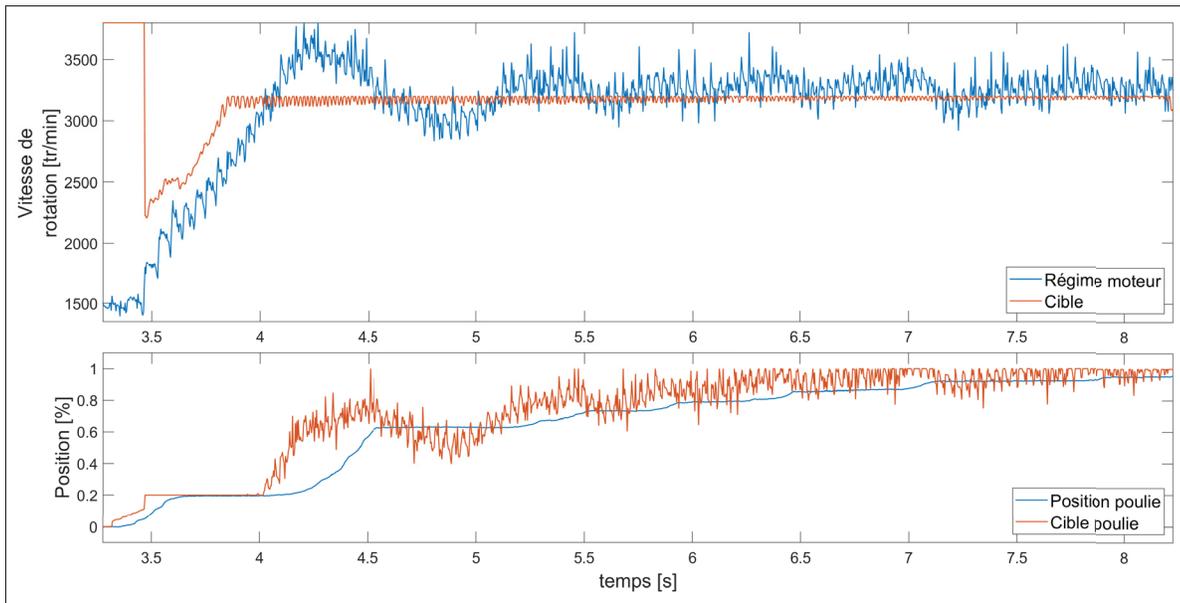


Figure 3.1 Accélération du prototype en 2022 avec ancien algorithme

ainsi dans la commande de la boucle interne qui positionne le moteur électrique. Ce phénomène est observable dans la deuxième partie du graphique, puisque la commande « sheave.target », qui correspond à la position cible de la poulie motrice, présente le même niveau de bruit. Ainsi, l'ajout d'un filtre sur le régime moteur permettrait d'améliorer l'asservissement du moteur.

Le deuxième élément observable est le déplacement de la poulie motrice pendant l'accélération. Le fait que la poulie se déplace rapidement suivie d'un plateau est la raison pour laquelle le pilote ressent une oscillation. Ce comportement est en partie causé par le filtrage du régime moteur. Cependant, il est important de s'assurer que le déplacement de la poulie se fait de manière graduelle, en limitant les plateaux et en évitant les changements brusques de direction. Un désengagement durant l'accélération peut provoquer une augmentation soudaine du régime moteur et faire sortir le moteur de sa plage de performance.

3.1.2 Désengagement et reprise

Les deux derniers comportements indésirables décrits par les pilotes sont la décélération immédiate et la réactivité lente du système. Premièrement, le graphique 3.2 indique que lors du

relâchement de la pédale d'accélérateur, la poulie motrice se dirige vers sa position de repos (région A). Le problème réside dans la vitesse à laquelle le désengagement de la poulie est effectué. Dans l'algorithme 2022, le choix de conception pour le désengagement de la poulie motrice était suffisamment rapide pour réaliser un freinage brusque du véhicule sans caler le moteur. Cependant, cette vitesse est excessive pour des conditions de fonctionnement normales, telles que celle illustrée dans la figure 3.2, qui comprend deux virages serrés après une longue accélération. Ainsi, le ratio de la CVT diminue trop rapidement, forçant le véhicule à décélérer à une vitesse anormale. Un deuxième indicateur visuel montrant que la poulie motrice se désengage trop rapidement est le régime moteur dans la région B. Malgré le relâchement de l'accélérateur, le régime moteur s'emballe. Cela démontre que le moteur est privé de charge trop rapidement, au point de se retrouver sans charge alors que le véhicule est toujours en mouvement.

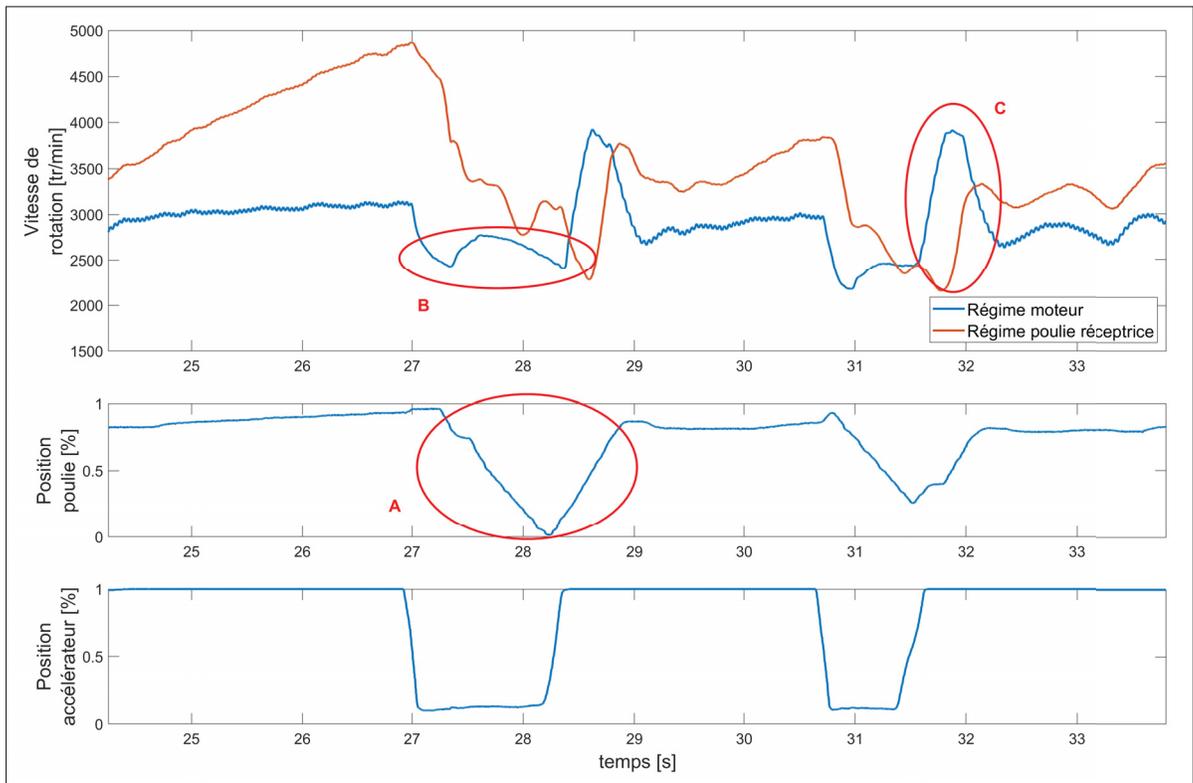


Figure 3.2 Désengagement et reprise de la EVT avec l'algorithme 2022

La reprise correspond à l'accélération du véhicule lorsqu'il est déjà en mouvement. Les performances de la reprise sont caractérisées par la capacité de la CVT à retourner vers sa cible dès l'appui sur l'accélérateur. La région C de la figure 3.2 indique que l'algorithme 2022 est peu performant en reprise. On observe ici un important dépassement du régime moteur avant son retour à la cible. Cette mauvaise performance en reprise est directement liée au désengagement rapide de la poulie. En premier lieu, la réactivité lente mentionnée par les pilotes est due au fait que les plateaux de la poulie motrice ne sont plus en contact avec la courroie, nécessitant ainsi un bref délai pour reprendre le jeu dans la courroie et restaurer la transmission de couple dans le système. Ensuite, le ratio de transmission est très bas au moment de la reprise. La vitesse maximale de déplacement de la poulie est limitée par le moteur électrique, équipé d'une boîte de réduction. Ainsi, il devient impossible pour le système d'effectuer le changement de ratio requis pour empêcher le régime moteur de subir un dépassement aussi important.

3.2 Étude de la CVT mécanique

Maintenant que nous avons identifié les problèmes de la version précédente de la EVT, une analyse d'une CVT mécanique sera réalisée afin de mieux comprendre le comportement d'une CVT fonctionnelle et d'en tirer des enseignements pour améliorer la EVT. Pour cette analyse, le prototype de 2022, équipé d'une CVT mécanique et propulsée par l'ancien moteur Briggs & Stratton, est utilisé. L'utilisation de l'ancien moteur est permise durant cette analyse, car l'objectif est de comprendre le comportement de la CVT et non de mesurer l'ensemble des performances du véhicule. Le système d'acquisition de données pour cette section est un contrôleur EVT. Malgré que le contrôle du BLDC n'est pas requis, ce dispositif est conçu pour lire les données nécessaires, soit le régime moteur, la vitesse de la poulie réceptrice et la position de l'accélérateur.

L'essai présenté dans la figure 3.3 consiste en un court parcours sur gravier et gazon, configuré pour permettre au véhicule d'effectuer une accélération, une reprise à haute vitesse et une reprise à basse vitesse. Ces trois manœuvres suffisent à caractériser le comportement de la CVT sur un terrain plat.

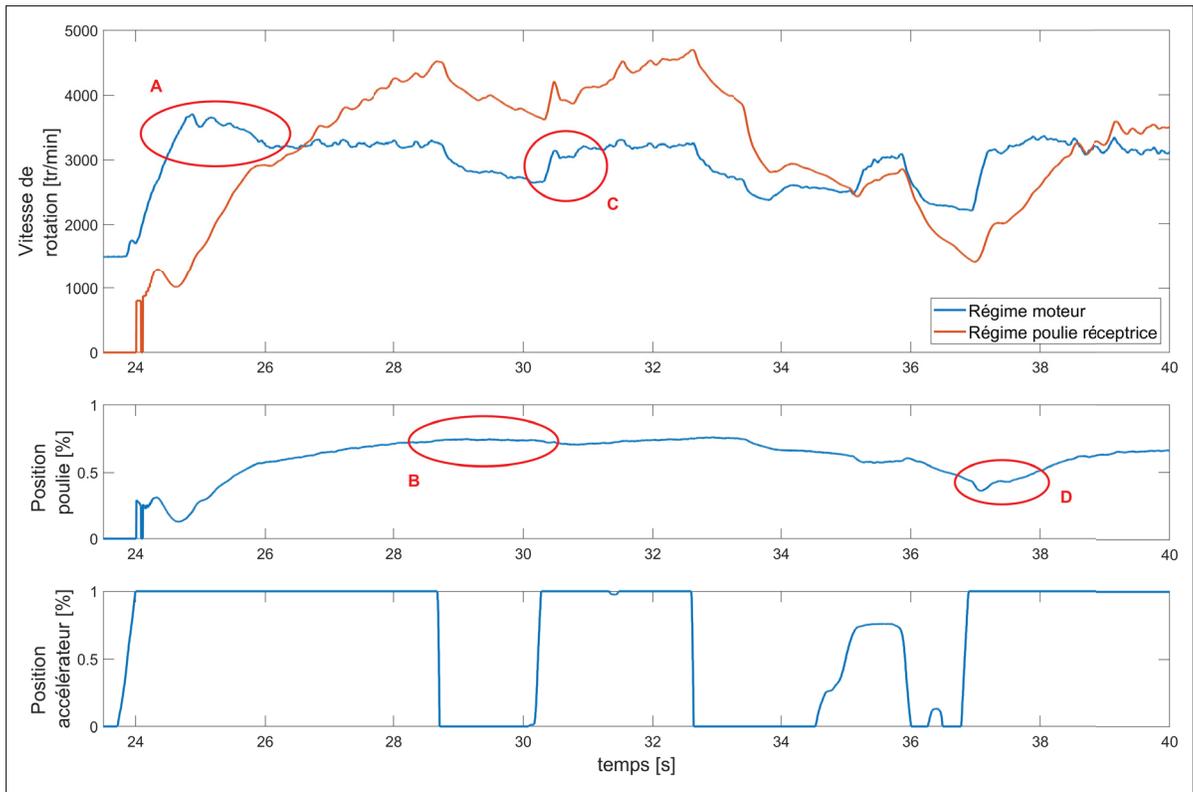


Figure 3.3 Comportement du prototype 2022 sur une piste

Le premier point à considérer est le dépassement du régime dans la région A. Cela correspond au même dépassement discuté dans la revue de littérature, causé par la friction statique lors du déplacement initial des masses. Suite à ce dépassement, le régime moteur se stabilise sur la cible et reste constant à 3 200 tr/min. Un autre aspect intéressant à observer est la position de la poulie pendant l'accélération. Étant impossible de placer un capteur de position sur la poulie motrice, sa position doit être estimée en utilisant le ratio entre la poulie motrice et la poulie réceptrice. L'objectif est d'avoir une estimation générale du déplacement de la poulie motrice, donc deux hypothèses doivent être posées. Tout d'abord, nous supposons qu'il n'y a pas de glissement dans le système pendant l'accélération. De plus, en connaissant seulement les ratios maximal et minimal de la CVT mécanique, nous devons présumer que la géométrie entre ces deux ratios est similaire à celle utilisée dans la EVT du Baja. En utilisant la formule géométrique des poulies, il est possible d'obtenir la position relative au ratio de la CVT. Le deuxième graphique de la

figure 3.3 représente la position de la poulie motrice. Cette donnée est pertinente, car elle nous informe sur la courbe de déplacement lors d'une accélération.

La région B représente la position de la poulie au moment où l'accélérateur est relâché. Pendant cette période, jusqu'au moment où l'accélérateur est à nouveau enfoncé, le régime moteur reste au-dessus du seuil d'engagement de la poulie. En d'autres termes, la force exercée par les masses est suffisante pour maintenir la poulie motrice à peu près à la même position, environ à 75 % dans ce cas précis. Si l'accélérateur avait été relâché pendant une durée plus longue, on aurait observé une chute plus marquée du régime moteur et de la position de la poulie afin de maintenir le régime moteur à un niveau raisonnable. Ainsi, lors d'un relâchement momentané de l'accélérateur, on constate que la poulie motrice reste quasiment à la même position dans un système mécanique.

La région C illustre une phase de reprise, caractérisée par le réengagement de l'accélérateur alors que le véhicule est déjà en mouvement. On observe que le régime moteur augmente vers la cible, mais présente un sous-dépassement. Ce sous-dépassement se produit lorsque la poulie est trop désengagée au moment de la reprise, résultant en une charge insuffisante sur le moteur et un régime qui dépasse temporairement la cible. Ce phénomène induit un léger retard dans la dynamique du groupe motopropulseur en raison d'un déplacement plus important de la poulie pour reprendre contact avec la courroie. À l'inverse, un léger sur-engagement de la CVT au moment de la reprise entraîne une chute temporaire du régime avant son retour vers la cible. C'est ce comportement qui est observé dans la région C, et il est préférable comparé à un dépassement significatif. Le sous-dépassement est favorisé, car la poulie maintient le contact avec la courroie, permettant ainsi une réaction rapide du véhicule. De plus, il est plus avantageux de subir une réduction momentanée de puissance plutôt que d'attendre un bref délai pour atteindre une puissance optimale.

Dans la dernière région (D) de la figure 3.3, une reprise à basse vitesse est observée. Ce qui diffère ici, c'est le comportement de la poulie. Le système à base de masses et de ressorts désengage la poulie pour faciliter le retour du régime moteur vers sa cible. Le point de départ du

régime juste avant cette reprise est de 2 200 tr/min, comparé à 2 650 tr/min lors de la première reprise (région C). Ce qu'il faut retenir, c'est que le système mécanique parvient à s'ajuster correctement malgré le point de départ du régime moteur au moment de la reprise.

L'étude de la CVT mécanique a été bénéfique pour la compréhension du système. Les trois éléments les plus importants à retenir sont les suivants :

- Le déplacement de la poulie motrice est crucial durant une accélération. Il devrait être graduel sans désengagement, tout en tentant de limiter le dépassement du régime moteur à l'embrayage.
- Lorsque l'accélérateur est relâché, la poulie motrice reste engagée.
- Une bonne reprise permet au véhicule d'être plus performant et réactif.

3.3 Cartographie du moteur à combustion

Le rôle principal de la CVT consiste à maintenir le régime de fonctionnement du moteur à combustion dans son intervalle de régime optimal. Ainsi, une connaissance complète du moteur est nécessaire. Le fabricant du moteur met à disposition un diagramme dynamométrique (accessible dans l'annexe I), mais ce diagramme présente uniquement le couple et la puissance à pleine ouverture du papillon des gaz. Cependant, à noter que Kohler n'a jamais précisé les conditions d'opération spécifiques au moment de produire les données de leur graphique. Des détails tels que la durée d'échauffement du moteur et les vitesses restent inconnus. Ces facteurs pourraient avoir une incidence sur les performances du moteur et la fiabilité des données fournies. Ainsi, pour garantir la validité de ces informations et obtenir une cartographie exhaustive, il est préférable de mener notre propre série d'essais dynamométriques.

Grâce à la collaboration de l'équipe Baja de l'ÉNA, des évaluations ont été réalisées sur le moteur du Baja ÉTS par le biais de leur dynamomètre. Le dispositif de dynamométrie employé prend la forme d'un frein à eau, consistant à appliquer une charge hydraulique à l'arbre moteur. Le boîtier du frein à eau est relié à une cellule de charge, créant ainsi un bras de levier. Ceci

autorise la mesure du couple moteur. La puissance est dérivée du produit du couple par la vitesse de rotation.

La charge imposée au moteur est réglée selon l'ouverture de la vanne d'admission d'eau du système. Du fait que cette vanne est manuelle, les séances de dynamométrie doivent être conduites suivant la procédure suivante. Tout d'abord, le papillon des gaz est totalement ouvert. Par conséquent, le régime moteur atteint naturellement 3 800 tr/min. Ensuite, une charge est progressivement appliquée jusqu'à ce que le régime moteur diminue de 100 tr/min. Le couple engendré par cette charge est enregistré dans un fichier tableur. Cette série d'opérations est répétée jusqu'à ce que la charge exercée par le frein à eau amène le moteur à atteindre sa limite. À partir de ce point, l'ouverture du papillon à gaz est réduite de 10 % pour mener des essais à travers l'ensemble de la gamme d'ouvertures du papillon. Cette démarche vise à développer une cartographie exhaustive des performances du moteur.



Figure 3.4 Panneau de contrôle du dynamomètre

La collecte de données s'est révélée influencée par la subjectivité de l'échantillonneur, principalement en raison de la configuration des instruments de mesure. Le panneau de contrôle, illustré à la figure 3.4, est équipé de cadrans analogiques. Ces cadrans, sujets à des fluctuations dues aux variations du régime moteur et des turbulences dans l'entrée d'eau, introduisent une incertitude

notable. Les mouvements de l'aiguille du cadran pouvaient atteindre 0,1, correspondant à une variation de 0,1 à 0,2 cheval-vapeur (HP) dans la mesure. L'équation fournie par le fabricant du dynamomètre permet de convertir la lecture du cadran en puissance HP (cette équation de conversion est représentée dans l'équation 3.1).

$$Puissance [HP] = LECTURE * \frac{tr/min}{1000} \quad (3.1)$$

La session de collecte de données a permis d'obtenir la puissance du moteur pour chaque palier de 10 % de l'accélérateur. Le graphique complet est disponible dans l'annexe I. Deux essais ont été effectués à la pleine ouverture du papillon, l'un au début des essais et l'autre à la fin. La différence réside dans la température du bloc moteur, avec une augmentation de 6°C entre les deux essais, passant de 60°C à 66°C pour être précise.

Malgré l'incertitude considérable de l'équipement d'essai, les résultats de la figure 3.5 indiquent que la plage cible du régime moteur se situe entre 3 000 et 3 200 tr/min. Les données obtenues sur le banc d'essai présentent une courbe de tendance similaire à celle produite par Kohler, suggérant que les différences pourraient être dues à l'incertitude du banc d'essai ou à la température du

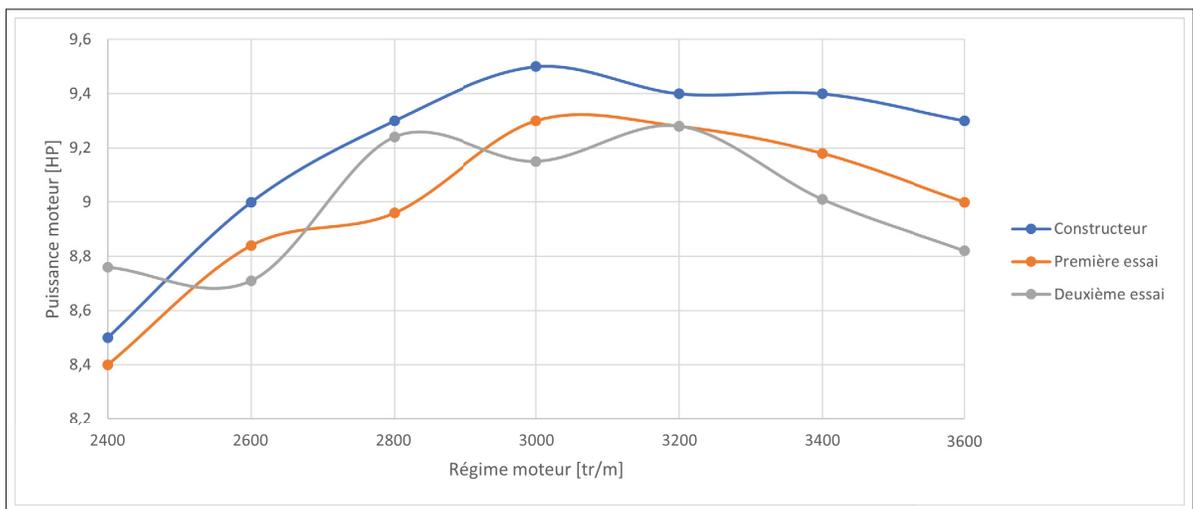


Figure 3.5 Cartographie dynamométrique du moteur Kohler

bloc moteur lors des essais. Il est également observé que les données du premier essai tendent à être supérieures à celles du deuxième, ce dernier présentant un bloc moteur à température plus élevée. Cela pourrait indiquer que les essais réalisés par Kohler ont été effectués sur un moteur à froid.

L'étude de la EVT permet de comprendre les raisons derrière les mauvaises performances de l'ancien algorithme. L'analyse de la CVT mécanique permet de saisir les comportements normaux attendus d'une CVT. Enfin, la cartographie fournit une compréhension des courbes de couple et de puissance du nouveau moteur. Le regroupement des travaux effectués dans ce chapitre facilitera le développement de l'algorithme de contrôle dans les prochains chapitres, offrant ainsi des performances adéquates de la EVT pour atteindre la puissance cible du moteur.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DES OPÉRATIONS DE CONTRÔLE ET DE TRAITEMENT DE DONNÉES

Afin de garantir la meilleure mise en œuvre du nouvel algorithme de contrôle, il est impératif de s'assurer de l'intégration optimale du code hôte ainsi que de l'intégration la plus efficace possible des signaux d'entrée. Ce chapitre procédera à une révision des sections de l'algorithme de contrôle 2022 de l'équipe Baja, tout en y ajoutant les éléments nécessaires pour améliorer l'asservissement.

4.1 Fréquence d'échantillonnage des tâches

Afin de déterminer les temps d'échantillonnage optimaux pour les boucles de contrôle et les signaux d'entrée, une analyse approfondie du moteur à combustion doit être entreprise. L'obtention d'un échantillon provenant du moteur nécessite l'application d'un échelon de consigne, suivi de l'observation de la réaction du système. Cependant, la nature du moteur impose certaines limitations, rendant impossible l'application d'un échelon instantané. Ainsi, une courte rampe de consigne doit être utilisée, étant donné que le pilote ne peut pas actionner la pédale de 0 % à 100 % de manière instantanée. La figure 4.1 présente un exemple de la réponse temporelle du moteur lors de cette identification.

La forme de la courbe de réponse du régime moteur est très similaire à celle d'une fonction de transfert d'ordre 1. Deux observations importantes peuvent être faites concernant cette fonction. Premièrement, il y a un retard entre la pleine ouverture du papillon des gaz et l'augmentation de la vitesse du moteur. Ce retard est causé par le temps nécessaire au déplacement de l'air lors de l'ouverture du papillon. Deuxièmement, le régulateur de vitesse entre en action lorsque la vitesse de coupure est atteinte. Cela entraîne un léger dépassement suivi d'une diminution de la vitesse, puis le régulateur ajuste finalement la vitesse à la valeur de coupure souhaitée. Malgré ces différences observées au début et à la fin de la courbe de réponse du régime moteur, sa dynamique présente des similitudes suffisantes avec celle d'un système de premier ordre.

