

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MARC-ANDRÉ LEBLANC

ÉMULATION DE CHARGE POUR SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT CYCLISTE

DÉCEMBRE 2012

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

Cette recherche consiste à appliquer la méthode *Hardware-in-the-Loop* (HIL) à l'aide d'une représentation énergétique à un système d'émulation de charge, plus précisément, un système d'entraînement pour cycliste. Le système d'entraînement permet de reproduire le chargement dynamique que subirait le cycliste lorsqu'il évolue sur un parcours réel, mais cette fois, sur un système d'entraînement statique. L'application de la méthode HIL permet de reproduire fidèlement les effets de charge à l'aide de la commande d'une machine électrique. Tout au long de ce travail, l'accent est mis sur la modélisation du système à l'aide de la représentation énergétique macroscopique (REM) et des étapes de développement d'un système d'émulation de charge.

Pour parvenir à réaliser un banc de test fonctionnel, une modélisation du cycliste et des éléments de son environnement est établie. Cette première étape sert de fondement au développement de la commande et au modèle de la dynamique à reproduire. Par la suite, divers éléments viennent compléter le modèle afin de respecter les contraintes d'intégration. L'intégration d'estimateurs et d'un observateur permet d'éviter l'utilisation de capteurs onéreux. Une réalisation expérimentale permet de valider l'ensemble des résultats.

Table des matières

Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des symboles	ix
Chapitre - 1 Introduction.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Problématiques	3
1.3 Objectifs	3
1.4 Méthodologie.....	3
1.5 Infrastructure	5
1.6 Organisation du mémoire	5
Chapitre - 2 Système d'entraînement pour cycliste	7
2.1 Représentation Énergétique Macroscopique	7
2.2 Cadre de la modélisation	10
2.3 Spécificités du système d'entraînement	12
2.4 Développement du modèle	14
2.5 Conclusion.....	21

Chapitre - 3 Stratégie de commande	22
3.1 Contrôle de la vitesse.....	23
3.2 Estimation de la force produite.....	27
3.3 Émulation	30
3.4 Conclusion.....	33
Chapitre - 4 Résultats de simulation	34
4.1 Conditions de simulation.....	34
4.2 Émulation de charge	36
4.3 Comparaison des résultats	38
4.3.1 Estimation du couple.....	38
4.3.2 Évolution de la vitesse cycliste	38
4.3.3 Effets de l'environnement.....	40
4.4 Conclusion.....	41
Chapitre - 5 Résultats expérimentaux	42
5.1 Observation du couple cycliste.....	45
5.2 Environnement du cycliste	46
5.3 Comparaison des vitesses	47
Chapitre - 6 Conclusion	50
Chapitre - 7 Bibliographie.....	52

Annexe A – Calculs des paramètres des contrôleurs	57
Annexe B –Paramètres de simulation	59
Annexe C – Cycliste et système de traction.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1: Description des éléments de la REM [EMR-12].....	9
---	---

Liste des figures

Figure 2-1: Modèle cycliste, simplification et détermination du modèle à émuler	11
Figure 2-2 : Système d'émulation de charge.....	12
Figure 2-3 : Schéma de principe du système d'entraînement virtuel pour cycliste.....	13
Figure 2-4 : Représentation par schéma bloc et avec la REM du système d'entraînement pour cycliste.....	14
Figure 2-5 : Caractérisation du couple cycliste.....	15
Figure 2-6 : Profil de couple au pédalier produit par un cycliste.....	16
Figure 2-7 : Couplage roue et rouleau.....	16
Figure 2-8 : Inertie montage et machine cc.....	17
Figure 2-9 : Machine à cc.....	18
Figure 2-10 : Induit machine à cc	18
Figure 2-11 : Convertisseur cc, commande bipolaire	19
Figure 2-12 : Bus cc	20
Figure 2-13 : Source de courant commandée.....	21
Figure 3-1 : Chemin de commande pour le contrôle de la vitesse pour l'imposition de charge	23
Figure 3-2: Structure de commande pour le contrôle de la vitesse	23
Figure 3-3 : Inversion du couplage roue et rouleau	24
Figure 3-4 : Inversion avec contrôleur, inertie du montage	24
Figure 3-5 : Inversion de la conversion électromagnétique de la machine à cc	25
Figure 3-6: Contrôleur de courant.....	26
Figure 3-7 : Inversion convertisseur cc/cc	27
Figure 3-8 : Développement du modèle d'émulation	28
Figure 3-9: Estimation du couple et de la tension induite de la machine cc	28

Figure 3-10 : Estimation de la vitesse de la machine cc	29
Figure 3-11: Observateur du couple rouleau.....	29
Figure 3-12: Estimation de la force au rouleau	30
Figure 3-13 : Modèle dynamique du cycliste.....	31
Figure 3-14 : Modèle de l'environnement du cycliste.....	32
Figure 3-15 : Diagramme des forces exercées sur le cycliste	32
Figure 3-16 : Modélisation complète du système d'émulation de charge	33
Figure 4-1 : Profil de force cycliste utilisé en simulation	35
Figure 4-2 : Simulation de parcours du cycliste.....	36
Figure 4-3 : Intégration du modèle sous Simulink avec la bibliothèque SimPower System.....	37
Figure 4-4 : Profil de force cycliste utilisé en simulation	38
Figure 4-5 : Évolution de la vitesse du cycliste	39
Figure 4-6 : Effet du couple sur la vitesse cycliste	40
Figure 4-7 : Évolution des forces résistantes	41
Figure 5-1 : Banc d'essai.....	43
Figure 5-2 : Convertisseur cc/cc	43
Figure 5-3 : Console temps-réel RT-Lab	44
Figure 5-4 : Signal de couple imposé lors du test expérimental	45
Figure 5-5 : Profil de parcours	46
Figure 5-6 : Force imposée par le modèle d'environnement	47
Figure 5-7 : Comparaison des vitesses en simulation et lors de l'émulation sur le banc d'essais	48
Figure 5-8 : Comparaison de l'effet du couple sur la vitesse cycliste lors de la simulation et des résultats HIL	49

Liste des symboles

B : Coefficient de frottement visqueux [N.m.s]

C : Capacité du bus à courant continu [F]

$C_{aéro}$: Coefficient aérodynamique

D_{arr} : Nombre de dents de la roue dentelée arrière

D_{av} : Nombre de dents de la roue dentelée avant

E : Tension induite de la machine courant continu [V]

E_{est} : Estimation de la tension induite de la machine courant continu [V]

$F_{aéro}$: Force aérodynamique [N]

f_c : Frottement sec [N]

f_{couple} : Fréquence du signal de couple cycliste au pédalier [rad/sec]

F_{fric} : Force résistante de friction [N]

F_{grav} : Force résistante imposée par la gravité [N]

F_{rest} : Force résistante totale exercée par l'environnement cycliste [N]

F_{roue} : Force appliquée par la roue [N]

F_{roue_ext} : Estimation de la force appliquée par la roue [N]

$H(s)$: Fonction de transfert du système premier ordre à commander

I_{bus} : Courant du bus à courant continu [A]

I_{charge} : Courant transigeant vers la charge [A]

I_{conv} : Courant de sortie du convertisseur quatre quadrants [A]

I_{ext} : Courant provenant de la source externe [A]

$I_{machine}$: Courant d'armature de la machine courant continu [A]

$I_{machine_ref}$: Courant de référence de la machine cc [A]

I_{source_ext} : Courant provenant de la source externe [A]

$J_{montage}$: Inertie du banc d'essais [Kg·m²]

J_{Roue_av} : Inertie de la roue avant du vélo [Kg·m²]

J_{roue_arr} : Inertie de la roue arrière du vélo [Kg·m²]

k : Gain statique du système premier ordre à commander

kp_1 : Gain proportionnel utilisé pour la boucle de courant de la machine cc

Ki_1 : Gain de l'intégrateur utilisé pour la boucle de courant de la machine cc

kp_2 : Gain proportionnel utilisé pour la boucle de vitesse de la machine cc

Ki_2 : Gain de l'intégrateur utilisé pour la boucle de vitesse de la machine cc

kp_3 : Gain proportionnel utilisé pour l'observateur du couple rouleau

Ki_3 : Gain de l'intégrateur utilisé pour l'observateur du couple rouleau

K_{trans} : Rapport de transmission du couple cycliste à la roue

$K\Phi$: Constante de flux de la machine courant continu

L : Inductance d'induit de la machine courant continu [H]

$M_{cycliste}$: Masse du cycliste [Kg]

M_{eq} : Masse équivalente du modèle cycliste [Kg]

m_{ext} : Indice de modulation du hacheur relié à la source externe [V]

M_{velo} : Masse du vélo [Kg]

R : Résistance d'induit de la machine courant continu [Ω]

R_{Roue} : Rayon des roues du vélo [m]

$R_{rouleau}$: Rayon du rouleau [m]

S : Surface de front cycliste [m^2]

τ : Constante de temps du système premier ordre à commander

T : Période du signal MLI [s]

T_c : Frottement de coulomb [Nm]

$T_{machine}$: Couple produit par la machine à courant continu [Nm]

$T_{machine_ref}$: Couple de référence de la machine cc [Nm]

t_{on} : Temps pendant lequel le signal MLI est actif [s]

$T_{pédalier}$: Couple au pédalier [Nm]

$T_{rouleau}$: Couple du rouleau [Nm]

$T_{rouleau_est}$: Couple estimé du rouleau [Nm]

T_{roue} : Couple à la roue arrière [Nm]

U_{bus} : Tension du bus à courant continu [V]

U_{charge} : Tension moyenne à la charge [V]

U_{conv} : Tension moyenne d'entrée du convertisseur cc/cc quatre quadrants [V]

U_{conv_ref} : Tension de référence du convertisseur cc/cc quatre quadrants [V]

V_{roue} : Vitesse linéaire de déplacement du cycliste [m/s]

V_{roue_ref} : Vitesse linéaire déduite à partir de l'émulation [m/s]

α : Indice de modulation du convertisseur quatre quadrants

$\varepsilon_{forces résistantes}$: Erreur relative sur l'application des forces résistantes entre la simulation et l'émulation.

ρ : Densité de l'air [Kg/m³]

Ω_{machine} : Vitesse de rotation de la machine électrique [rad/sec]

$\Omega_{\text{machine_mea}}$: Vitesse mesurée de rotation de la machine électrique [rad/sec]

$\Omega_{\text{machine_est}}$: Estimation de la vitesse de rotation de la machine électrique [rad/sec]

$\Omega_{\text{machine_ref}}$: Vitesse de référence de la machine cc [rad/sec]

$\Omega_{\text{pédalier}}$: Vitesse du pédalier [rad/sec]

Ω_{roue} : Vitesse de rotation de la roue arrière [rad/sec]

ω_n : Fréquence naturelle désirée

ζ : Coefficient d'amortissement

Chapitre - 1 Introduction

1.1 Contexte

L'émulation de charge permet, grâce à une chaîne de commande et par des actionneurs de reproduire des effets statiques et dynamiques de chargement. Ces effets sont imposés à l'aide d'un modèle précis et sur une plage bien définie. On retrouve dans la littérature cette méthode sous l'acronyme *Hardware-in-the-Loop* (HIL) [Bouscayrol-08]. En effet, des éléments matériels s'introduisent dans un système en boucle afin de remplacer et de reproduire le comportement d'un environnement, d'une composante particulière qu'on ne peut directement utiliser lors de tests, lors de travaux de développement ou en recherche. Elle permet la validation de stratégies de commande dans le domaine des énergies renouvelables, par exemple dans le domaine de l'éolien [Li-06, Bouscayrol-09], et aussi dans le domaine des véhicules électriques [Gauchia-10, Bouscayrol-10, Zhong-06]. L'utilisation de cette méthode permet une validation virtuelle fonctionnelle [Zhou-09] des stratégies de commande d'un produit. Elle évite le déploiement de structures matérielles importantes [Gauchia-10] lors des étapes de conception et permet du fait même de réduire les retards de mise en marché [Fennibay-10]. Cependant, les applications ne se limitent pas au secteur industriel, on retrouve dans le domaine de l'entraînement de sportifs certaines utilisations où le contrôle de charge est utilisé, entre autres, dans le domaine de l'entraînement cycliste. Un contrôle de charge permet d'imposer des contraintes lors de l'entraînement. Le sujet peut alors évoluer dans un contexte bien précis, ainsi il est possible

d'étudier précisément son comportement ainsi que son évolution lors de l'entraînement [Dingwell-08, Yamaguchi-05]. Cependant, les systèmes sur le marché possèdent certaines limitations concernant l'émulation des forces. Les systèmes offerts se limitent à reproduire les forces statiques comme la friction, les effets de pentes et ne considèrent généralement pas les effets d'inerties [Bertucci-11]. Une partie de ces systèmes d'entraînement pour cyclistes sont développés afin de rendre le plus réaliste possible leur utilisation. Parmi ceux-ci, on retrouve des systèmes évolués reproduisant les effets résistants au pédalier et pourvus de capteurs de position au guidon pour la détection des virages. Ce type de système est de plus monté sur plateforme mobile [Dong-Soo-01, Ranky-10]. Toutefois, l'accent est mis sur l'effet d'immersion plutôt qu'une reproduction fidèle des forces que le cycliste doit confronter dans un environnement réel.

