



ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

PROPULSION D'UNE VOITURE DE FORMULA STUDENT

PROJET DE BACHELOR

Johan Germanier
Valentin Riat
Robin Ottinger

17 septembre 2021

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Motivation	1
2	Voiture	3
2.1	Machine d'état	3
2.1.1	États	3
2.1.2	Transitions	4
2.1.3	Activation AIRs	5
2.2	Hardware	5
2.2.1	Precharge	6
2.2.2	Discharge	7
2.3	Contrôle	9
2.3.1	Limitation en couple	9
2.3.2	Différentiel	13
2.3.3	Contrôleur de traction	16
3	Banc de test	18
3.1	Description général	18
3.2	Contrôle des Moteurs	18
3.3	Banc de test avec une source de tension connectée au réseau	19
3.3.1	Principe de fonctionnement	19
3.3.2	Le problème des situations transitoires	19
3.3.3	La machine d'état	20
3.4	Banc de test avec la voiture	20
3.4.1	Principe de fonctionnement	20
3.4.2	Procédure d'allumage du banc de test	21
4	Cyclage	22
4.1	Motivation	22
4.2	Hardware	22
4.3	Sécurité	23
5	Conclusion	24
6	Annexes	25
6.1	Procédures	25
6.1.1	Cyclages	25
6.1.2	Test-Bench	30
6.2	Graphes TTC	36

Table des figures

2.1	Schéma de la machine d'états	4
2.2	Séquence d'activation des AIRs	5
2.3	Puissance dissipée par la résistance de precharge et temps nécessaire à la charge	6
2.4	Tension lors de la décharge	8
2.5	Cercle de friction d'un pneu	10
2.6	Ellipse de friction (à g.) et force latérale à dr.) issues de FSAE TTC	11
2.7	Flowchart de l'algorithme de limitation du couple	12
2.8	Modèle géométrique du steering Ackermann	13
2.9	Plot de l'angle des roues de Mercury en fonction du travel du volant	14
2.10	Schéma des forces exercées par les roues arrières	14
2.11	Force longitudinale en fonction du slip ratio (Base de donnée TTC)	16
3.1	Schéma de principe du banc de test avec bilan de puissance (en bleu, à droite)	19
3.2	Procédure de freinage pour ne pas créer de surtension	20
3.3	Schéma de principe du banc de test avec le bilan de puissance (en bleu, à droite) pour une accélération	21
4.1	Schéma électrique du cyclage	23

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Formula Student est une compétition d'ingénierie entre universités dont l'objectif est de concevoir et de produire une voiture de course. Seuls les étudiants sont autorisés à participer et la voiture doit suivre un grand nombre de règles et des normes de sécurité très strictes. Les véhicules sont ensuite évalués selon leur qualité de design et leur performance sur plusieurs épreuves statiques et dynamiques.

Les épreuves statiques, qui ne nécessitent pas de faire rouler la voiture, servent à vérifier le bon fonctionnement de tous les systèmes.

Une fois les épreuves statiques passées avec succès, les équipes peuvent prendre part aux épreuves dynamiques. Celles-ci sont composées d'une accélération en ligne droite, d'un skidpad (circuit en 8), d'une course d'autocross à effectuer le plus rapidement possible et d'une épreuve d'endurance.

En 2021, trois catégories sont disponibles pour inscrire une équipe : Thermique, Électrique et Driverless.

L'EPFL Racing Team, qui représente l'EPFL, participe dans la catégorie électrique.

Cette année, l'équipe est principalement composée de nouveaux membres, pour la plupart étudiants en bachelor. La voiture que nous avons construite cette année est le fruit de deux années de travail intensif, l'édition 2020 ayant été annulée à cause de la pandémie de COVID-19.

Le projet que nous vous présentons est notre participation à cette aventure : La conception des systèmes de contrôle, de l'électronique de puissance et d'un banc de test pour notre voiture : Mercury.

1.2 MOTIVATION

L'électronique de la voiture est dotée de plusieurs systèmes pouvant être très complexes.

Les règles de la compétition nous imposent des normes de sécurité strictes qui doivent être respectées à la lettre.

Étant en charge de l'électronique de puissance nous devons nous assurer que tout fonctionne bien et créer des circuits de protections adaptés afin que notre voiture puisse être validée par les experts.

Cela inclut des systèmes de protection du matériel tels que les relais, les circuits de pré-charge et de décharge aussi bien que des sécurités pour les humains tels que les connecteurs, boîtiers, TSAL (Tractive System Activated Light)

Les systèmes de contrôles ont eux pour rôles d'orchestrer tout le fonctionnement des différents circuits de la voiture grâce à l'ordinateur de bord.

Notre objectif était de créer un système embarqué qui assure la sécurité et l'autonomie de la voiture. Cela inclut donc la mesure de tous les paramètres internes du véhicule via les capteurs, le traitement de ces données, la gestion des erreurs et une réaction adaptée à chacune d'entre elles.

Pour accélérer le processus de vérification et correction des systèmes, l'équipe a décidé de construire un banc de test.

Le banc a comme objectif de pouvoir conduire des tests sur la globalité des systèmes. Ainsi, tous les problèmes issus de l'interaction entre les différents circuits pourraient être résolus dans notre atelier. Cela permettrait un gain de temps énorme, car les chances d'être bloqués lors d'un test de conduite à cause d'une erreur de programmation ou d'un circuit électrique seraient grandement réduites.

CHAPITRE 2

VOITURE

2.1 MACHINE D'ÉTAT

2.1.1 ÉTATS

La section "EV 4.11 : Activating the Tractive System" du règlement *Formula Student Rules 2020* explique la procédure de mise en marche de la voiture. Cette section impose trois états : TSOFF, TSON et R2D (Ready-to-Drive).

- TSOFF : les AIRs (Accumulator Insulator Relay) sont ouverts, la batterie est isolée du reste de la voiture.
- TSON : les VSIs sont connectés à la batterie mais ils ne sont pas encore actifs.
- R2D : la voiture est active, les moteurs répondent à la pédale d'accélérateur.

Ces états représentent le strict minimum pour respecter les règles. Trois états supplémentaires sont nécessaires au bon fonctionnement de la voiture. Ces nouveaux états sont :

- Init : initialisation de tous les appareils au démarrage
- PreCharge : limitation du courant de charge des VSI lors de leur mise sous tension
- Error : déconnexion de la batterie, les moteurs ne répondent plus.

Tous ces états peuvent être résumés dans un schéma :

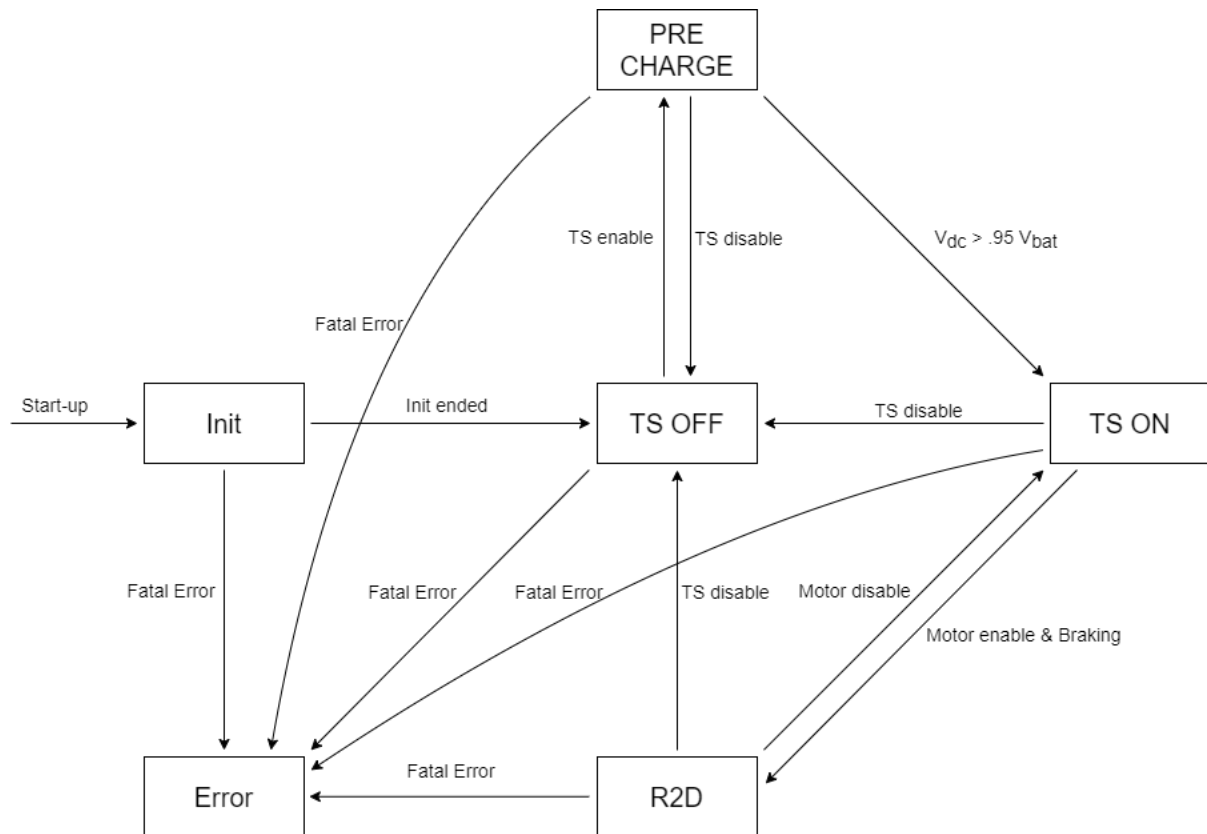


FIGURE 2.1
Schéma de la machine d'états

2.1.2 TRANSITIONS

Les transitions entre les états sont soit effectuées de manière automatique, soit effectuées suite à une action du le pilote.