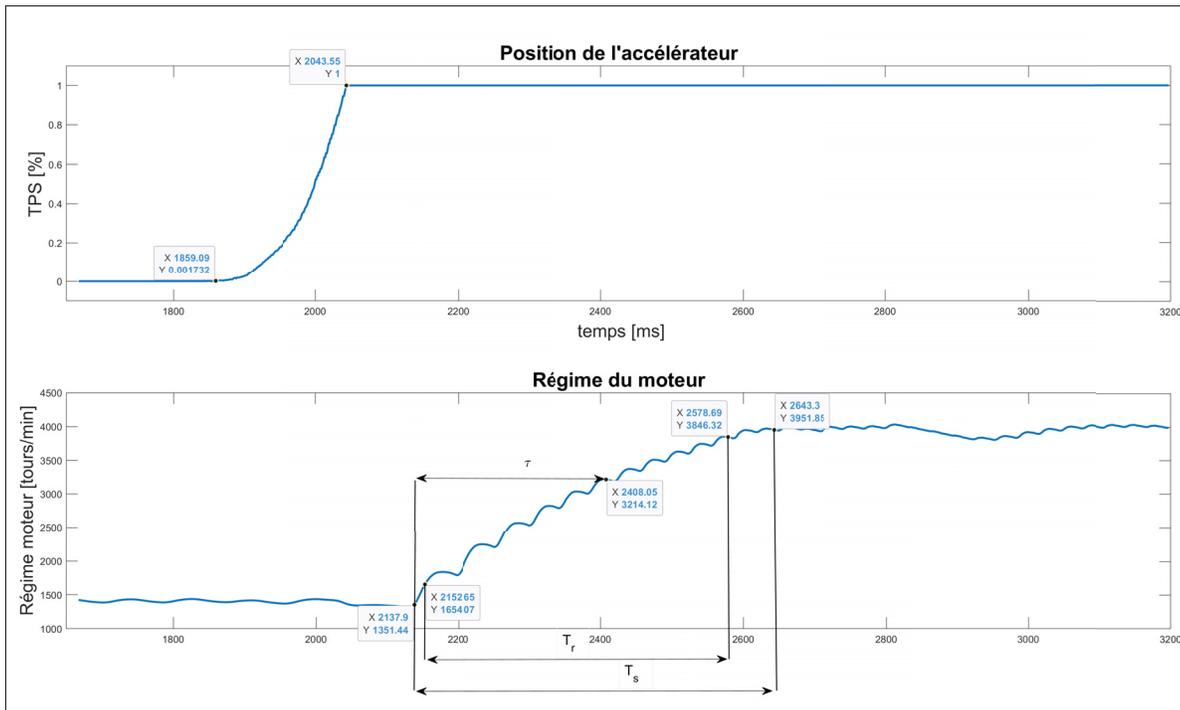


Figure 4.1 Identification des éléments temporels du moteur à combustion

Dans son ouvrage, Nise (2011, p.166) nous informe des trois caractéristiques temporelles permettant d'évaluer un système de premier ordre. Ces caractéristiques sont élaborées dans la description suivante :

- τ La constante de temps représente la période de temps nécessaire pour que le signal atteigne 63 % de sa valeur finale après l'application d'un échelon.
- T_r Le temps de montée est le temps requis pour que le signal passe de 10 % à 90 % de sa valeur finale après l'application d'un échelon.
- T_s Le temps de stabilité est la durée pour que le signal soit en dessous de 2 % de sa valeur finale après l'application d'un échelon.

La constante de temps du moteur joue un rôle crucial dans la détermination de la vitesse des boucles de contrôle et le temps d'échantillonnage des signaux qui en découlent. Selon Picard

(2007, p. 420), la fréquence d'échantillonnage devrait être 5 à 25 fois plus élevée que la fréquence la plus haute du système à réguler.

Alors avec une constante de temps d'environ 275 ms, obtenue à partir de la figure 4.1, et en suivant la recommandation de Pinard, la fréquence de la boucle d'asservissement du régime moteur devrait se situer entre 11 ms et 55 ms. Avant de sélectionner cette fréquence, il est essentiel de prendre en considération la boucle interne, dont l'objectif est de réguler la position du moteur électrique, tout en respectant la contrainte de fréquence d'échantillonnage. De plus, il existe des limitations au niveau de la librairie du système d'exploitation en temps réel. La configuration qui établit la fréquence d'échantillonnage d'une tâche ne peut pas être inférieure à 1 ms (Amos, 2020, p. 166). En pratique, le MCU est capable d'exécuter plus rapidement que 1 ms, cependant le système d'exploitation est configuré de telle manière que des temps de cycle du MCU sont utilisés pour exécuter la commutation des tâches du système. Ainsi, la sélection des fréquences est la suivante : la boucle externe fonctionnera à 20 ms et la boucle interne à 4 ms. Le tout respecte la recommandation de Pinard et celle de l'ouvrage de Guzzella et Onder (2010, p. 152) qui informent que les unités de contrôles électroniques devraient respecter les règles suivantes :

- 1 ms : tâches très rapides, traitement des signaux des capteurs, etc. ;
- 20 ms : échelle de temps normal pour les fonctions de contrôle ;
- 100 ms : fonctions lentes (adaptatives), effets de température, etc. ;

En ce qui concerne l'échantillonnage des signaux d'entrée, la fréquence du régime moteur dépend de sa vitesse. La fréquence la plus basse est atteinte lorsque le moteur tourne au ralenti à 1400 tr/min, avec une fréquence d'échantillonnage de 433 μ s, respectant ainsi suffisamment l'équation de Pinard. Cependant, les signaux analogiques de l'accélérateur et position de la poulie motrice doivent être échantillonnés plus rapidement, car ils sont utilisés dans la boucle interne.

Une troisième source pertinente (Wanhammar & Saramäki, 2020, p. 17) indique que la fréquence d'échantillonnage doit être de 8 à 10 fois supérieure à celle de la boucle de contrôle. Par conséquent, le choix de fréquence d'acquisition des convertisseurs analogique à numérique à $400 \mu s$ assurent de respecter les recommandations de la littérature.

4.2 Filtrage des signaux d'entrée

Les signaux d'entrée peuvent parfois présenter un niveau élevé de bruit dans un système embarqué, notamment lorsqu'ils sont générés par une carte électronique conçue par des étudiants. Dans de tels cas, il est avantageux d'appliquer des techniques de filtrage au sein du système embarqué afin de compenser les déficiences matérielles. Cette section examinera les exigences de filtrage pour les signaux numériques et analogiques, puis appliquera des filtres adaptés à chaque type de signal.

4.2.1 Filtrage du régime moteur

Le chapitre 3 a mis en lumière la nécessité d'appliquer un filtre numérique au régime moteur avant d'entamer le processus de régulation des données. Cette section détaille la méthodologie de conception du filtrage numérique mise en place. Dans un premier temps, des échantillons ont été générés pour mieux comprendre les besoins de filtrage et réaliser des simulations basées sur des données réelles. Ensuite, une revue de la littérature a été entreprise pour explorer les différents types de filtres et leurs applications numériques. Enfin, le filtre a été implémenté sur le moteur et soumis à une évaluation approfondie.

4.2.1.1 Obtention des échantillons

Le régime moteur est mesuré au moyen d'un capteur à effet Hall placé sur la roue dentée de l'arbre moteur à combustion. Son signal est connecté à une entrée numérique du MCU, associée au système d'interruption. Ainsi, chaque fois qu'un front montant est détecté, induit par le

passage d'une dent devant le capteur, une routine d'interruption est déclenchée dans le système embarqué.

Deux méthodes sont utilisées pour mesurer le régime moteur dans cette configuration matérielle lors de l'interruption. La première méthode mesure le temps écoulé entre chaque détection de dent. La seconde méthode compte le nombre de dents détectées dans un laps de temps fixe. Pour des variations importantes du régime moteur, la seconde méthode est intéressante, car elle maintient une période d'échantillonnage constante. Cependant, avec seulement 99 dents sur la roue et une plage de vitesse du moteur allant de 1 400 tr/min à 3 800 tr/min, cette méthode ne garantit pas une précision suffisante, surtout à bas régime. Par exemple, à 3 200 tr/min avec une fréquence d'échantillonnage de 5 ms, le calcul donne 26.4 dents. Arrondi à 26 (puisque les incréments sont unitaires), cela affiche 3 151,5 tr/min, induisant une erreur de 48 tr/min. En revanche, la première méthode offre une précision supérieure, car le compteur 16 bits s'incrémente à une vitesse de 42 MHz dans la configuration actuelle du microcontrôleur.

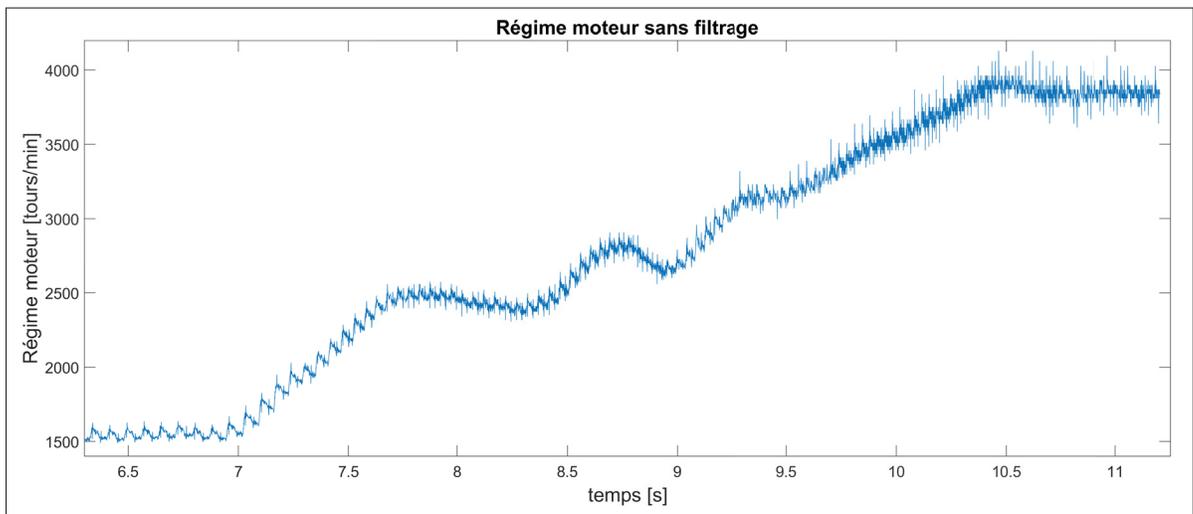


Figure 4.2 Données brutes du régime moteur en phase transitoire

Pour faciliter la conception du filtre de régime moteur, des échantillons de ce dernier ont été capturés à partir du moteur sans charge, couvrant différentes phases. L'un de ces échantillons est représenté dans la figure 4.2. Une première observation concerne la haute résolution de l'acquisition, rendue possible grâce aux 99 dents présentes sur la roue d'inertie. Ainsi, à chaque

révolution du vilebrequin, 99 points de mesure de vitesse sont générés. Cette résolution élevée permet d'observer l'intégralité du cycle d'accélération et décélération du piston. Cependant, en termes de régulation, une telle résolution n'est pas nécessaire. Le principal défi se trouve dans la différence d'amplitude d'environ 120 tours par minute, ce qui impacte la commande du moteur.

Une autre observation concerne le niveau de bruit, lequel augmente à mesure que les régimes moteurs s'élèvent, étant donné que la fréquence d'acquisition est proportionnelle au régime du moteur. Par conséquent, l'objectif est d'intégrer un filtre passe-bas afin d'éliminer le bruit à haute fréquence du signal, ainsi que les variations cycliques du moteur. Cette approche vise à maintenir une vitesse moyenne du moteur stable.

4.2.1.2 Filtrage numérique

L'implémentation du filtre passe-bas sera réalisée par le microcontrôleur en raison de la flexibilité des filtres numériques. Il existe deux catégories de filtres numériques : les filtres à réponse impulsionnelle infinie (IIR) et les filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR). Leur équation récurrente respective est présentée dans les équations 4.1 et 4.2. La principale différence entre les deux types réside dans le fait que le filtre IIR utilise des valeurs de sortie antérieures pour calculer la sortie actuelle, ce qui permet de contrôler les pôles de la fonction de transfert du filtre. Cependant, cette flexibilité supplémentaire induit une obligation additionnelle au concepteur, car il est essentiel de s'assurer que le filtre reste stable en tout temps, ce qui n'est pas un problème pour les filtres FIR. Ce dernier est également plus performant en raison du plus grand nombre d'opérations arithmétiques. Toutefois, cette amélioration des performances nécessite une puissance de calcul supplémentaire et plus d'espace en mémoire (Wanhammar & Saramäki, 2020, p. 243). Ainsi, le filtre IIR est plus approprié pour des applications sur microcontrôleur et les systèmes en temps réel. Une autre raison qui confirme le choix d'implémenter le filtre IIR est la possibilité de synthétiser un filtre analogique à partir du IIR (Wanhammar & Saramäki, 2020, p. 375).

Équation du filtre FIR :

$$y[n] = \sum_{k=0}^N (a_k x[n-k]) \quad (4.1)$$

Équation du filtre IIR :

$$y[n] = \sum_{k=0}^N (b_k x[n-k]) - \sum_{k=1}^M (a_k y[n-k]) \quad (4.2)$$

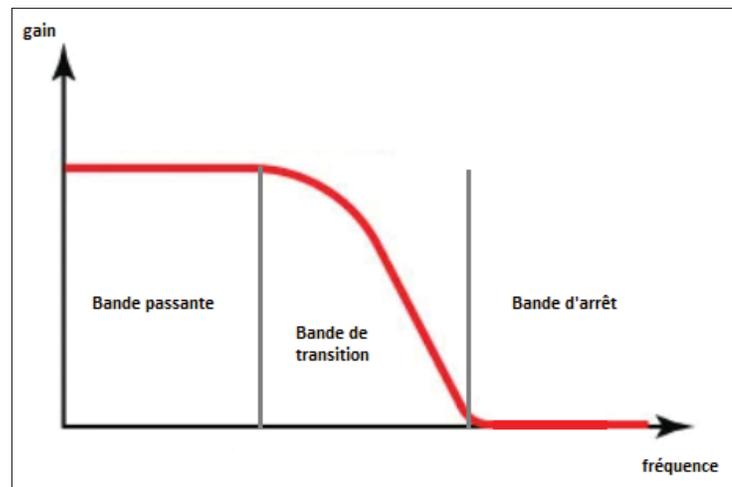


Figure 4.3 Bandes du filtre passe-bas
Adaptée de Muthukrishnan (2021)

Les filtres analogiques sont caractérisés par trois principales propriétés : le gain dans la bande passante, l'atténuation dans la bande de transition et le retard de groupe. On peut observer l'effet du gain dans les trois phases à la figure 4.3. Le gain dans la bande passante correspond à l'amplitude du signal en sortie du filtre par rapport à l'entrée dans la plage de fréquence qui est autorisée à passer. Une augmentation du gain dans la bande passante se traduira par un gain positif, tandis qu'une diminution se traduira par un gain négatif. L'atténuation dans la bande de transition représente la plage de fréquence où les fréquences indésirables sont graduellement atténuées.

Le retard de groupe quantifie le décalage temporel moyen entre le signal d'entrée et le signal de sortie du filtre. Lors de la conception d'un filtre, il est important de faire des compromis entre ces trois caractéristiques. Par exemple, un filtre avec un gain très élevé dans la bande passante peut entraîner des ondulations indésirables dans la bande de transition.

Les quatre filtres analogiques populaires sont le Butterworth, le Tchebychev, l'Elliptique et le Bessel. Chacun de ces filtres présente des propriétés distinctes en matière de gain, d'atténuation et de retard de groupe. La figure 4.4 résume de manière visuelle les réponses en fréquence de chaque filtre.

Butterworth Ce filtre offre une réponse stable dans la bande passante, ce qui signifie que le gain reste constant dans cette zone. Cependant, l'atténuation est loin d'être idéale dans la bande de transition. L'augmentation de l'ordre réduit la bande de transition, mais il demeure toujours moins performant que les autres filtres. Le retard de groupe reste relativement constant dans la bande passante. Lorsque l'ordre du filtre augmente, le retard augmente aussi près de la fréquence de coupure (Podder, Hasan, Islan & Sayeed, 2014, p.2).

Tchebychev Le filtre Tchebychev présente une meilleure atténuation dans la bande de transition. Il est alors plus efficace d'atténuer les fréquences non désirables au-delà de la fréquence de coupure. En revanche, le gain dans la bande passante présente des ondulations (Rorabaugh, 1992, p.81). Ces ondulations affectent l'amplitude du signal à la sortie du filtre. De plus, le retard de groupe du Tchebychev peut varier en fonction de la fréquence, ce qui provoque une distorsion du signal.

Elliptique Le filtre elliptique présente des caractéristiques comparables au filtre Tchebychev, mais avec une amélioration supplémentaire de l'atténuation dans la bande de transition. Cependant, cette amélioration vient au prix d'ondulations présentes à la fois dans la bande passante et dans la bande d'arrêt (Podder et al., 2014, p.2).

Bessel Le dernier filtre numérique est reconnu pour sa caractéristique en retard de groupe constant. Le retard de groupe reste stable jusqu'à la fréquence de coupure, assurant ainsi que le signal de sortie du filtre conserve un retard constant. Le filtre Bessel offre également

une réponse stable dans la bande passante, mais l'atténuation dans la bande transitoire est moins performante que celle du filtre Butterworth (Rorabaugh, 1992, p.99).

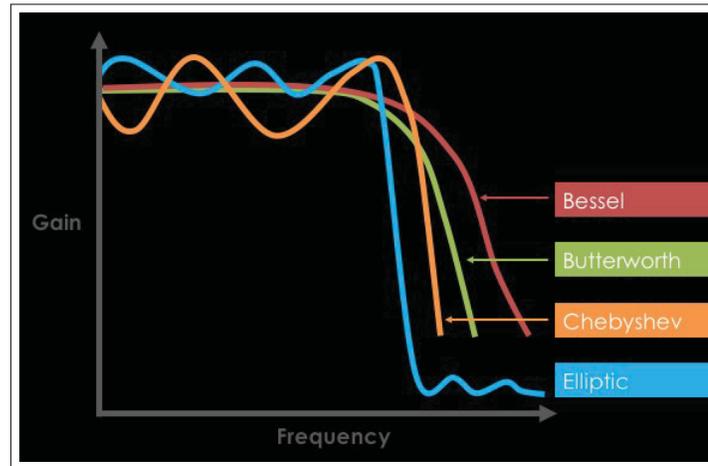


Figure 4.4 Réponse en fréquence de filtre passe-bas
Tirée de Bliley Technologies (2016)

4.2.1.3 Application du filtre numérique

L'obtention d'échantillonnage du régime moteur a permis le développement du filtre passe-bas dans Matlab. Différents essais ont été réalisés en utilisant les quatre filtres analogiques présentés. Celui qui a donné les meilleurs résultats dans Matlab était le filtre Butterworth. La fonction *butter* permet de calculer les coefficients du filtre en fonction de la fréquence de coupure (f_c), de la fréquence d'échantillonnage (f_s) et de l'ordre du filtre. Par la suite, les coefficients peuvent être appliqués au jeu de données à l'aide de la fonction *filter*, laquelle renvoie un signal filtré. Ces mêmes coefficients peuvent être utilisés dans l'équation du filtre IIR 4.2 sur le microcontrôleur.

Une série d'essais réalisés sur le moteur à combustion dans diverses conditions a permis de déterminer les paramètres de filtrage qui offrent le filtrage souhaité. Les paramètres en questions sont un filtre d'ordre 4, une fréquence de coupure de 15 Hz et une fréquence d'échantillonnage de 4200 Hz. La figure 4.5 présente le résultat du filtrage numérique du régime moteur. Dans la figure du haut, on superpose les données brutes avec le signal filtré. On observe que les variations de vitesse causées par l'accélération et décélération du piston ne sont plus présentes. Par conséquent,

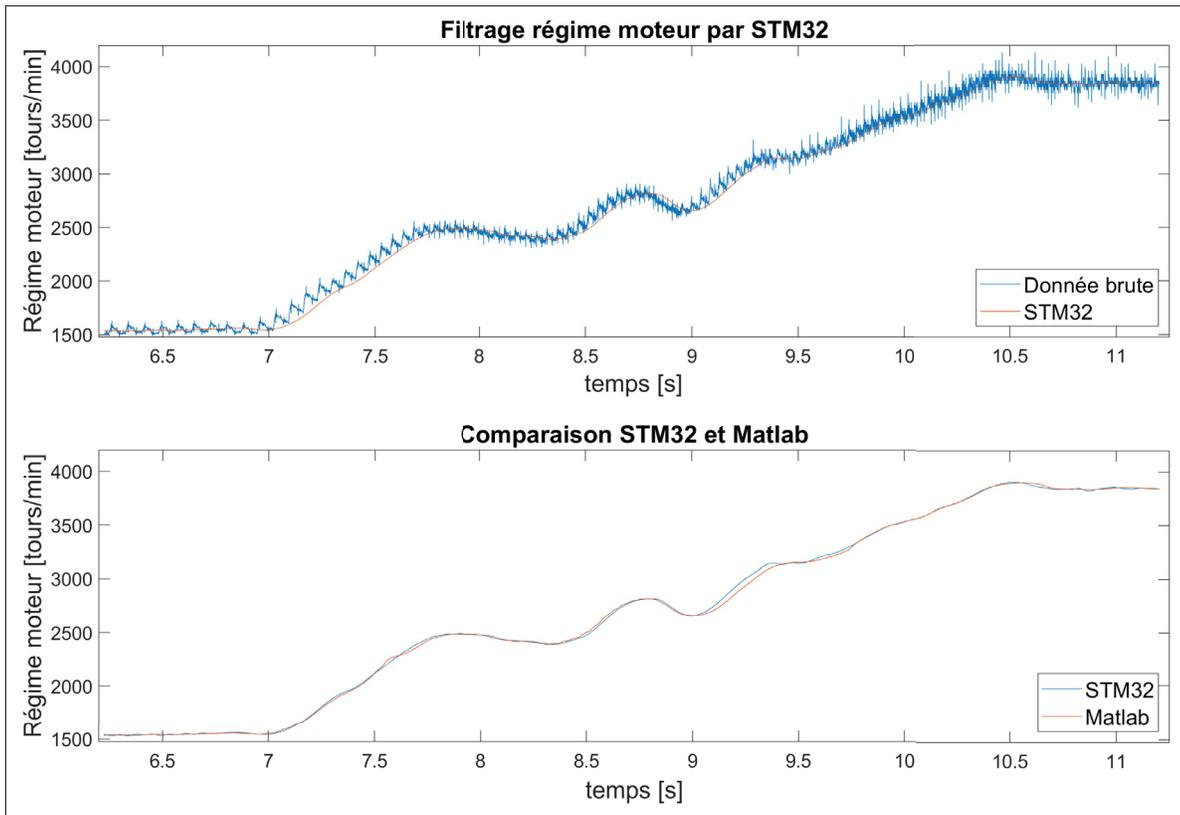


Figure 4.5 Résultat du filtre passe-bas

l'absence de bruit permet d'obtenir un signal de sortie de meilleure qualité pour le système de régulation. Dans le graphique du bas de la figure 4.5, on retrouve une comparaison entre le résultat réel du microcontrôleur et celui calculé par Matlab. La faible différence est insuffisante pour nécessiter une investigation plus profonde, considérant que le résultat du microcontrôleur répond aux besoins du projet. Cependant, une explication plausible de la différence pourrait être la puissance ou la précision du calcul entre le microcontrôleur 32 bits utilisant des nombres flottants et celle disponible dans Matlab.

En ce qui concerne la performance du filtre, on remarque que la tendance générale de la figure 4.5 est maintenue. La stabilité du filtre est confirmée à tous les régimes du moteur. Finalement, le retard dans le filtre est caractérisé entre 50 et 120 ms en fonction de la vitesse et de l'accélération du moteur.

4.2.2 Filtrage des signaux analogiques

Les signaux analogiques, tels que la position de la poulie primaire et la position de l'accélérateur, présentent généralement moins de bruit que les signaux numériques dans le cadre de ce projet. Cependant, afin de garantir l'intégrité du signal, un filtrage est mis en place. Un filtre de faible complexité, tel qu'un filtre moyennant, est considéré comme adéquat pour cette application. L'équation 4.3 utilisée pour le filtrage est tirée de l'ouvrage *Digital Filters Using Matlab* par Lars Wanhammar et Tapio Saramäki (p. 43).

$$y[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x(n-k) \quad (4.3)$$

L'équation du filtre moyennant a été appliquée de deux manières différentes dans le but d'obtenir le meilleur filtrage ADC. Tout d'abord, l'obtention des valeurs analogiques brutes se fait par un accès direct à la mémoire (DMA). Ce module permet d'acquérir rapidement les valeurs, sans l'intervention du MCU, à une vitesse précise de 937 ns par échantillon. Ensuite, une interruption est déclenchée tous les 800 μ s. Cette fréquence est choisie pour être cinq fois plus rapide que la boucle interne, qui utilise la position de la poulie toutes les 4 ms (Pinard, 2007, p.420).

La subtilité entre les deux méthodes réside ici : dans la première méthode, appelée filtre moyennant classique, la valeur brute est ajoutée à un tableau circulaire à chaque interruption (la nouvelle valeur remplace la plus ancienne). Lorsque la valeur ADC est requise par l'algorithme toutes les 4 ms, la somme du tableau circulaire est calculée et divisée par la taille du tableau. Ce calcul est réalisé en dehors de l'interruption pour réduire le temps de traitement. Dans la deuxième méthode, appelée filtre moyennant par fenêtre, le DMA est programmé en filtre circulaire d'une grandeur de 24 échantillons. Lors de l'interruption, le tableau du DMA est additionné, représentant ainsi la somme des valeurs brutes sur les dernières 22,5 ms (937 ns x 24 données dans le tableau du filtre).