Dans une toute autre optique d'utilisation de systèmes d'entraînement, on retrouve dans certaines salles d'entraînement publiques, des systèmes d'entraînement pour cycliste qui permettent de récupérer l'énergie produite [Gibson-11]. Ainsi, il est possible pour ces centres d'entraînement de réduire leur consommation d'électricité mais surtout de démontrer une conscience écologique.

Cette recherche consiste donc à appliquer la méthode HIL à un système d'entraînement pour cyclistes afin de reproduire le chargement dynamique produit par un parcours prédéterminé. L'application de la méthode permettra une reproduction fidèle des effets résistifs, statiques et dynamiques, ressentis par le cycliste. L'accent sera mis sur la modélisation du système à l'aide d'une représentation énergétique et des étapes de développement d'un système d'émulation de charge.

1.2 Problématiques

La problématique principale est d'imposer un chargement mécanique représentatif de la réalité tout en récupérant de l'énergie. De plus, le système ne doit pas imposer quelque modification que ce soit au vélo. Le cycliste doit pouvoir utiliser le vélo qu'il utilise normalement. Le positionnement du cycliste influence les performances entre autres au niveau de la puissance développée. Il est donc préférable que le cycliste conserve un positionnement habituel, la position prise normalement sur son vélo, pour une évaluation représentative de ses performances [Bertucci-11].

1.3 Objectifs

Cette recherche vise à établir un système d'émulation de charge, de la modélisation à l'établissement de la chaîne de commande. La chaîne de commande permet l'émulation d'un comportement mécanique, c.-à-d. une simulation de parcours cycliste. Le tout est validé en pratique par la réalisation d'un banc d'essai.

1.4 Méthodologie

L'implantation d'un système de commande peut-être ambiguë. Les interactions entre les différentes sources énergétiques, mécaniques et électriques, peuvent occulter l'interprétation du comportement global du système. L'utilisation d'une représentation générale se basant sur les échanges énergétiques est alors pertinente. Un tel outil permet d'illustrer de façon plus claire les interactions sur le plan énergétique et oriente de façon efficace l'implantation d'une structure de commande. Le principe HIL est alors utilisé comme approche à l'aide d'un outil graphique de représentation. L'outil se nomme : Représentation Énergétique Macroscopique (REM). La méthode emploie des diagrammes blocs afin de représenter les différentes particularités d'un système énergétique. Une fois le

système modélisé avec ces blocs il est possible, suivant des règles bien précises, de développer une structure de commande appelée : Structure maximale de commande (SMC). Cette structure propose d'introduire une série de contrôleurs de manière imbriquée, configuration connue sous le nom de boucles en cascade. Le système complet est découpé en plusieurs modèles de premier ordre possédant leur propre contrôleur [Barre-06].

Une fois, notre système d'émulation en contrôle, il est possible de lui imposer certains comportements. Comme le système doit répondre à des besoins bien définis au niveau du chargement mécanique, la gestion de l'énergie doit respecter ce dernier critère tout en permettant de récupérer le maximum d'énergie. Les lois de commande pour l'émulation de la charge et de son contrôle seront déduites directement à partir de la représentation.

La modélisation du système d'entraînement virtuel pour cyclistes servira à l'élaboration des lois de commande. Ce système contient deux boucles imbriquées. Le modèle est défini avec la REM et sa structure de commande déterminée avec les règles de la SMC [Barre-06]. Du point de vue de la commande, le découplage naturel des boucles de commande permet l'utilisation de l'approche SMC courante [Barre-06].

Un banc de test est mis en place afin de démontrer la validité de l'émulation. Les résultats obtenus avec la maquette expérimentale seront confrontés au modèle de simulation. Une caractérisation des paramètres propres au système a donc été effectuée afin d'obtenir un modèle de simulation correspondant à la maquette expérimentale.

La première étape de développement de la commande consiste à identifier, modéliser et quantifier les différentes dynamiques. Entre autres, la plage de fonctionnement des machines électriques et la source d'énergie, en l'occurrence notre cycliste. Les premiers travaux sont effectués en simulation avec les paramètres physiques de chacun des éléments

et du modèle mathématique élaboré à l'aide de la REM. Par la suite, la mise en pratique des lois de commande est effectuée. Finalement, les résultats expérimentaux seront comparés à ceux obtenus lors de la simulation.

1.5 Infrastructure

Les travaux ont été effectués au sein du Groupe de Recherche en Électronique Industrielle (GRÉI) évoluant au sein de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Les laboratoires et les équipements qui s'y trouvent ont été utilisés pour la mise en œuvre, la calibration ainsi que pour les tests pratiques. Le montage pratique est constitué d'une machine électrique à courant continu et d'une machine asynchrone remplaçant le cycliste pour réaliser des tests reproductibles. Un onduleur est utilisé pour le contrôle de la machine asynchrone et un convertisseur cc/cc (pont en H) est utilisé pour le contrôle de la machine courant continu. La commande du pont en H permet un freinage bipolaire et un second mode de freinage pour la récupération d'énergie. Les commandes pour les deux machines électriques ainsi que le modèle à émuler sont mis en œuvre dans une console temps réel RT-Lab, gracieuseté du conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

1.6 Organisation du mémoire

Le travail consiste tout d'abord à développer la modélisation du système énergétique puis d'élaborer la structure de commande. Cette structure est basée sur la représentation énergétique macroscopique du système d'entraînement, c'est-à-dire, de la représentation des machines électriques, des convertisseurs de puissance ainsi que les différentes sources énergétiques. Un modèle fidèle à la réalité correspondant aux effets résistifs et dynamiques

du cycliste est établi par la suite. Les considérations pratiques et les plages de fonctionnement pour la commande sont finalement abordées.

Le mémoire se subdivise alors comme suit :

Le chapitre 2 présente le développement du modèle cycliste et de son environnement. Un schéma bloc général permet d'identifier les principaux éléments constituant le système d'entraînement. La méthode de modélisation énergétique macroscopique y est d'abord présentée puis directement appliquée au système.

Le chapitre 3 présente le développement de la commande du système d'émulation. Ce développement s'initie avec un bref modèle qui regroupe les spécificités auxquelles l'émulation doit se conformer. Des considérations pratiques y sont soulevées et l'approche de modélisation est utilisée afin de résoudre les différentes problématiques.

Le chapitre 4 regroupe l'analyse des résultats de simulation préliminaire à la mise en œuvre pratique. On y retrouve entre autres, l'organisation des fichiers de programmation qui est fidèle à la méthode de modélisation utilisée ainsi que la présentation des performances du système.

Le chapitre 5 offre une description des éléments du banc de test expérimental et présente les résultats et analyses des tests pratiques. Le comportement de l'outil de simulation y est comparé avec celui de la maquette expérimentale afin de mettre en évidence la validité de l'émulation.

Le chapitre 6 est une conclusion générale portant sur les résultats obtenus et les avenues possibles de la recherche.

Chapitre - 2 Système d'entraînement pour cycliste

Dans ce chapitre, une brève description de la REM est présentée. La méthode sera appliquée au modèle cycliste ce qui permettra de définir les interactions entre celui-ci et le système d'émulation de charge. Finalement, le modèle du système d'émulation de charge est développé avec la REM et les modèles mathématiques sont présentés.

2.1 Représentation Énergétique Macroscopique

La REM a été appliquée à plusieurs types de systèmes électromécaniques. On compte parmi eux les systèmes d'enroulement à plusieurs convertisseurs et les véhicules hybrides. Ces systèmes intègrent des éléments mécaniques et électriques couplés entre eux. Il est alors complexe d'établir un modèle clair définissant le système. La REM permet alors de modéliser efficacement l'ensemble des éléments et soulève les relations entre eux. Plusieurs travaux ont été effectués sur le sujet au Groupe de Recherche en Électronique Industrielle (GRÉI) ou en collaboration avec le GRÉI [Leclercq-04, Thiffault-05, Wankam-06, Boulon-10a] et se concentrent particulièrement sur la modélisation et les performances dynamiques du système. D'autres applications comme la production d'énergie éolienne [Bouscayrol-09] et les piles à combustible [Boulon-10b] ont fait l'objet d'études en utilisant cette représentation. Une liste plus exhaustive des applications de la méthode est présentée dans [Barre-06].

La REM est une méthode développée afin de résoudre des problèmes complexes qui impliquent des échanges énergétiques. La méthode utilise le principe d'action — réaction et est définie comme une description macroscopique d'un système [Barre-06]. Chaque sous-

Le système est interconnecté avec les autres par les variables d'action et de réaction. Le produit de ces variables correspond toujours à une puissance. Les sous-systèmes sont représentés par des blocs, qui se distinguent par leur causalité (Tableau 1).

La REM distingue différents types de processus physiques : les dissipateurs, les transformateurs d'énergie et les accumulateurs d'énergie [Béarée-06]. Ces processeurs d'énergie sont représentés distinctivement par une forme caractéristique. Les convertisseurs d'énergie se classent selon trois types : mécanique, électrique et électromécanique. Une entrée de plus leur est accordée, voir dans le tableau 1 (flèche en rouge). Elle correspond à une entrée de commande qui permet de régler la conversion d'énergie. Prenons par exemple l'indice de modulation d'un hacheur ou le sélecteur de vitesse sur une boîte de transmission mécanique qui coïnciderait avec cette entrée. La représentation des sources est effectuée par des ellipses vertes. On y retrouve des caractères permettant de distinguer la nature de l'énergie associée qu'elle soit mécanique (SM) ou électrique (SE).

Les blocs en bleu du tableau 1 correspondent aux éléments de commande. Ils constitueront la chaîne de commande appelée Structure Maximale de Commande (SMC). Ces blocs sont choisis par association directe avec les éléments de la modélisation REM telle que vue plus tôt. La définition des blocs se base sur le principe d'inversion. On en retrouve deux types soit : l'inversion directe et l'inversion avec contrôleur. L'inversion directe est associée aux relations rigides du modèle. C'est le cas de la relation force/couple pour le couplage effectué par le rouleau. Dans le domaine électrique, ce type de relation se présente comme la relation Tension bus/ Tension sortie du bloc associé à l'onduleur. Une entrée pour la compensation de perturbation peut leur être ajoutée. L'inversion avec contrôleur est utilisée avec les blocs accumulateurs d'énergie. C'est dans ces blocs

d'inversion que l'on retrouve les lois de commande. Ces derniers possèdent plusieurs entrées dédiées au besoin de valeur de référence, de mesure de la variable à contrôler ainsi que pour l'évaluation de la perturbation. Finalement, tous les éléments déterminés par la REM énumérés précédemment apparaissent avec la couleur violette lorsqu'ils sont utilisés pour établir un estimateur. L'élaboration du modèle donne un exemple détaillé de l'approche.