- Start-up : le programme se lance automatiquement lors de la mise sous-tension du système LV
- Init ended : tous les capteurs et appareils communiquent correctement
- TS Enable : le pilote active le switch TS Enable dans le cockpit
- TS Disable : le pilote désactive le switch TS Enable dans le cockpit
- $V_{dc} > .95V_{bat}$: la tension sur les VSIs atteint 95% de la valeur de tension de la batterie
- Motor enable & braking : le pilote applique les freins et appuie sur le bouton Motor Enable dans le cockpit
- Motor disable : le pilote appuie sur le bouton Motor Enable
- Fatal Error : détection d'une erreur critique

TS Enable est un interrupteur, on s'intéresse à sa position ; alors que Motor Enable est un bouton poussoir, on s'intéresse à son flan montant.

Pour avoir un fonctionnement intuitif, la séquence d'allumage fonctionne de manière analogue à une voiture classique. Le switch TS Enable prend la fonction de "mettre le contact". Alors que le bouton Motor Enable est analogue au bouton "Engine Start/Stop"

2.1.3 ACTIVATION AIRS

L'alimentation du HV des VSIs est contrôlée avec des AIRs. La limitation du courant de charge se fait à travers une résistance de precharge. Pour des raisons de packaging, la precharge se fait sur le pôle négatif de la batterie.

La question, faut-il respecter une séquence particulière lors du passage entre Precharge et TS On, peut se poser.

- Activation du AIR- alors que le precharge est encore activé : à la fin du precharge, la différence de tension entre V_{bat} et V_{dc} et donc le courant de charge sont négligeables. Activer AIR- alors que le precharge est encore activé est donc possible.
- Délais entre la désactivation du precharge et l'activation du AIR- : ce délais entraîne une chute de tension car les VSIs se déchargent lentement à travers une grosse résistance de décharge. Si ce délais est raisonnablement court, quelques dizaines de millisecondes, la tension n'a pas le temps de beaucoup baisser. La différence de tension, donc le courant d'appel sera petit. Ce courant sera bien inférieur à la limite posée par le fabricant. Un délais est donc autorisé
- Désactivation du precharge et activation du AIR- parfaitement simultanée : ce cas est idéal mais physiquement improbable. Car les AIRs ne sont pas exactement similaires, il y a du bruit, etc. Ce cas se situe entre les deux précédents, il ne pose donc aucun problème.

La commutation des AIRs peut se faire simultanément ou avec un léger délais. La séquence ne requiert aucun feedback des AIRs ce qui simplifie la programmation. La mesure de tension V_{dc} est suffisante pour connaître l'état des AIRs.

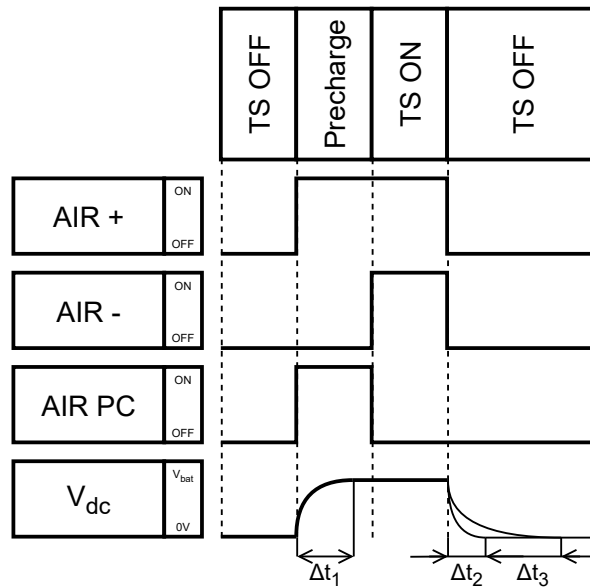


FIGURE 2.2
Séquence d'activation des AIRs

2.2 HARDWARE

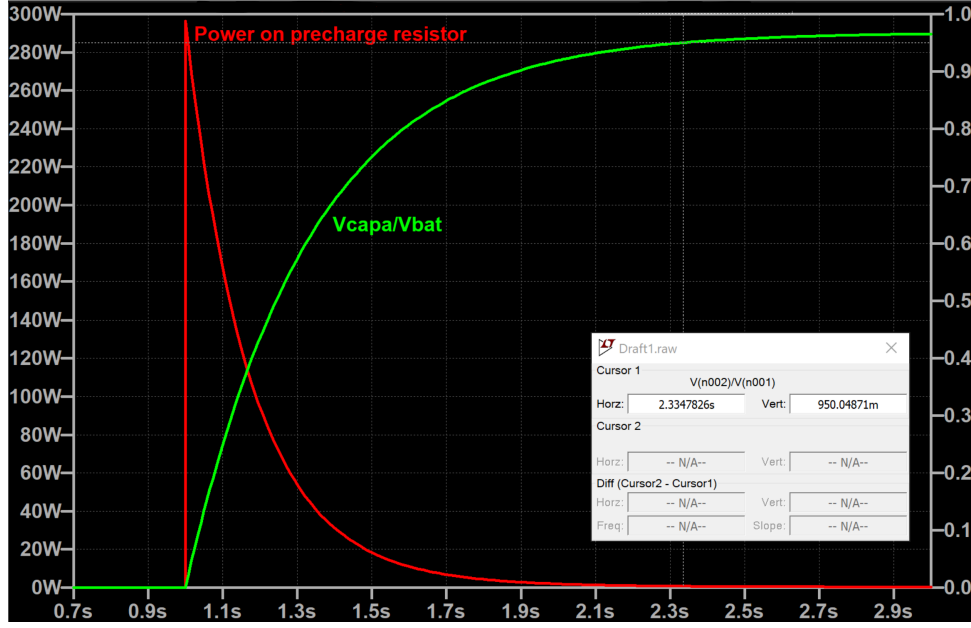


FIGURE 2.3

Puissance dissipée par la résistance de precharge et temps nécessaire à la charge

2.2.1 PRECHARGE

Dans la section " 4.7 : Battery Connection" de la *datasheet des VSIs*, le constructeur recommande un courant de charge inférieur à 20A par VSI. La résistance adaptée serait au minimum :

$$R_{PreCharge} > \frac{V_{bat,Max}}{I_{tot}} = \frac{403V}{20A + 20A} = 10.07\Omega$$

Les résistances en parallèle des capacités du VSI et la résistance de precharge forment un diviseur résistif. La résistance maximum pour pouvoir obtenir 95% de la tension de la batterie sur le VSI est de :

$$\begin{aligned} \frac{R_{VSI}}{R_{VSI} + R_{preCharge}} &> 0.95 \\ \Leftrightarrow R_{preCharge} &< R_{VSI} \cdot \frac{1 - 0.95}{0.95} = (50k\Omega // 50k\Omega) \cdot \frac{1 - 0.95}{0.95} = 1.3k\Omega \end{aligned}$$

Les contraintes sur la résistance sont : $10.07\Omega < R_{pc} < 1.3k\Omega$. La valeur qui a été retenu est $R_{preCharge} = 540\Omega$ car elle permet d'avoir une bonne marge dans le cas où la résistance en parallèle est plus petite que prévu¹ tout en limitant la puissance dissipée par cette résistance.

De plus, comme on peut le voir avec le curseur de la figure 2.3, le temps de precharge reste très raisonnable (2.4s) même avec une résistance aussi grande.

1. Le data logger, fourni par les officiels des compétitions, est branché en parallèle des capacité, sa résistance n'est pas connue

2.2.2 DISCHARGE

La section " EV 4.9 : Discharge Circuit" du règlement *Formula Student Rules 2020* impose que, suite à l'ouverture du Shutdown Circuit engendrée par un défaut ou une urgence, la tension sur bus DC des VSIs descende sous les 60VDC en maximum 5 secondes.

Le relais qui contrôle la décharge doit donc avoir un contact NC. Le circuit de décharge doit se fermer quand l'alimentation de la bobine est coupée.

De plus, ces résistances doivent résister à la tension maximum du TS de manière permanente. Elles doivent donc dissiper une certaine puissance.

Résistance maximale utilisable :

Avec : $t = 5 [s]$, $C = 2 \cdot 320 = 640 [\mu F]$, $U_c = 60 [V]$ et $U_{Max} = 403 [V]$

$$U_c = U_{Max} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$t = -RC \cdot \ln \left(\frac{U_c}{U_{Max}} \right)$$

$$R = \frac{-t}{C \cdot \ln \left(\frac{U_c}{U_{Max}} \right)} = 4.1 [k\Omega]$$

Pour avoir un peu de marge et pour optimiser la taille des composants, une résistance de $1.5[k\Omega]$ en série avec une résistance de $2[k\Omega]$ pour avoir une valeur totale de $3.5 [k\Omega]$ ont été choisies. Ces résistances de discharge sont en parallèle avec les résistances de décharge des deux VSIs, $50 [k\Omega]$ chacun, et de la résistance du datalogger s'il est connecté.

La résistance équivalente est donc : $R_{dis} // R_{VSI1} // R_{VSI2} = 3.07[k\Omega]$

Le temps de décharge est de $t = -RC \cdot \ln \left(\frac{U_c}{U_{Max}} \right) = 3.7 [s]$ sans le datalogger. En compétitions, lorsque le datalogger sera branché, la décharge se fera un peu plus rapidement ; $0.2[s]$ plus vite si la résistance interne du datalogger est de $50 [k\Omega]$. Dans le cas où les VSIs se déchargent dans leurs propres résistances de décharge, la tension atteint 60 [V] en 30 [s].