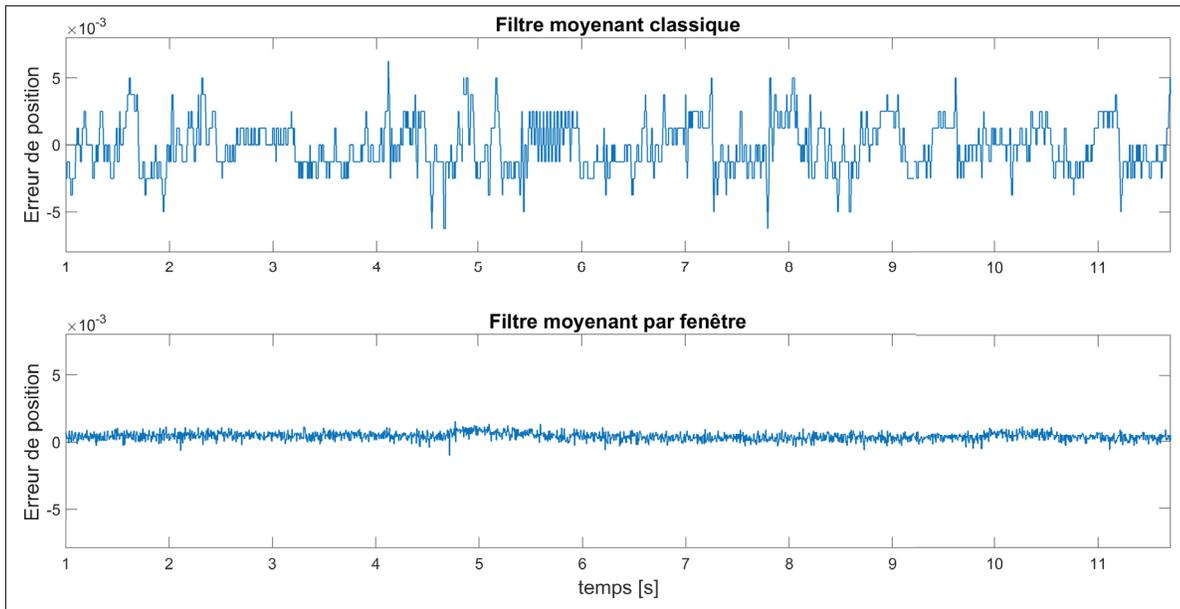


Figure 4.6 Comparaison de l'erreur entre les deux applications du filtre moyennant

Indépendamment de l'implémentation, la sortie du filtre, sous forme d'une valeur ADC, est mise à l'échelle pour représenter la position en pourcentage. Ce pourcentage est un nombre flottant compris entre 0 et 1.

Malgré les différences dans l'implémentation du filtre, les résultats obtenus après le filtrage sont significatifs. Sur la figure 4.6, l'erreur de position de la poulie motrice au repos est illustrée en utilisant les deux méthodes. La méthode par fenêtre présente une erreur inférieure à 0,0015, tout en demeurant stable. En revanche, la méthode classique est beaucoup plus instable, avec des oscillations d'erreur atteignant une amplitude de 0,01. Bien que cette différence puisse sembler mineure, lors de l'instauration de la régulation, le bruit supplémentaire induit par la méthode classique pourrait être amplifié, nuisant ainsi aux performances globales du système.

4.3 Écriture sur clé USB

L'obtention des résultats des filtres lorsque le véhicule est immobile s'avère relativement simple grâce à la liaison filaire établie entre le contrôleur et le programmeur ST-LINK. Cependant, cette méthode d'acquisition des données du système soulève des préoccupations en matière de

sécurité et de manipulation pour le matériel informatique lorsque le véhicule est en mouvement. Pour la lecture des signaux filtrés ainsi que de tous les autres signaux essentiels à la gestion de l'algorithme, nous optons pour un système d'acquisition plus conventionnel, spécifiquement conçu pour ce véhicule tout-terrain. Cette section détaille la démarche de conception visant à permettre le transfert des données du microcontrôleur vers un dispositif de stockage USB connecté sur le côté du contrôleur. Ceci facilite la visualisation et le post-traitement des signaux, que ce soit pour la calibration, la correction du système de commande ou le traitement des données.

La séquence débute lorsque la clé USB est détectée par le système. Suite à l'initialisation de la clé par le module USB On-The-Go (OTG), un message CAN (*Controller Area Network*) est envoyé au volant pour informer que l'initialisation de la clé est prête. Lorsque le pilote est prêt à effectuer son essai, il appuie sur un bouton pour démarrer l'écriture sur la clé. À la fin de chaque boucle de contrôle, dix données sélectionnées par l'utilisateur sont placées dans l'un des deux tampons. Les pourcentages sont multipliés, et des points-virgules sont placés entre chaque nombre pour faciliter la lecture lors du post-traitement. Lorsque le tampon est rempli avec 200 cycles de données, correspondants à une seconde de données, le tampon est envoyé par file d'attente à la tâche USB_Task. Les données doivent rester intactes pendant le transfert par file d'attente, c'est pourquoi deux tampons sont utilisés afin de ne pas interrompre le flux de données. USB_Task fonctionne à une fréquence de 4 Hz et vérifie en continu s'il y a un message dans la file d'attente. À la réception des données, la librairie FatFs est utilisée pour effectuer l'écriture sur la clé USB. La figure 4.7 montre un exemple de fichier texte (.txt) généré par le contrôleur.



```
P=0.000075 D=0.000015 F=0.025, . x +
File Edit View
rpm_moteur;rpm_moteur_T;rpm_mene;sheave1000;sheave_T1000;tpm1000;brake;launch
1488;4200;0000;0039;0040;0003;0000;0000
1489;4200;0000;0040;0040;0003;0000;0000
1489;4200;0000;0040;0040;0002;0000;0000
1489;4200;0000;0040;0040;0003;0000;0000
1489;4200;0000;0039;0040;0002;0000;0000
```

Figure 4.7 Exemple de fichier texte avec les données du véhicule

Le choix de transférer 200 cycles de données d'une tâche à l'autre est motivé par les contraintes de performances liées à l'utilisation du FatFs. Le processus de transfert des données vers la clé USB est coûteux en temps. Afin d'estimer la durée du transfert, des essais ont été réalisés en utilisant un oscilloscope. Un signal binaire est activé juste avant le début de l'écriture et désactivé à la fin, permettant ainsi de mesurer le temps d'écriture total. Le transfert a été évalué à 100, 200 et 300 cycles de message par écriture. Les temps d'écriture totaux étaient de 19,55 ms, 24,68 ms et 31,68 ms respectivement, confirmant ainsi le choix de transférer 200 cycles à la clé USB par transfert.

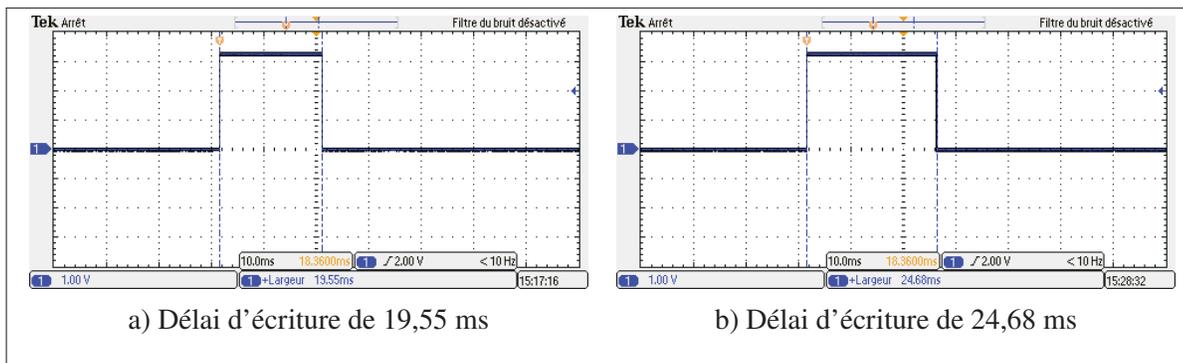


Figure 4.8 Délai d'écriture entre 100 et 200 cycles de données

4.4 Outil d'analyse de données

Dès que les données du véhicule sont récupérées par clé USB et transférées sur l'ordinateur de test, Matlab est utilisé pour effectuer l'analyse. Selon les besoins des essais, il est possible d'effectuer un post-traitement sur les données. Des exemples incluent le calcul du véritable rapport de transmission CVT (vitesse de la poulie motrice divisée par la vitesse de la poulie réceptrice) ou l'obtention de la vitesse des roues arrière à partir de la vitesse de la poulie réceptrice, du rapport de la boîte de réduction et la déroulante des roues arrière. La librairie privilégiée pour générer les graphiques est *Stackplot* car elle permet d'afficher plusieurs graphiques à échelles différentes sur une même fenêtre. De plus, les graphiques générés par cette librairie sont dynamiques, permettant à l'utilisateur d'agrandir le graphique et d'obtenir la valeur exacte des données en

plaçant son curseur au moment désiré. Tous les graphiques des données ont été produits par Matlab, et un exemple de script est disponible dans l'annexe II.

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DE LA COMMANDE NUMÉRIQUE DU RÉGIME MOTEUR

Maintenant que la plateforme du système embarqué est bien établie et les signaux méticuleusement filtrés, il est temps de se concentrer sur l'amélioration de la commande numérique. Ce chapitre se divise en deux sections principales. La première traite de la boucle interne du système, à savoir le contrôle du moteur électrique qui ajuste la position de la poulie motrice. La seconde section s'attache à la boucle externe, qui a pour rôle la régulation du régime du moteur à combustion. Ces améliorations constituent une étape essentielle vers l'optimisation de la performance et de la réactivité de l'ensemble du système de transmission.

5.1 Asservissement du moteur électrique

L'intégration d'un système d'asservissement pour le moteur électrique implique la prise en compte de trois aspects essentiels. La première consiste à comprendre en profondeur le système à contrôler. La deuxième étape englobe la sélection du compensateur approprié, tandis que la dernière étape se concentre sur la calibration du système de commande. Chacun de ces domaines sera étudié en détail dans cette section. À l'issue de celle-ci, une tâche du système d'exploitation en temps réel sera créée et calibrée afin de positionner la poulie motrice à n'importe quel emplacement souhaité avec une précision en régime permanent, tout en limitant les dépassements.

5.1.1 Contrôle du moteur électrique

Le contrôle du moteur électrique est réalisé par l'intermédiaire du contrôleur intégré DRV8343 de Texas Instruments. Ce dispositif requiert seulement trois signaux pour opérer le moteur. Ces signaux sont le PWM pour ajuster la vitesse du moteur, un bit pour définir la direction, ainsi qu'un autre bit pour enclencher le freinage, comme illustré à la figure 5.1.

Le système embarqué fait appel à une fonction maison pour fixer la vitesse du moteur électrique. Cette fonction accepte en paramètre la valeur du rapport de cycle, se situant dans la plage de

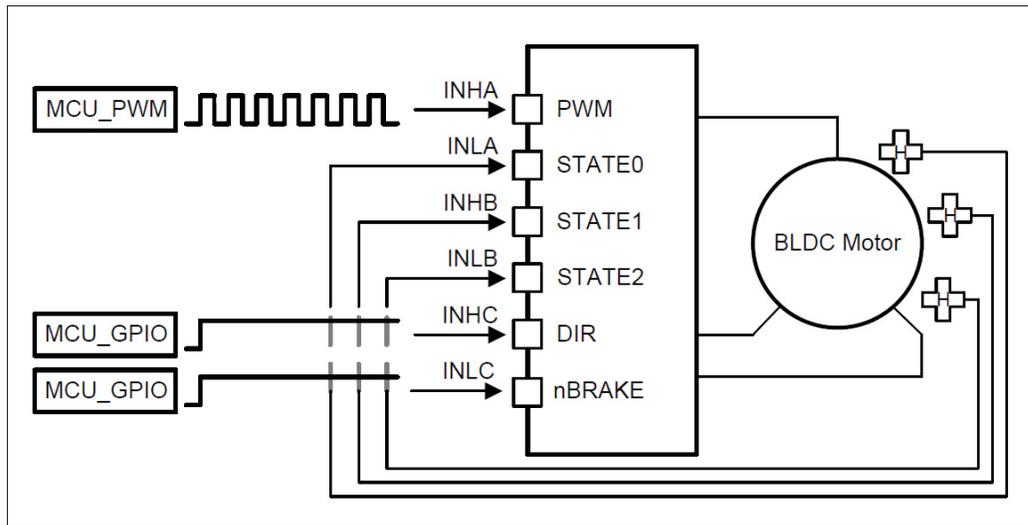


Figure 5.1 Opération du contrôleur de moteur électrique avec le DRV8343
Tirée de Texas Instruments (2018, p. 23)

-97 à 97. Cette plage s'explique par la configuration du PWM sur le compteur numéro 8. Pour respecter les exigences du contrôleur intégré, le PWM doit être configuré à une fréquence de 10 kHz (Texas Instruments, 2018, p. 71). Le compteur 8 est lié à l'horloge APB1 de 84 MHz, avec un prédiviseur réglé à 83 (84-1), et la période du compteur à 99 (100-1). Cette combinaison permet d'obtenir une fréquence 10 kHz ($84 \text{ MHz} / 84 / 100 = 10 \text{ kHz}$). Le rapport cyclique est déterminé par le ratio entre le « duty_cycle » et la période du compteur (100). Le choix de la valeur 97 découle de l'algorithme de 2022. Cet artéfact a été conservé car la documentation technique ne précise pas les conséquences d'un rapport cyclique de 100 %. Il serait probablement possible d'augmenter cette limite à 99 sans risque. Le signe du paramètre « duty_cycle » est utilisé pour ajuster la direction de rotation du moteur.

Bien que la commande de la vitesse du moteur électrique soit effectuée par l'intermédiaire du rapport cyclique sélectionné, la nécessité de positionner le plateau mobile à un endroit spécifique dans la plage de transmission exige une régulation de la position du moteur électrique. De plus, le capteur de rétroaction, à savoir le potentiomètre de position de la poulie mobile, permet la mise en place de la régulation en position. En définissant une position cible, en mesurant la position actuelle et en calculant l'erreur de position, il est impératif d'utiliser un compensateur

pour prendre en compte cette erreur de position et déterminer le gain approprié pour déplacer le moteur électrique de manière adéquate dans le but de réduire l'erreur. Le choix du compensateur sera abordé dans la section suivante.

5.1.2 Implémentation d'une boucle de rétroaction

Pour instaurer une boucle de rétroaction sur le moteur électrique, il est essentiel d'utiliser un compensateur pour parvenir à la consigne souhaitée, tel qu'illustré à la figure 5.2. Le choix du compensateur est dépendant de la nature du système et des critères de conception. Dans un souci de simplification, les non-linéarités de la courroie et du système mécanique sont négligées. Par conséquent, le moteur sous commande est considéré comme un système du premier ordre. De plus, étant donné que le moteur électrique est contrôlé en vitesse ($\dot{\theta}$) tandis que le potentiomètre informe sur la position (θ), un intégrateur physique est présent entre le moteur et la sortie. Cette caractéristique implique que le système contrôlé est de type 1.

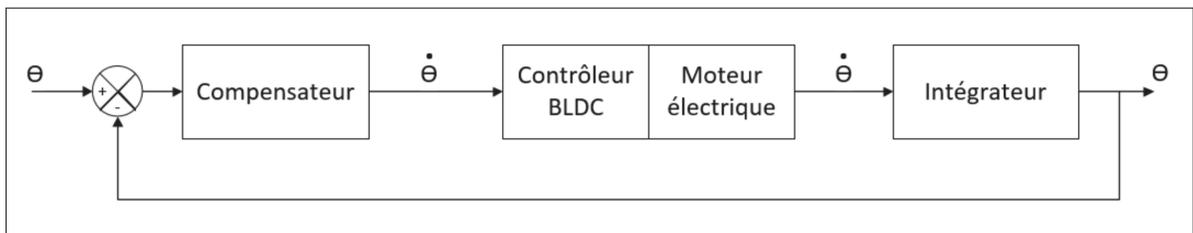


Figure 5.2 Schéma bloc du contrôle moteur en boucle fermée

La détermination du type de système revêt une importance significative, car l'erreur en régime permanent dépend du type de système et du type d'entrée. Le tableau 5.1 synthétise les erreurs possibles avec les entrées d'un échelon, rampe et parabole. Étant donné que le moteur électrique (sans compensateur) est de type 1, il est judicieux de noter que, pour éviter toute erreur, seules les consignes échelons doivent être utilisées. Toutefois, l'ajout d'un intégrateur au compensateur fait passer le système au type 2, ce qui autorise également l'utilisation de consignes en rampe sans affecter l'erreur en régime permanent.

Entrée	erreur type 0	erreur type 1	erreur type 2
Échelon	$\frac{1}{1+K_p}$	0	0
Rampe	∞	$\frac{1}{K_v}$	0
Parabole	∞	∞	$\frac{1}{K_a}$

Tableau 5.1 Relation entre l'entrée, le type de système et l'erreur statique
Adaptée de Nise (2011, p. 353)

Les constantes K_p , K_v et K_a sont les constantes de position, vitesse et accélération. Elles sont obtenues à partir des équations 5.1, 5.2 et 5.3. Dans ces équations, $G(s)$ représente la fonction de transfert du système de rétroaction unitaire. Dans notre cas, cela correspond à la fonction de transfert du moteur électrique combinée avec l'intégrateur physique.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow \infty} G(s) \quad (5.1) \quad K_v = \lim_{s \rightarrow \infty} sG(s) \quad (5.2) \quad K_a = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2G(s) \quad (5.3)$$

En absence de modèle mathématique précis du moteur électrique dans son environnement mécanique, l'objectif est d'estimer approximativement la forme du modèle. La caractérisation simplifiée du système permet, à l'aide d'outils comme le tableau 5.1, de mieux orienter le choix du compensateur.

Pour la conception de la boucle de rétroaction, les critères consistent à éviter les dépassements autant que possible, ainsi qu'obtenir une erreur nulle en régime permanent. Ces critères garantiront un contrôle précis et fiable de la position de la poulie motrice. La rapidité du moteur électrique n'est pas un critère décisif, car le système électrique est bien plus rapide que le système mécanique, et la précision du positionnement revêt davantage d'importance.

Avec une compréhension approfondie du système à contrôler, l'étape suivante consiste à concevoir le compensateur. La littérature est abondante en différents types de compensateurs, tels que les commandes classiques, modernes, prédictives et adaptatives. Étant donné que la commande de position du moteur électrique est une tâche relativement simple et que le modèle mathématique est absent, l'approche classique de commande s'avère la plus réaliste pour résoudre ce problème. Parmi les choix de compensateur classique, on retrouve le régulateur PID ainsi que ses variations

P, PI et PD, les régulateurs d'avance et retard de phase, et finalement le régulateur tout ou rien. Le PID est le régulateur de choix pour le contrôle de position pour les raisons suivantes :

- La longévité de ce régulateur assure une documentation exhaustive dans la littérature et sur le web,
- Le PID fait partie du curriculum des étudiants de l'ÉTS (client du projet),
- Le PID est le régulateur privilégié dans 95 % des applications de contrôle (Åström, 2002, p. 216). L'asservissement moteur est l'un des cas d'utilisation que le PID excelle.

Le PID est composé de trois éléments de régulation, chacun ayant son propre gain pour ajuster l'impact. Le terme proportionnel correspond simplement à l'erreur multipliée par son gain. Une augmentation du gain accroît la sortie du régulateur pour la même erreur, rendant ainsi le système plus réactif. L'intégrateur additionne l'erreur présente à l'erreur passée, créant ainsi un effet semblable à un accumulateur. Cette accumulation d'erreurs mineures permet à l'intégrateur d'avoir une plus grande influence sur le système au fil du temps. Enfin, le terme dérivé agit sur la pente de changement de l'erreur. Une pente élevée entraînera une plus grande sortie au niveau du terme dérivé et de son gain. Le tableau 5.2 illustre l'impact de chacun de ces éléments sur le système à contrôler.

Réponse en BF	Temps de montée	Dépassement	Temps de stabilisation	Erreur en régime permanent
K_p	diminution	augmentation	légère modification	diminution
K_i	diminution	augmentation	augmentation	diminution
K_d	légère modification	diminution	diminution	aucun changement

Tableau 5.2 Effet des gains sur le comportement d'un système de commande
Tirée de University of Michigan et al. (2021)

La fonction du compensateur PID utilisé est extraite de l'ouvrage de Phillips et Nagle (1995, p. 449). Cette fonction est représentée par l'équation 5.4.

$$D(z) = K_P + \frac{K_I T}{2} \left(\frac{z+1}{z-1} \right) + \frac{K_D}{T} \left(\frac{z-1}{z} \right) \quad (5.4)$$

En appliquant cette fonction dans la mise en équation, nous obtenons l'équation récurrente 5.5. La démonstration complète de cette équation est disponible à l'annexe II.

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_I T}{2} [e(k) + e(k-1)] + \frac{K_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (5.5)$$

Selon les concepts relatifs à l'erreur en régime permanent du système exposé dans le tableau 5.1, il est évident que le régulateur doit intégrer un élément d'intégration, car la boucle de contrôle externe appliquera soit un échelon soit une rampe comme consigne. Par conséquent, les régulateurs P et PD peuvent dès maintenant être exclus. Les essais effectués dans la section 5.1.4 évalueront la nécessité d'introduire un terme dérivé pour la position du moteur.

5.1.3 Algorithme anti-dépassement pour intégrateur

Lors de la mise en oeuvre de l'intégrateur dans un système où le changement de consigne est important, il est essentiel de l'accompagner d'un mécanisme de restriction de l'accumulation d'erreur, ce qui évite l'apparition d'oscillation indésirable ou d'instabilité. La figure 5.3 illustre un exemple typique de saturation de l'intégrateur. Les graphiques mettent en évidence les paramètres suivants : y pour la sortie du système, y_{sp} pour la consigne, u pour le signal de contrôle et I pour la contribution de l'intégrateur. Il faut un laps de temps considérable pour que la sortie y atteigne la stabilisé, en raison de l'accumulation substantielle dans l'intégrateur, ce qui oblige le système à surmonter cette accumulation.

Compte tenu de la caractéristique du comportement de la CVT ainsi que la nature généralement progressive de la consigne appliquée au moteur électrique, il n'est pas impératif que l'algorithme d'antisaturation de l'intégrateur soit excessivement complexe. L'algorithme de choix est le blocage dynamique (Salmony, 2020). Cette méthode requiert plusieurs paramètres, notamment les valeurs du terme proportionnel et du terme intégral, ainsi que les limites supérieures et inférieures définies pour le régulateur. Le seuil de l'intégrateur est ajusté en fonction du seuil du régulateur et de la valeur du terme proportionnel. De cette manière, l'intégrateur est autorisé à

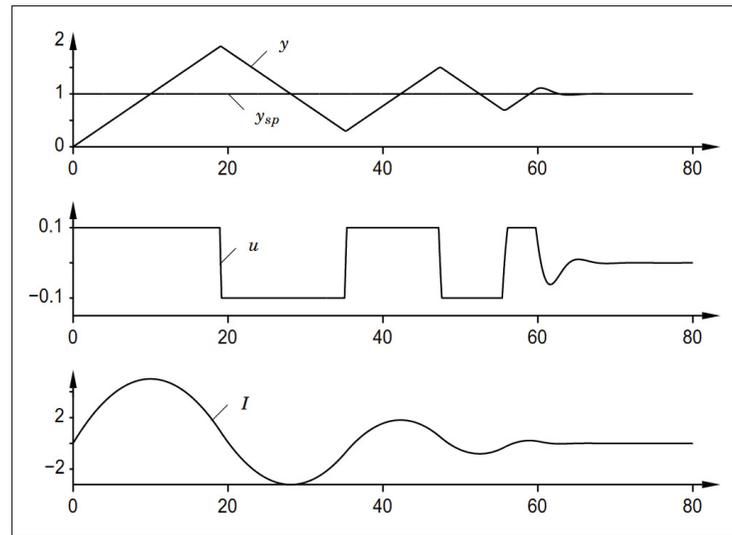


Figure 5.3 Exemple de saturation par intégrateur
Tirée de Åström (2002, p. 227)

contribuer uniquement dans la plage excédant celle du terme proportionnel. À chaque itération, le seuil de l'intégrateur est calculé selon la relation suivante : Seuil du régulateur - valeur du terme proportionnel. Ensuite, en cas de dépassement de la contribution de l'intégrateur par rapport au nouveau seuil défini, cette contribution est réduite à la valeur du seuil. L'algorithme exhaustif est exposé dans l'annexe II.

5.1.4 Embrayage séquentiel

La boucle de rétroaction du moteur électrique opère dans un environnement mécanique hautement spécifique et intrinsèquement complexe. Pendant le déplacement du véhicule, la CVT transmet un couple généré par le moteur aux roues. En conséquence, le moteur électrique doit travailler de manière continue pour maintenir un niveau optimal de couple à la poulie motrice. Cependant, il convient de noter qu'un véhicule fonctionnant sans chargement ne crée pas les mêmes conditions de fonctionnement pour le moteur électrique. Par conséquent, une méthode doit être instaurée pour réaliser la calibration de la boucle interne dans un environnement réel. Le mécanisme qui est mis en place est un système d'embrayage séquentiel.

La réalisation d'un embrayage séquentiel est possible en fixant un nombre de ratios d'incrémentations uniformes de la plage de transmission de la CVT. La commande qui effectue le changement du ratio provient du volant grâce au réseau de communication CAN du véhicule. Le système est configuré afin que le pilote puisse incrémenter la vitesse avec un bouton poussoir et effectuer une décrémentation avec un deuxième bouton. L'algorithme du volant a été modifié pour accommoder l'embrayage séquentiel et son interface graphique améliorée pour faciliter l'opération par l'utilisateur. Cette interface est illustrée à la figure 5.4.

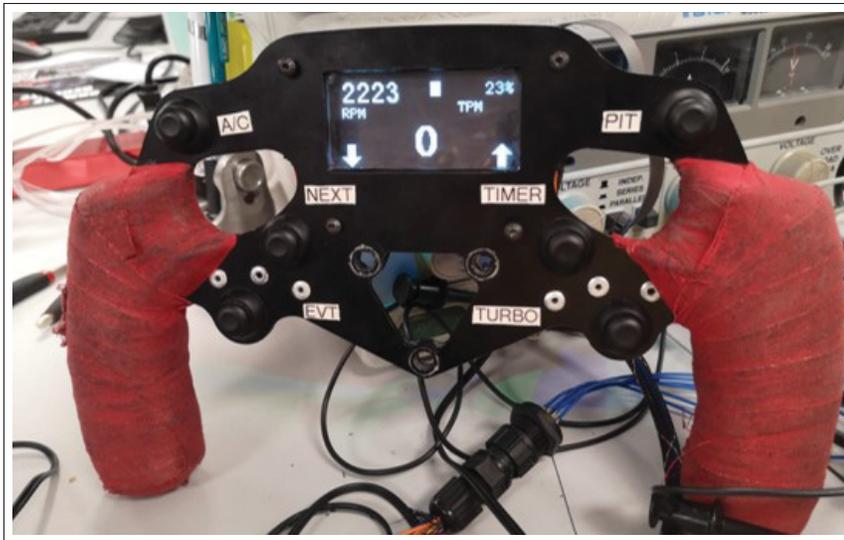


Figure 5.4 Interface du volant en mode d'embrayage séquentiel

Dans les séances de calibration réalisées dans le stationnement intérieur de l'ÉTS, le pilote doit effectuer manuellement les changements de vitesse lors des accélérations. Il est essentiel de respecter un délai entre chaque incrémentation pour permettre à la réponse du système de se stabiliser. L'utilisation de 8 vitesses fixes permet d'envoyer des commandes sous forme d'échelons au contrôleur. L'analyse des réponses en échelon en post-traitement permet d'ajuster les gains afin d'améliorer la réactivité du système. Cette démarche vise à obtenir un compensateur correctement calibré pour les conditions réelles du véhicule.