Tableau 1: Description des éléments de la REM [EMR-12]

REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)			
	Variables d'action et de réaction		Modèle ou estimateur (peu importe la forme)
	Accumulateur d'énergie		Source d'énergie
	Conversion monophysique		Inversion avec contrôleur
	Conversion multiphysique		Inversion directe (sans contrôle)
	Stratégie		Inversion directe (avec rejet de perturbation)

2.2 Cadre de la modélisation

Un modèle complet, basé sur la REM, du cycliste avec les caractéristiques du vélo doit être pris en compte afin de mettre en évidence les variables d'interaction qui doivent être prises en charge par le système d'émulation.

Le modèle cycliste, figure 2-1, permet d'évaluer les variables et les dynamiques en jeu de plus que leurs interactions. Le modèle du cycliste est scindé en trois parties distinctes, haut de la figure 2-1 : premièrement, une partie cycliste et traction constituée de l'ensemble du mécanisme servant à la propulsion du vélo avec les caractéristiques de la roue arrière; une partie d'interaction avec l'environnement regroupant les forces de friction avec le sol, l'inertie, les masses; et finalement un couplage mécanique reliant ces deux groupes.

Comme le cycliste, la traction ainsi que la dynamique associée à la roue arrière se retrouveront sur le système d'entraînement, ces éléments sont regroupés dans un seul bloc équivalent de source mécanique constituant l'entrée du système. Ces éléments se retrouveront naturellement au niveau du système d'entraînement. Le comportement des autres éléments sera à reproduire afin de simuler fidèlement les effets de la route. On y retrouvera l'effet d'inertie causé par les masses du vélo et du cycliste, l'effet de la masse tournante de la roue avant et l'influence de l'environnement cycliste. Le contexte dans lequel le cycliste évolue et qui devra être reproduit est composé par la friction des roues avec le sol, de l'influence de la gravité lors du parcours de pentes et l'effet de l'aérodynamisme. Ces éléments seront rassemblés en deux blocs, un représentant l'accumulation d'énergie causée par les masses, les inerties et un autre se présentant comme une source d'énergie mécanique qui regroupe les effets de l'environnement, bas de la figure 2-1.

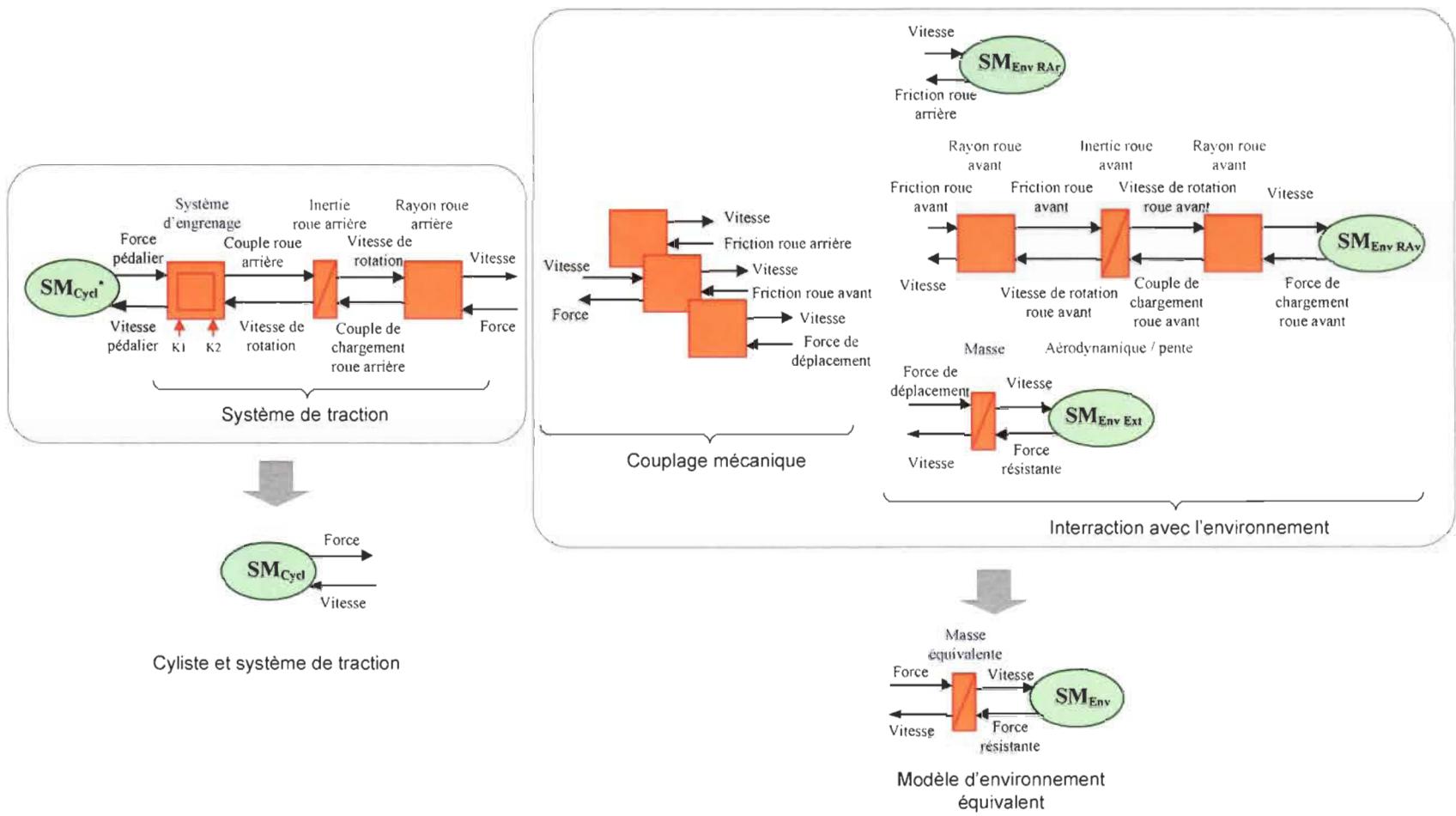


Figure 2-1: Modèle cycliste, simplification et détermination du modèle à émuler

Avec ce développement, on met en évidence les variables de force et de vitesse. Ces grandeurs seront les variables d'entrée du système d'entraînement, soit à l'interface entre la roue arrière du vélo et le rouleau. Pour reproduire le comportement de la route, ces mêmes grandeurs seront utilisées. La variable d'action, force produite par le cycliste, va interagir avec le modèle d'environnement équivalent, qui déterminera la variable de réaction, la vitesse de déplacement du cycliste.

Avec ce modèle, le cycliste se retrouve isolé de son chargement mécanique. Ainsi, il est possible de développer le système d'émulation de charge en restant découpé de la mécanique du vélo. Alors, aucune instrumentation supplémentaire ne doit être ajoutée au vélo du cycliste et n'importe quel vélo peut être utilisé avec le système d'émulation de charge, figure 2-2.



Figure 2-2 : Système d'émulation de charge

2.3 Spécificités du système d'entraînement

L'objectif du système d'entraînement virtuel est de permettre à un cycliste de ressentir les effets propres à un parcours routier en utilisant un vélo stationnaire. Le cycliste subira les effets d'inertie, de pente, de friction et d'aérodynamisme en suivant un parcours prédéterminé. Le système d'entraînement virtuel pour la simulation de parcours se subdivise en deux éléments centraux, figure 2-3.

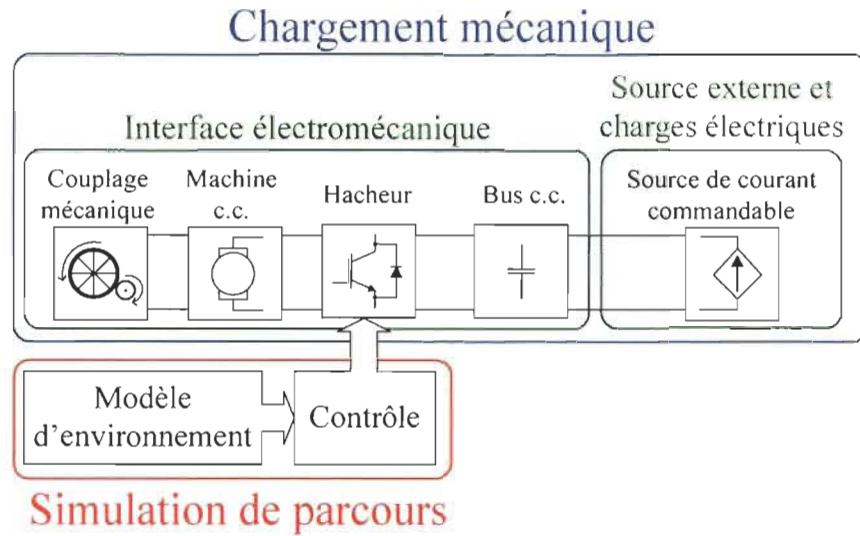


Figure 2-3 : Schéma de principe du système d'entraînement virtuel pour cycliste

Le premier élément est le chargement mécanique s'opposant à l'effort du cycliste. Il permet de produire un effet résistant tout en s'adaptant à un réseau électrique pour fournir de l'énergie ou en utiliser selon les besoins. Il est divisé en deux parties, une première étant une interface électromécanique et la seconde une source de courant représentant une source d'énergie externe et les charges électriques.

L'interface électromécanique est constituée du couplage mécanique, d'une machine à cc et d'un circuit de puissance. L'électronique associée correspond à un convertisseur cc/cc permettant à la fois le freinage s'opposant à l'effort du cycliste et un fonctionnement moteur pour la simulation de descente ou des effets d'entrainements causés par l'inertie du cycliste. Cette interface constitue l'organe de contrôle du système d'émulation.

La seconde partie nommée sources externes et charges électriques, représentées par une source de courant commandée, illustre le point d'échange en énergie du système. Dans certains cas, un apport en énergie est nécessaire lors d'une demande de freinage élevée et

dans d'autres cas, il est nécessaire de retrancher le surplus d'énergie accumulé par le bus cc à l'aide de charges électriques. Cette source de courant commandée permet au bus cc de maintenir la tension à un niveau stable.

Le deuxième élément principal est la simulation de parcours. Une partie contrôle lui est d'abord associée afin de charger correctement la génératrice à l'aide du hacheur. La consigne lui est fournie par le modèle d'environnement à simuler qui intègre les paramètres nécessaires à la reproduction du parcours. Les détails de l'itinéraire s'y retrouvent : la pente, la friction ainsi que la distance à parcourir. Un modèle du cycliste s'y retrouve aussi, regroupant les caractéristiques inertielles du vélo, de la roue, la masse du cycliste et le coefficient de friction aérodynamique.

2.4 Développement du modèle

La figure 2-4 montre une représentation par schéma bloc ainsi que la représentation par la REM. On remarque une association directe entre les éléments mécaniques et électriques avec les blocs de la REM. La modélisation commence à l'interface entre le rouleau et la roue avec les variables de force et de vitesse en contre-réaction.