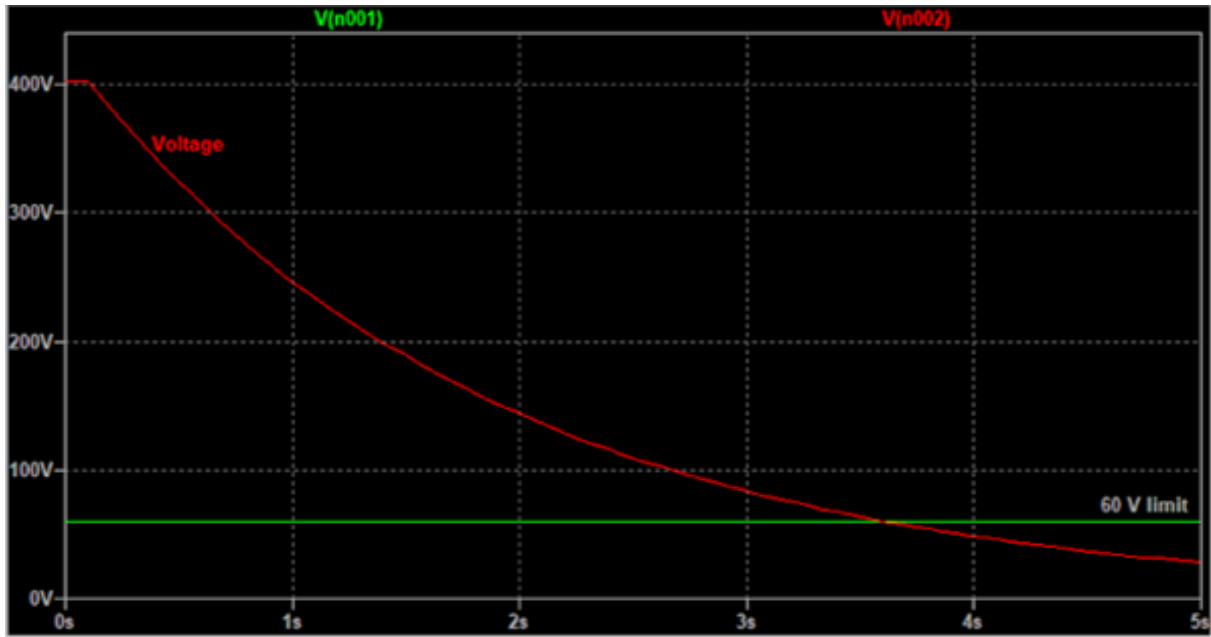


FIGURE 2.4
Tension lors de la décharge

Le courant du discharge à travers les résistances est d'au maximum $\frac{U}{R} = \frac{403}{3500} = 115 \text{ [mA]}$. Ce qui donne une puissance de 26 [W] pour la résistance de $2[k\Omega]$ et 19.88 [W] pour la résistance de $1.5[k\Omega]$.

2.3 CONTRÔLE

2.3.1 LIMITATION EN COUPLE

Les seuls moyens de contrôle dont le pilote dispose sont le volant, la pédale d'accélérateur et la pédale de frein.

Le véhicule est équipé de nombreux capteurs qui permettent de connaître l'état de conduite et d'adapter le couple moteur avec une bien meilleure précision.

La première étape primordiale à implémenter est la limitation en couple. Cette limitation doit prendre en compte plusieurs restrictions physiques et électriques, à savoir :

- Une puissance totale à la sortie des batteries de 80 kW
- La perte d'adhérence dans un virage lorsque le couple des roues est trop important
- La perte d'accélération linéaire lorsque le glissement est trop grand

Un bon moyen d'estimer la puissance en temps réel est d'utiliser la puissance mécanique sortant des moteurs :

$$P_{mec} = \Omega \cdot T_{moteur} \quad \text{Avec } \Omega \text{ la vitesse angulaire et } T_{moteur} \text{ le couple moteur}$$

La formule simplifiée suivante peut-être utilisée afin de poser une limite de couple combiné.

$$T_{combined,max} = \frac{P_{max}}{\Omega_{RL} + \Omega_{RR}}$$

Remarquez qu'il s'agit d'une formule simplifiée, car les pertes dans les moteurs et dans les circuits électriques ne sont pas prises en compte. Les moteurs de Mercury, deux Emrax188, ont un rendement pouvant varier de 92% à 98%. Comme les 80kW sont mesurés au niveau de la batterie, il faut réduire la puissance disponible pour la propulsion.

Un modèle de perte simple sera utilisé pour les premiers tests. :

$$P_{actual} = P_{max} \cdot \eta_{Motor} \cdot \eta_{VSI} \cdot \eta_{gearbox} \cdot \eta_{Battery} \quad (2.1)$$

Une définition précise des pertes en fonction du couple et de la vitesse de rotation sera facile à obtenir une fois que le test bench ou la voiture sera opérationnel(le). D'ici là, une limite de puissance inférieure sera utilisée.

Il faut ensuite limiter le couple en fonction de l'adhérence. Pour cela, le "Cercle de friction" se révèle très utile.

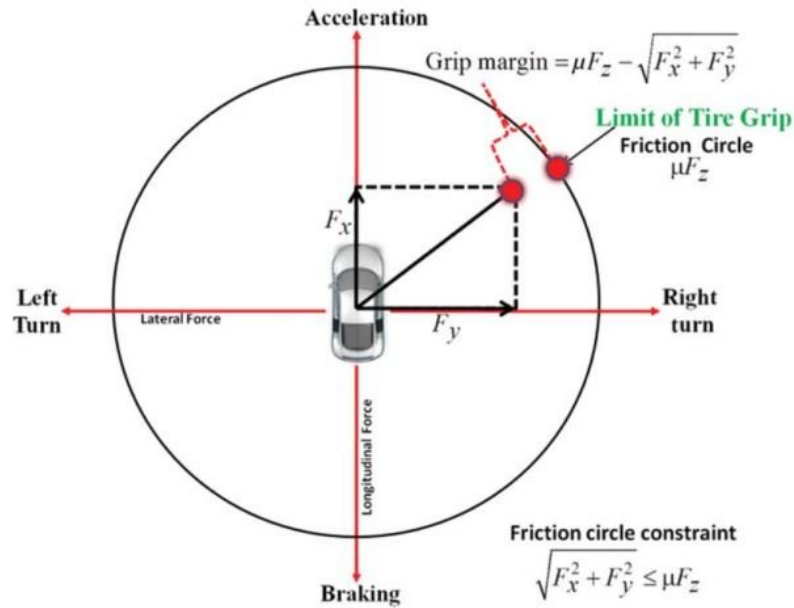


Figure 1. Friction circle of a tire.

FIGURE 2.5
Cercle de friction d'un pneu

Ce cercle représente la force maximale que peuvent transmettre les pneus dans toutes les directions. En pratique, le cercle est en fait une ellipse et est une propriété des pneus. Le seul moyen de connaître cette limite avec une précision correcte est en utilisant des mesures expérimentales.

Heureusement, l'EPFL Racing Team, comme toutes les autres équipes FSAE, a accès à une base de donnée (FSAE Tire Testing Consortium) comportant les données de divers tests effectués sur nos pneus (Hoozier 43075 R25B).

Une lookup table est utilisée à partir de ces données, à défaut de posséder un modèle suffisamment complet de nos pneus.

Pour pouvoir l'utiliser, encore faut il connaître le coefficient de friction latéral μ_y . Celui-ci est donné par :

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z}$$

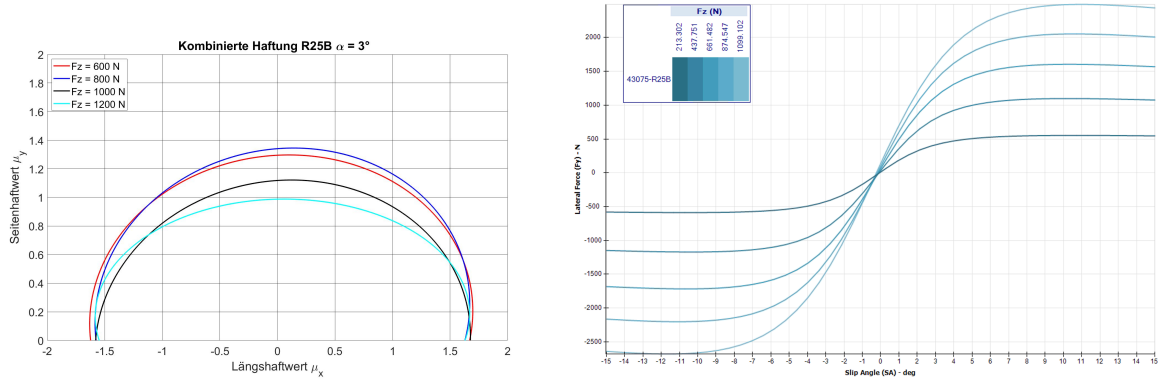


FIGURE 2.6
Ellipse de friction (à g.) et force latérale à dr.) issues de FSAE TTC

La force de frottement latérale est également une propriété des pneus obtenue via les données expérimentale de FSAE TTC. Elle est fonction du slip angle :

$$S_a = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad [\text{deg}]$$

Les forces normales appliquées sur chaque roue de la voiture sont affectées par la force aérodynamique et le déplacement de masse :

$$Fz_{aero,R} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot A \cdot \xi \cdot V_x^2 \quad (2.2)$$

$$Fz_{aero,F} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot A \cdot (1 - \xi) \cdot V_x^2 \quad (2.3)$$

Avec C le coefficient de lift, ρ la densité de l'air, A l'aire frontale projetée et ξ le coefficient de répartition aérodynamique avant-arrière.

$$F_{transfer,x} = m \cdot h_{CG} \cdot \frac{1}{l_{wb}} \cdot a_x \quad (2.4)$$

$$F_{transfer,y,front} = m \cdot h_{CG} \cdot \frac{1}{l_{fr}} \cdot \theta \cdot a_y \quad (2.5)$$

$$F_{transfer,y,rear} = m \cdot h_{CG} \cdot \frac{1}{l_{fr}} \cdot (1 - \theta) \cdot a_y \quad (2.6)$$

Avec m la masse du véhicule, h_{CG} la hauteur du centre de gravité, l_{wb} la longueur de wheel base, l_{fr} la longueur du front rack et θ un coefficient de déplacement avant-arrière.

Les forces normales sur chaque roues sont données par :

$$Fz_{FL} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \eta + Fz_{aero,F} - F_{transfer,y,front} - F_{transfer,x} \quad (2.7)$$

$$Fz_{FR} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \eta + Fz_{aero,F} + F_{transfer,y,front} - F_{transfer,x} \quad (2.8)$$

$$Fz_{RL} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot (1 - \eta) + Fz_{aero,R} - F_{transfer,y,rear} + F_{transfer,x} \quad (2.9)$$

$$Fz_{RR} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot (1 - \eta) + Fz_{aero,R} + F_{transfer,y,rear} + F_{transfer,x} \quad (2.10)$$

Avec g l'accélération de pesanteur et η la répartition de masse avant/arrière.