La méthodologie de calibrage de la boucle de rétroaction du moteur électrique suit les étapes suivantes : dans un premier temps, seul le gain proportionnel est utilisé, avec une valeur inférieure

au gain utilisé dans l'algorithme 2022. Des expérimentations sont menées jusqu'à ce que la sortie présente un dépassement. Ensuite, le gain de l'intégrateur est incrémenté pour réduire l'erreur en régime permanent. Si nécessaire, un ajustement fin du paramètre proportionnel est effectué pour parfaire le calibrage. La progression du calibrage du moteur est illustrée dans la figure 5.5.

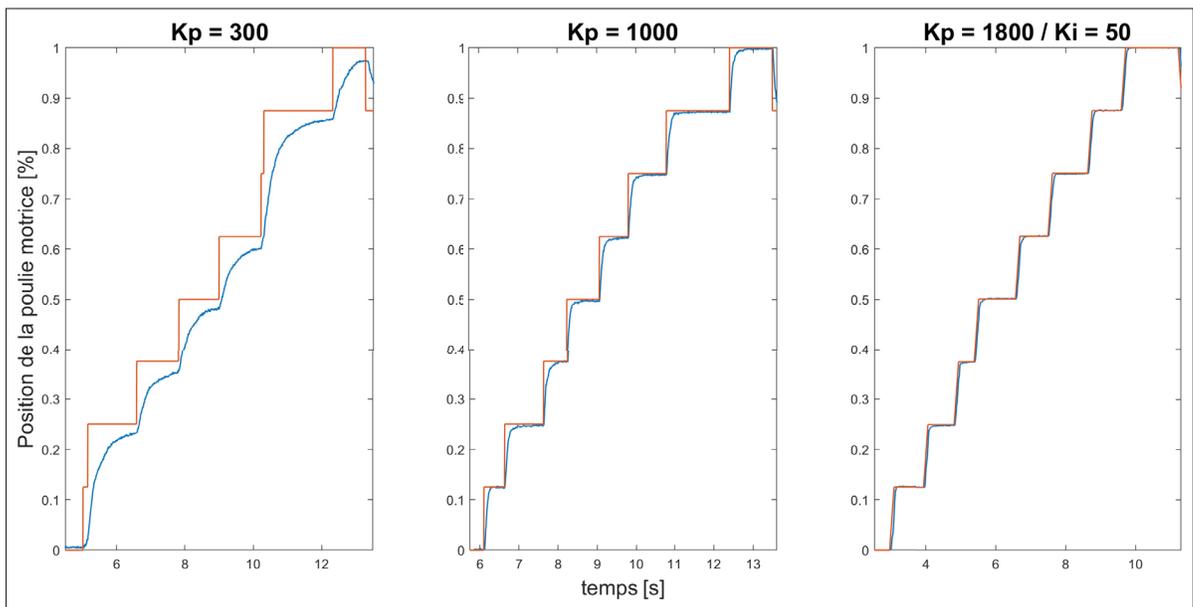


Figure 5.5 Évolution de la calibration de la boucle interne par embrayage manuel

La calibration du moteur électrique, effectuée uniquement avec les termes proportionnel et intégral, s'est avérée suffisante pour le contrôle en position. L'évolution présentée dans la figure 5.5 démontre l'amélioration grâce à l'intégration. Cela confirme les observations de Jacob dans son livre *Régulation PID en génie électrique*, lorsqu'il introduit la correction proportionnelle et intégrale : « le but de ce correcteur est d'annuler l'erreur de position due au couple de frottement sec tout en conservant les performances dynamiques du correcteur proportionnel » (Jacob, 2000, p. 75). Les critères de conception sont atteints grâce à la satisfaction des résultats obtenus par le calibrage du PI, ce qui élimine le besoin d'ajouter la composante dérivée.

Généralement, la configuration initiale du compensateur se fait à l'aide de méthodes classiques telles que celles de Ziegler et Nichols (Åström, 2002, p. 232), largement utilisées dans

l'enseignement de la régulation. Guzella et Onder (2010, p. 283) exposent également une méthode expérimentale pour ajuster le compensateur. Cette technique implique l'augmentation du gain proportionnel à un niveau provoquant des oscillations en sortie du compensateur. Cependant, cette instabilité est indésirable dans le contexte d'un système mécanique borné, surtout lorsqu'il s'agit d'un véhicule en mouvement.

Åström mentionne que « The tuning rules give ball park figures. Final tuning is then done by trial and error » (2002, p. 235). Ces observations sont également partagées par Ghooi et Hote (2018, p. 1), soulignant que même si différentes méthodes existent, l'essai et l'erreur restent parmi les approches les plus simples pour régler les régulateurs PI/PID. Par conséquent, les méthodes de Ziegler & Nichols et d'autres n'ont pas été utilisées, et les gains de l'ancien algorithme ont été pris comme point de départ pour la calibration.

5.2 Asservissement du moteur à combustion

Maintenant que la boucle de rétroaction sur la position de la poulie est implémentée et calibrée, il est temps de mettre en place la structure qui permettra d'envoyer la bonne position cible au premier système. Dans les sections suivantes, nous aborderons plusieurs développements clés du projet. Pour commencer, une machine d'état sera intégrée pour faciliter l'expansion de l'algorithme et maintenir sa lisibilité. Ensuite, le système de régulation du régime moteur sera mis à jour afin d'extraire de meilleures performances du moteur. Enfin, une seconde stratégie de commande sera développée pour contrôler la position de la poulie motrice lorsque la pédale d'accélération est relâchée.

5.2.1 Implémentation d'une machine d'état

La structure de la dernière version de l'algorithme était réalisée sous la forme de boucle « if » et « else if ». Cette méthodologie s'est révélée suffisante lors de la mise en oeuvre initiale de l'algorithme, lorsque celui-ci comportait peu de phases différentes. Cependant, avec le développement continu de l'algorithme, l'intégration de nouveaux états est devenue nécessaire.

Cette tâche est devenue complexe dans la structure précédente et, surtout, a rendu la lisibilité et la compréhension de l'algorithme difficile. Par conséquent, l'implémentation d'une machine d'état est devenue la prochaine étape pour optimiser le contrôle de l'algorithme.

La première étape de cette démarche a été la création d'une tâche distincte dans le système d'exploitation destinée à loger la machine d'état. L'établissement d'une tâche distincte, nommée *rpmControl*, a permis de séparer l'asservissement du régime moteur à celle du contrôle du moteur électrique. Cette séparation a également facilité la configuration de la fréquence d'échantillonnage, conformément aux conventions établies dans le chapitre 4. La structure adoptée pour la machine d'état repose sur un système utilisant trois variables : une pour l'état présent, une pour l'état futur et une pour l'état passé. De plus, deux fonctions distinctes sont mises en place, chacune utilisant un « switch case ». La première fonction (*ALGO_CheckState*) est chargée de vérifier les conditions permettant au système de passer à l'état suivant. La seconde fonction (*ALGO_stateMachine*) prend en charge l'exécution des tâches propres à l'état actuel. Enfin, la troisième variable, correspondant à l'état passé, est utilisée pour réaliser une sélection de gain dans l'asservissement du régime moteur, plus de détails à ce sujet seront exposés dans la section suivante.

L'implémentation d'une machine d'état s'avère être une approche efficace pour orchestrer les différents états d'un algorithme. Sa structure offre une souplesse inestimable en permettant l'intégration aisée de nouveaux états, tout en conférant un contrôle précis sur les transitions entre ces derniers. Chaque état, une fois atteint, se révèle visuellement accessible pour anticiper sa prochaine séquence, fondée sur les conditions préalablement établies. Cette visibilité représente un avantage majeur, facilitant la gestion des transitions et offrant une vision claire du parcours algorithmique à travers ses différents états.

La liste suivante détaille les états de la machine d'état, offrant ainsi un aperçu de chaque étape et de sa fonction au sein de l'algorithme. Cette énumération vise à faciliter la compréhension du fonctionnement global, en lien avec l'organigramme présenté à la figure 5.6. Quant aux autres,

issus de l'ancien algorithme, certains ont subi d'importantes améliorations afin d'accroître leur efficacité opérationnelle.

*MOTEUR AU RALENTI : Positionnement de la poulie motrice en mode de repos

MOTEUR ÉTEINT : Retour de la poulie à sa position initiale

*SLED_RAPIDE : Positionnement de la poulie pour une charge rapide

*SLED_LENT : Positionnement de la poulie pour une charge lente

SÉQUENCE DÉCOLLAGE : Ouverture de la poulie pour permettre au pilote d'augmenter le régime moteur et décoller avec plus de puissance

VITESSE DE MARCHÉ : Réglage de la poulie à des ratios stables pour déplacer le véhicule à basse vitesse

COURSE : Optimisation du ratio de la CVT pour maximiser les performances du moteur à combustion

*DÉSENGAGEMENT1 : Réduction de l'engagement de la poulie de 4 %

*DÉSENGAGEMENT2 : Réduction de l'engagement de la poulie basée sur la décélération du véhicule

*RATIO_BARRÉ : Réglage de la transmission CVT à un ratio bas et fixe

*ANTI-CALAGE MOTEUR : Protection en cas de chute drastique du régime moteur, en ouvrant la poulie pour éviter le calage du moteur

L'organigramme représenté à la figure 5.6 est une version simplifiée des opérations standards de l'algorithme. Certaines étapes et transitions ont été exclues pour alléger le schéma bloc et mettre en avant les éléments clés du processus. Les états exclus sont utilisés dans des cas très spécifiques, comme les modes de tirage rapide et lent. De plus, une fois que le système est en mode de tirage (rapide ou lent), l'algorithme y reste tant que le moteur à combustion est en marche. Le troisième état écarté de l'organigramme est le ratio barré. Cette fonctionnalité permettrait au pilote de bloquer la transmission CVT à un faible ratio lorsqu'il est bloqué dans un obstacle, transmettant ainsi plus de couple aux roues. L'objectif est de rendre cet atout accessible à tout moment par l'appui d'un bouton. Cependant, l'implémentation est incomplète du côté du volant pour envoyer la commande.

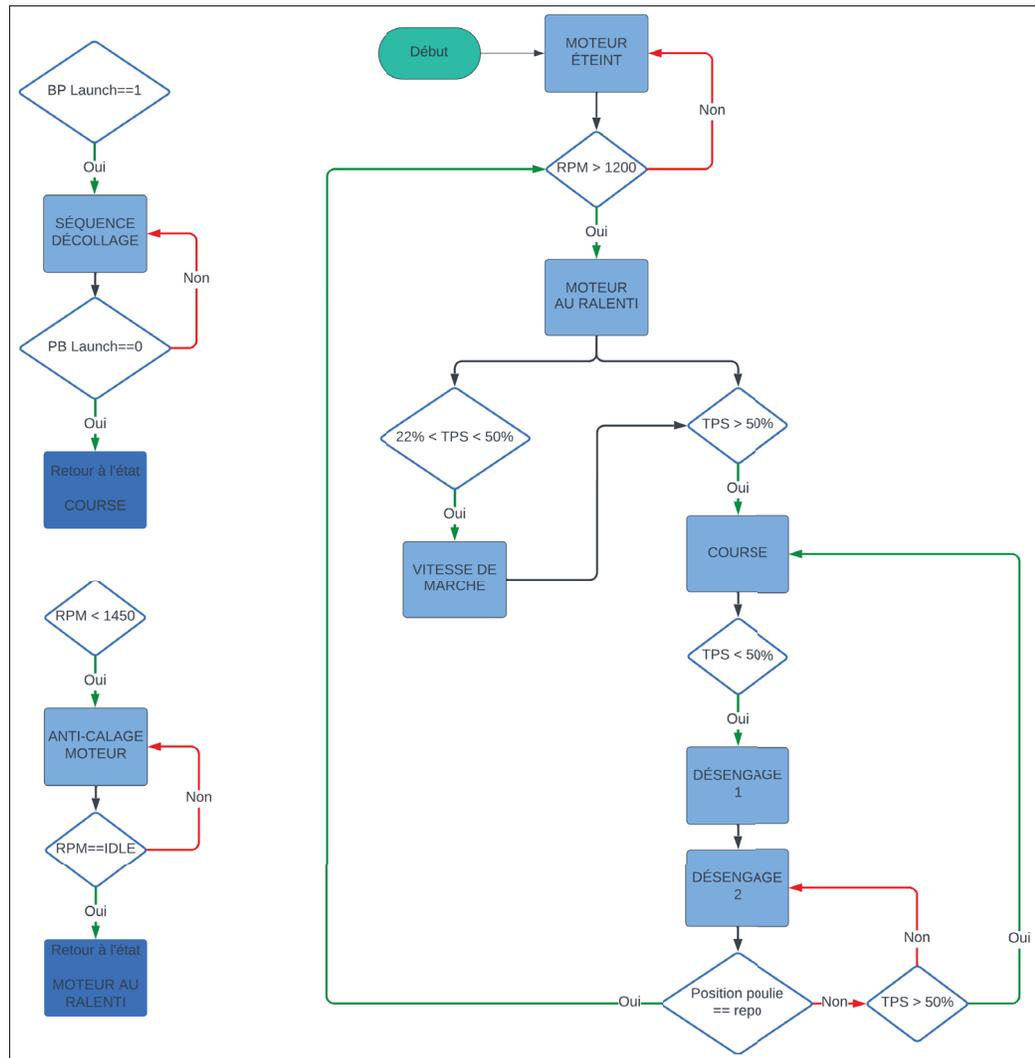


Figure 5.6 Schéma bloc simplifié de l'algorithme

Le comportement du véhicule dépend fortement de la position de l'accélérateur. En premier lieu, si le moteur à combustion n'est pas en marche, la poulie est positionnée au ratio minimum de la CVT, soit à 0 %. Lorsque le moteur est en marche, mais au ralenti, la poulie est placée à 3 % d'engagement, appelée la « position de repos ». La conception du système mécanique prévoit un jeu dans la courroie, autorisant environ 10 % de déplacement avant que la poulie n'entre en contact avec celle-ci. En outre, un déplacement supplémentaire de 3 % est requis pour éliminer le glissement entre la poulie et la courroie, ce qui est essentiel pour mettre le véhicule en mouvement. La position de repos est accrue pour tolérer des dépassements au niveau de la

limite inférieure, prévenant ainsi toute contrainte excessive sur les composants mécaniques en cas de dépassement accidentel. Lorsque le moteur est en marche et que la poulie est au repos, la position de l'accélérateur détermine l'état suivant, un mécanisme inchangé par rapport à la version 2022. Si l'accélérateur est inférieur au seuil de 22 %, la poulie reste au repos. Entre 22 % et 50 %, l'algorithme passe en « vitesse de marche ». Enfin, si l'accélérateur dépasse les 50 %, le véhicule se déplace en optimisant la puissance du moteur à combustion. Cependant, des améliorations ont été apportées au contenu de l'état « Course » pour obtenir de meilleures performances sur piste. La section 5.2.2 est dédiée à ce sujet.

Les derniers ajouts aux états incluent l'intégration de l'anti-calage et du mécanisme de désengagement. Le mécanisme de désengagement, essentiel à la régulation de la vitesse lors du relâchement de l'accélérateur, est une fonctionnalité nouvellement intégrée pour répondre à une problématique du projet, qui sera abordée en détail dans la section 5.2.3. D'autre part, l'anti-calage, aisément implémenté grâce à la machine d'état, a pour vocation d'ouvrir la poulie motrice si le régime moteur chute en dessous d'un seuil critique. Cette fonction s'est avérée cruciale lors des épreuves de suspension et de traction. En exemple, lors de la compétition en Oregon 2023, avant l'intégration de cette fonctionnalité, le moteur a calé lors de la première épreuve du *Rock Crawl* cause de l'arrêt soudain des roues arrière lors d'une descente abrupte, entraînant la perte d'un des essais de l'équipe de l'ÉTS.

Désormais, grâce à cette nouvelle fonction, le calage du moteur à combustion est évité, le système étant capable de détecter toute chute de régime et d'ajuster l'ouverture de la poulie motrice en conséquence. Pour étalonner cette fonction, les roues arrière du véhicule sont relevées de 2 pieds, puis le pilote accélère jusqu'à ce que la poulie soit engagée à 100 %. Il est important, en l'absence de charge, de ne pas appuyer complètement sur l'accélérateur, car la vitesse de la poulie réceptrice devient excessive et le véhicule entre en résonance. Ensuite, le véhicule est relâché au sol pour arrêter brusquement les roues, induisant une chute du régime moteur. La figure 5.7 illustre l'action du mode anti-calage. Dans le graphique, on observe une chute de vitesse des roues arrière de 41 km/h à 8 km/h, entraînant une baisse du régime moteur. Lorsque le régime moteur atteint 1 400 tr/min, la commande est envoyée pour ouvrir complètement la

poulie. À ce stade, le moteur électrique fonctionne à pleine vitesse pour stabiliser le régime moteur et éviter toute baisse supplémentaire. Une fois la poulie suffisamment désengagée, le régime moteur reprend sa vitesse normale, permettant au véhicule de continuer à avancer puisque le pilote n'a pas retiré son pied de l'accélérateur. Dans l'annexe III, une seconde instance de l'anti-calage est présentée, cette fois-ci le pilote retire son pied de l'accélérateur. Il est important de noter que ce type de test impose une contrainte supplémentaire sur le système mécanique. Bien que le moteur ne cale pas lors du test de chute, il représente les conditions de chargement les plus extrêmes qui, s'ils sont répétés trop fréquemment, pourraient endommager le véhicule.

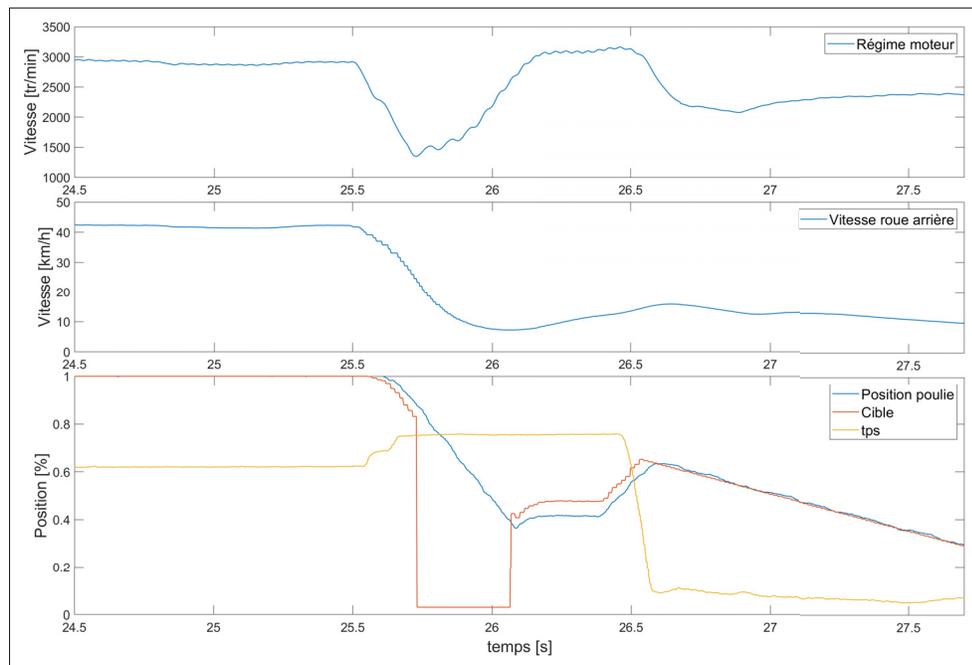


Figure 5.7 Activation de l'état anti-calage

5.2.2 Stratégie de commande pour l'embrayage de la poulie motrice

Lorsque l'accélérateur est complètement enfoncé, le principal objectif du système de commande est de déplacer la poulie motrice pour maintenir le régime moteur sur sa cible. L'analyse du prototype Baja équipé d'une CVT mécanique a fourni des observations cruciales concernant le déplacement de la poulie tout en maintenant le régime moteur sur sa cible. Ces observations sont directement pertinentes pour le développement de l'embrayage pour la EVT.

Pour contrôler le déplacement de la poulie de manière à maintenir le régime moteur dans sa plage de puissance optimale, deux techniques de commande sont implémentées. La première consiste à suivre une trajectoire. Bien que cette méthode ait été utilisée dans l'algorithme 2022, son implémentation était obscure et ne visait pas à maintenir le régime moteur sur la cible. Par conséquent, une nouvelle approche était nécessaire. Ensuite, une seconde forme de régulation classique est nécessaire pour apporter des correctifs imposés par l'environnement du véhicule.

5.2.2.1 Suivi de trajectoire

Dans le cadre de la commande de systèmes, la trajectoire désigne la séquence prédéterminée de positions ou de mouvements qu'un élément d'un système doit suivre. Contrairement aux entrées typiques comme l'échelon, la rampe ou la parabole, la trajectoire peut adopter n'importe quelle forme mathématique, visant à réaliser un déplacement d'un point A à un point B. Il est donc impératif que le système de commande puisse suivre cette trajectoire pour répondre aux exigences spécifiques du système.

Le suivi de trajectoire fonctionne comme un type de compensateur anticipatif. Dans un monde idéal, si une fonction de transfert précise du système à commander était disponible, son inverse pourrait être utilisé à cette fin. Cependant, en l'absence d'un modèle mathématique défini, il est nécessaire d'approximer et d'ajuster la trajectoire sur le terrain. L'importance de suivre une trajectoire spécifique a été clairement établie dans l'analyse du chapitre 3, où il a été observé que la forme géométrique du déplacement de la poulie motrice pouvait être reproduite par une équation mathématique.

Il existe deux méthodes pour intégrer la trajectoire : basée sur le temps ou basée sur une position. Dans cette application, une trajectoire basée sur la position de la poulie facilite l'intégration, car la trajectoire peut ne pas toujours commencer à partir de la position de repos. Ainsi, une trajectoire basée sur la position actuelle de la poulie permet une meilleure adaptabilité. Cela se traduit par une forme de trajectoire qui agit comme un accumulateur, indépendamment de la position de départ de la poulie. L'ancienne trajectoire suivait l'équation 5.6.

$$cible_poulie = position_poulie + TPS * K_{FF} * (1 - position_poulie) \quad (5.6)$$

Cette équation permet de reprendre la trajectoire indépendamment de la position de la poulie. Le terme TPS est intégré dans l'équation pour tenir compte de la variation de la cible du régime moteur selon la position de l'accélérateur, réduisant ainsi l'impact de la trajectoire à différentes positions de l'accélérateur. Ensuite, le gain K_{FF} est ajusté pour caractériser la trajectoire. Cependant, des sessions de calibration ont révélé que cette forme de trajectoire ne maintenait pas toujours le régime moteur à sa cible, indépendamment de la valeur du gain K_{FF} sélectionné.

Une nouvelle forme d'équation était nécessaire pour recentrer la trajectoire. Deux autres types d'équations ont été testés : la fonction exponentielle (5.7) et la fonction quadratique (5.8). Ces équations offrent une meilleure paramétrisation grâce à l'ajout de gains supplémentaires et la nature de l'équation.

$$cible_poulie = position_poulie + TPS * K_{FF1} - K_{FF2} * e^{(K_{FF3}/position_poulie)} \quad (5.7)$$

$$cible_poulie = position_poulie + TPS * K_{FF1} * (position_poulie - K_{FF2})^2 \quad (5.8)$$

Un tableau Excel a été développé pour simuler la forme de la trajectoire, permettant de visualiser l'effet de modifications des gains avant toute mise à jour dans l'algorithme. Ce tableau s'avère être un outil précieux lors des séances de calibration. Par exemple, en observant les données d'une accélération, si l'on constate que le régime moteur chute trop brusquement pendant l'engagement initial de la poulie, il est possible de modifier la trajectoire dans le tableau pour que la poulie soit moins agressive au début. La figure 5.8 présente l'ancienne trajectoire avec les deux nouvelles formes de trajectoire. Cependant, il est impossible de déterminer à l'avance quelle sera la meilleure trajectoire avec ces gains. Seules les sessions de calibration permettront de déterminer la forme optimale par la méthode d'essai et erreur.

Il est important de noter que la calibration initiale de la trajectoire doit être réalisée dans un environnement contrôlé, idéalement une surface pavé pour avoir le meilleur coefficient de friction avec le sol et maintenir les quatres roues du véhicule sur le sol en tout temps.