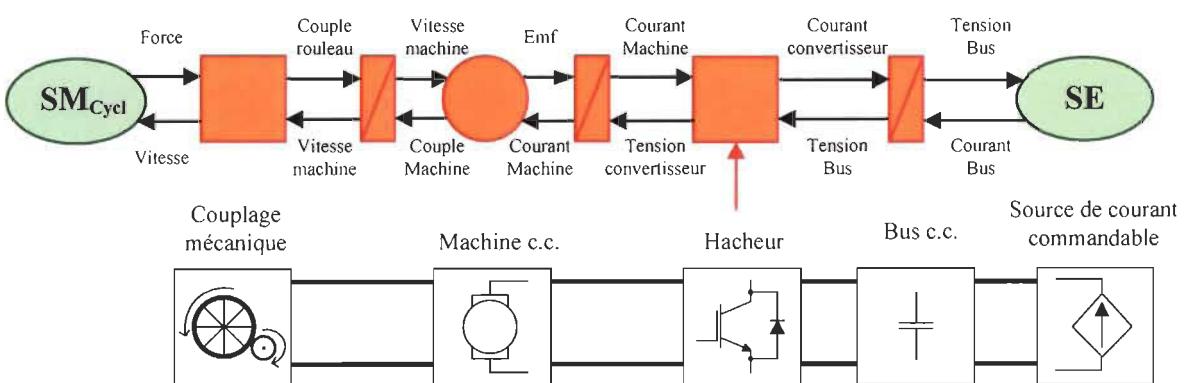


Figure 2-4 : Représentation par schéma bloc et avec la REM du système d'entraînement pour cycliste

Regardons maintenant plus en détail les relations qui caractérisent chacun des blocs. Ces relations seront premièrement définies pour le modèle du système d'entraînement et après avoir défini la stratégie de commande nous nous attarderons au modèle d'émulation, à la chaîne de commande ainsi qu'à un estimateur.

- **Source cycliste, SM_C**

La source d'énergie mécanique correspond à l'effort produit par le cycliste. Elle incorpore l'ensemble des interactions entre le cycliste et son vélo. Les variables définies pour ce modèle sont premièrement la force produite à l'interface du rouleau et de la roue F_{roue} . Le profil de la force est caractérisé conformément aux modèles que nous retrouvons dans la littérature, figure 2-5. La contre-réaction est une vitesse linéaire V_{roue} correspondant à la vitesse de déplacement du cycliste.

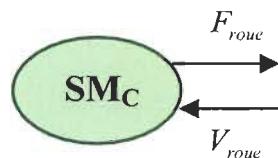


Figure 2-5 : Caractérisation du couple cycliste

Le profil du couple produit par un cycliste fluctue dans le temps suivant le positionnement du pédalier, ce qui donne une forme à peu près sinusoïdale au profil. L'amplitude, la fréquence et la forme de ce signal peuvent varier grandement en fonction de la performance du cycliste et des conditions du parcours. Il en ressort toutefois une certaine constance chez des athlètes bien entraînés et l'on retrouve nombre de publications faisant état des paramètres constituant les profils de couple cycliste dont [Smith-08,

Bertucci-05]. Grâce à ces données, il est possible d'établir un gabarit, figure 2-6, définissant un portrait fidèle d'un profil de couple au pédalier.

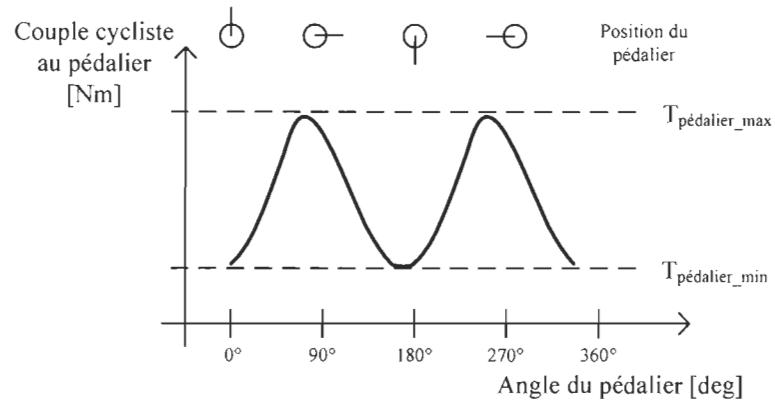


Figure 2-6 : Profil de couple au pédalier produit par un cycliste

■ Conversion mécanique, roue – rouleau

Le premier échange énergétique est de type mécanique et agit comme un convertisseur direct d'énergie, figure 2-7. La force transmise au rouleau F_{roue} sera transformée en couple $T_{rouleau}$ et la vitesse linéaire V_{roue} en vitesse de rotation $\Omega_{machine}$. Ces variables sont couplées par le dimensionnement du rouleau, ici le rayon $R_{rouleau}$.

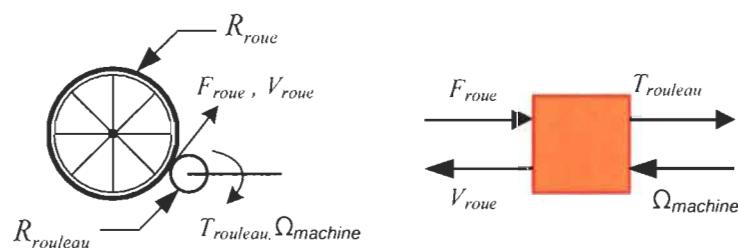


Figure 2-7 : Couplage roue et rouleau

$$T_{rouleau} = F_{roue} \cdot R_{rouleau} \quad (2.1)$$

$$V_{roue} = R_{rouleau} \cdot \Omega_{machine} \quad (2.2)$$

▪ Accumulateur d'énergie, Inertie

Le premier élément d'accumulation d'énergie, figure 2-8, correspond à l'inertie mécanique $J_{montage}$ produite par la machine cc, le rouleau et l'ensemble de la quincaillerie de couplage nécessaire à la réalisation du système. Le couple transmis par le rouleau $T_{rouleau}$ s'oppose au couple de la machine $T_{machine}$. La contre-réaction est la vitesse de rotation de la machine $\Omega_{machine}$. Le coefficient de friction du banc machine et du rouleau est défini par B et le coefficient de frottement sec est f_c .

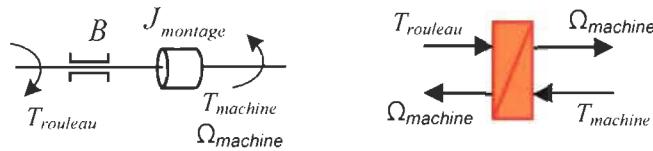


Figure 2-8 : Inertie montage et machine cc

$$J_{montage} \frac{d}{dt} \Omega_{machine} + B \cdot signe(\Omega_{machine}) + f_c = T_{rouleau} - T_{machine} \quad (2.3)$$

L'inertie du montage est constituée de l'inertie du rouleau de couplage $J_{rouleau}$ et de la machine à cc $J_{machine}$ auquel vient s'ajouter l'inertie de la roue arrière J_{roue_arr} ramenée à la machine cc.

$$J_{montage} = J_{rouleau} + J_{roue_arr} + J_{machine} \quad (2.4)$$

▪ Conversion électromécanique, machine cc

L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique avec la machine cc, figure 2-9. Le bloc de conversion ne tient compte ici que du comportement intrinsèque de la machine. C'est-à-dire que la vitesse $\Omega_{machine}$ est directement traduite en tension induite E par

l'entremise de la constante de la machine $K\Phi$. L'inertie étant tenue en compte dans le bloc précédent et la dynamique de l'induit dans le bloc suivant. Le couple $T_{machine}$ qu'elle produit est aussi lié par la constante $K\Phi$ au courant $I_{machine}$.

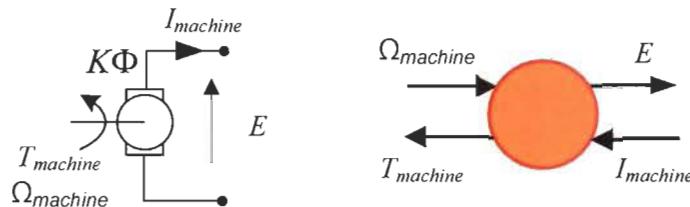


Figure 2-9 : Machine à cc

$$E = K\Phi \cdot \Omega_{machine} \quad (2.5)$$

$$T_{machine} = K\Phi \cdot I_{machine} \quad (2.6)$$

■ Accumulateur d'énergie, Induit

Les caractéristiques électriques de la machine sont attribuées au modèle par ce bloc d'accumulation d'énergie, figure 2-10. L'inductance d'induit L et la résistance R relient le courant de la machine cc $I_{machine}$ et la tension induite E à la tension d'entrée du convertisseur quatre-quadrant U_{conv} .

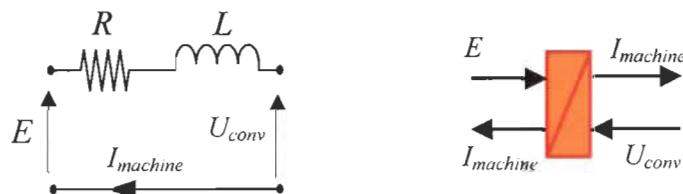


Figure 2-10 : Induit machine à cc

$$U_{conv} = E - L \frac{d}{dt} I_{machine} - R \cdot I_{machine} \quad (2.7)$$

■ Conversion électrique, convertisseur cc/cc

Le hacheur est constitué de quatre interrupteurs de puissance montés selon une topologie de pont en H. Cette configuration permet différents modes de fonctionnement qui sont mis à profit. L'utilisation du modèle moyen nous permet de considérer le convertisseur en tenant compte d'une relation directe entre le courant d'entrée $I_{machine}$ et de sortie I_{conv} en considérant l'indice de modulation α . Il en est de même pour la tension d'entrée U_{conv} et de sortie U_{bus} . Ces relations varient selon la commande du pont. Le convertisseur est commandé en mode bipolaire afin de permettre le contrôle du courant en basse vitesse et la récupération d'énergie quand cela est possible.

La commande du convertisseur consiste en une commande de hacheur quatre quadrants, figure 2-11. Le mode de commande des interrupteurs est le mode bipolaire où chaque impulsion provoque l'inversion de la polarité. Les interrupteurs S2 et S3 s'activent conformément au signal de modulation en largeur d'impulsion (MLI) et les interrupteurs S1 et S4 leurs sont complémentaires.

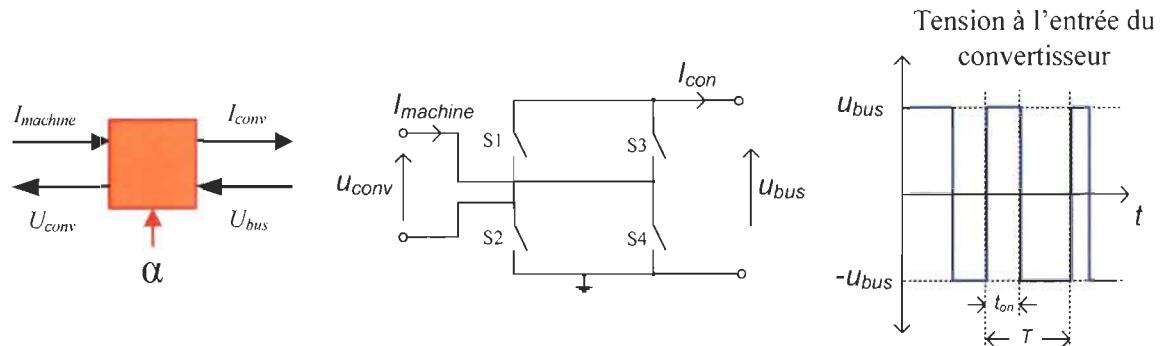


Figure 2-11 : Convertisseur cc, commande bipolaire

Les relations de courant et de tension sont définies par :

$$I_{conv} = I_{machine} (2\alpha - 1) \quad (2.8)$$

$$U_{conv} = U_{bus} (2\alpha - 1) \quad (2.9)$$

Et l'indice de modulation par :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.10)$$

■ Accumulateur d'énergie, Bus cc

Le bus à cc constitue le point d'interconnexion entre le convertisseur cc et la source de courant commandable, figure 2-12. Il est constitué d'une capacité C de valeur élevée. La différence entre le courant délivré par le convertisseur I_{conv} et le courant s'écoulant vers la source externe I_{bus} fait varier le potentiel du bus U_{bus} .