En utilisant les lookup tables évoquées plus haut, la force longitudinale maximum applicable sur chaque roue motrice peut être obtenue.

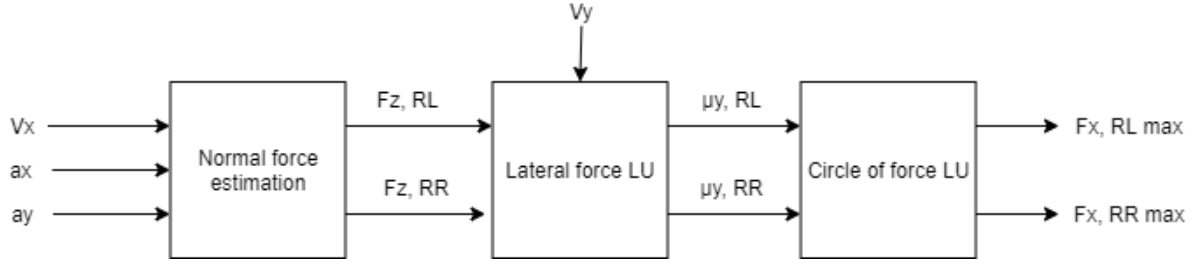


FIGURE 2.7
Flowchart de l'algorithme de limitation du couple

Le couple maximum de chaque moteur peut directement être obtenu :

$$T_{moteur} = F_{x,max} \cdot r_{eff} \cdot K_{gear} \quad (2.11)$$

Avec r_{eff} le rayon effectif de la roue et K_{gear} le rapport de transmission de la gearbox.

2.3.2 DIFFÉRENTIEL

L'objectif d'un différentiel électronique est de répartir le couple de façon optimale entre les roues motrices.

Il faut d'abord pouvoir fixer une trajectoire idéale que la voiture doit suivre. Le seul contrôle sur la vitesse angulaire, ou "yaw rate", de la voiture dont dispose le pilote est le volant. En utilisant le modèle géométrique dont est issu le système de direction de Mercury, la trajectoire correspondante à l'angle du volant peut être calculée.

Le modèle d'un steering d'Ackermann est construit comme suit :

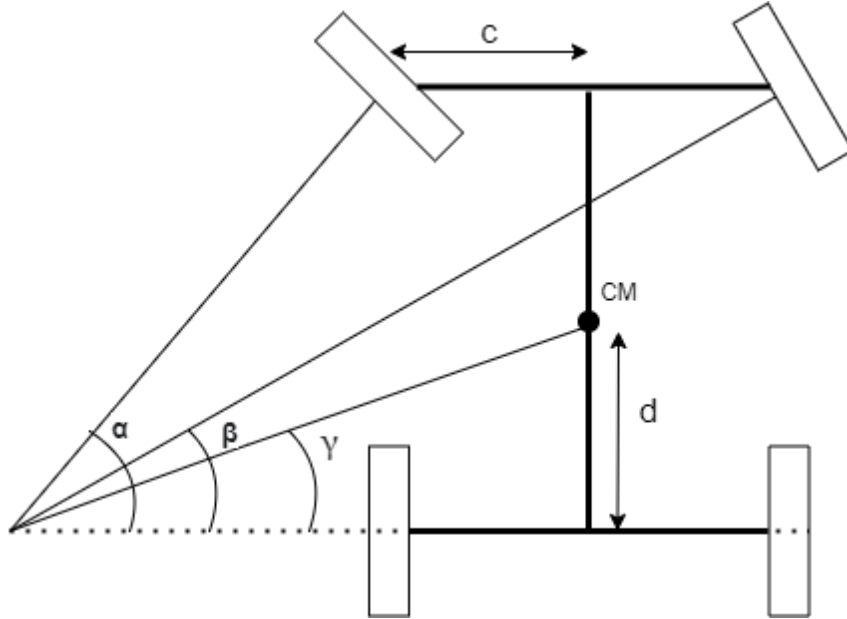


FIGURE 2.8
Modèle géométrique du steering Ackermann

Avec c et d des paramètres géométriques connus de la voiture, α et β les angles des roues et γ l'angle formé entre le centre de masse, le centre de courbure et l'essieu arrière.

Remarquez que dans ce modèle tout point de la voiture peut-être placé sur plusieurs cercles dont le centre est commun. Le rayon de courbure au centre de masse peut être calculé comme suit :

$$r_{\alpha} = \frac{2d}{\sin \alpha} \quad \text{Rayon de courbure de la roue intérieure}$$

$$r_{\beta} = \frac{2d}{\sin \beta} \quad \text{Rayon de courbure de la roue extérieure}$$
(2.12)

$$l_{\alpha} = r_{\alpha} \cdot \cos \alpha \quad \text{Projection des rayons de courbure sur l'essieu arrière}$$

$$l_{\beta} = r_{\beta} \cdot \cos \beta$$
(2.13)

$$r_{CM} = \sqrt{\left(\frac{l_{\alpha} + l_{\beta}}{2}\right)^2 + d^2} \quad \text{Rayon de courbure du centre de masse}$$
(2.14)

Il est essentiel d'utiliser les angles des deux roues pour calculer r_{CM} car le système de direction a été conçu avec un toe-in d'environ 3°. Le résultat final fait que les roues avant n'ont pas exactement le même centre de courbe, mais la voiture exerce plus de force latérale.

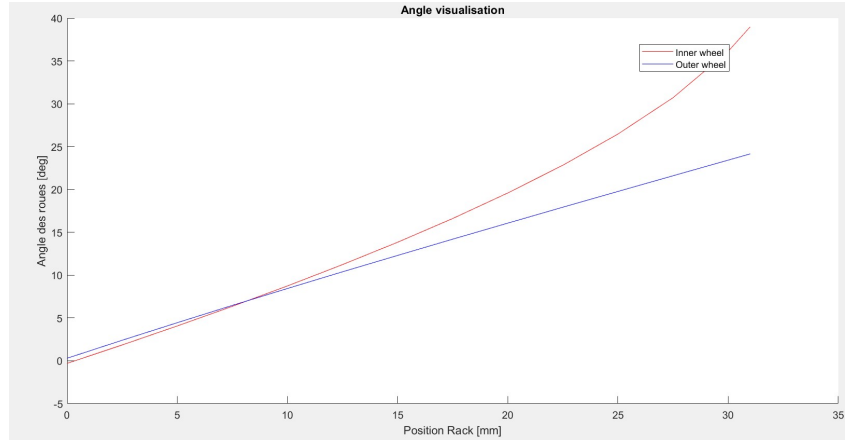


FIGURE 2.9
Plot de l'angle des roues de Mercury en fonction du travel du volant

Avec le rayon de courbure idéal et la vitesse instantanée connue, le yaw-rate cible peut être calculé :

$$\dot{\psi}_{target} = \frac{V_x}{2\pi r_{CM}} \quad (2.15)$$

Le différentiel agit sur le moment de yaw en appliquant un couple différent à chaque roue.

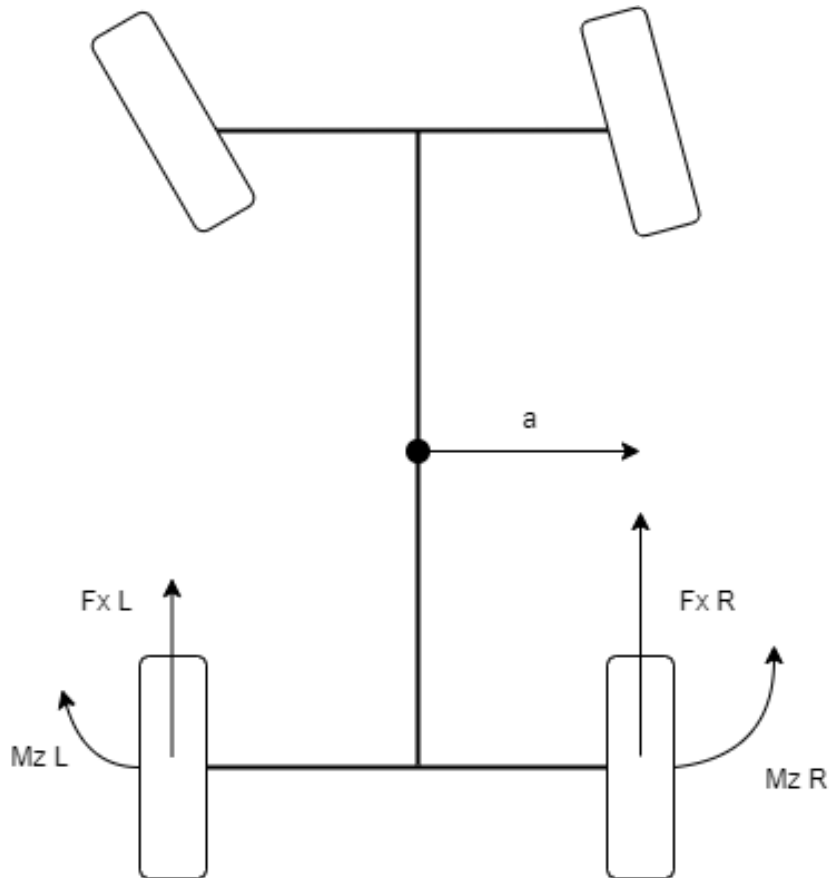


FIGURE 2.10
Schéma des forces exercées par les roues arrières

Avec a la longueur du bras de levier, Fx_L et Fx_R les forces longitudinales exercées par les roues arrières. Le moment de yaw peut être calculé à partir des forces de réactions longitudinales :

$$Mz_R = Fx_R \cdot a \quad (2.16)$$

$$Mz_L = -Fx_L \cdot a \quad (2.17)$$

$$Mz = Mz_R + Mz_L = a (Fx_R - Fx_L) \quad (2.18)$$

En remplaçant la force par les couples moteurs :

$$Fx = K \cdot \frac{T_{in}}{R_{wheel}}$$

$$Mz = a \cdot K \cdot \frac{T_R - T_L}{R_{wheel}}$$

La différence de couple exercée par les roues motrices génère donc un moment de yaw sur le véhicule. Le contrôle en situation de conduite sera différent selon l'état de la voiture.