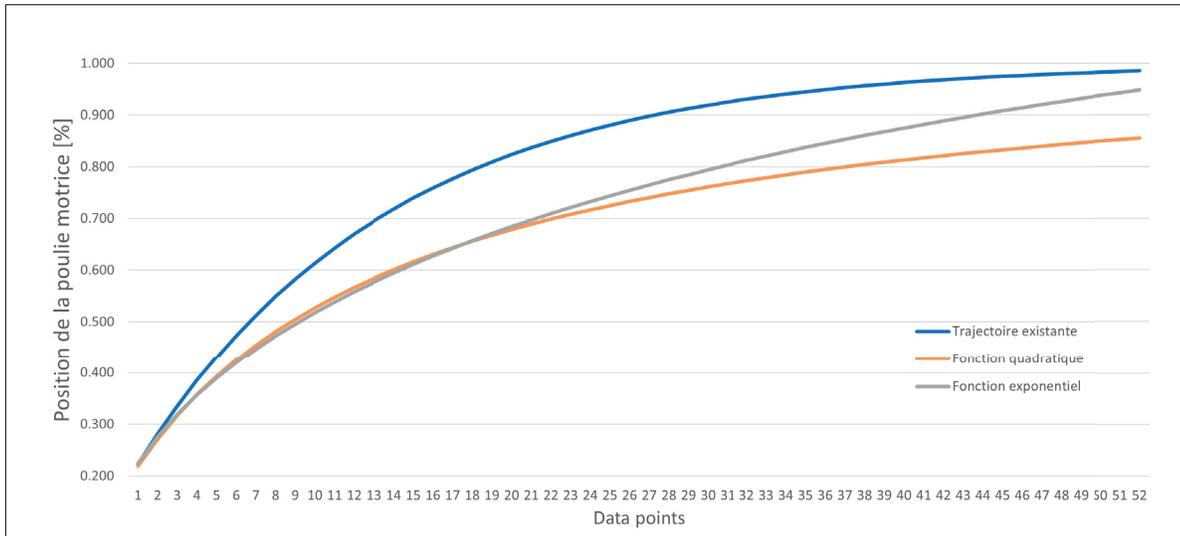


Figure 5.8 Différentes équations mathématiques pour la trajectoire

5.2.2.2 Compensateur PID

Le suivi de trajectoire seul n'est pas suffisant pour l'embrayage. L'environnement auquel le baja est confronté comprend plusieurs perturbations, tels que les changements de terrain, le niveau d'inclinaison et les obstacles. Par conséquent, un compensateur de type PID est utilisé pour aider à maintenir la trajectoire malgré ces perturbations.

Le rôle de ce compensateur n'est pas de maintenir parfaitement le régime moteur sur la cible en tout temps pendant l'accélération. Cela ne serait pas réaliste dans le contexte du Baja, dû aux multiples perturbations, et la nature du moteur à combustion. Une certaine marge est permise pour prendre en compte certaines situations, telles que les sauts ou les glissements des roues. Pour gérer ces variations, du *Gain Scheduling* est instauré. Les gains proportionnels sont ajustés pour une réaction différente en fonction des erreurs positives et négatives. Donc dans un cas de glissement temporaire des roues qui entraîne une augmentation du régime moteur, l'effet de

l'erreur positif combiné avec un faible gain proportionnel affectera peu la position de la poulie. Cependant, dans une montée de côte, lorsque le régime moteur commence à chuter en raison de l'inclinaison, l'erreur négative combinée à un gain proportionnel approprié va permettre à la poulie de réduire son ratio et maintenir le régime sur la cible pendant la montée de côte. Un second paramètre de *Gain Scheduling* est mis en place pour l'ajustement du gain proportionnel lors de la reprise. En exploitant les variables d'état antérieures, il est possible de moduler le gain du compensateur, afin d'avoir des valeurs différentes pour la reprise et pour la phase de conduite normale.

Ensuite, l'intégrateur est ajouté pour éliminer les erreurs en régime permanent. Cependant, s'il est activé trop rapidement, l'erreur initiale devient trop importante, ce qui ne peut être corrigé qu'en accumulant une erreur dans le sens opposé. Un exemple de ce phénomène est présenté à la figure 5.9.

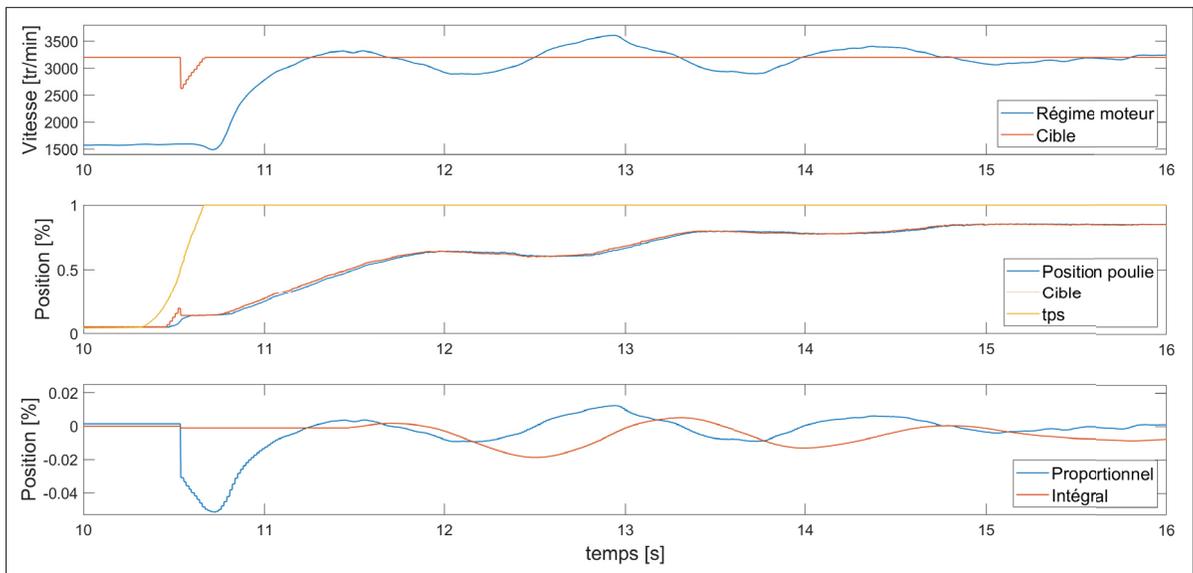


Figure 5.9 Exemple d'une oscillation causée par l'intégrateur

5.2.3 Stratégie de commande pour le désengagement de la poulie motrice

Une des problématiques majeures de l'algorithme 2022 était l'absence de contrôle sur la poulie lorsque l'accélérateur était relâché. Comme illustré dans la figure 3.2, la poulie s'ouvrait

complètement, provoquant un arrêt brusque du véhicule et introduisant un délai dans la reprise de l'accélération. Pour pallier à ce problème, un nouvel état a été conçu pour apporter un niveau de contrôle au désengagement de la poulie motrice.

Le but du désengagement, lors du relâchement de l'accélérateur, est de maintenir la poulie motrice proche de la courroie sans caler le moteur. Cette proximité permet de maintenir la vitesse du véhicule et rend le véhicule plus réactif au moment de la reprise. Le système à implémenter doit être suffisamment dynamique pour ouvrir rapidement la poulie lors de freinages brusques, mais moins agressifs lors du désengagement à haute vitesse pour offrir une conduite plus confortable.

Lorsque l'accélérateur est relâché, un phénomène inattendu se produit avec la commande de la poulie, résultant d'un effet secondaire lié à la pente du signal TPS. Selon l'algorithme, tant que le signal TPS dépasse 50 %, l'état demeure en mode « Course ». Cependant, la cible du régime moteur est plus élevée à 100 % TPS qu'à 50 %. Comme illustré dans la figure 5.10, le signal TPS ne peut physiquement passer de 100 % à 0 %, créant ainsi une pente progressive. Au moment où cette transition se produit, la cible du régime moteur diminue (flèche #1), ce qui entraîne l'engagement plus prononcé de la poulie (flèche #2) afin de réduire le régime moteur. Ce phénomène d'engagement de la poulie n'est pas une fonctionnalité prévue par l'algorithme et est donc qualifié d'engagement involontaire.

La séquence de désengagement se déroule en deux phases. La première vise à compenser l'engagement involontaire en désengageant la poulie de 4 % (flèche #3 de la figure 5.10). La deuxième phase vise à rendre le désengagement de la poulie proportionnel à la décélération du véhicule. Le véhicule est équipé d'un capteur de pression sur le maître-cylindre du système de freinage. Cependant, ce signal est binaire. C'est la vitesse de la poulie réceptrice qui rend cette fonctionnalité possible, car elle est directement liée aux roues arrière via la boîte de vitesses. De plus, lors de la décélération du véhicule, les roues ne glissent pas, permettant ainsi une représentation fiable de la décélération via le capteur sur la poulie réceptrice.

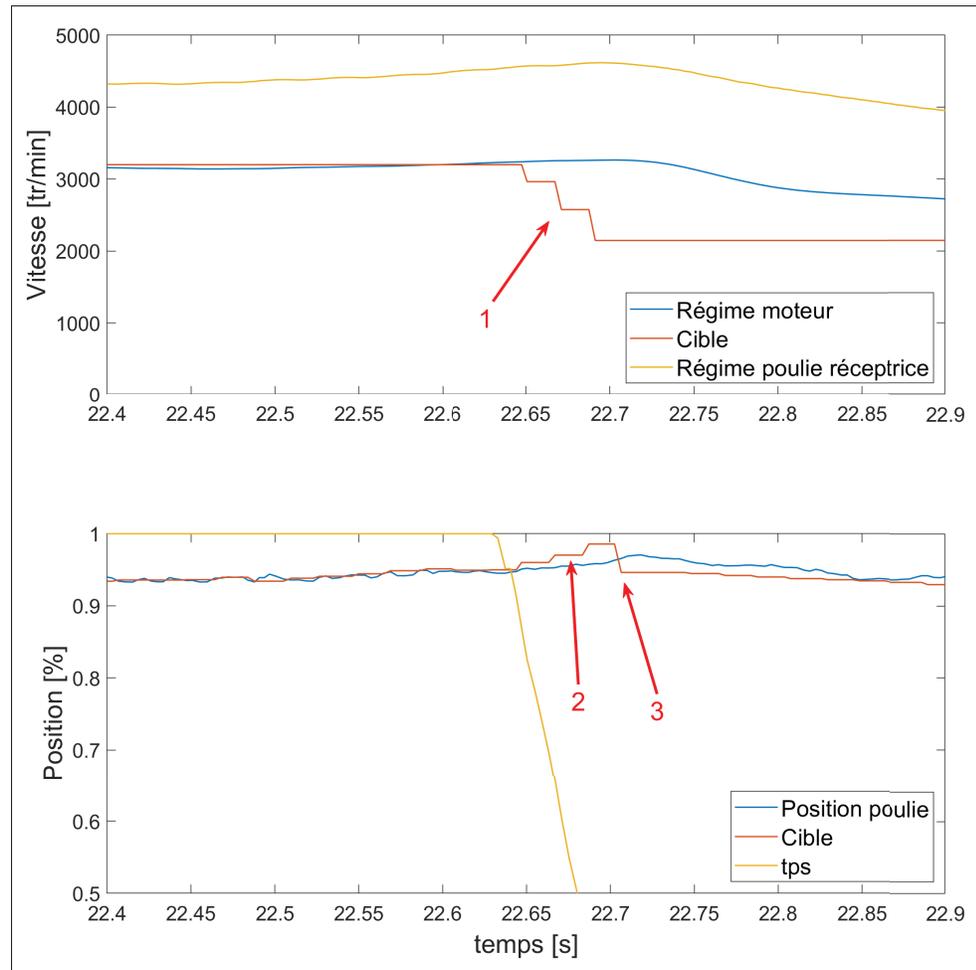


Figure 5.10 Engagement involontaire de la poulie

Pour obtenir la variation de la vitesse du véhicule, une nouvelle tâche a été ajoutée au système d'exploitation, chargée de mettre à jour la variable contenant la décélération du véhicule. Le calcul de cette tâche est simplement la valeur de vitesse actuelle moins la valeur précédente. Dans la deuxième phase du désengagement, cette variable est multipliée par un gain pour déterminer le pourcentage de désengagement à effectuer à chaque cycle. Une fonction de sélection du gain a également été instaurée. Le gain varie selon différents paliers de vitesse véhicule. L'objectif est d'avoir un gain plus faible à haute vitesse et un gain plus agressif à basse vitesse. Cette implémentation vise à ajuster le désengagement de la poulie en fonction de la vitesse du véhicule pour maintenir une réactivité adéquate.

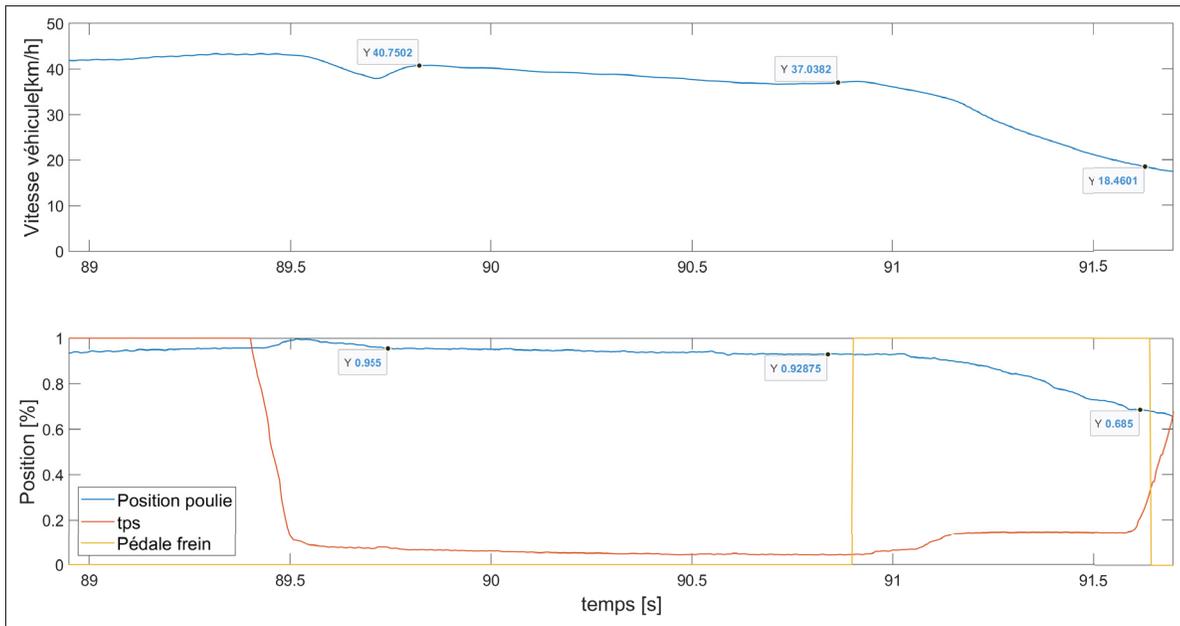


Figure 5.11 Désengagement de la poulie selon la décélération du véhicule

La figure 5.11 illustre le désengagement de la poulie en fonction de la décélération du véhicule. Le graphique supérieur montre la vitesse du véhicule. Lors d'une décélération à haute vitesse, sans freinage (juste par relâchement de l'accélérateur), la poulie se désengage de 2,6 % en une seconde. Dans cette période, la vitesse du véhicule diminue de 4 km/h. Ce comportement est adapté, car le frein n'est pas sollicité et le pilote souhaite maintenir sa vitesse. En revanche, lorsque le frein est actionné (comme montré à la 91^e seconde sur la figure 5.11), la poulie se désengage davantage en réponse à une décélération plus marquée du véhicule. On constate que, sur une durée de 700 ms, le freinage provoque une réduction de la vitesse de 18 km/h et un désengagement de 24 % de la poulie motrice.

La mise en œuvre d'un contrôle sur le désengagement ainsi que l'amélioration de l'embrayage durant l'accélération ont grandement contribué à résoudre les problèmes rencontrés dans l'ancien algorithme. La prochaine étape consistera à caractériser ces améliorations en utilisant des graphiques, des temps d'accélération chronométrés et des résultats des compétitions pour comparer le véhicule de l'ÉTS avec ces compétiteurs. Ces mesures permettront de valider l'efficacité et l'impact de ces nouvelles stratégies dans des scénarios réels et de compétition.

CHAPITRE 6

ÉVALUATION DES PERFORMANCE DE LA EVT

Ce dernier chapitre est consacré à l'évaluation des performances de l'algorithme développé dans le cadre du projet. Trois méthodes distinctes sont employées pour mesurer l'efficacité de cet algorithme. La première consiste à analyser la consommation de ressources de l'algorithme au sein du microcontrôleur. La seconde méthode repose sur la présentation de graphiques de calibration, qui permettront d'établir un parallèle avec les performances théoriques du système CVT. Enfin, la troisième méthode consiste à quantifier les performances à l'aide de mesures de temps d'accélération ainsi que des résultats obtenus lors de la saison 2023 du Baja SAE.

6.1 Performance du système embarqué

L'analyse des performances du système est un aspect important en raison de la nature exigeante de l'acquisition du régime moteur et du régime de la poulie réceptrice, pouvant exercer une pression sur le système. L'utilisation de l'outil SystemView s'avère essentielle pour évaluer l'impact de ces processus sur le microcontrôleur. L'implémentation de la librairie nécessaire à cette analyse a été réalisée par l'un des membres de l'équipe. Cette librairie, intégrée au code, permet d'observer les événements d'interruption dans le logiciel SystemView. Les données obtenues offrent une vision précise du temps moyen passé dans chaque tâche et interruption, ainsi que du pourcentage d'utilisation de l'unité centrale de traitement (CPU) par le MCU.

Pour notre première analyse, nous avons utilisé le banc d'essai afin de simuler le pire cas d'utilisation de manière contrôlée. Les générateurs de fonction ont été configurés pour reproduire un régime moteur à 3 800 tr/min et une vitesse de poulie réceptrice à 7 000 tr/min (correspondant à une vitesse de roue de 63,5 km/h), la vitesse maximale limitée par la puissance du moteur. Les résultats de cette analyse sont présentés à la figure 6.1. L'onglet *Contexts* offre une vue détaillée de tous les éléments exécutés par le MCU, incluant le chargement de chacun sur l'unité de traitement et le nombre d'activations pour la durée du test.

Property	Detail	Name	CPU Load	Total Run Time	Activations
Device	STM32F407	ISR 66	0.89 %	0.321 920 280 s	24 773
Core		ISR 44	8.11 %	2.949 412 101 s	121 855
CPU Frequency	168 MHz	ISR 41	1.82 %	0.721 040 304 s	45 449
Cycle Frequency	168 MHz	SysTick	0.64 %	0.234 510 899 s	36 360
Cycle Period	5.952 ns	Scheduler	0.27 %	0.121 910 077 s	20 653
Time Offset	01:04.140 973	motorControl	0.60 %	0.231 551 833 s	9 090
Recording		rpmControl	0.16 %	0.060 520 190 s	1 818
Title		USBH_Queue	0.00 %	0.000 000 000 s	0
Author		MessageTask	0.68 %	0.263 789 673 s	12 120
Description		defaultTask	0.04 %	0.018 189 798 s	145
Host Time		calculDeriveeN2	0.17 %	0.064 986 613 s	3 636
Duration	36.361 018 s	USB	0.01 %	0.002 361 970 s	145
Number of Events	558 412	Tmr Svc	0.00 %	0.000 000 000 s	0
Event Frequency	15 363/s	Idle	86.61 %	35.595 459 476 s	20 653

Figure 6.1 Contexte des tâches et interruptions sur le banc d'essai

ISR 66 : Interruption du filtre ADC

ISR 44 : Interruption du régime moteur

ISR 41 : Interruption du régime poulie réceptrice

Les données présentées dans la figure 6.1 offrent des informations essentielles sur l'état du système embarqué, particulièrement en vue des futures évolutions du projet. Tout d'abord, il est notable que l'interruption du régime moteur occupe la plus grande part du temps du système, représentant 8 % du temps total. Cette fréquence élevée d'interruptions dépasse les 121 000 activations en 35,6 secondes. La prédominance de cette interruption souligne l'importance de maintenir un temps d'exécution faible dans cette routine pour éviter que son pourcentage d'utilisation dépasse les 8 %. Ensuite, les données de SystemView révèlent que les tâches du projet consomment très peu de ressources sur l'unité de traitement. Les deux tâches les plus consommatrices de ressources sont la tâche de contrôle du moteur électrique (*motorControl*) et l'émission/réception des messages CAN (*MessageTask*), ne représentant respectivement que 0,6 % et 0,68 % du temps total d'exécution. De plus, le compteur du système (*SysTick*) déclenché toutes les 1 ms, et l'ordonnanceur (*Scheduler*) sont pratiquement négligeables avec des pourcentages d'utilisation de 0,64 % et 0,27 %. Par conséquent, le faible contexte de traitement utilisé par les tâches et les interruptions laisse le CPU en attente d'instructions pendant 86 % du temps. Cette analyse confirme que le microcontrôleur est suffisamment puissant pour

exécuter l'algorithme développé dans le cadre du projet, laissant ainsi une marge de puissance significative pour toute évolution future.

L'onglet *Timeline* de SystemView, confirme le déroulement des tâches et interruptions. Il valide l'exécution de l'interruption du filtre analogique toutes les $800 \mu s$, ainsi que la fréquence d'échantillonnage des tâches d'asservissement à 4 ms et 20 ms, configurées dans l'algorithme.

La seconde analyse est réalisée sur le terrain. L'objectif est d'observer le temps d'exécution des tâches d'asservissement dans un contexte réel. Le temps d'exécution doit être isolé des autres données produites par SystemView avec les essais sur terrain, car le régime moteur varie énormément selon la vitesse du parcours et l'agressivité du pilote. Ainsi, pour la durée de l'échantillonnage prise par SystemView, le logiciel effectue des moyennes. Si le moteur est ralenti au début et à la fin de l'essai pour permettre d'activer et fermer l'acquisition de données, la représentation globale du régime moteur serait moyennée vers le bas. Les données sur le contexte du CPU lors d'un essai sont disponibles dans l'annexe III, mais elles ne contiennent pas le contexte des interruptions. Par défaut d'informations moyennes sur le contexte du CPU lors de l'essai sur piste, une attention particulière est portée au temps d'exécution des deux tâches principales du projet (« *motorControl* » et « *rpmControl* »), présenté à la figure 6.2, pour comparer les données entre le banc d'essai et le terrain.

	Min	25%	50%	75%	Max
motorControl	19.881 us	20.417 us	25.060 us	25.238 us	39.560 us
rpmControl	26.298 us	28.452 us	31.429 us	32.500 us	46.548 us
a) Essai sur banc d'essai					
	Min	25%	50%	75%	Max
motorControl	21.685 us	25.000 us	30.060 us	30.357 us	71.179 us
rpmControl	16.685 us	24.702 us	26.786 us	32.143 us	73.625 us
b) Essai sur terrain					

Figure 6.2 Temps d'exécution des tâches principale

de contrôle. Cette dynamique est clairement visible dans la figure 6.4 où l'on remarque une légère variation dans le temps d'exécution des interruptions. L'interruption la plus critique est celle associée au régime moteur (ISR 44), avec une variation minimale de seulement $0,7 \mu s$, ce qui signifie qu'elle n'a jamais été interrompue. Toute variation significative dans le temps d'exécution de cette interruption pourrait induire des erreurs de calcul dans les signaux générés. Ensuite, la variation dans les signaux ADC (ISR 66) présente également une faible amplitude, atteignant $0,9 \mu s$. Quant à la mesure de la vitesse de la poulie réceptrice, son impact sur l'algorithme étant moindre, une variation de $20,9 \mu s$ est tolérée.

	Min	25%	50%	75%	Max
ISR 66	12.440 us	12.798 us	13.006 us	13.214 us	13.369 us
ISR 44	23.685 us	24.107 us	24.315 us	24.315 us	24.381 us
ISR 41	13.196 us	13.571 us	13.750 us	13.750 us	34.000 us

Figure 6.4 Temps d'exécution des interruptions

Le développement de l'algorithme a été effectué de manière à être aussi optimisé que possible avec les connaissances acquises au cours du projet. Les données de SystemView ont permis d'analyser l'interaction entre les interruptions et les tâches du projet, confirmant également que le matériel électronique dispose de suffisamment de ressources pour exécuter l'algorithme sans créer des goulots d'étranglement. Ces ressources disponibles offrent à l'équipe une marge de manœuvre pour apporter des améliorations et de nouvelles fonctionnalités au système embarqué, sans nécessiter de changement au niveau du microcontrôleur.

6.2 Performance véhicule

L'évaluation des performances du véhicule est cruciale et doit être réalisée en conditions réelles, en simulant des scénarios fréquemment rencontrés en compétition. Cette section se concentre sur trois catégories d'essais essentielles. La première consiste en une analyse des graphiques d'accélération pour mettre en évidence la capacité de l'algorithme à stabiliser le régime moteur sur la cible fixée. La seconde catégorie, la reprise, est déterminante pour confirmer que le régime moteur revient promptement à la cible après un relâchement suivi d'une nouvelle sollicitation de

l'accélérateur, une situation courante lors du franchissement d'obstacles. Enfin, l'épreuve de montée de côte est abordée pour démontrer l'aptitude de l'algorithme à s'ajuster aux variations de régime et à exécuter un désengagement adéquat pour rectifier la situation. L'ensemble des graphiques présentés dans cette section est le fruit de dizaines d'heures de calibration et d'apprentissage sur la trajectoire, les gains du régulateur PI et la planification des gains, le tout visant à maximiser les performances du système.

6.2.1 Accélération

Afin d'assurer une performance optimale lors d'une accélération, il est primordial que la CVT d'un prototype Baja puisse maintenir le régime moteur au niveau optimal d'extraction de puissance. Selon les résultats de la calibration du moteur présentés au chapitre 3, la cible pour notre système a été fixée à 3 200 tr/min. Un autre facteur clé pour réussir une accélération est d'éviter le désengagement indésirable de la poulie. Ce phénomène peut survenir lors d'un glissement excessif des roues, poussant le régulateur à trop engager la poulie pour rectifier la situation. Cependant, lorsque les roues retrouvent leur adhérence, le régime moteur subit une chute due à un engagement trop prononcé de la poulie, nécessitant ainsi une correction supplémentaire.

La figure 6.5, illustre une accélération sur l'asphalte. Cette surface, rare en compétition, réduit le glissement des roues au démarrage et minimise les perturbations durant l'accélération. Ceci permet d'évaluer efficacement le système d'asservissement. Deux points clés ressortent de cette analyse qui mérite une attention particulière. Le premier est la stabilité du régime moteur une fois la cible atteinte, se maintenant dans une plage de +/- 50 tr/min à tout moment. Le second aspect concerne la dynamique d'engagement de la poulie motrice. Contrairement à une CVT mécanique où la poulie reste sur le ratio minimum jusqu'à atteindre la vitesse d'embrayage spécifiée, notre système EVT, grâce à son embrayage électronique, permet d'éviter un dépassement en s'engageant proactivement avant d'atteindre cette vitesse. Cette capacité a également pour bénéfice d'augmenter la réactivité du véhicule puisque la poulie s'embraye instantanément dès que l'accélération est demandée par le pilote.