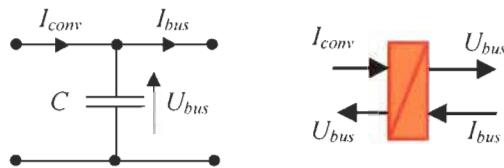


Figure 2-12 : Bus cc

$$I_{conv} - I_{bus} = C \frac{d}{dt} U_{bus} \quad (2.11)$$

■ Source électrique, charge électrique

La chaîne de blocs pour la modélisation se termine par une source d'énergie électrique, figure 2-13. Elle correspond à une source de courant commandée qui permet de réguler le bus cc. La configuration et la commande d'une telle source ne seront pas traitées ici puisqu'elle est déjà traitée dans différents ouvrages. On retrouve entre autres dans

[Lhomme-09, Leblanc-10b] la régulation d'un bus cc à l'aide d'une source de courant en utilisant la même représentation et deux approches de commande différentes. La tension du bus U_{bus} sera alors considérée comme constante en supposant que le courant I_{bus} de cette source parvient à équilibrer rapidement le courant I_{conv} fourni par le convertisseur cc.

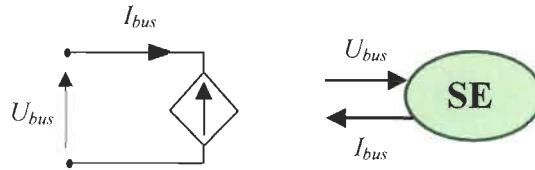


Figure 2-13 : Source de courant commandée

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle de chargement mécanique du système d'entraînement pour cycliste a été développé en utilisant la représentation par la REM et les équations de chacun des blocs ont été définies. Des justifications ont été fournies quant au cadre de la modélisation. Le modèle de chargement est défini à partir de l'interface roue-rouleau. Ceci permet l'utilisation de n'importe quel vélo lors d'une simulation de parcours et limite par le fait même l'intégration de capteurs supplémentaires.

Chapitre - 3 Stratégie de commande

La stratégie de commande a d'abord été développée grâce à la REM. Deux options s'offrent pour la commande. Premièrement, un ajustement de la force résistante peut être effectué. Ce choix est instinctif pour l'application des forces résistantes de friction et dues à la gravité. Cependant, pour l'application directe de l'effet inertiel, des mesures d'accélération seraient nécessaires. D'un point de vue pratique, le contrôle de la vitesse avec un modèle de référence est plus facile à mettre en œuvre. En effet, avec la force produite par le cycliste, on détermine la vitesse de déplacement du cycliste sur un parcours réel à l'aide du modèle d'environnement. Ensuite, le chargement de la génératrice est imposé par des boucles de commande afin de s'assurer que la vitesse du vélo stationnaire respecte bien la vitesse déterminée par le modèle d'émulation. Ainsi, le chargement de la génératrice est fidèle à celui défini par le parcours et le modèle du cycliste.

La représentation du système d'entraînement et d'émulation a permis de faire ressortir le groupe de variables qui doivent être contrôlées. Le trait en vert sur la figure 3-1, correspond à la chaîne à inverser pour le contrôle de la vitesse. On suppose toujours une tension du bus contrôlée par la source de courant commandée SE.

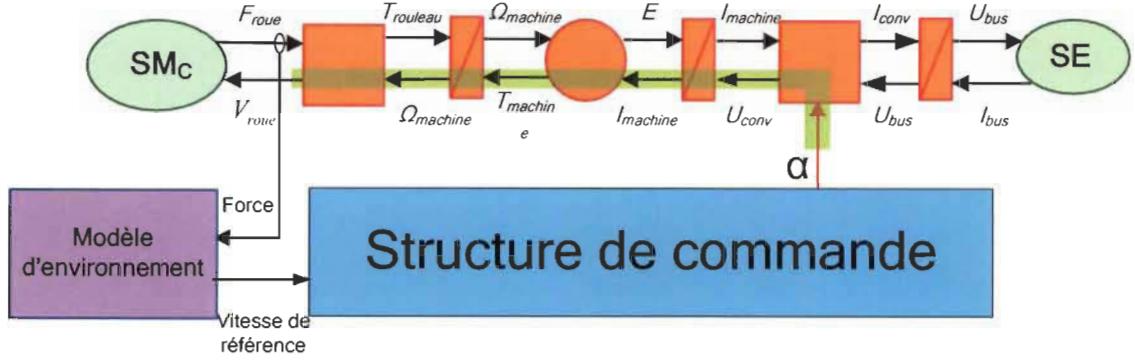


Figure 3-1 : Chemin de commande pour le contrôle de la vitesse pour l'imposition de charge

3.1 Contrôle de la vitesse

La commande du système élaborée ici ne tient compte que de la partie contrôle de la vitesse. Toutes les mesures sont considérées comme étant disponibles lors de l'établissement des lois de commande. Les variables inaccessibles directement seront obtenues plus tard en développant des estimateurs. Comme énoncé plutôt la structure de commande est développée selon le principe d'inversion et est représentée avec les blocs de couleur bleu. La chaîne développée est illustrée à la figure 3-2. Le détail des équations de chacun des blocs est présenté par la suite.

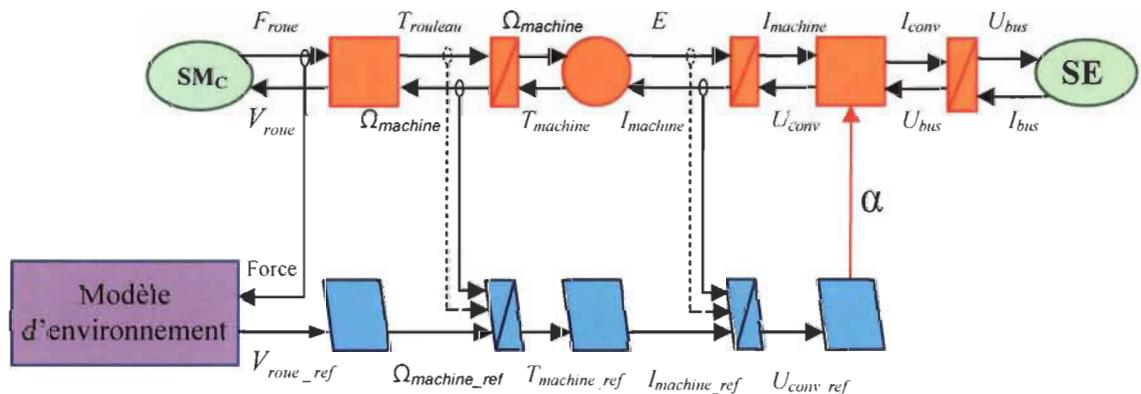


Figure 3-2: Structure de commande pour le contrôle de la vitesse

- Inversion directe, Conversion mécanique roue – rouleau

La vitesse linéaire déduite à partir de l'émulation V_{roue_ref} doit être transformée en vitesse de rotation de la machine cc afin d'obtenir la bonne valeur de référence $\Omega_{machine_ref}$, figure 3-3. Le rayon du rouleau $R_{rouleau}$ relie ces deux variables.

$$\Omega_{machine_ref} = \frac{V_{roue_ref}}{R_{rouleau}} \quad (3.1)$$

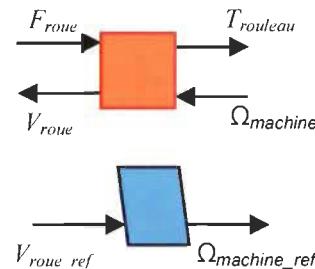


Figure 3-3 : Inversion du couplage roue et rouleau

- Inversion avec contrôleur, Inertie des éléments de transmission mécanique du banc d'essais

Le premier contrôleur est celui permettant la compensation de l'inertie, figure 3-4. Il contrôle la boucle externe de vitesse à partir du couple du rouleau et de la vitesse de la machine.

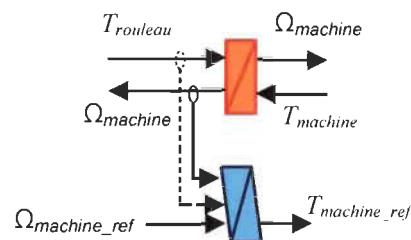


Figure 3-4 : Inversion avec contrôleur, inertie du montage

La loi de commande PI choisie est donnée par :

$$T_{machine_ref} = T_{rouleau} - (\Omega_{machine_ref} - \Omega_{machine}) \left(1 + \frac{Ki_1}{s} \right) Kp_1 \quad (3.2)$$

Où les paramètres Ki_1 et Kp_1 sont déterminés par placement de pôles. Le détail du calcul se retrouve à l'annexe A. La conception des boucles de commande est effectuée avec l'hypothèse des modes des boucles de commande (séparation des constantes de temps par un facteur de l'ordre de 10). Ainsi, ce correcteur est établi en négligeant les autres dynamiques du système. Il en sera de même pour les prochaines boucles de commande.

- Inversion directe, conversion électromagnétique de la machine cc

Le couple de référence $T_{machine_ref}$ de la machine permet de déduire le courant de référence $I_{machine_ref}$ à partir de la constante de flux $K\Phi$ de la machine cc, figure 3-5.

$$I_{machine_ref} = \frac{T_{machine_ref}}{K\Phi} \quad (3.3)$$

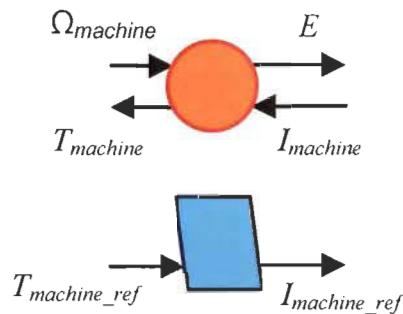


Figure 3-5 : Inversion de la conversion électromagnétique de la machine à cc

- Inversion avec contrôleur, Induit de la machine à cc

Le deuxième contrôleur assure la réponse de la boucle interne, figure 3-6. Cette deuxième boucle commande la dynamique du courant qui traverse l'induit de la machine à cc.

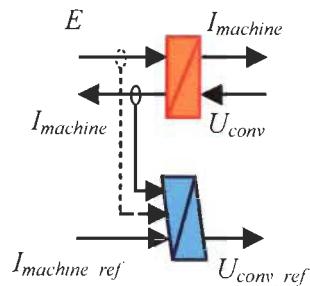


Figure 3-6: Contrôleur de courant

La loi de commande avec contrôleur PI est donnée par :

$$U_{conv_ref} = \left(I_{machine_ref} - I_{machine} \right) \left(1 + \frac{Ki_2}{s} \right) kp_2 \quad (3.4)$$

Où les paramètres Ki_2 et Kp_2 sont déterminés par placement de pôles conformément à la méthode proposée précédemment.

- Inversion directe, Convertisseur réversible

Le dernier bloc, figure 3-7, permet d'interagir avec le convertisseur réversible par le signal de commande α . Ce bloc doit être inversé en tenant compte du mode de fonctionnement souhaité. Pour un mode de fonctionnement en hacheur quatre-quadrant avec commande en mode bipolaire, l'inversion directe est réalisée par l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{conv_ref}}{U_{bus}} + 1 \right) \quad (3.5)$$

Dans le cas d'un fonctionnement en hacheur abaisseur-élévateur synchronisé l'équation directe inverse est :

$$\alpha = \frac{U_{conv_ref}}{U_{bus}} \quad (3.6)$$

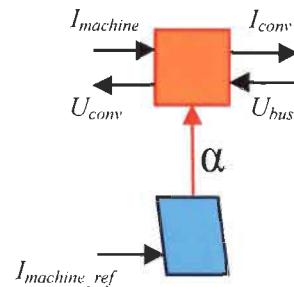


Figure 3-7 : Inversion convertisseur cc/cc

3.2 Estimation de la force produite

Comme il faut obtenir la force exercée par le cycliste pour permettre l'émulation de la charge, il est essentiel de pouvoir l'estimer puisqu'un capteur ne peut être implanté facilement et à faible coût. L'observateur est constitué du modèle de la machine et du montage mécanique auquel un correcteur est ajouté, figure 3-8. Les variables nécessaires à l'observateur qui ne peuvent être obtenues directement sont alors estimées grâce au modèle en utilisant les relations directes vues plus tôt. Finalement, un estimateur utilisera le couple observé pour déduire la force appliquée par la roue.