MODE DE CONDUITE STABLE

Lorsque la voiture se comporte de façon normale, c'est à dire lorsque les pneus adhèrent correctement à la route, l'objectif du différentiel est simplement d'améliorer les performances de la voiture sans que le pilote en ait même conscience.

Pour cela le couple doit être distribué de façon à augmenter la vitesse maximale dans un virage, ou réduire le rayon de courbure minimal à vitesse donnée.

De manière générale, cela consiste à ajouter un moment de yaw dans la même direction que le yaw rate afin d'aider la voiture à tourner. Mais en observant la dérivée du yaw rate, un système basique peut être conçu.

$$\ddot{\psi} = \frac{a_x}{2\pi r_{curve}} \quad (2.19)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{Fx}{2\pi m r_{curve}} \quad (2.20)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{T_L + T_R}{2\pi m r_{curve} R_{wheel}} \quad (2.21)$$

En appliquant les lois de la dynamique de rotation sur eq. 2.20 :

$$\ddot{\psi} = \frac{Mz_{motor} - Mz_{reac}}{I_{car}} \quad (2.22)$$

$$\frac{T_L + T_R}{2\pi m r_{curve} R_{wheel}} = \frac{Mz_{motor} - Mz_{reac}}{I_{car}} \quad (2.23)$$

$$(2.24)$$

$$Mz_{motor} = (T_R + T_L) \frac{I}{2\pi m r_{curve} R_{wheel}} + Mz_{reac} \quad (2.25)$$

Avec I le moment d'inertie de la voiture et Mz_{reac} Le moment de réaction généré par les pneus. Lorsque l'angle de glissement est faible, il est proportionnel au slip ratio (voir fig. 2.6). C'est l'hypothèse qui sera prise en compte lors du choix des paramètres du différentiel.

Le modèle paramétrique choisi est le suivant :

$$T_R - T_L = \frac{K_1 \cdot (T_R + T_L)}{r_{curve}} + K_2 \cdot S_a \quad (2.26)$$

$$(2.27)$$

Où S_a est l'angle de glissement en degré.

CONTRÔLEUR EN DÉRAPAGE

Lorsque la voiture dérape, le contrôle décrit plus tôt n'est plus suffisant car il ne prend pas en compte le comportement non linéaire des pneus.

Mercury est pourvue d'un estimateur d'état capable de détecter les capteurs faussés. Il est aussi capable de déterminer lorsque la voiture est en situation de dérapage, car lors d'un "tête à queue" les informations des capteurs ne sont plus cohérentes par rapport à un comportement de conduite classique.

Lorsque cela arrive, le différentiel prend la décision exceptionnelle de contourner l'estimateur d'état et de se fier uniquement à l'INS (Inertial Navigation Sensor). Le mode de contrôle change également afin de remettre la voiture dans une situation normale le plus rapidement possible.

Le choix s'est porté sur un contrôleur proportionnel qui devra être accordé lors de tests spécifiques. Il est très compliqué de sélectionner les coefficients de façon analytique à cause de la nature non-linéaire de la conduite en dérapage. Le contrôleur en mode dérapage sera de la forme :

$$T_R - T_L = K \cdot (\dot{\psi} - \dot{\psi}_{target}) \quad (2.28)$$

ACCORDAGE DES COEFFICIENTS

Pour le contrôleur en conduite normale, l'objectif est de prendre un virage donné le plus rapidement possible sans perdre l'adhérence. L'épreuve de skidpad est parfaite pour ce genre de tests. Le pilote devra accomplir des tours de skidpad le plus rapidement possible en faisant varier les coefficients du différentiel. Les coefficients donnant la meilleure vitesse de cornering seront conservés.

Pour le contrôleur en dérapage, le pilote devra volontairement déraiper et le temps de récupération ainsi que le confort du pilote seront utilisés afin de sélectionner les coefficients finaux, car le modèle parfait reste celui avec lequel pilote est le plus à l'aise.

2.3.3 CONTRÔLEUR DE TRACTION

Le contrôleur de traction a pour objectif de maximiser le couple en ligne droite sans pour autant déraiper. Pour cela il faut se baser sur un modèle des pneus.

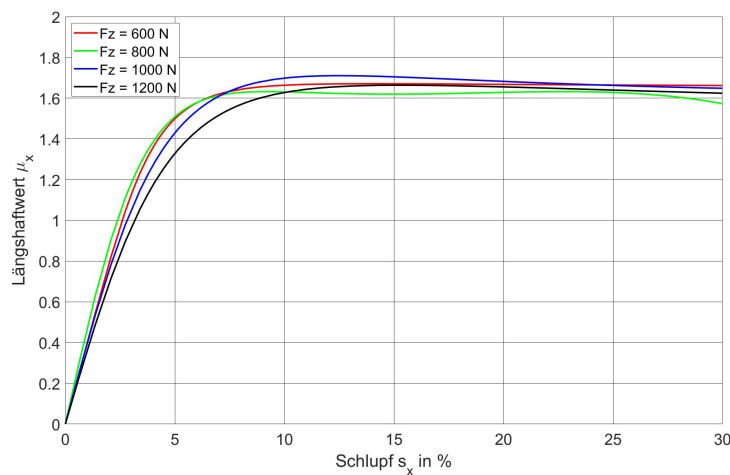


FIGURE 2.11
Force longitudinale en fonction du slip ratio (Base de donnée TTC)

Avec le slip ratio d'une roue défini comme :

$$S_x = 1 - \frac{V_x}{\Omega_{wheel} \cdot R_{wheel}} \quad (2.29)$$

Le rapport de glissement, ou slip ratio, définit le rapport entre la vitesse de la voiture et celle de la roue. Il existe un glissement optimal, environ 10-15% pour lequel une force de réaction maximale est transmise à la voiture.

Le principe du contrôle en traction est donc de passer d'un contrôle en couple à un contrôle en vitesse avec comme consigne :

$$\Omega_{target} = \frac{V_x}{R_{wheel} \cdot (1 - S_{x,opt})} \quad (2.30)$$

Avec $S_{x,opt}$ le rapport de glissement optimal.

Il est possible de mettre ce contrôle en application de deux manières :

- Un contrôleur programmé dans le sbRIO avec les commandes en couple envoyé aux VSI
- Utiliser provisoirement des commandes en vitesse et laisser le contrôleur interne du VSI faire le travail.

Les deux méthodes ont leurs avantages.

En programmant "à la main" le contrôleur, les limites de couples sont totalement maîtrisées, puisque les commandes sont envoyées en couple. En contrepartie, des délais sont ajoutés car les communications CAN ont un délai, que ce soit pour les commandes ou le feedback du resolver.

En utilisant le contrôleur (avec coefficients programmables) du VSI ces délais sont réduits significativement et le système tournera avec une fréquence bien plus élevée et aura donc une meilleure réponse aux perturbations. En revanche, le couple de sortie ne sera pas spécifié, et il sera donc nécessaire d'envoyer des limitations en courant via le bus CAN.

Utiliser le contrôleur du VSI en mode vitesse semble plus performant, mais des tests sur le testbench seront nécessaires pour confirmer la validité des limites en courant vis-à-vis de la règle des 80kW.

CONDITIONS D'ACTIVATION DU CONTRÔLE EN TRACTION

Le contrôle en traction est un mode à utiliser uniquement en cas d'accélération forte en ligne droite. L'estimateur d'état devra confirmer la conduite normale, car l'utilisation de ce mode serait catastrophique dans une situation de dérapage.

En plus de cela, les capteurs du volant devront indiquer une ligne presque droite, c'est à dire un angle faible des roues.

L'accélérateur devra quand à lui être enfoncé à 100%.

Dans ces conditions uniquement le mode de contrôle en traction sera enclenché.

CHAPITRE 3

BANC DE TEST

3.1 DESCRIPTION GÉNÉRAL

Le banc de test a pour but de tester les moteurs ¹ en charge et, à terme, de tester toute la voiture pendant que les moteurs tournent et produisent de la puissance.

Le banc de test consiste en deux moteurs couplés par un arbre. Le premier consomme de la puissance pour tourner alors que le deuxième freine le premier et fonctionne donc en génératrice. Chaque moteur possède un VSI ² qui le contrôle indépendamment de l'autre. Ceux-ci sont alimentés par une bus DC commun connecté à une source de tension pouvant aller jusqu'à 750V, 60A et 15kW. Cependant, le but final est de les alimenter chacun avec une batterie séparée.

3.2 CONTRÔLE DES MOTEURS

Il est possible d'envoyer à chaque VSI autant des commandes de couples, que des commandes de vitesses. Dans un premier temps, pour éviter que le système ne soit instable et que les moteurs s'emballent, le moteur est commandé en vitesse alors que la génératrice est commandée en couple. Ainsi, une vitesse de fonctionnement stable est garantie et il est possible de définir le couple de freinage que le moteur devra contrer pour maintenir cette vitesse.

Une fois que la voiture entière sera sur le banc de test, tous les moteurs seront contrôlés en couple car ceux de la voiture agiront comme s'ils étaient en courses alors que ceux qui les freinent simuleront les forces que la voiture subira sur la route. La stabilité du système sera garantie par le modèle avec lequel les génératrices seront contrôlés.

1. Le mot moteur est utilisé dans ce rapport pour faire référence aux machines électriques mais il est entendu qu'ils peuvent être utilisés en moteur comme en génératrice

2. Voltage Source Inverter

3.3 BANC DE TEST AVEC UNE SOURCE DE TENSION CONNECTÉE AU RÉSEAU

3.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Dans le cas avec la source de tension (cf. figure 3.1), le courant généré par la génératrice est directement réutilisé par le moteur et la source ne fournit que la différence de courant dû aux pertes. Ainsi, dans cette configuration, il est possible d'alimenter un système comprenant une génératrice alors que la source ne peut que fournir du courant et pas en absorber. Une telle disposition demande tout de même qu'une attention particulière soit portée aux phénomènes transitoires (accélération, freinage) pour ne pas casser la source. Ces questions sont explorées dans la section suivante.