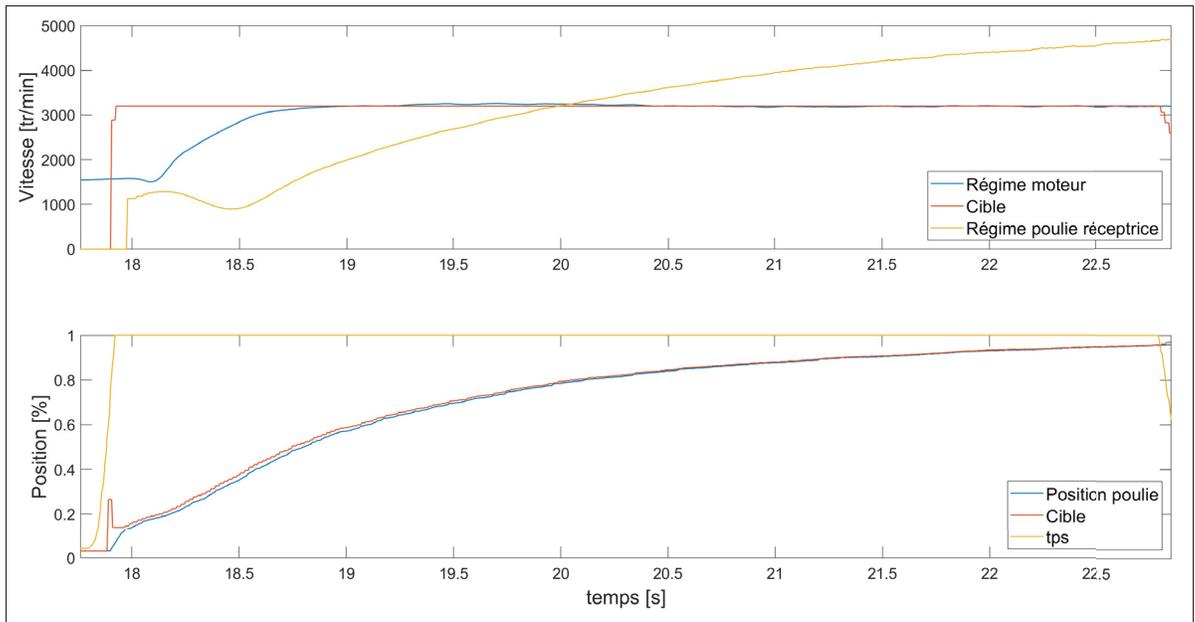


Figure 6.5 Accélération sur de l'asphalte

Il est essentiel de réaliser des essais du véhicule dans des conditions similaires à celles des compétitions réelles, d'où l'importance des essais sur un terrain boueux, représentatives des

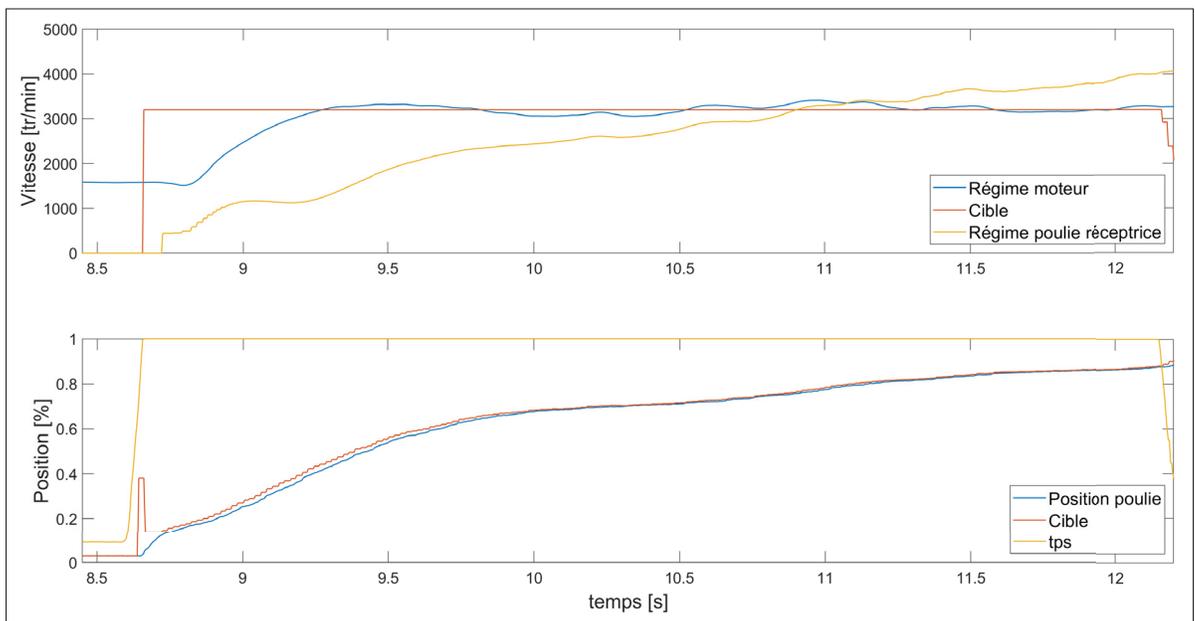


Figure 6.6 Accélération sur terrain boueux

sites de compétition. La surface choisie est située sur un chantier de construction (image du site à l'annexe IV), donc l'état du terrain n'est pas tout à fait de niveau, rendant l'essai sur boue illustré dans la figure 6.6 d'autant plus pertinent.

Le premier élément clé révélé par ce changement de terrain est la tendance des roues arrière à glisser lors du démarrage. Cette réaction initiale provoque un dépassement de 120 tr/min à 9,5 secondes. Le système réagit en engageant davantage la poulie pour ramener le régime à la cible. Toutefois, lorsque la traction des roues s'améliore, le régime diminue légèrement trop, entraînant un sous-dépassement de 140 tr/min à la 10^e seconde. Malgré le glissement, le système réussit à ajuster l'engagement de la poulie sans déviation ni plateau notable.

Le second point d'analyse concerne la perturbation à la 11^e seconde, correspondant à un passage sur un obstacle qui éjecte temporairement la roue arrière du sol, causant une augmentation du régime moteur. Le système, cependant, ne tente pas de corriger cette perturbation, évitant ainsi une surcorrection lors de la retombée de la roue. Cette décision est judicieuse, car elle prévient une cascade de corrections qui pourrait perturber davantage la stabilité du régime.

En résumé, la figure 6.6 démontre qu'en conditions réelles, une légère variation du régime moteur est acceptable pour assurer une adaptation continue et fluide de la poulie. Un écart de +/- 140 tr/min est considéré comme adéquat compte tenu de l'environnement opérationnel du système. D'après les données du dynamomètre de l'ÉNA, un écart de 200 tr/min par rapport à la cible entraîne une perte minimale de puissance, respectivement de 0.1 HP pour un dépassement et de 0.2 HP pour un sous-dépassement.

La séquence de décollage, bien qu'elle ne soit pas au cœur de ce projet, représente un atout fondamental de la EVT. Le calibrage de cette séquence n'a pas été traité dans le cadre de ce travail, mais il est essentiel d'en évaluer les performances pour identifier les axes d'amélioration. La figure 6.7 capture un lancement sur l'asphalte, où la traction n'est pas un facteur limitatif. Le graphique indique clairement le début de la séquence avec une accélération de 81 %, un moteur tournant à 3 200 tr/min, tandis que le véhicule reste immobile. Dès le relâchement du bouton de la séquence, l'embrayage de la poulie est activé et le Baja s'élance. Toutefois, la

baisse du régime moteur à 2 650 tr/min souligne une perte de performance, ce qui suggère que la trajectoire actuelle nécessite une optimisation pour la séquence de décollage.

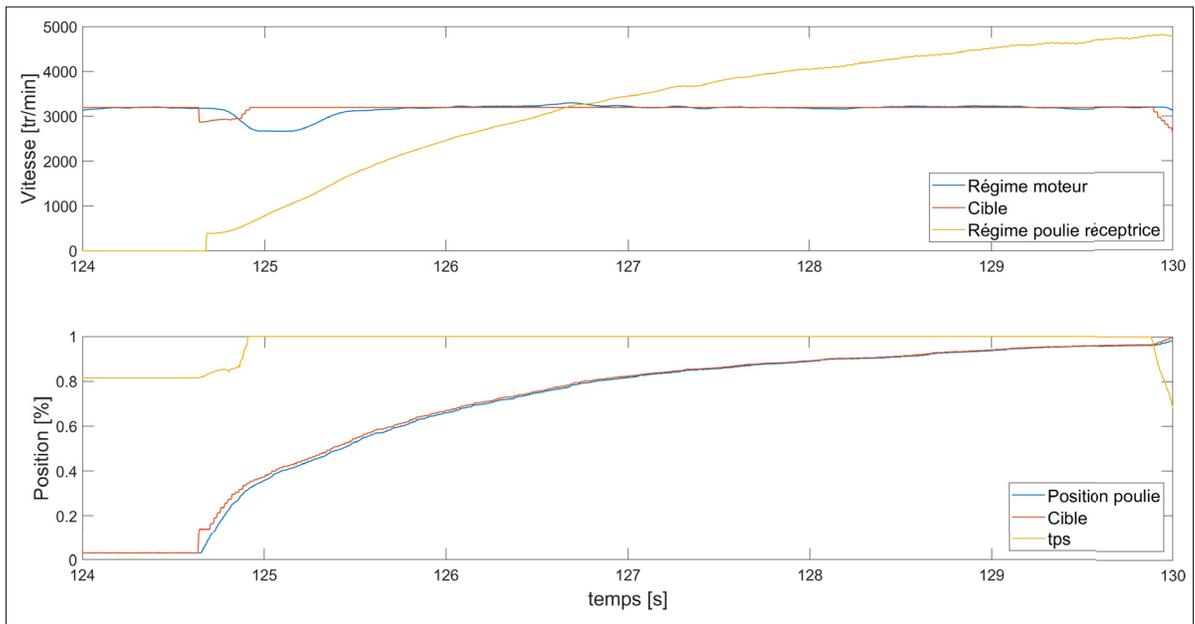


Figure 6.7 Accélération avec séquence de décollage

La mise au point d'une trajectoire spécifiquement conçue pour la séquence de décollage est recommandée pour exploiter pleinement le potentiel de la EVT. L'algorithme est conçu pour accommoder une trajectoire et des gains spécialement pour la séquence, ce qui représente une opportunité de réglages précis. L'analyse présente démontre l'importance d'un tel ajustement, soulignant qu'il est possible d'améliorer davantage les performances.

6.2.2 Reprise

La reprise est caractérisée par la capacité du système à revenir rapidement à la cible moteur lorsque le véhicule est déjà en mouvement et que l'accélérateur est de nouveau sollicité. En pratique, cela signifie que le véhicule dispose de meilleures performances lors de la sortie de virages ou après avoir franchi un obstacle. Une calibration méticuleuse des gains liés au désengagement de la transmission, couplée à un ajustement fin des gains du régulateur de

régime moteur, s'est avérée centrale pour atteindre les performances attendues en reprise et en accélération. Cette fine calibration a été possible grâce à la disponibilité de la piste de l'ÉNA, qui a servi de terrain d'essai pour les réglages nécessaires.

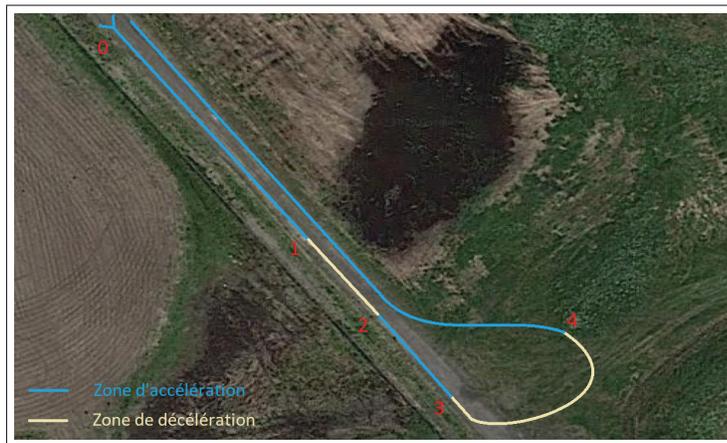


Figure 6.8 Parcours pour la calibration reprise

Le parcours conçu pour tester le système offrait l'opportunité de réaliser deux reprises à des vitesses véhicule différentes, mettant ainsi à l'épreuve la réactivité du système à partir de deux niveaux de rapport de transmission distincts. Le tracé, bien que simple, a permis au véhicule d'atteindre une vitesse suffisante pour effectuer la première reprise à haute vitesse et la seconde à une vitesse réduite à la sortie d'un virage. La figure 6.8 illustre ce parcours et fournit des indications sur les différentes zones et numérote les transitions pour faciliter l'analyse des résultats présentés dans la figure 6.9. Les vitesses de 30 km/h et 15 km/h, respectivement pour la première et la seconde reprise, n'ont pas été prédéterminées, mais ont naturellement établi les conditions de l'essai.

La première reprise, visible dans le cercle rouge indiquée par le numéro 2 de la figure 6.9, montre que le régime moteur se stabilise immédiatement sur la cible, sans dépassement ou sous-dépassement significatifs. Le régulateur apporte une correction mineure à la position de la poulie, ce qui conduit à une transition adéquate.

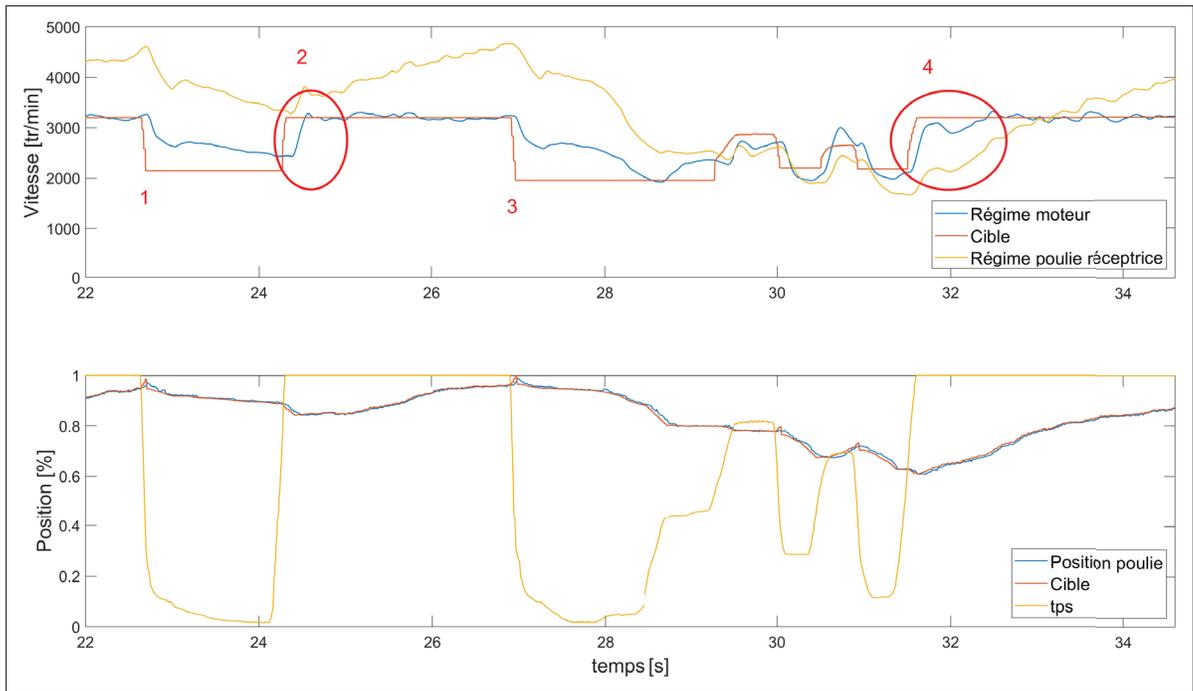


Figure 6.9 Caractérisation de la reprise

Pour la deuxième reprise, bien que le résultat ne soit pas aussi idéal que le premier, il est tout de même très satisfaisant. Un sous-dépassement est toujours à privilégier par rapport à un dépassement. Le sous-dépassement indique que le groupe motopropulseur demande un couple trop élevé sur le moteur, suggérant que le rapport de transmission CVT était trop élevé au moment de la reprise. Cela signifie également que, puisque la poulie est trop engagée à cet instant, le véhicule réagit instantanément avec un couple réduit (un rapport de transmission plus élevé se traduit par moins de couple aux roues) avant que le régime moteur ne se stabilise sur sa cible. À l'inverse, un dépassement lors de la reprise indique que la poulie est trop désengagée, entraînant un retard avant que le transfert de couple ne reprenne efficacement dans la courroie. De manière pragmatique, il est souvent plus bénéfique d'avoir une légère réduction immédiate de puissance plutôt qu'une puissance optimale accompagnée d'un retard. De plus, la suppression de tout délai dans la reprise augmente la prédictibilité du véhicule et renforce la confiance du pilote dans ses manœuvres.

Actuellement, les performances globales de la reprise sont plus que satisfaisantes. Cependant, pour raffiner davantage le système, la seconde reprise pourrait être améliorée. Une piste d'optimisation consisterait à implémenter un niveau additionnel à la planification des gains selon la position de la poulie spécifiquement pour la reprise. Il a été constaté que la reprise était excellente lorsque la poulie était engagée à 90 %, mais les gains étaient moins appropriés à 60 %. Par conséquent, l'ajustement des gains en fonction de la position de la poulie pourrait faciliter la calibration de la reprise à différentes vitesses sans compromettre les performances à d'autres régimes. Il convient toutefois de noter que chaque gain supplémentaire implique un allongement du temps nécessaire à la calibration du système.

6.2.3 Montée de côte

La montée de côte est un essai critique, car elle teste le désengagement de la poulie sous charge. L'objectif est de provoquer une chute du régime moteur pour inciter le système d'asservissement à désengager la poulie et maintenir le régime au niveau ciblé. Réaliser cet essai sur l'asphalte permet d'isoler la réaction du système face à la montée sans être affecté par des problèmes de traction. Ensuite, la pente doit être assez prononcée pour induire une chute du régime moteur. Avec l'arrivée de l'hiver, le temps pour identifier un site idéal était limité, menant au choix de deux rues tranquilles sur le Mont-Royal.

La figure 6.10 illustre les résultats obtenus lors de la première montée de côte avec une inclinaison de 14 %. Le site sélectionné pour cet essai comportait une zone plate avant la pente. Bien que cette inclinaison ne soit pas particulièrement sévère, les données graphiques illustrent efficacement la réaction du système. Une accélération est perceptible (reflétée par la vitesse de la poulie secondaire) jusqu'à la 93^e seconde, le moment où l'influence de la pente se fait sentir, comme en témoigne la légère réduction de la vitesse des roues. Cette dernière entraîne une baisse simultanée du régime moteur. Néanmoins, le régulateur a adéquatement répondu en désengageant la poulie pour conserver le régime moteur autour de la cible durant l'ascension. Le désengagement était très faible, de seulement 2 %, pour réaliser la correction. L'aspect primordial est que la poulie est demeurée à la même position durant la pente. Cela a permis

de maintenir le régime moteur sur la cible, démontrant ainsi l'aptitude de l'asservissement à s'adapter rapidement à d'importantes variations de charge.

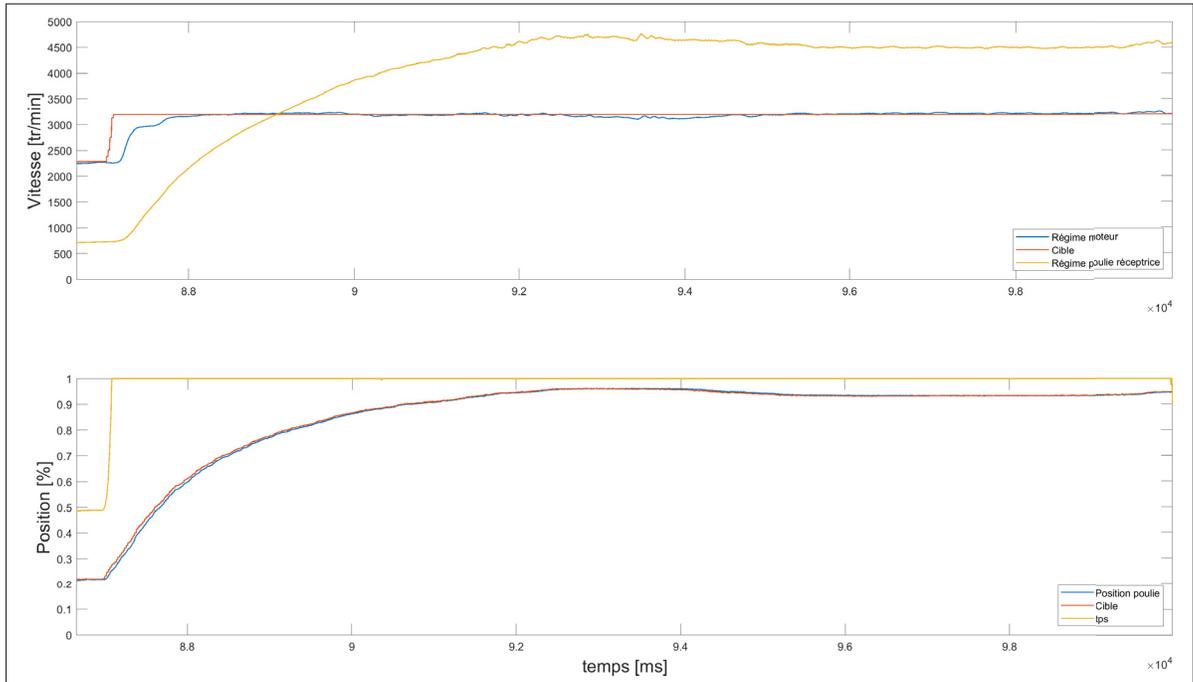


Figure 6.10 Montée de côte de 14 %

Le second site d'essai se distinguait du premier en offrant un espace restreint pour que le Baja accélère, avec la section la plus pentue qui s'étendait sur seulement une dizaine de mètres. La pente y présentait un dénivelé de 11,4 % dans la première section, de 18,2 % au milieu, et de 12,8 % dans la dernière section. Dans la figure 6.11, le moment le plus critique est atteint à la 71^e seconde, où la pente maximale provoque une diminution notable de la vitesse du véhicule. Le régulateur réagit en désengageant la poulie, mais cette fois-ci, elle semble avoir trop diminué le ratio de la EVT, car on témoigne un dépassement temporaire du régime moteur.

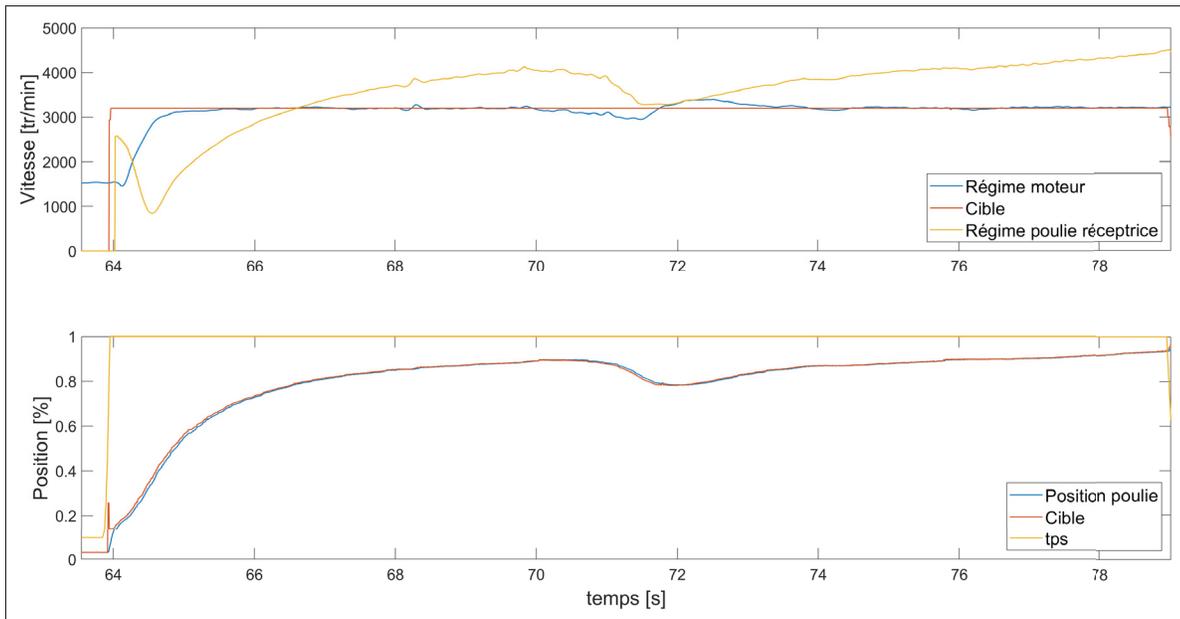


Figure 6.11 Montée de côte de 18,2 %

Dans des conditions idéales, les essais de montée de côte seraient réalisés sur des pentes plus raides que celles accessibles lors de nos tests. Le lieu optimal pour de tels essais serait la piste de CVTech, spécialement équipée de pentes de 20 %, 30 % et 40 % conçues pour tester les performances des CVT, offrant ainsi l'espace nécessaire pour aborder l'obstacle à une vitesse appropriée. Malheureusement, l'accès à cette piste n'était pas réalisable pendant la période des essais du projet. Il serait judicieux que l'équipe envisage d'utiliser la piste de CVTech pour des tests futurs, car les contraintes des essais réalisés pour les figures 1 et 2 ont limité l'équipe à un seul essai par site, sans possibilité de calibration en raison du risque potentiel lié à la conduite d'un véhicule tout-terrain dans les rues de Montréal. Une calibration précise effectuée sur un circuit adéquat pourrait sans doute optimiser davantage les performances. Cela dit, même avec des pentes moins abruptes, les tests effectués ont permis de mettre en évidence l'aptitude du régulateur à désengager la poulie pour maintenir le régime moteur dans la cible visée.