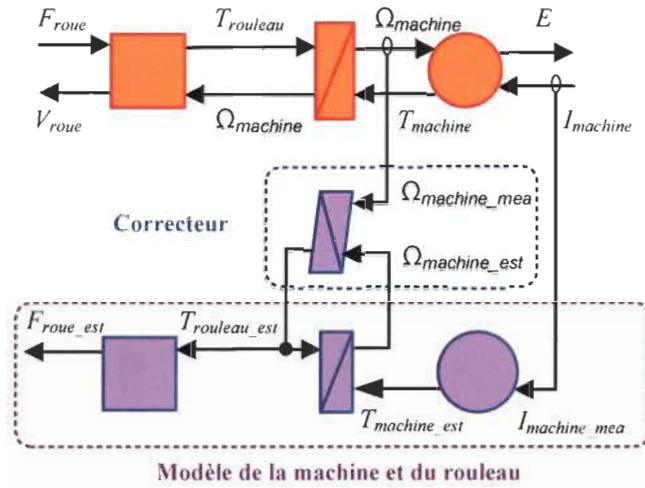


Figure 3-8 : Développement du modèle d'émulation

- Estimateur, couple de la machine.

Le cercle magenta correspond au modèle de conversion électromagnétique de la machine à cc, figure 3-9. À partir de la mesure du courant $I_{machine_mea}$, il est possible d'évaluer le couple produit par la machine $T_{machine_est}$ en utilisant son modèle. La relation liant le courant au couple est utilisée directement. Il en est de même pour la tension induite estimée E_{est} déduite à partir de la vitesse de la machine à cc. $\Omega_{machine_mea}$.

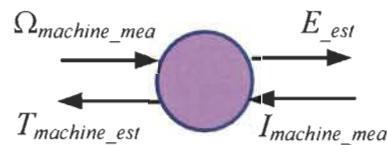


Figure 3-9: Estimation du couple et de la tension induite de la machine cc

$$T_{machine_est} = K\Phi \cdot I_{machine_mea} \quad (3.7)$$

$$E_{est} = K\Phi \cdot \Omega_{machine_mea} \quad (3.8)$$

- Estimateur, vitesse de la machine

Ici, on utilise le modèle dynamique qui caractérise la partie mécanique de la machine et du montage afin d'évaluer la vitesse de la machine $\Omega_{machine_est}$, figure 3-10. Pour ce faire le couple du rouleau $T_{rouleau_est}$ estimé par l'observateur est utilisé ainsi que le couple de la machine à cc obtenu plus tôt.

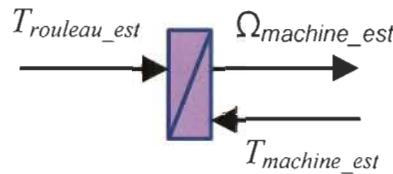


Figure 3-10 : Estimation de la vitesse de la machine cc

$$\Omega_{machine_est} = T_{rouleau_est} - T_{machine_est} (J_{montage} s + B) \quad (3.9)$$

- Observateur de couple rouleau

Un contrôleur supplémentaire, bloc supérieur de la figure 3-11, est ajouté afin de faire converger le couple rouleau estimé vers la valeur adéquate. Pour ce faire, la vitesse estimée par le modèle dynamique précédent est comparée avec la vitesse mesurée. Un contrôleur PI permet d'assurer la poursuite de la mesure à observer.

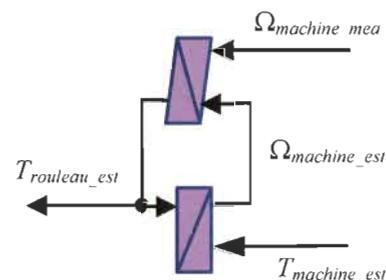


Figure 3-11: Observateur du couple rouleau

La loi de commande choisi est donnée par :

$$T_{rouleau_est} = (\Omega_{machine_est} - \Omega_{machine_mea}) \left(1 + \frac{Ki_3}{s} \right) kp_3 + signe(\Omega_{machine_mea}) * T_c \quad (3.10)$$

Où les paramètres Ki_3 et Kp_3 sont déterminés par placement de pôles conformément à la méthode proposée précédemment. Le paramètre T_c correspond au frottement de Coulomb estimé du montage.

- Estimation, conversion mécanique roue – rouleau

Le couple estimé $T_{rouleau_est}$ peut être utilisé directement à partir du rayon du rouleau pour évaluer la force F_{roue_est} produite par le cycliste. Un carré de couleur magenta représente cette relation, figure 3-12.

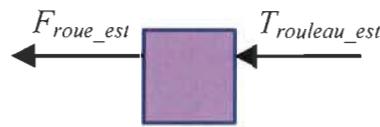


Figure 3-12: Estimation de la force au rouleau

$$F_{roue_est} = \frac{T_{rouleau_est}}{R_{rouleau}} \quad (3.11)$$

3.3 Émulation

Les éléments considérés dans le modèle d'environnement permettent de faire ressentir au cycliste les effets dus à la force gravitationnelle, à l'effort aérodynamique, ainsi qu'aux forces de friction ressenties sur un parcours réel. Le principe de base est de déterminer à partir de la force que le cycliste développe sur le vélo stationnaire et des forces résistantes,

la vitesse à laquelle il se déplacerait dans un environnement réel. Le travail consiste donc à simuler le comportement. Pour ce faire, nous devons dans un premier temps tenir compte de l'inertie du cycliste et dévaluer les forces résistantes qui doivent être appliquées. À partir de la force qui a été estimée ainsi que celle de friction et de gravité, nous parvenons à déterminer la somme des forces résistantes qui agissent sur le cycliste. En connaissance de l'inertie du cycliste qui peut être obtenue avec la masse de l'individu, du vélo et des masses tournantes, nous parvenons à déterminer la vitesse de déplacement du cycliste dans un environnement réel. L'inertie causée par la roue arrière n'est pas ajoutée au modèle puisque son effet se retrouve naturellement sur le système d'entraînement virtuel. À la figure 3-13 l'on retrouve un bloc magenta d'accumulation d'énergie représentant le modèle dynamique du cycliste.

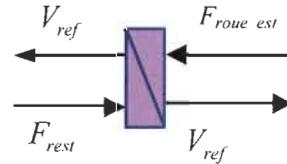


Figure 3-13 : Modèle dynamique du cycliste

$$F_{rest} - F_{roue_est} = \frac{1}{M_{eq}} \frac{d}{dt} V_{ref} \quad (3.12)$$

$$M_{eq} = M_{vélo} + M_{cycliste} + \frac{J_{Roue_av}}{R_{Roue}^2} \quad (3.13)$$

Finalement, les forces statiques imposées par la force gravitationnelle, la friction et la force résistante causée par l'aérodynamisme sont ajoutées au niveau de la source d'énergie correspondant à l'environnement, figure 3-14.

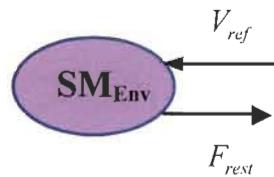


Figure 3-14 : Modèle de l'environnement du cycliste

$$F_{aéro} = \frac{V_{ref}^2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_{aéro}}{2} \quad (3.14)$$

$$F_{grav} = (M_{vélo} + M_{cycliste}) \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.15)$$

$$F_{fric} = C_{friction} \cdot (M_{vélo} + M_{cycliste}) \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (3.16)$$

$$F_{rest} = F_{aéro} + F_{grav} + F_{fric} \quad (3.17)$$

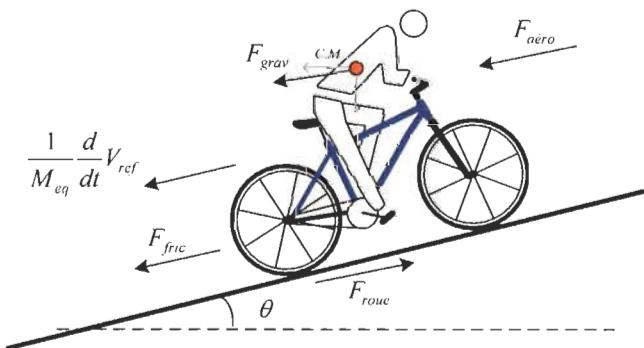


Figure 3-15 : Diagramme des forces exercées sur le cycliste

Il est alors possible de retrouver le modèle complet du système d'entraînement pour cycliste, figure 3-15. On y retrouve la modélisation du système électromécanique, le modèle d'environnement à reproduire, les estimateurs ainsi que la commande nécessaire au fonctionnement du système, figure 3-16.

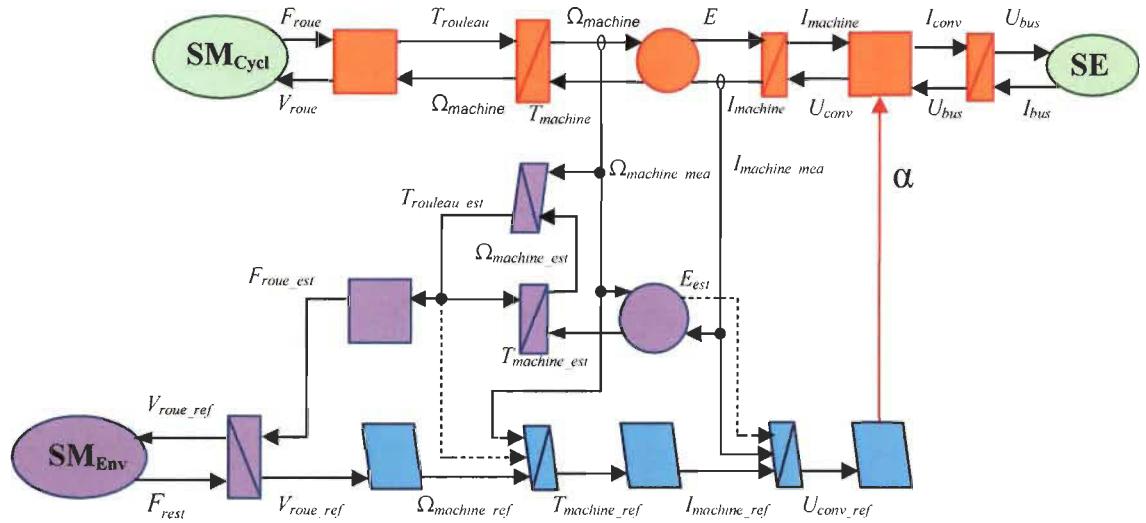


Figure 3-16 : Modélisation complète du système d'émulation de charge

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation complète du système d'émulation de charge a été définie en considérant l'utilisation d'un observateur de couple. Ce choix permet d'émuler les effets d'inerties en estimant le couple fourni par le cycliste. Ainsi, il est possible de déterminer la vitesse du cycliste sur le parcours grâce au modèle d'environnement. Finalement, l'émulation est assurée par la chaîne de commande qui permet d'imposer le profil de vitesse approprié.

Chapitre - 4 Résultats de simulation

La validation du système d'émulation a été effectuée en deux parties, soit la simulation et l'expérimentation. Cette première étape de simulation permet de valider les performances de la commande, de l'observateur ainsi que de l'émulation. L'étape de simulation consiste à utiliser le modèle défini à l'aide de la REM et de traduire le modèle directement dans un outil de simulation, dans ce cas-ci Simulink.

Les paramètres de simulation tels que le profil de force cycliste, les paramètres de l'environnement et le profil de parcours sont présentés dans la section conditions de simulation. Les performances des contrôleurs sont présentées dans la section régulation de courant et vitesse. Les performances de l'estimateur seront présentées par la suite. Les différentes forces auxquelles le cycliste est contraint lors de son évolution seront aussi présentées. Les caractéristiques électriques et mécaniques du système d'entraînement sont regroupées à l'annexe B.