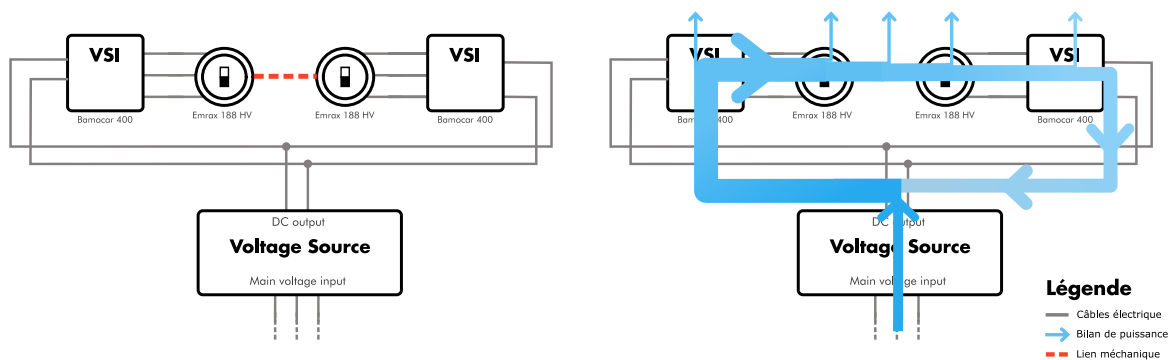


FIGURE 3.1

Schéma de principe du banc de test avec bilan de puissance (en bleu, à droite)

3.3.2 LE PROBLÈME DES SITUATIONS TRANSITOIRES

Comme mentionné ci-dessus, le problème principal lié à l'utilisation de notre source de tension est qu'elle ne peut que fournir du courant. Un bilan de puissance positif dans le système n'aurait donc d'autre choix que de s'accumuler dans les capacités des VSI, ce qui créerait une surtension fatale pour la source. Il convient donc de s'assurer qu'à aucun moment, plus de puissance n'est produite que consommée. Pour cela, décomposons l'utilisation du banc de test en trois parties :

L'ACCÉLÉRATION : Lorsque le système accélère, par définition, le moteur consomme plus que la génératrice. Ainsi, la source devra fournir du courant au système et il n'y a donc aucun risque de casse.

LA VITESSE CONSTANTE : En théorie, lorsque la vitesse est constante, le moteur consomme autant que la génératrice. Cependant, avec les pertes, la source doit tout de même fournir du courant au moteur. Dans ce cas aussi, il n'y a pas de risque de casse.

LE FREINAGE : Pour ce mode d'utilisation, si le moteur reçoit une commande de vitesse plus basse que la précédente, il va essayer de freiner activement et les deux moteurs vont fonctionner en génératrice. Dans ce cas, le courant crée une surtension dans les capacités des VSI qui va endommager la source.

Pour éviter cela, il serait tentant de couper totalement le moteur en lui envoyant une commande de couple à zéro le temps du freinage, mais dans ce cas le deuxième moteur serait toujours en train de générer de

la puissance et le bilan de puissance serait positif.

Ainsi la seule manière de freiner les moteurs sans avoir de bilan positif de puissance est de d'abord couper la génératrice en lui envoyant une commande de couple de zéro, puis, après un délai, de couper le moteur de la même façon, comme l'indique la figure 3.2.

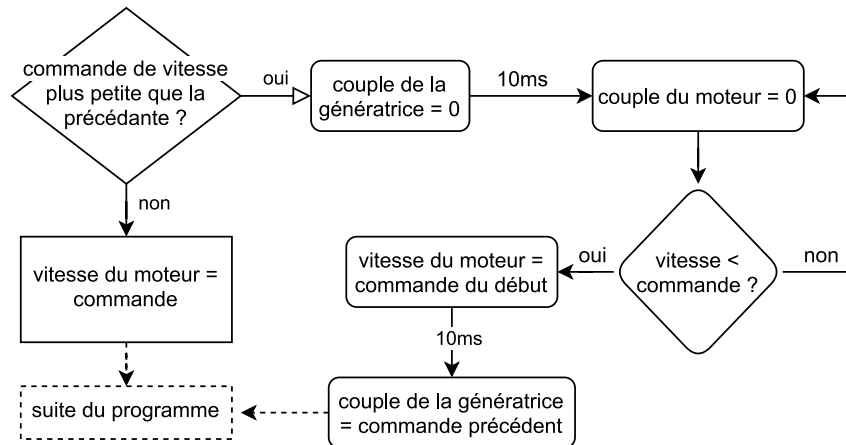


FIGURE 3.2

Procédure de freinage pour ne pas créer de surtension

3.3.3 LA MACHINE D'ÉTAT

La machine d'état du banc comporte les états suivants :

INIT : Initialisation des VSI et des variables du code

MOTOR DISABLE : Tout est prêt pour faire tourner les moteurs mais les VSI sont en mode 'standby' car le signal `Motor Disable` a été envoyé.

MOTOR ENABLE : Le signal `Motor Enable` est envoyé aux moteurs et les le code envoie une commande à chaque moteur toutes les 10ms. Les valeurs des commandes sont définies par deux curseurs que l'utilisateur peut contrôler.

En cas de problème, un bouton d'urgence permet de couper l'alimentation au signal `RUN` des VSI ce qui permet couper les moteurs rapidement et sans l'intervention du code.

Lors du passage de l'état `Motor Enable` à `Motor Disable`, le code coupe d'abord la génératrice, puis, après un délai de 10ms, le moteur. Cette procédure est effectuée de cette façon pour les raisons exposées dans la section 3.3.2.

3.4 BANC DE TEST AVEC LA VOITURE

3.4.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Ce banc de test se compose de la voiture arrimée à des bar en béton, surélevée du sol et dont les roues sont remplacées par des moteurs. Comme pour le premier banc de test, ces moteurs sont contrôlés par

deux VSIs, eux même commandés par un code labview. L'alimentation provient d'une batterie.

Comme mentionné dans la section 3.2, Ces deux moteurs ont pour rôle de s'opposer à l'accélération des moteurs de la voiture pour simuler l'inertie de celle-ci.

On voit sur la figure 3.3 que dans cette configuration, la puissance est transférée d'une batterie à l'autre. Ainsi, lorsque la voiture veut accélérer, elle tire du courant de sa batterie qui sera réinjecter dans la batterie du banc de test. À l'inverse si la voiture veut freiner, ses moteurs vont agir en génératrices alors que les moteurs du banc de test tireront du courant de leur batterie pour contrer le ralentissement du système.

Dans ce cas, il est clair que les précautions évoquées dans la section 3.2 n'ont plus lieu d'être car il est possible de charger ou de décharger une batterie sans problème. En revanche, il faut veiller à bien limiter le courant de charge si celui-ci venait à devenir trop grand.

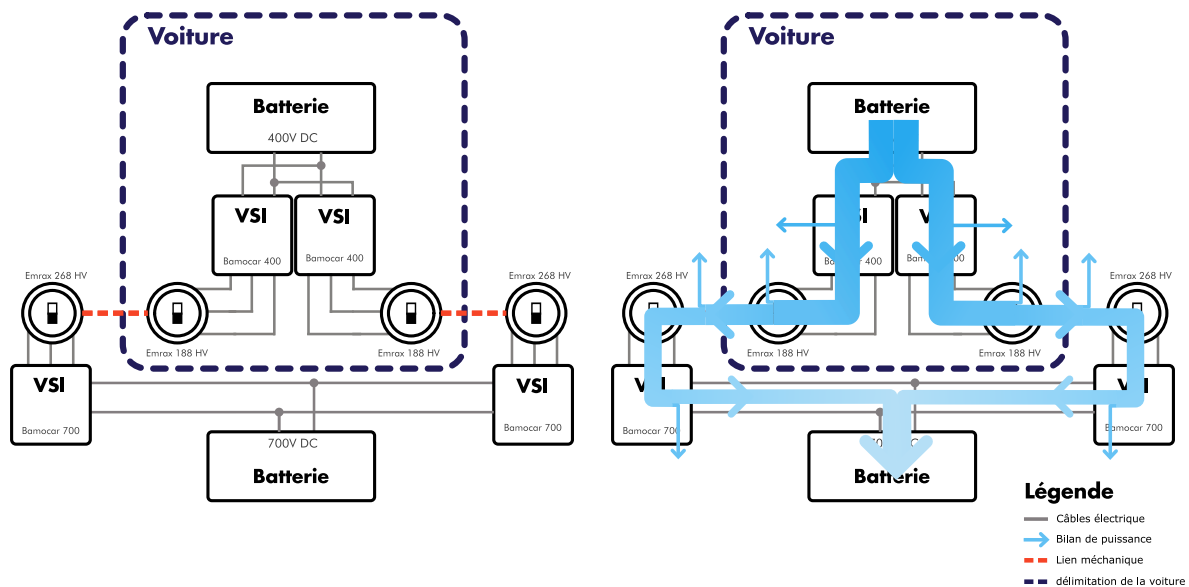


FIGURE 3.3

Schéma de principe du banc de test avec le bilan de puissance (en bleu, à droite) pour une accélération

3.4.2 PROCÉDURE D'ALLUMAGE DU BANC DE TEST

Le banc de test avec la voiture étant en construction au moment de l'écriture de ce rapport, aucun détail d'implémentation ne peut être discuté dans le cadre de ce rapport.

Cependant, une procédure d'allumage et d'arrêt du banc de test a déjà été écrite afin d'assurer une opération sécurisée du système. Elle est disponible dans les annexes (page 30).

CHAPITRE 4

CYCLAGE

4.1 MOTIVATION

La batterie de la voiture est constituée de six segments mis en série. Ces segments sont un arrangement de cellules en série et en parallèle. A la fin du processus de fabrication de ces segments, des cycles de charges, décharges et repos, à des courants et durées bien définis sont nécessaires pour optimiser la durée de vie et l'efficacité de la batterie. Ces cycles doivent être similaires pour avoir une uniformité des fonctionnement des segments . Cela nécessite une station de cyclage dédiée.