6.3 Comparaison entre EVT et CVT

Les analyses précédentes nous ont permis d'évaluer les performances de la EVT d'un point de vue théorique, en les comparant aux résultats issus de la littérature. Bien que les graphiques et les données théoriques offrent une perspective précieuse, il est essentiel de rappeler que dans le contexte compétitif, ce sont les temps d'accélération qui déterminent les gagnants. Cette section vise donc à contextualiser ces améliorations de manière concrète. D'abord, une comparaison sera effectuée entre la EVT et une CVT mécanique sur le même véhicule. Ensuite, la discussion se concentrera sur les résultats concrets obtenus lors de la saison 2023.

6.3.1 Comparaison sur le même prototype

Pour évaluer de manière approfondie la performance de la EVT, une comparaison a été réalisée sur le prototype 2021, équipé du nouveau kit CVTech conçu spécialement pour la série Baja. Afin de garantir la fiabilité des résultats, les temps d'accélération ont été mesurés à l'aide de portes laser, et un même pilote a fait l'ensemble des tests. Les essais se sont déroulés à la fois sur l'asphalte et dans un stationnement, sur une surface en béton plus glissante que l'asphalte. De multiples mesures ont été prises pour chaque essai afin d'obtenir une moyenne fiable. Pour la EVT, cinq essais avec la séquence de décollage et cinq autres sans, ont été effectués en

EVT		
Stationnement	avec séquence	4,038 s
	sans séquence	4,040 s
Asphalte	avec séquence	3,990 s
	sans séquence	4,050 s
CVTech		
Stationnement		4,130 s
Asphalte		4,122 s

Tableau 6.1 Comparaison des temps d'accélération entre EVT et CVTech sur différentes surfaces

alternance entre chaque mode de décollage. Quant à la CVT, dix essais ont été réalisés pour chaque condition. Les résultats moyens sont présentés dans le tableau 6.1.

La comparaison des performances d'accélération sur différentes surfaces révèle des données captivantes. Initialement, il est évident que l'EVT surpasse le CVTech dans toutes les catégories. Plus précisément, sur l'asphalte, l'EVT enregistre un temps supérieur de 132 ms avec la séquence de lancement et de 72 ms sans. Dans le stationnement, l'amélioration est légèrement moindre, avec 93 ms avec la séquence de lancement et 90 ms sans. Étrangement, la séquence de décollage semble n'offrir qu'un avantage minime dans le stationnement (2 ms), alors qu'il procure une amélioration notable de 60 ms sur l'asphalte.

Cette différence peut être attribuée à la dynamique du ratio de glissement des roues. Lorsque le véhicule décolle avec la séquence, il atteint rapidement la puissance maximale du moteur, et si l'adhérence est insuffisante, le couple excédentaire se traduit en glissement, réduisant ainsi l'efficacité de la propulsion. Sur l'asphalte, où le coefficient de friction est plus élevé, les pneus maintiennent une meilleure adhérence lors du lancement. Cela permet aux roues de transmettre une plus grande proportion du couple au sol, diminuant le ratio de glissement et améliorant significativement l'accélération. En conséquence, l'optimisation de la séquence de décollage devrait être considérée pour maximiser les performances d'accélération. Cependant, cet aspect n'a pas été évalué dans le cadre du projet, car le prototype de 2021, sur lequel tout le développement a été effectué, est le dernier modèle Baja à 2 roues motrices. À partir de 2022, les véhicules sont équipés d'un système à 4 roues motrices, augmentant considérablement la traction lorsque les deux roues avant aident à transmettre le couple au sol. Néanmoins, les données présentées dans le tableau 6.1 offrent un aperçu significatif de l'importance du ratio de glissement au décollage sur différentes surfaces. Il serait donc très pertinent que l'équipe poursuive une évaluation approfondie dans un projet futur.

Il faut cependant noter une limite importante concernant la comparaison effectuée. En effet, la CVT mécanique utilisée est un modèle commercial, conçu avec des facteurs de sécurité plus élevés que ceux généralement trouvés dans les CVT personnalisées des équipes de haut

niveau. Ces équipes parviennent à concevoir des CVT plus légères et avec moins d'inertie que le modèle de CVTech, mais ces modèles sur mesure sont spécifiques à leur véhicule. De plus, l'obtention d'un modèle de CVT d'une autre équipe s'avère pratiquement impossible, en raison de contraintes liées à la propriété intellectuelle et à des problèmes de compatibilité. Par conséquent, pour réaliser une comparaison directe entre EVT et CVT sur le prototype de 2021, l'utilisation du modèle commercial de CVTech était la seule option viable.

6.3.2 Comparaison en compétition

Une méthode complémentaire d'évaluation des performances de la EVT consiste à la comparer avec les CVT personnalisées conçues par d'autres équipes de Baja. Ces équipes performantes, en concevant et fabriquant leurs propres CVT, peuvent réduire les facteurs de sécurité et ainsi obtenir de meilleures performances que les modèles commerciaux. Toutefois, cette approche a ses limites, car il est nécessaire d'examiner l'ensemble du véhicule, y compris la résistance au roulement, la force de traînée et le poids, rendant difficile l'isolation de l'impact de la CVT. Malgré cela, cette analyse est pertinente, car l'objectif ultime est la performance en compétition.

Durant la saison de compétition du prototype 2023, le développement de l'algorithme était encore en cours. Par conséquent, le prototype n'a pas bénéficié de toutes les améliorations prévues dans le projet. Néanmoins, des améliorations significatives, telles que le filtrage des signaux, la commande du moteur électrique et l'ajustement des gains du contrôleur PD de la boucle externe, ont été implémentées.

L'épreuve d'accélération en compétition s'avère être la plus indicative pour évaluer les performances de l'algorithme, étant donné qu'elle dépend moins des compétences du pilote, contrairement aux épreuves de manœuvrabilité ou de suspension. Historiquement, l'équipe de l'Université du Michigan Ann Arbor a fréquemment excellé dans cette épreuve. Le tableau 6.2 illustre les résultats des épreuves d'accélération des trois compétitions annuelles depuis 2017, année où la EVT du Baja ÉTS a été introduite en compétition. Pour la première fois cette année, l'ÉTS n'a pas seulement remporté une première place, mais a aussi réalisé la Triple

Couronne. Le but de ce tableau est de mettre en lumière les avancées de l’algorithme au fil du projet. Toutefois, il convient de ne pas attribuer le succès de 2023 uniquement à l’algorithme. D’autres améliorations ont été apportées au système, bien que l’impact individuel de chacun soit difficile à quantifier.

Compétition	ÉTS			Michigan Ann Arbor		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
2023	1	1	1	3	7	2
2022	5	7	11	8	1	1
2019	6	3	9	3	1	2
2018	18	7	8	1	1	1
2017	12	27	25	1	1	2

Tableau 6.2 Résultat de l’épreuve d’accélération depuis 2017
Adaptée de SAE (2023)

De 2017 à 2022, le système mécanique de la EVT a connu une progression significative, avec des composants devenus plus légers, ayant moins d’inertie et plus efficaces. En 2023, bien que la mécanique n’ait pas connu de progrès majeurs en termes de performance, la conception a été orientée vers l’amélioration de la fiabilité du système. Cela suggère que l’algorithme a joué un rôle central dans les résultats de 2023, en particulier grâce à sa capacité à maintenir le régime moteur sur la cible de puissance optimale.

Dans la section précédente, l’intégration de la séquence de décollage s’est révélée bénéfique pour améliorer l’accélération. Sur l’asphalte, un gain de temps de 60 ms a été constaté grâce à cette séquence. Bien que 60 ms puissent paraître négligeables, en réalité, ils ont joué un rôle déterminant dans les performances. Le tableau 6.1 présente les trois meilleurs temps d’accélération lors des compétitions de la saison 2023, ainsi que les écarts entre les classements. Il est difficile de quantifier exactement le bénéfice de la séquence de décollage en compétition, mais une comparaison hypothétique suggère que, sans ce gain de 60 ms, l’ÉTS se seraient classés 3^e en Ohio et 2^e dans les deux autres compétitions.

Dans un contexte compétitif, où les meilleures équipes cherchent constamment à repousser les limites de leurs véhicules en allégeant chaque système et en affinant les calibrations pour une

Compétition	ÉTS [s]	2^e Pos. [s]	Écart 1-2 [s]	3^e Pos. [s]	Écart 2-3 [s]
Oshkosh	3,895	3,953	0,058	4,001	0,048
Oregon	3,958	4,010	0,052	4,048	0,038
Ohio	4,192	4,228	0,036	4,239	0,011

Tableau 6.3 Classement et écarts des temps d'accélération du podium - 2023

performance optimale, la EVT s'est avérée être un atout clé. La séquence de décollage, rendue possible par la EVT, peut faire une différence notable dans les résultats. Les efforts investis dans ce mémoire ont significativement accéléré le développement du système d'asservissement, exploitant ainsi au mieux les capacités de la CVT. De plus, la capacité de personnaliser la dynamique du véhicule en fonction du style de chaque pilote a permis une conduite plus maîtrisée et efficace. Ces avantages confirment que l'investissement supplémentaire requis pour la EVT est pleinement justifié.

CONCLUSION

La CVT électronique développée par l'équipe Baja de l'ÉTS, introduite en 2017, est devenue un symbole de distinction technologique. Grâce à d'incessantes améliorations mécaniques et à l'évolution du contrôleur, la performance et la fiabilité de ce système ont été significativement renforcées. Cependant, l'asservissement n'a pas suivi cette évolution, entravé principalement par un manque de connaissances spécialisées au sein de l'équipe. Cette lacune a eu un impact direct sur l'efficacité du moteur à combustion, avec un code 2022 peu compréhensible et inefficace pour suivre la cible motrice. Les déplacements en plateau de la poulie motrice créaient des oscillations dans l'accélération, perceptibles par le pilote, tandis que la réactivité de la CVT était limitée, la poulie revenant en position de repos dès le relâchement de l'accélérateur. Ce mémoire a donc été consacré à l'amélioration de l'algorithme d'asservissement, afin de le porter à un niveau de maturité équivalent à celui des autres composants de la EVT.

L'analyse a démontré que les problèmes de l'ancien algorithme résidaient dans un filtrage insuffisant des signaux d'entrée, causant la transmission de bruits dans les commandes. La trajectoire existante, inadéquate, ne permettait pas de maintenir le régime moteur sur la cible souhaitée. Pour remédier à ces problèmes, un double filtrage a été instauré : un filtrage passe-bas pour les signaux numériques et un filtrage par moyenne glissante pour améliorer l'intégrité des données. L'introduction d'une boucle de rétroaction améliorée et d'un embrayage séquentiel a non seulement facilité la calibration, mais a également permis un contrôle plus précis du régime moteur. L'implémentation d'une machine d'état a significativement amélioré la lisibilité de l'algorithme et a facilité l'ajout de fonctionnalités, comme le désengagement rapide, améliorant ainsi la réactivité et la reprise du véhicule.

L'aboutissement de ce projet a contribué au succès de l'équipe Baja ÉTS lors de la saison 2023, en leur permettant de retrouver les compétences nécessaires pour calibrer et maintenir le système embarqué de la EVT. Les graphiques présentés dans le dernier chapitre démontrent

que la EVT est désormais capable de fonctionner efficacement, en engageant la poulie motrice de manière à maintenir le régime moteur à un niveau optimal de puissance. Les résultats en compétition valident le travail accompli dans ce projet, démontrant que la EVT est non seulement performante, mais également l'une des meilleures, sinon la meilleure CVT sur le circuit Baja SAE, en grande partie grâce à la séquence de décollage.

Ce travail a permis à l'équipe de remporter les trois épreuves d'accélération de la saison 2023, avec une EVT n'ayant jamais dépassé une troisième place en 2019. Cette réussite illustre l'importance de l'approche adoptée dans ce mémoire, consistant à améliorer l'accélération du véhicule, à éliminer les oscillations et à maintenir le régime moteur sur la cible, tout en rendant la conduite plus accessible et maîtrisable.

Néanmoins, ce projet n'est pas sans limitations. L'absence d'un modèle complet du système a conduit à une approche empirique basée sur la méthode essai-erreur, nécessitant des ajustements et des calibrations directement sur le terrain. Malgré ces défis, le projet a non seulement démontré la supériorité de la EVT sur les CVT mécaniques, mais a également jeté les bases pour des développements futurs, offrant à l'équipe une plateforme solide pour continuer à innover et exceller dans les compétitions de Baja SAE.

RECOMMANDATIONS

Le travail effectué dans le cadre de ce projet a permis d'améliorer significativement la performance et la flexibilité de l'algorithme de contrôle de la EVT. Néanmoins, plusieurs opportunités d'amélioration demeurent, offrant à l'équipe des pistes pour poursuivre son développement. L'intégration de nouveaux capteurs, par exemple, pourrait enrichir l'algorithme et permettre une gestion plus précise de divers aspects du véhicule. L'implémentation réussie de la machine d'état simplifie l'ajout de nouvelles caractéristiques, ouvrant la voie à des innovations continues.

Calibration

La cible de 3 200 tr/min, bien que choisie après une analyse dynamométrique, pourrait être réévaluée par des tests plus exhaustifs pour déterminer avec précision le régime produisant la puissance maximale. Comprendre l'influence de la température sur les performances du moteur pourrait permettre une gestion optimale de cette dernière. En cas de modification de la cible moteur, une recalibration de la trajectoire et de l'algorithme s'impose.

Les résultats d'accélération avec la séquence de décollage suggèrent que la trajectoire actuelle pourrait être optimisée. Un ajustement spécifique pour ce mode, accessible facilement via le volant, pourrait améliorer sensiblement les performances d'accélération. La trajectoire idéale devrait permettre au pilote de maximiser l'inertie au moment du décollage en commençant la séquence à 3 800 tr/min.

Des essais sur différentes surfaces d'accélération pourraient également améliorer la polyvalence du véhicule. L'enregistrement de trajectoires adaptées à différents types de terrains dans le système embarqué pourrait être une stratégie gagnante lors des compétitions variées.

Capteurs

L'ajout de capteurs de suspension pourrait résoudre le problème de reconnaissance lorsque les roues arrière ne sont plus en contact avec le sol. Ces capteurs, en détectant l'extension maximale des bras de suspension, pourraient bloquer le ratio de la CVT, prévenant ainsi un couple excessif lors de l'atterrissage. Cependant, cette implémentation dépend de la disponibilité des entrées électroniques appropriées sur le circuit actuel.

La fiabilité du signal de la poulie réceptrice au décollage du véhicule n'est pas tout à fait adéquate. Ce phénomène est probablement causé par l'instabilité du filtre passe-bas. L'amélioration de ce signal pourrait donner une meilleure compréhension du glissement des roues et l'opportunité d'ajouter un système d'antipatinage selon la surface.

Le nouveau capteur de vitesse sur la poulie menée a amélioré le désengagement de la poulie motrice. Un système d'autoprotection intégré au code pourrait servir de plan B en cas de défaillance du capteur, assurant une continuité dans le contrôle du véhicule.

Autres

Le développement d'un banc d'essai pour l'actionneur électrique, en plus de tester la fiabilité du matériel électronique, pourrait servir à développer un algorithme de protection contre la surconsommation de courant. L'approche décrite par Pinard (2007) pourrait constituer une base pour cette fonctionnalité.

Enfin, l'utilisation de Matlab pour le post-traitement est efficace, mais gourmande en ressources. La transition vers Python, avec des bibliothèques comme Matplotlib ou Pandas, serait avantageuse, d'autant plus que les nouvelles générations d'étudiants en génie mécanique sont désormais formées à ce langage. Cette migration vers Python permettrait une gestion plus souple et moins consommatrice de ressources pour le traitement des données.

ANNEXE I
ESSAI DYNAMOMÈTRE

1. Résultat dynamomètre sur Briggs & Stratton

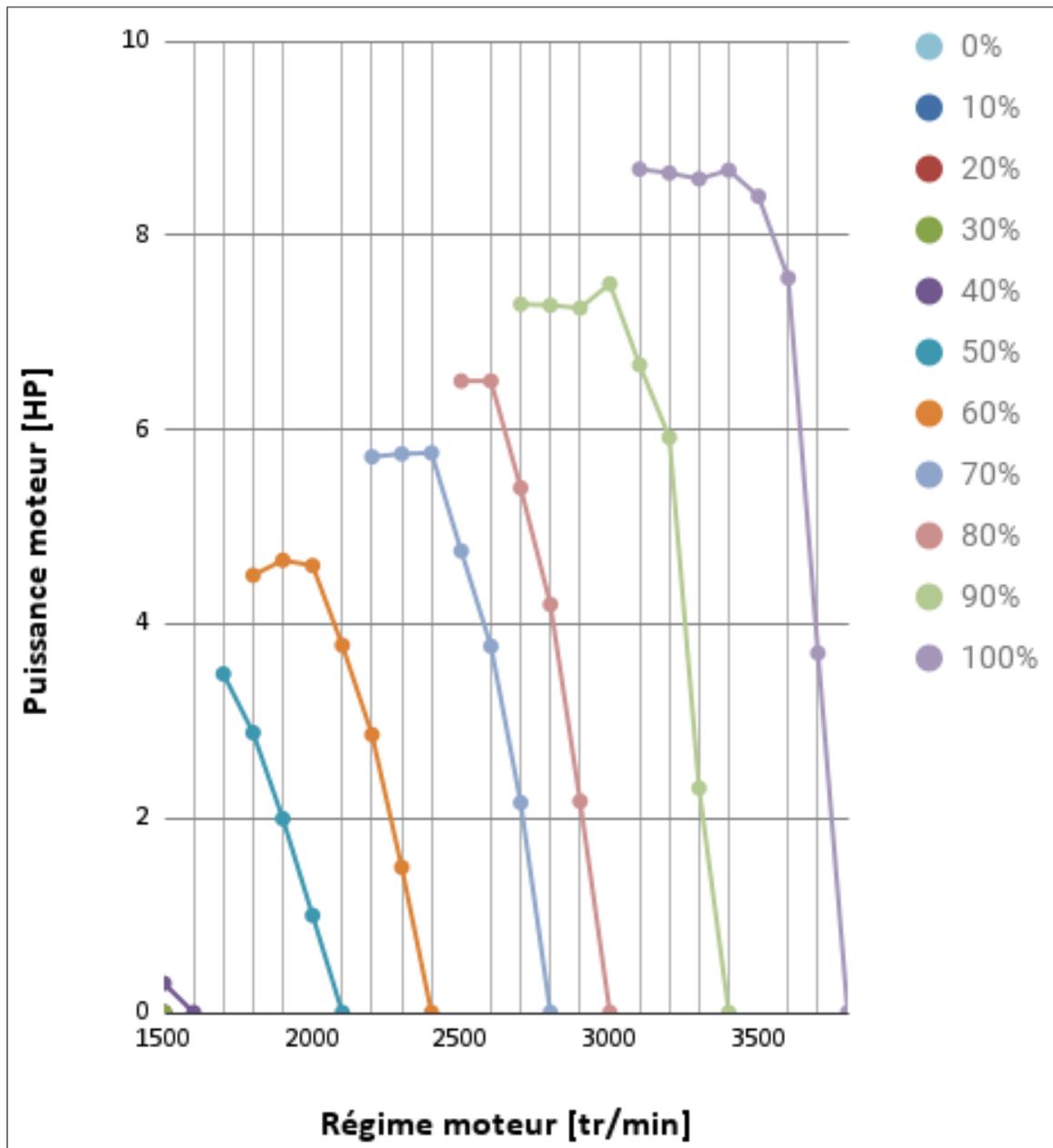


Figure-A I-1 Essaie dynamomètre effectué en 2016

2. Donnée fournie par Kohler

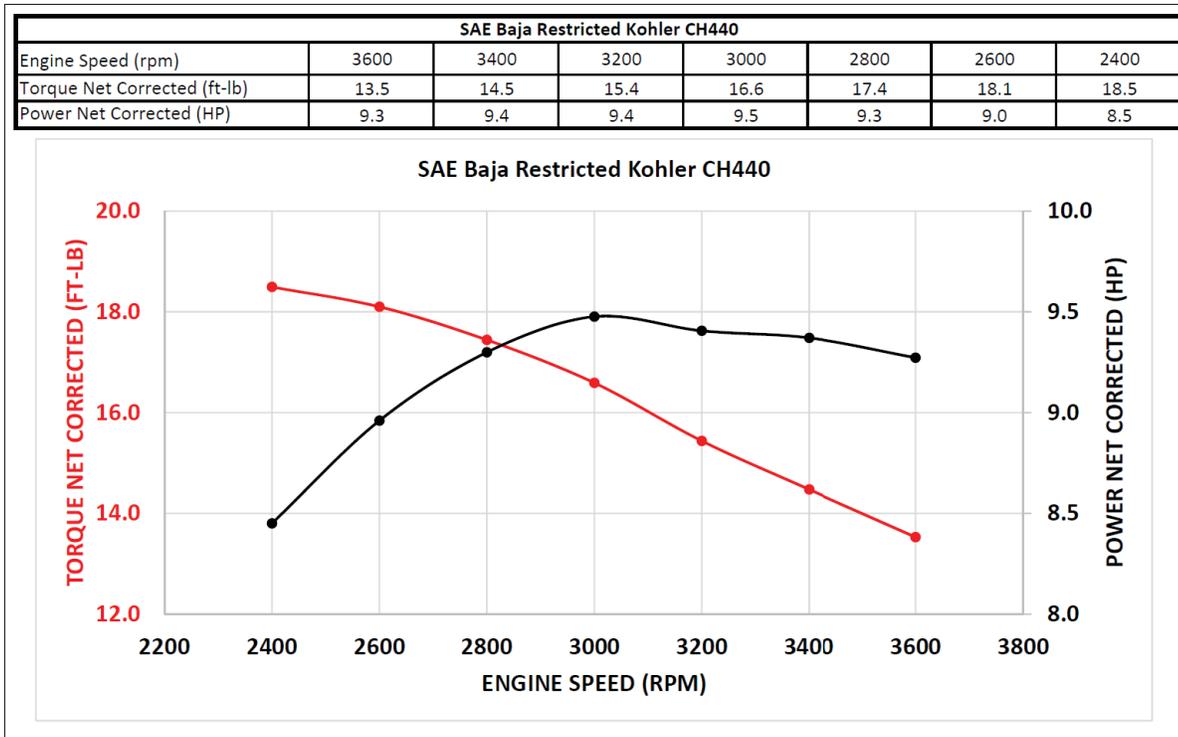


Figure-A I-2 Résultat dynamométrique fourni par Kohler

3. Donnée récoltée sur le Dynamomètre

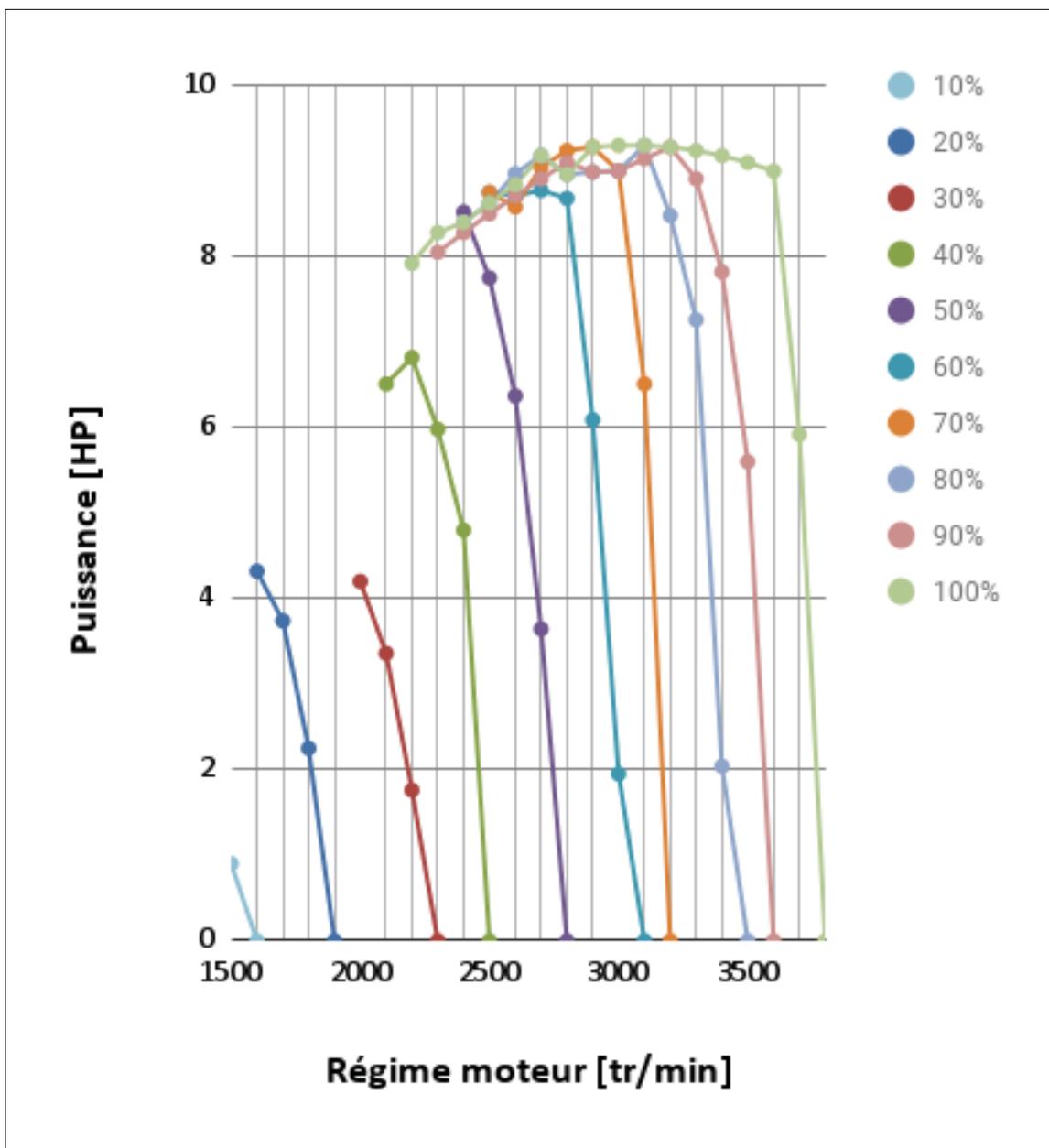


Figure-A I-3 Résultat dynamométrique de toutes les plages d'ouverture du papillon des gaz