4.1 Conditions de simulation

Les principaux paramètres de simulation sont constitués du profil de force appliquée par le cycliste et du profil de parcours. Ces deux éléments constituent les entrées du système d'entraînement. Ces paramètres sont fixés de sorte à couvrir l'ensemble des cas de fonctionnement que devrait subir le système. Le rapport de transmission est imposé empiriquement. Le profil de force présenté à la figure 4-1 est celui utilisé en simulation qui modélise le profil de force transmis par le cycliste à l'interface de la roue et du rouleau.

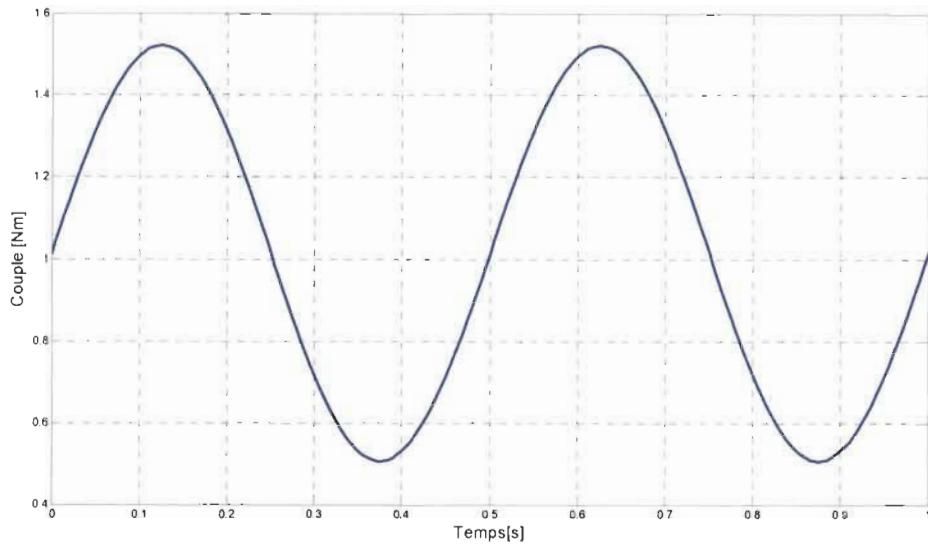


Figure 4-1 : Profil de force cycliste utilisé en simulation

Le dénivelé imposé en simulation permet d'évaluer le chargement du vélo lors de pentes ascendantes et l'effet d'entraînement dans le cas de pentes descendantes. Ainsi, le parcours en simulation est constitué de plats et d'une pente positive et négative de 1.5%. Les paramètres de l'environnement concernant l'aérodynamisme et la friction ont été imposés selon des résultats d'études sur l'optimisation des performances cycliste [Martin-98, Grappe-05]. Ainsi, les paramètres cyclistes et du vélo reflètent une configuration moyenne pour un cycliste de compétition. Les paramètres se retrouvent en annexe B dans le tableau cycliste et environnement. Les paramètres d'inertie pour le vélo et les composantes du montage ont été déduits à partir de courbes de décélération obtenues expérimentalement. Toutes les valeurs d'inertie sont ramenées au niveau de la machine à cc et sont présentées en annexe B.

4.2 Émulation de charge

Les premiers travaux de simulation consistent à comparer le comportement en simulation du parcours cycliste et de l'émulation du même parcours avec le modèle du banc d'essai. Ainsi, une première section simulation de parcours, voir figure 4-2, représente le modèle du cycliste sur le parcours.

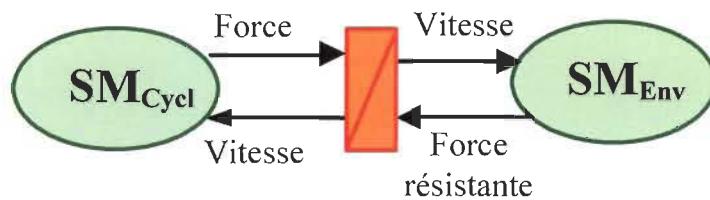


Figure 4-2 : Simulation de parcours du cycliste

La source d'énergie mécanique à gauche correspond au cycliste et à son vélo fournissant la force tangentielle au sol qui propulse le cycliste. Le bloc d'accumulation d'énergie permet de simuler l'inertie du cycliste et finalement la source mécanique de droite regroupe les forces contraintant son évolution. On retrouve, dans le même fichier de simulation, les éléments qui modélisent la source correspondant au cycliste, mais cette fois-ci juxtaposés à la modélisation complète du banc d'essai de plus que l'observateur, l'émulation et la structure de commande modélisée avec la REM-SMC, figure 4-3. La simulation du système a été effectuée avec un pas fixe de calcul dix fois plus petit que celui utilisé pour la commande afin d'introduire les effets causés par la discrétisation.

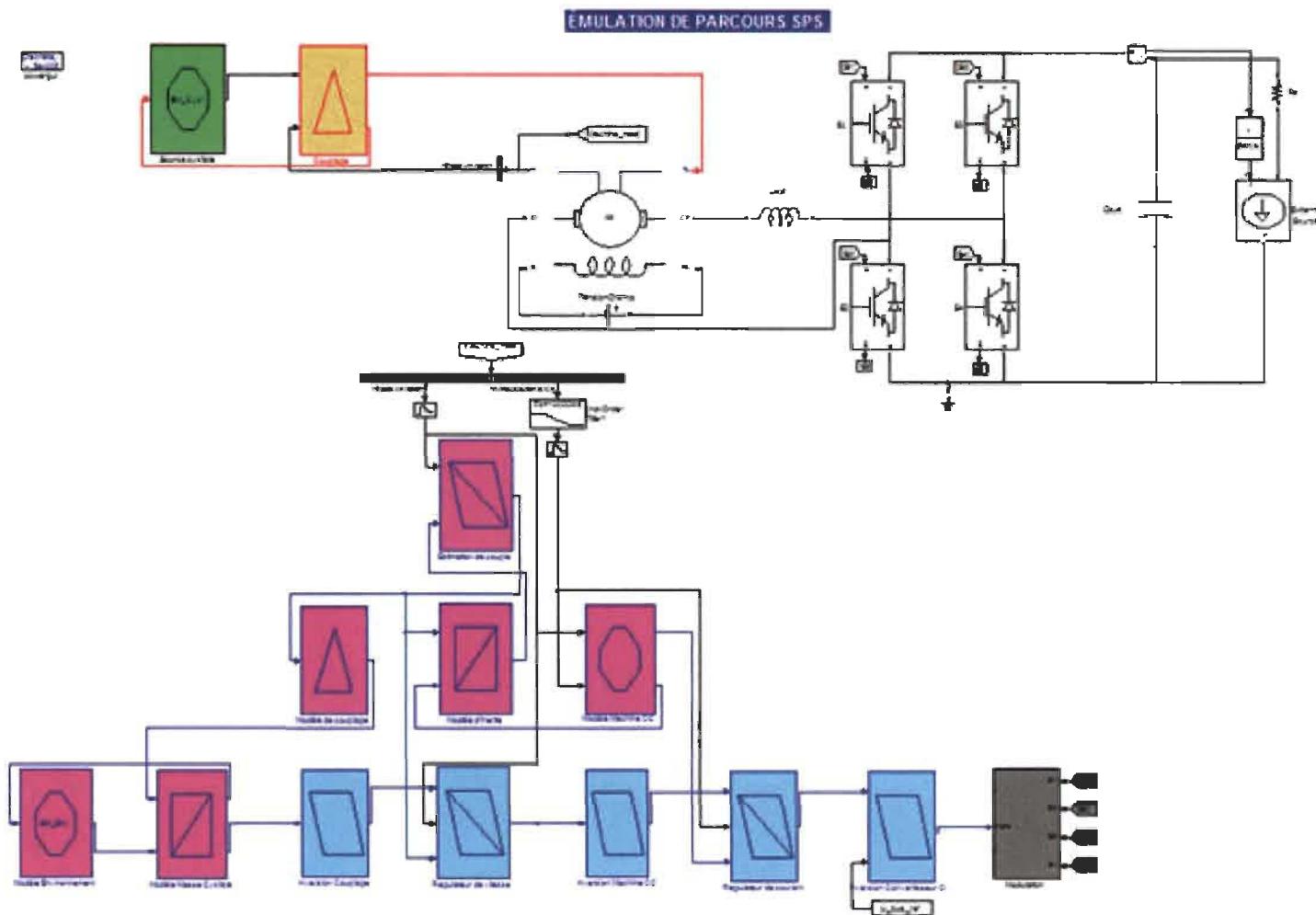


Figure 4-3 : Intégration du modèle sous Simulink avec la bibliothèque SimPower System

4.3 Comparaison des résultats

4.3.1 Estimation du couple

L'émulation est basée sur l'estimation du couple cycliste, une estimation précise de cette grandeur est nécessaire. À la figure 4-4, on peut comparer le profil de couple appliqué au système $T_{rouleau_mea}$ avec le profil de couple estimé $T_{rouleau_est}$, obtenue par l'observateur. Les deux profils de couples se superposent démontrant la fonctionnalité de l'observateur.

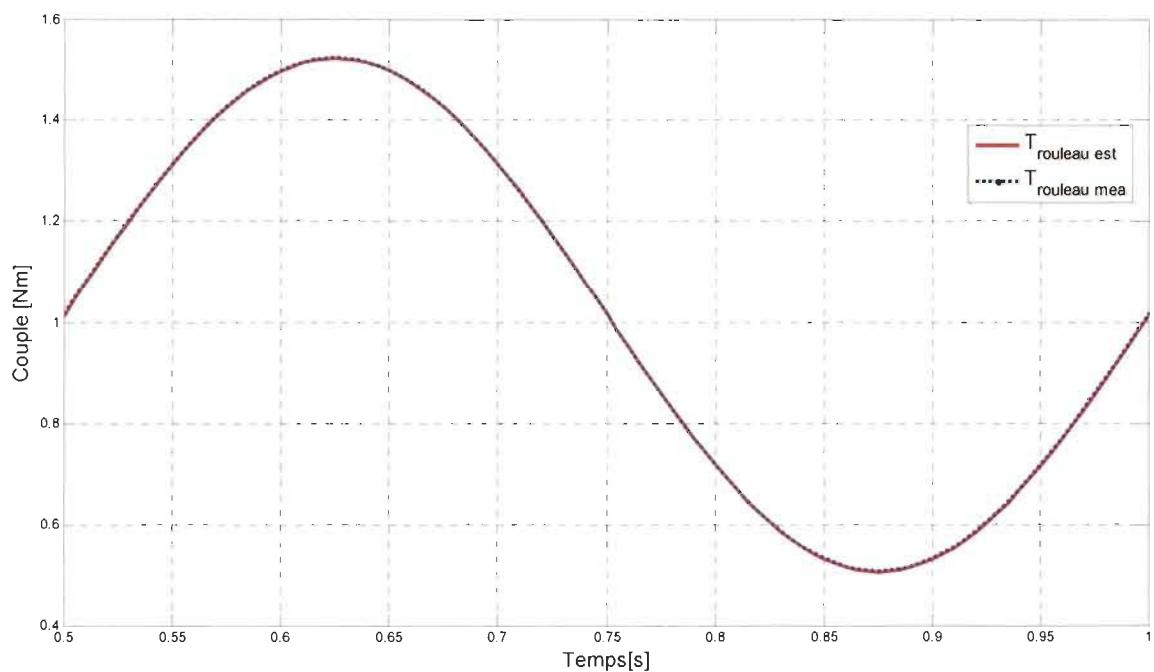


Figure 4-4 : Profil de force cycliste utilisé en simulation

4.3.2 Évolution de la vitesse cycliste

Les résultats obtenus au niveau du profil de vitesse, figure 4-5, montrent une correspondance entre le comportement en simulation du modèle cycliste pour un parcours prédéfini et de l'émulation de ce même parcours avec la modélisation du banc d'essai. On

retrouve à la figure 4-5, la vitesse $V_{roue \text{ Modèle}}$ correspondant au profil de vitesse obtenu par la simulation du modèle cycliste, figure 4-2. Le second profil $V_{roue \text{ Banc d'essai}}$ correspond au résultat de simulation du modèle de la figure 4-3. Les profils de vitesse du cycliste se superposent eux aussi l'un sur l'autre. Le comportement du banc d'essai et du modèle du cycliste est donc le même.