4.2 HARDWARE

Les cycles sont décomposés en trois parties :

- charge : une source externe charge le segment en limitant d'abord le courant puis la tension
- repos : aucun courant ne circule, les charges internes des cellules se redistribuent
- décharge : une charge électronique décharge le segment à un courant fixé.

La station de cyclage nécessite donc une source DC pouvant générer 21[A] sous 70[V] et une charge électronique pouvant consommer 4.2[A] sous 70[V]. Trois relais sont nécessaire pour connecter et déconnecter le segment de ces appareils.

Les relais et la source sont des éléments critiques en matière de sécurité. Ils sont donc contrôlés par un CompactRIO (c.f. figure 4.1). La charge électronique n'étant pas critique à ce niveau, elle est contrôlée manuellement par un superviseur ¹. Le programme doit aussi faire un logging des tensions et courant pour ensuite permettre l'analyse des caractéristiques électriques du segment en question.

Pour plus de sécurité encore, l'AMS peut ouvrir les relais à tout moment sans l'intervention du code via le transistor 'Q1' de la figure 4.1. Ainsi, même si le code du compactRIO ne répond plus ou est bloqué d'une façon ou d'une autre, l'AMS à toujours la capacité d'ouvrir le circuit.

1. Le superviseur doit simplement entrer le courant souhaité dans l'interface de la charge, puis celle-ci régule automatiquement le courant tiré.

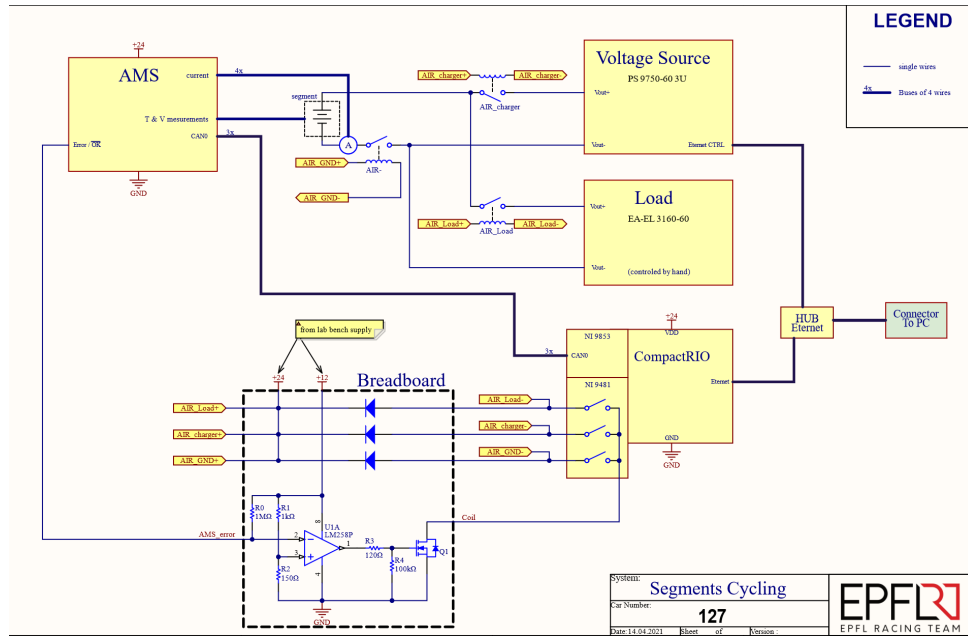


FIGURE 4.1
Schéma électrique du cyclage

4.3 SÉCURITÉ

Ce processus implique des cellules potentiellement dangereuses, le risque d'incendie est présent. Une personne instruite doit être présente en permanence et réactive. Un protocole d'utilisation est d'autant plus nécessaire.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Durant ce projet, nous nous avons développé le système embarqué pour notre voiture Mercury. En théorie, le code résultant accompli bien son travail. Cependant, il comporte encore quelques lacunes en matière de traitement d'erreurs et il n'a pas été testé en situation réelle.

L'estimateur d'état doit être implémenté dans le code pour pouvoir détecter les capteurs défectueux. Ces vérifications sont l'étape finale qui nous permettra de passer à la phase de test de la voiture avec une confiance suffisante dans notre code. Le différentiel doit également être calibré. Le protocole expérimental manque encore de précisions.

Les étapes de validations du test-bench avancent bien. Nous avons testés tous les composants individuellement, il nous reste à valider la sécurité du système dans sa globalité avant de pouvoir passer aux tests de la voiture.

Nous avons pris plus de retard que prévu sur notre programme de test, mais ce banc devrait tout de même se révéler un gain de temps énorme sur la validation des systèmes électroniques. Aussi, le mettre en opération est notre priorité absolue avant les compétitions.

Un problème de manufacture sur le dernier segment(segment de rechange) nous a empêché de terminer le cyclage. Le code d'automatisation présentant une interface simple a permis à tous les membres de la division électronique et BESS de participer aux cyclages. Cela nous a donné la possibilité d'accomplir un à deux cycles par jour, sans erreurs humaines à déplorer. De plus cela nous a donné beaucoup d'informations sur les segments de notre batterie, révélant un défaut dans le segment 5A.

CHAPITRE 6

ANNEXES

6.1 PROCÉDURES

6.1.1 CYCLAGES

Segment Cycling Procedure

The cycling procedure should always be supervised by at least two persons for safety reasons. One executing the tasks, the other carefully reading the procedure and instructing the other person.

Segment type and number :

Start time and date:

End time and date:

General Safety informations

1. Emergency number for any incident:
 - a. 115 from any fix line
 - b. SOS on EPFL app
 - c. 021 693 40 00 from any mobile device
2. In case of contact with materials from a damaged or ruptured cell or battery:
Eye contact: Washing immediately with plenty of water for at least 15 minutes.
Skin Contact: Washing immediately with water and soap.
Inhalation of vented gas: remove to fresh air. Get medical attention.
Ingestion: Get medical attention immediately.
3. Do not store cells, segments, batteries in a manner that allow terminals to short-circuit.
4. Do not place the battery near heating sources, nor expose it to direct sunlight for long periods of time.
5. If a cell or battery overheats, safely move the device away from flammable materials and place it on a non-combustible surface.
6. Never work on high-voltage cell assembly alone. Always think about your safety first and operate only if you are perfectly confident in what you are doing.

List of materials:

Name	Quantity	Description
Battery segment	1	
CPRIO	1	
LabView control program	1	
Power supply	1	
Timer	1	
Electronic Load	1	

List of instructions:

Instruction	Pass Criteria	No pass action	Pass/remark
Verify that the segment is not plugged to the circuit		Unplug the segment before any further action	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Verify that both the CMUs are correctly and rigidly mounted on the segment			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Verify that every connector of the CMUs are plugged in their respective slot on the CMU boards and that they are connected to the Master MCU.			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Turn the CPRIO on	Green LED should be blinking on top of the CPRIO		Pass : <input type="radio"/> Remark:
Turn the load and the power supply on			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Set the discharge current to C5 (4.2A) on the electronic load.			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Verify that the load is in "Standby" mode	Either "Standby" is written on the screen or the "Stanby" LED is turned on	Select the "standby" mode of the load	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Verify that the power supply "OUTPUT ON" light is off		Turn off the output of the power supply	Pass : <input type="radio"/> Remark:

Verify that the BMS is correctly working and does not detect any error			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Open the segment cycling file on LabView			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Plug the segment to the contactors in the right way : verify that the poles are correctly plugged in the right way (red plug to red connector and black plug to black connector)		Flip the segment and plug it again, in the right way.	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Set the log filename : cycling_0x_segment_yy.txt (x: # cycling, y: # segment)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Check all the values on the left of the screen	All values match	Correct the wrong values	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Run the program by clicking the arrow			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Wait a few seconds (20 s) the screen will turn Red (the BMS sends zeros for all the voltages, so errors appear)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Click <i>error latch reset</i>	The leds turn off	SPAM	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Click <i>error state reset</i>	The screen turns gray	SPAM	Pass : <input type="radio"/> Remark:
Turn on the logging by clicking <i>start save</i>			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Click <i>Connect charger</i> to charge the segment with constant voltage at 1C (21A or 15A with small supply) until the first group of cell reaches 4.15V (automatic)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Stop the charge at 1C and start charging with a constant voltage (defined by LabView when the first group of cells reaches 4.15V)(automatic)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
When the timer reaches 2 hours or if the current drops below 1A, stop the charge (automatic). The power supply can be turned off.			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Wait for 1 hour			Pass : <input type="radio"/> Remark:

Balance the whole segment with the BMS (mandatory only if it is the first charge cycle)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Press input on on the load and start discharging the segment at C5 (4.2A) through the load until the first group of cells reaches 2.7V			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Stop the discharge (automatic)			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Wait for 1 hour			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Stop the logging by switching <i>start save</i> to false			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Stop the program by clicking <i>Stop software</i>			Pass : <input type="radio"/> Remark:
Repeat from the first step 3 times for each segment			Pass : <input type="radio"/> Remark:

To charge the battery to 30% SoC, change the “Voltage” to 57[V].
Follow the procedure as usual. The CV part of the charging isn’t necessary. Press, disconnect charger whilst in CV. Wait a few minutes, stop logging and stop the programm.