4. Configuration des essais



Figure-A I-4 Vue d'ensemble du moteur et dynamomètre



Figure-A I-5 Configuration du système de dynamomètre en action

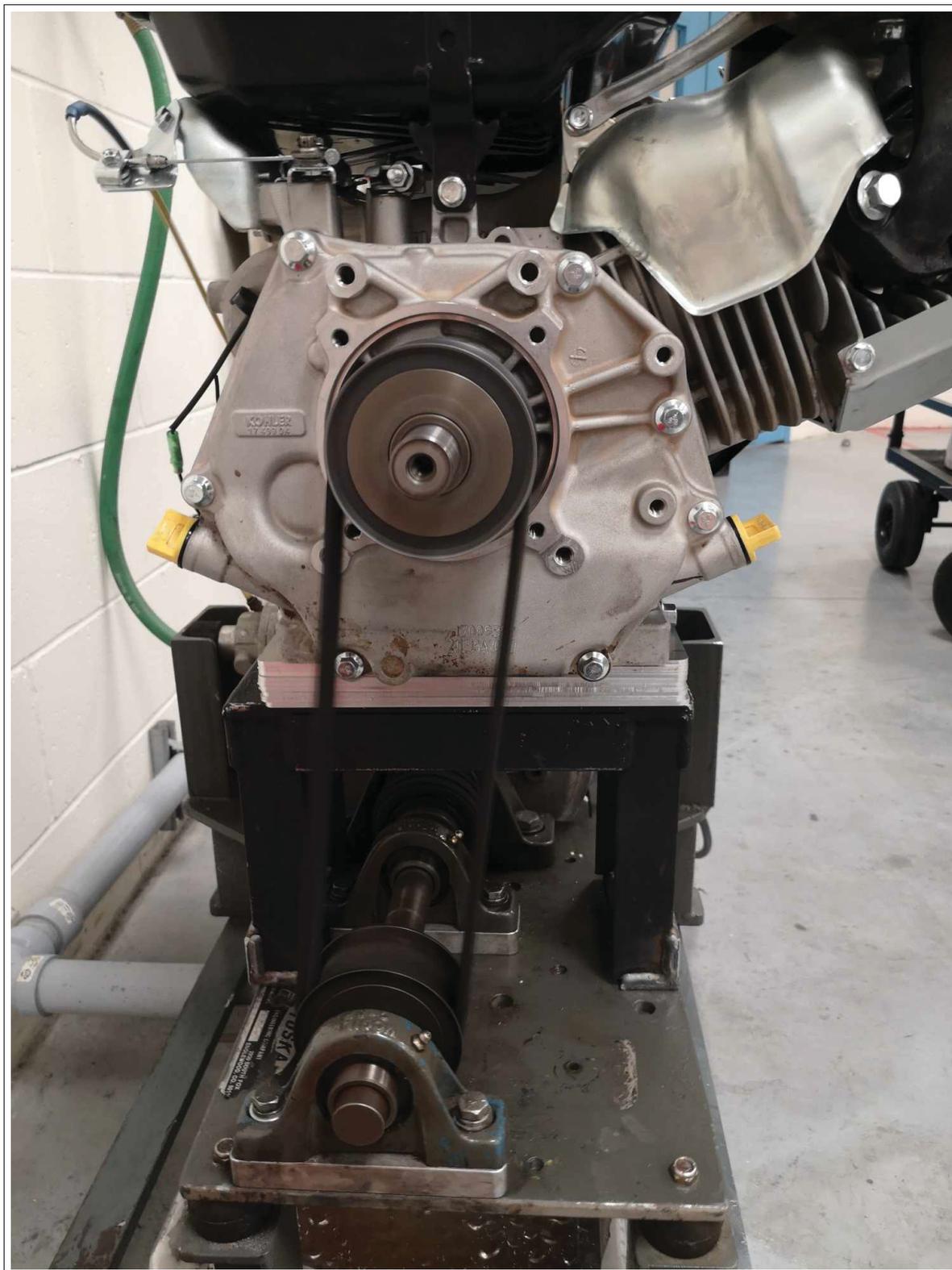


Figure-A I-6 Vue rapprochée de la courroie entre le moteur et dynamomètre

ANNEXE II

THÉORIE DU CONTRÔLE ET IMPLÉMENTATION

1. Script Matlab pour post-traitement

```
Ratio_tranny = 10.928;
RevRoue = 1653;          % mm
magic_N = ((RevRoue/1000000) * 60)/Ratio_tranny;
% Vitesse = magic_N * rpm_mene

% - Extraction des donnees
FileName=uigetfile('*.txt');
T = readtable(FileName);
T = renamevars(T, "Var2","Time[ms]");
T.vitesse = magic_N*T.rpm_mene_value;
T.ratio = T.rpm_moteur_value./T.rpm_mene_value;

% - Generation des graphiques
FigureName = append('RPM: ',FileName);
figure('Name',FigureName)
s = stackedplot(T,{"rpm_moteur_value","rpm_moteur_target","
    rpm_mene_value"},["tps","sheave_target","sheave_value","
    brake_pedal"],["state_current"],["ratio"],'XVariable',"
    Time[ms]");
s.AxesProperties(1).YLimits = [0,6000];
s.AxesProperties(2).YLimits = [-0.025,1.1];
s.AxesProperties(4).YLimits = [-120,120];

s.LineProperties(2).Color = [0 0 1
```

```
0 0 0 ];
```

```
s.LineWidth = 1;
s.FontSize = 14;
s.AxesProperties(1).LegendLocation = 'northwest';
s.AxesProperties(2).LegendLocation = 'northwest';
```

2. Démonstration de l'équation récurrente du PID

$$D(z) = K_P + \frac{K_I T}{2} \left(\frac{z+1}{z-1} \right) + \frac{K_D}{T} \left(\frac{z-1}{z} \right)$$

$$U(z) = D(z) * E(z)$$

$$U(z) = K_P * E(z) + \frac{K_I T}{2} \left(\frac{z+1}{z-1} \right) * E(z) + \frac{K_D}{T} \left(\frac{z-1}{z} \right) * E(z)$$

$$U(z)(z-1) = K_P(z-1) * E(z) + \frac{K_I T}{2} (z+1) * E(z) + \frac{K_D}{T} \left(\frac{(z-1)^2}{z} \right) * E(z)$$

$$U(z)(z-1)z = K_P(z-1)z * E(z) + \frac{K_I T}{2} (z+1)z * E(z) + \frac{K_D}{T} (z-1)^2 * E(z)$$

$$z^2 U(z) - z U(z) = K_P [z^2 E(z) - z E(z)] + \frac{K_I T}{2} [z^2 E(z) + z E(z)] + \frac{K_D}{T} [z^2 E(z) - 2z E(z) + E(z)]$$

$$U(z) - z^{-1} U(z) = K_P [E(z) - z^{-1} E(z)] + \frac{K_I T}{2} [E(z) + z^{-1} E(z)] + \frac{K_D}{T} [E(z) - 2z^{-1} E(z) + z^{-2} E(z)]$$

$$u(k) = u(k-1) + K_P [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_I T}{2} [e(k) + e(k-1)] + \frac{K_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

3. Démonstration de l'équation récurrente du PI

$$D(z) = K_P + \frac{K_I T}{2} \left(\frac{z+1}{z-1} \right)$$

$$U(z) = D(z) * E(z)$$

$$U(z) = K_P * E(z) + \frac{K_I T}{2} \left(\frac{z+1}{z-1} \right) * E(z)$$

$$U(z) * (z-1) = K_P(z-1) * E(z) + \frac{K_I T}{2} (z+1) * E(z)$$

$$zU(z) - U(z) = K_P[zE(z) - E(z)] + \frac{K_I T}{2} [zE(z) + E(z)]$$

$$U(z) - z^{-1}U(z) = K_P[E(z) - z^{-1}E(z)] + \frac{K_I T}{2} [E(z) + z^{-1}E(z)]$$

$$u(k) = u(k-1) + K_P[e(k) - e(k-1)] + \frac{K_I T}{2} [e(k) + e(k-1)]$$

4. Algorithme d'anti-dépassement dynamique

```

float ALGO_AntiWindup( float proportionel , float integral ,
                        float min, float max) {

    float limite_max_integreur , limite_min_integreur = 0.0;

    if (max > proportionel)
        limite_max_integreur = max - proportionel;
    else
        limite_max_integreur = 0.0;

    if ( min < proportionel )
        limite_min_integreur = min - proportionel;
    else
        limite_min_integreur = 0.0;

    if ( integral >= limite_max_integreur )
        return limite_max_integreur;

```

```
    else if ( integral <= limite_min_integreur )  
        return limite_min_integreur;  
  
    return integral;  
}
```

ANNEXE III

GRAPHIQUES SUPPLÉMENTAIRE

1. Algorithme d'anti-calage

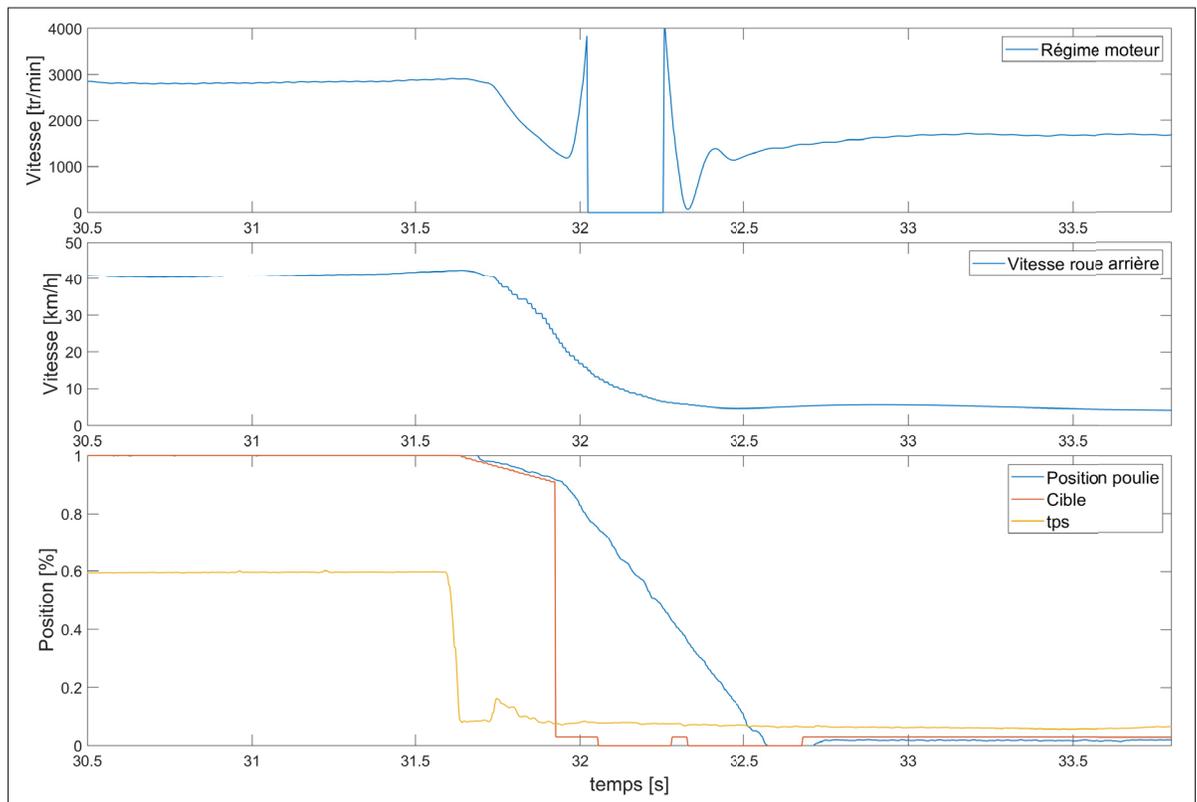


Figure-A III-1 Relâchement de l'accélérateur durant l'anti-calage

2. SystemView

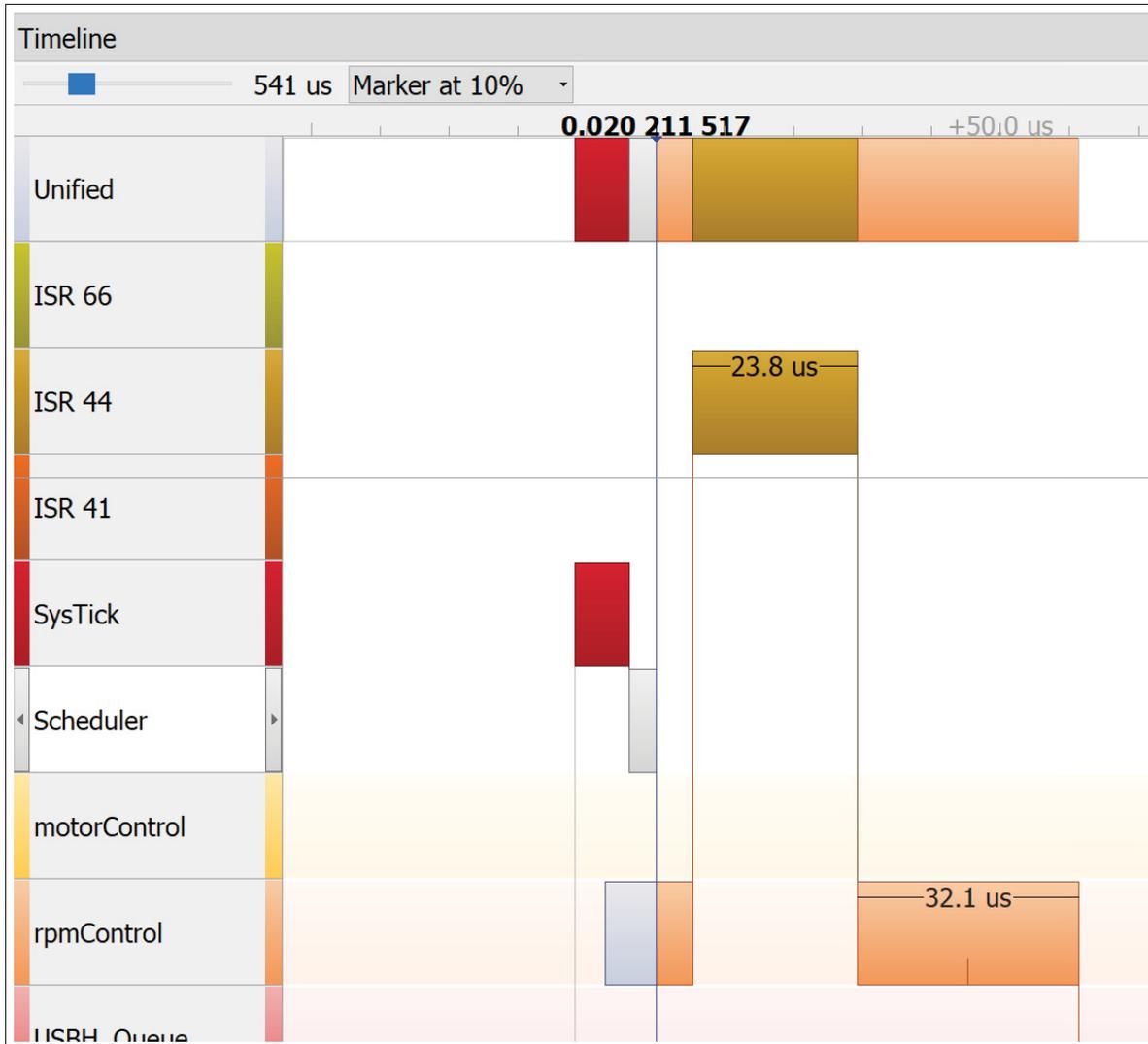
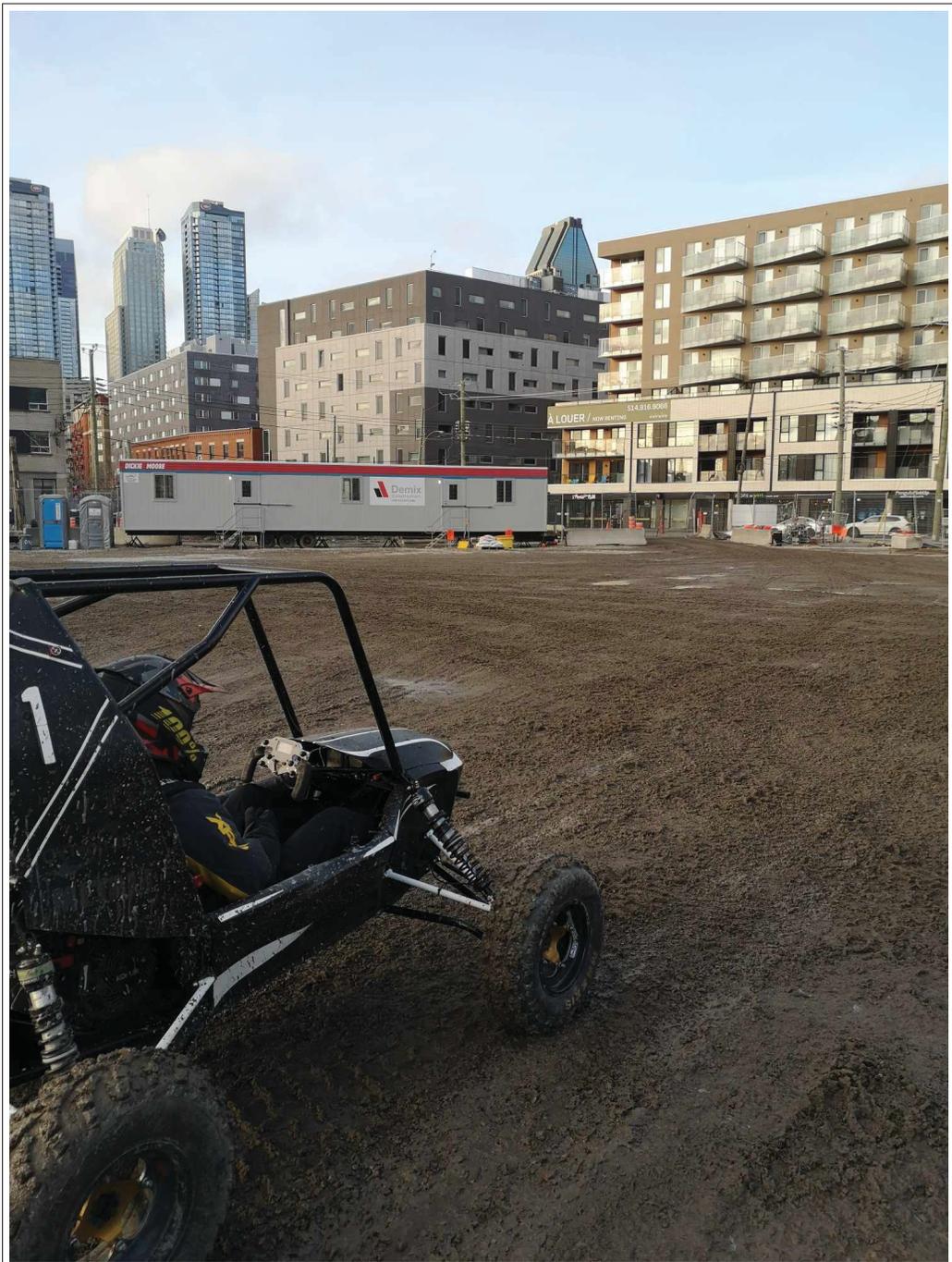


Figure-A III-2 Interruption d'une tâche

ANNEXE IV
CONDITIONS DES ESSAIS

1. Site de l'accélération sur boue



2. Piste de l'ÉNA où a eu lieu le parcours de reprise



LISTE DE RÉFÉRENCES

- Aaen, O. (2015). *Aaens Clutch Tuning Handbook : For Serious Racers and Anyone who Wants More Performance From Their Variable Ratio Belt-Transmission*. Aaen Performance.
- Amos, B. (2020). *Hands-On RTOS with Microcontrollers : Building real-time embedded systems using FreeRTOS, STM32 MCUs, and SEGGER debug tools*. Birmingham, UK : Packt Publishing Ltd. doi : 1-83882-928-8.
- Ariyono, S., Tawi, K. B., Jamaluddin, H., Hussein, M. & Supriyo, B. (2007). Adaptive Neural Network Optimisation Control of ICE for Vehicle with Continuously Variable Transmission. *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, pp. 257-262.
- Aström, K. J. (2022). ME 155A : Control System Design [Notes de cours]. Repéré à <https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom.html>.
- Bourassa, G. C. (2005). *Ajustement de la transmission à variation continue du Mini-Baja ÉTS*. Montréal.
- Ghooi, M. R. & Hote, Y. V. (2018). Design of PI controller for position control system using Kronecker summation approach : Experimental validation. *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1-6. doi : 10.1109/PICC.2018.8384821.
- Guzzella, L. & Onder, C. H. (2010). *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems* [2nd]. doi : 978-3-642-10775-7.
- Guzzella, L. & Schmid, A. (1995). Feedback Linearization of Spark-Ignition Engines with Continuously Variable Transmissions. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 3(1), 54-60.
- Hardy, A., Bernick, J., Capdevila, N. & Perry, T. (2019). *Electronic CVT - Controls*. BS in Mechanical Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- Instruments, T. (2018). *DRV8343-Q1 12-V/24-V Automotive Gate Driver Unit (GDU) with Independent Half Bridge Control and Three Integrated Current Sense Amplifiers*. Fiche technique, Dallas, TX.
- Jacob, D. (2000). *Régulation PID en génie électrique : études de cas*. Paris : Ellipses. doi : 978-2-7298-0075-8.

- Kim, W. & Vachtsevanos, G. (2000). Fuzzy Logic Ratio Control for a CVT Hydraulic Module. *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 151–156. doi : 10.1109/ISIC.2000.882915.
- Klaassen, T. T. (2007). *The Impact CVT : Dynamics and Control of an Electromechanically Actuated CVT*. (Thèse de doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands).
- Krosschell, B. D., Nelson, S. L., Gillingham, B. R., Wenger, U., Fredrickson, D. L., Grajkowski, K. J., Meyer, P., Frost, D. E., Kohler, B. R., Zurbruegg, R., Erasmus, P. J. & Peterman, J. I. (2016). *patentus n°9429235B2*. Medina, MN : Polaris Industries Inc.
- Muthukrishnan, V. (2021, April, 11). Active Low Pass Filter : Design and Applications. Repéré à <https://www.electrical4u.com/active-low-pass-filter/>.
- Nise, N. S. (2011). *Control systems engineering* (éd. 6). Hoboken, NJ : Wiley.
- Nuri, N. R. M., Hudha, K. & Rahman, M. L. H. A. (2022). Experimental of CVT Ratio Control Using Single Actuator Double Acting Electro-mechanical Continuously Variable Transmission. Dans *Recent Trends in Mechatronics Towards Industry 4.0* (vol. 730, pp. 659-668). Singapore : Springer Singapore.
- of Michigan, U., University, C. M. & of Detroit Mercy, U. (2021). Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Introduction : PID Controller Design. Repéré à <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>.
- Phillips, C. L. & Nagle, H. T. (1995). *Digital control system analysis and design* (éd. 3rd). Englewood Cliffs, N.J : Prentice Hall. doi : 978-0-13-309832-7.
- Pinard, M. (2007). *Commande électronique des moteurs électriques* (éd. 2). Paris : Dunod "L'Usine nouvelle".
- Podder, P., Hasan, M. M., Islam, M. R. & Sayeed, M. (2014). Design and Implementation of Butterworth, Chebyshev-I and Elliptic Filter for Speech Signal Analysis. *International Journal of Computer Applications*, 98(7), 12.
- Roberge, H., Levasseur, D. & Brind'Amour, F. (2011a). *patentus n°20110277577A1*. Drummondville, QC : Individual.
- Roberge, H., Levasseur, D. & Mercier, C. (2011b). *patentus n°8682549B2*. Drummondville, QC : CVTech Inc.

- Rorabaugh, C. B. (1992). *Circuit design and analysis : featuring C routines*. New York : McGraw-Hill.
- SAE. (2023, Octobre). Scores & Results. Repéré à <https://www.bajasae.net/res/ResultsLanding.aspx>.
- Salmony, P. [Phils's Lab]. (2020, Mai, 22). PID Controller Implementation in Software - Phil's Lab #6 [Vidéo Youtube]. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=zOByx3Izf5U>.
- Technologies, B. (2016, August, 2). Filter Topology Face Off : A closer look at the top 4 filter types. Repéré à <https://blog.bliley.com/filter-topology-face-off-a-closer-look-at-the-top-4-filter-types>.
- Thibodeau, P. (2021). *Calibration CVT*. Drummondville, QC : CVTech.
- Veenhuizen, P., Bonsen, B., Klaassen, T., Albers, P., Changenet, C. & Poncy, S. (2004). *Pushbelt CVT Efficiency Improvement Potential of Servo-electromechanical Actuation and Slip Control*. Repéré à <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=85443baf19d1a5927f670cd5579e232eb292b384>.
- Wanhammar, L. & Saramäki, T. (2020). *Digital filters using MATLAB*. Springer Cham. doi : 78-3-030-24063-9.
- Zhang, L., Zhai, Y. C., Zhao, H. X. & Chen, G. J. (2011). Research on Control Strategy and Experiment of Electronic Mechanical Continuously Variable Transmission. *Applied Mechanics and Materials*, 88-89, 191-196.

BIBLIOGRAPHIE

- Bonsen, B., Steinbuch, M. & Veenhuizen, P. (2005). CVT Ratio Control Strategy Optimization. *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 227-231.
- Meerakker, K., Rosielle, P., Bonsen, B. & Klaassen, T. (2004). Design of an electromechanical ratio and clamping force actuator for a metal V-belt type CVT. *Information and Computation/information and Control - IANDC*, 1-6.
- St-Martin, D., Gagnon, G., Dion-Déry, R. & Renaud, S. (2019). *Conception et optimisation du système de CVT électronique du Baja ÉTS*. Rapport de PFE, École de Technologie Supérieure, Montréal.