6.1.2 TEST-BENCH

EPFL RACING TEAM PROCEDURES

for the test bench with the car

DATE : June 13, 2021

V1

General Preparation

Car master switches Both unplugged
Indicator light off
Test bench VSI not powered

Car Preparation

Car structure secured
Mechanical coupling of motors check
Visual check of connectors
 ↔ VSI box (2xTS, 2x 3phase, 2x resolver, 1xLV) check
 ↔ Rear box (4xTS, 11xLV) checked
AMS switch switch on
LV batterie voltage (banana plugs) above 20V

LVMS switch on
Wait 30s
FSM state on the dashboard TS OFF
(if init, just wait longer)

THE CAR IS READY

Test Bench Preparation

program `testBench_Samsung` opened
Samsung battery voltage checked, below 640V
Visual check of the connections
 ↪ Can bus between VSIs en CompactRIO checked
 ↪ Ethernet between PC, Compact and battery checked
 ↪ HV cable : battery to VSI checked
 ↪ HV cable : VSI to VSI checked
 ↪ HV cable : tree phase, VSI to motor checked
 ↪ resolver checked
 ↪ LV cables of VSIs checked
 ↪ Emergency stop wired
Cooling checked
LV sourcechecked (24V, amps limit 4A min)

LV source switch on
VSI 7-segment on, no red light
VSI current 600mA
Labview program open and launch
data receptionchecked (for VSI and AMS)

THE TEST BENCH IS READY

EPFL RACING TEAM PROCEDURES

for the test bench with the car

DATE : June 13, 2021

V1

Car Power Up

Only necessary people must be there to provide space and calm

Calmpolitely asked
emergency stop (1xcockpit 2x main hoop)rearmed
Oscilloscope with differential probe plugged in the TSMP
(Tractive System Mesuring Point)
Start-up sequenceTSOff → PreCharge → TSON → R2D
LV system current 1A (visible on dashboard)
Motor enable buttonpressed
Car state TSON
Motor test with no load
 ↪ "Power" knob (steering wheel)set on 2
 ↪Go to R2D
 ↪Gently accelerate
 ↪Both motors spins forward checked
 ↪Go to TSON Car state checked, TSON

THE CAR IS POWERED UP

EPFL RACING TEAM PROCEDURES

for the test bench with the car

DATE : June 13, 2021

V1

Test Bench Power Up

Only necessary people must be there to provide space and calm

Dataloggingset on

In the program

↪activate both motors

↪select the right mode

↪clic on connect motor

VSI voltage checked

Emergency stoprearmed

Motor enable (in the program)switch on

VSImake high pitch noise, draw 1A from LV

Motor test with no load

↪torque command increase gently

↪Both motors spins backwardchecked

↪torque command apply 0 torque

Motor enable (in the program)switch off

THE TEST BENCH IS POWERED UP

EPFL RACING TEAM PROCEDURES

for the test bench with the car

DATE : June 13, 2021

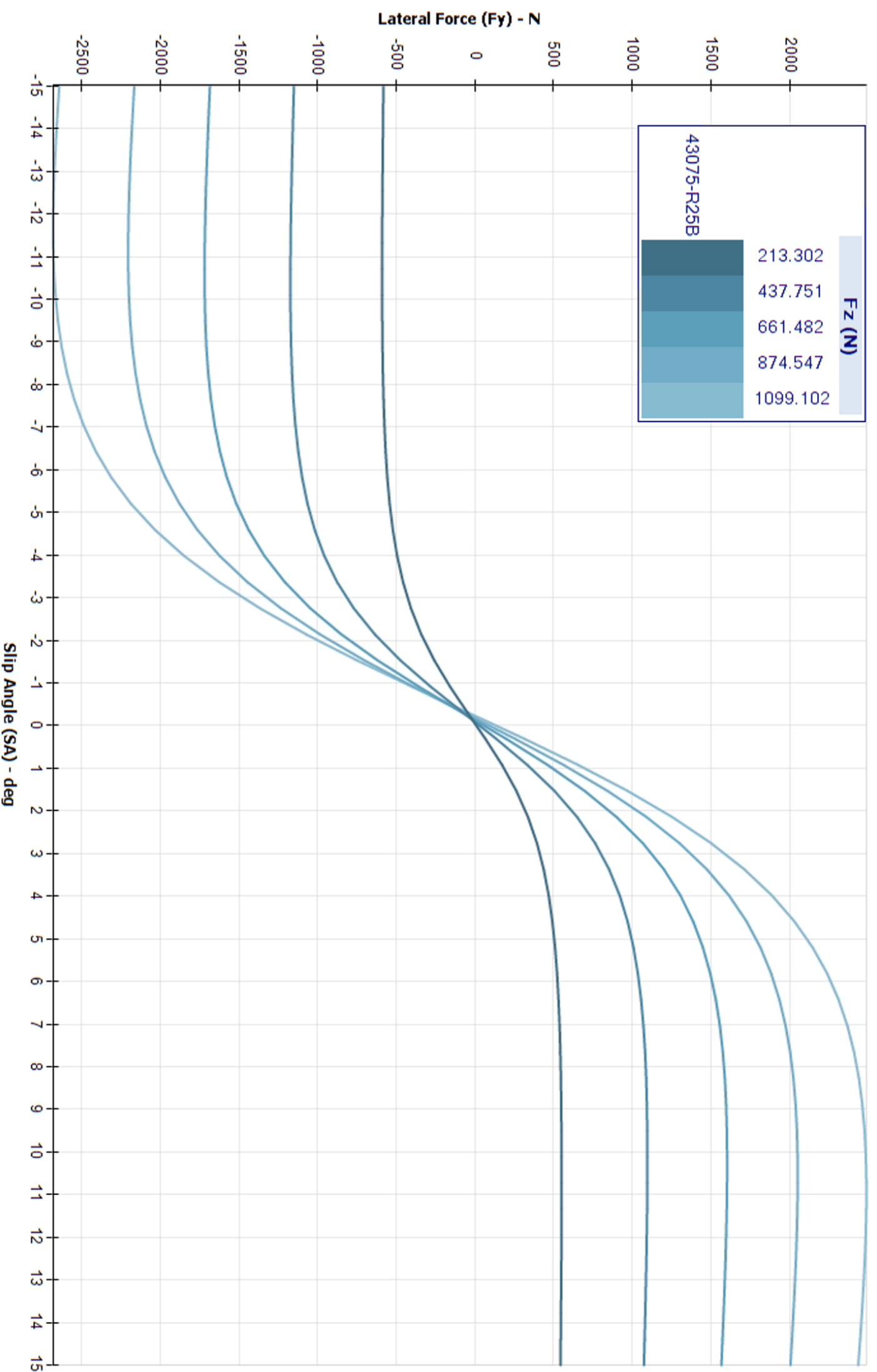
V1

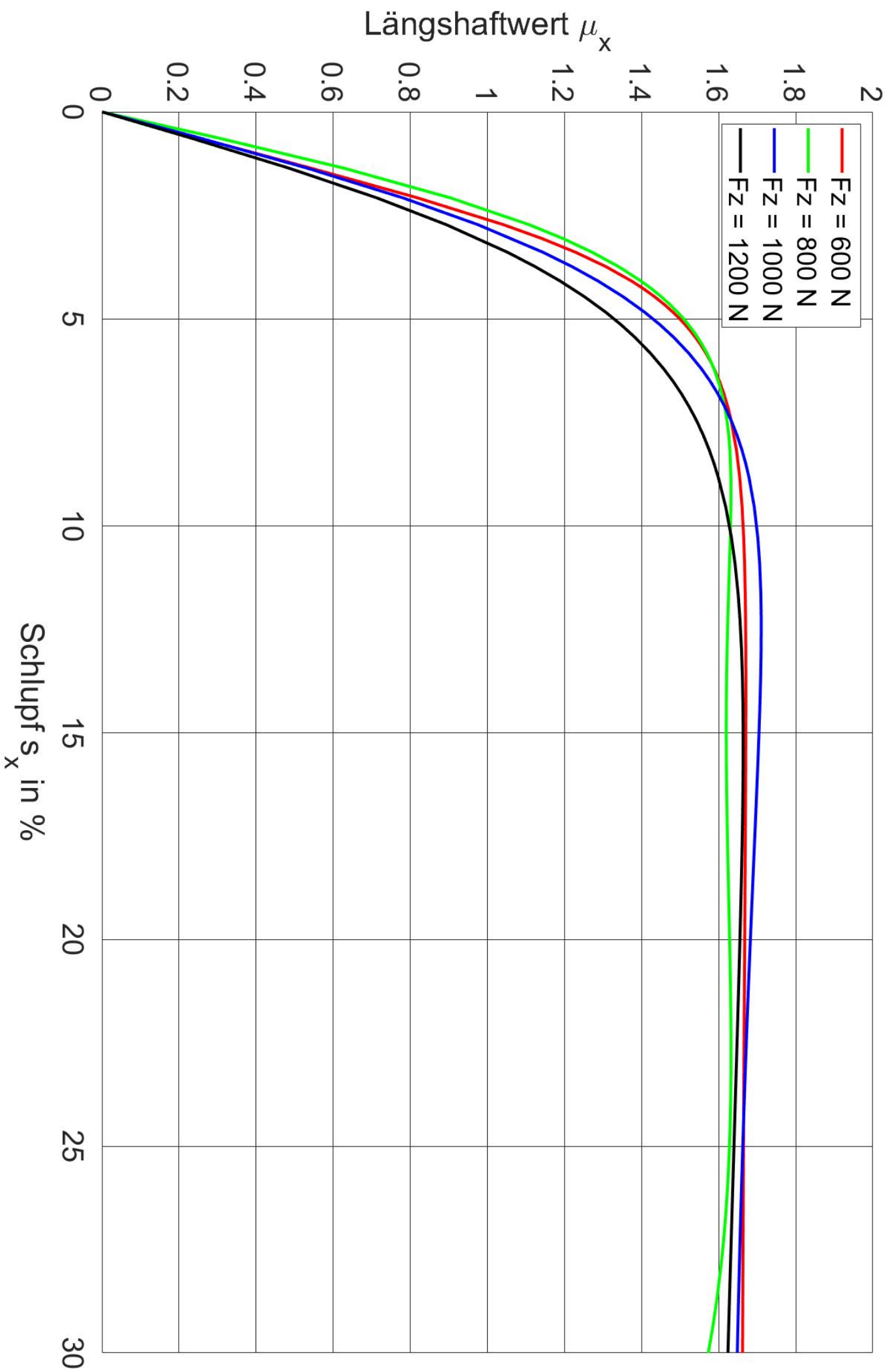
End of Tests

Car command 0 torque
TS enable of the carswitch off
TS enable of the test bench code switched off
TSMS switched off and locked
Wait for the car VSIs voltage to go under 20V
sbRIO switch off botton pressed
Wait for 15s
LVMS switched off and locked
test bench VSIs voltagebelow 20V
test bench datalogging switched off

THE SYSTEM IS POWERED OFF AND SECURED

6.2 GRAPHS TTC





Kombinierte Haftung R25B $\alpha = 3^\circ$