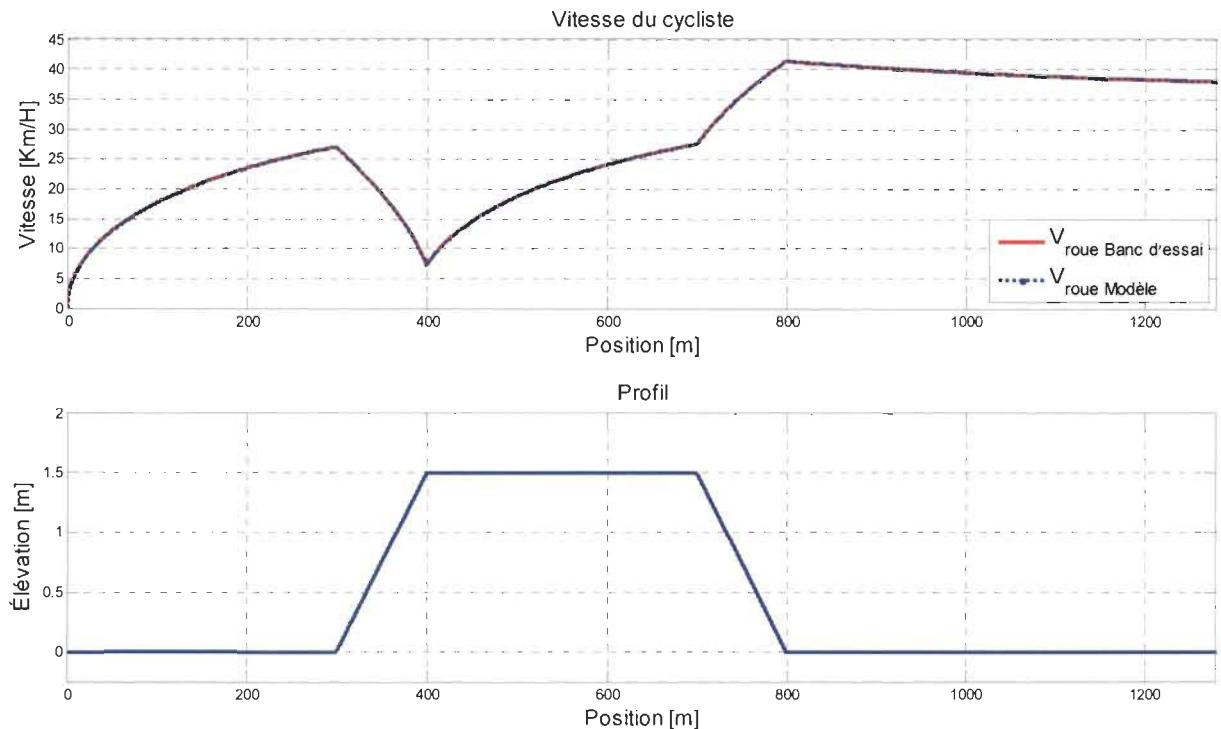


Figure 4-5 : Évolution de la vitesse du cycliste

La composante sinusoïdale superposée au profil de la vitesse du cycliste montre l'effet du couple lors de l'évolution du cycliste sur le parcours, figure 4-6. Cette composante doit être reproduite à l'aide du système d'émulation de charge. Elle constitue un élément important pour une reproduction fidèle du comportement cycliste afin que le sujet subisse une émulation réaliste.

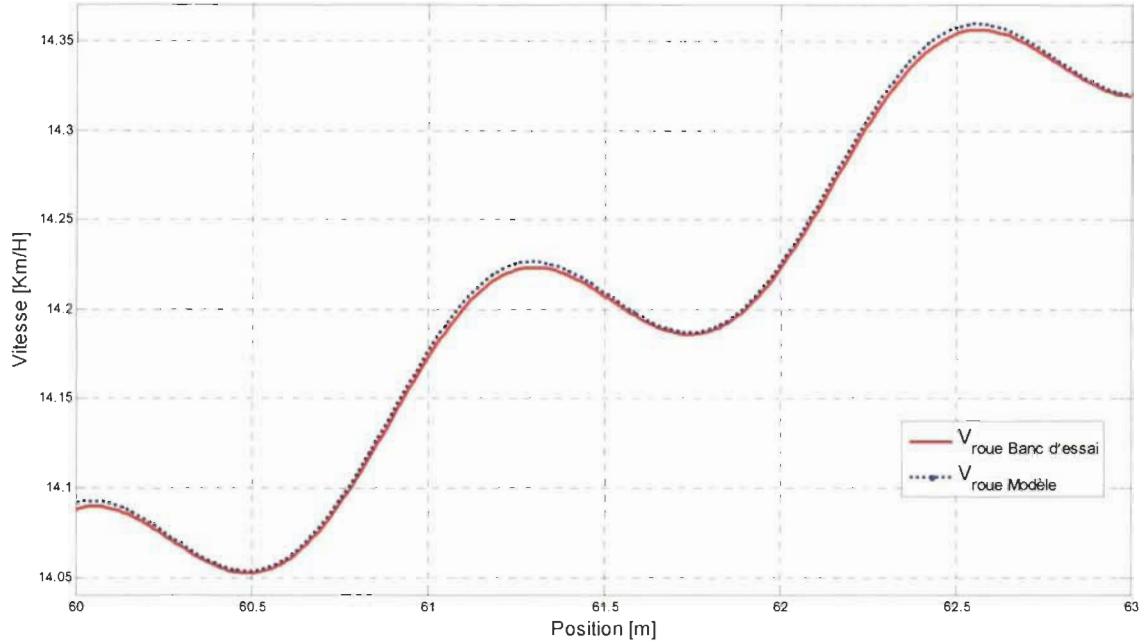


Figure 4-6 : Effet du couple sur la vitesse cycliste

4.3.3 *Effets de l'environnement*

Les forces exercées par l'environnement dépendent entre autres de la vitesse et du parcours. À la figure 4-7, on remarque la correspondance entre les forces résistantes définies pour le banc d'essai et celles définies pour le modèle moyen cycliste. On y retrouve deux changements brusques de forces provoqués par le changement de pente du parcours. L'effet de la vitesse cycliste sur la force résistante y est mis en évidence. Lors du changement de pente, la force résistance causée par la gravité est constante lors de la monté comme pour la descente. On remarque toutefois qu'à mesure que le cycliste effectue une montée, la force résistante totale diminue, effet causé par la force aérodynamique qui est émulée.

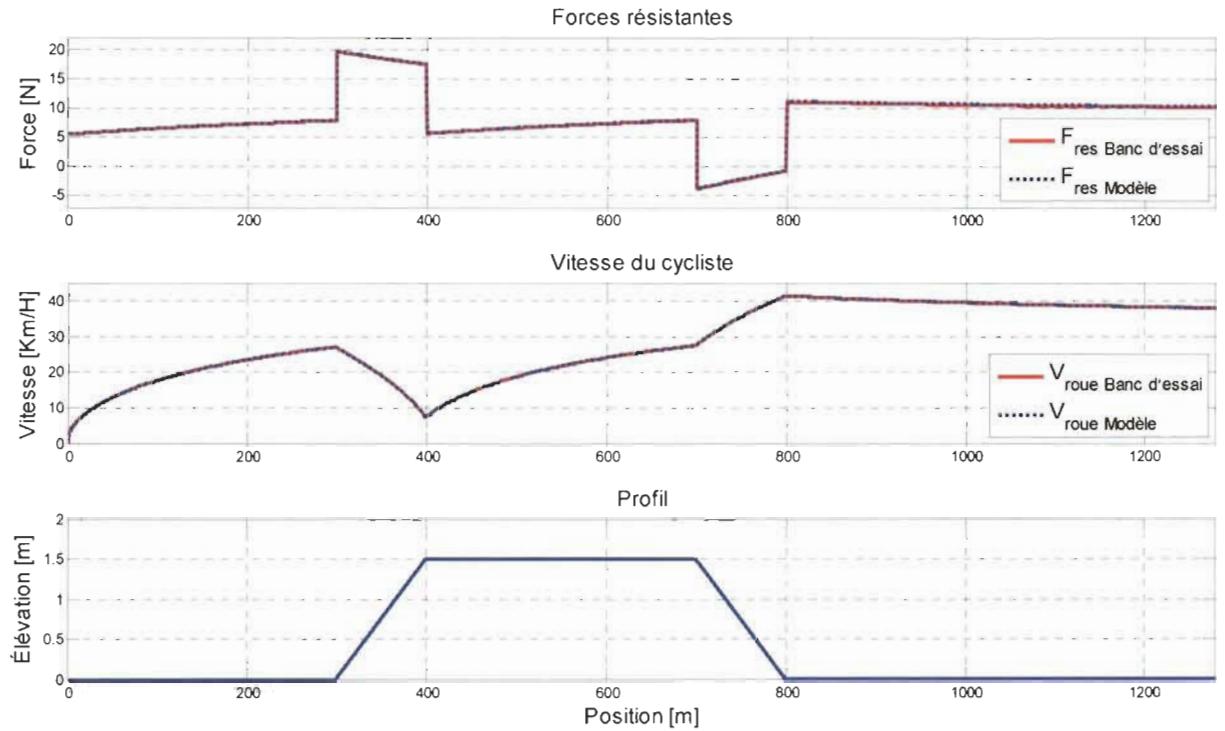


Figure 4-7 : Évolution des forces résistantes

4.4 Conclusion

Les résultats de simulations présentés démontrent d'abord la validité du modèle de l'observateur qui parvient à estimer le profil de couple. Par la suite, les profils des vitesses cyclistes ont été comparés et ont démontré une similitude dans le cas de la simulation de parcours pour le modèle cycliste comparativement au modèle du banc d'essais. Ainsi, le modèle développé avec la REM est validé puisqu'il permet d'imposer la même évolution de vitesse avec le banc d'essais que l'évolution obtenue avec le modèle cycliste.

Chapitre - 5 Résultats expérimentaux

Jusqu'à maintenant, la structure du système a été établie : la commande, l'observation ainsi que les éléments nécessaires à la reproduction de l'environnement. Le fonctionnement du système établi a par la suite été validé en simulation et comparé à la simulation d'un cycliste sur parcours prédéfini, validant la modélisation et la structure de commande. Une dernière étape consiste à vérifier expérimentalement la validité de l'émulation. Pour ce faire, un banc de test constitué du couplage mécanique entre le vélo et la machine à cc a été réalisé.

Le banc d'essais de la figure 5-1 est constitué d'un rouleau permettant le couplage mécanique entre la machine à cc et le vélo. Le recouvrement du rouleau et un ajustement de pression entre la roue et le rouleau permet d'éviter le glissement et assure donc un transfert d'énergie de la roue arrière vers la machine électrique. On retrouve sur la figure 5-1, deux machines électriques. Une première à gauche de type asynchrone permettant d'effectuer des tests préliminaires sur le banc d'essais; ce moteur est employé en traction pour remplacer le cycliste dans la reproduction de tests uniformes. Cette dernière est pourvue d'un capteur de vitesse incrémental de précision. La machine de droite est la machine à cc à excitation séparée utilisée pour l'émulation de charge.



Figure 5-1 : Banc d'essai

La circuiterie de puissance est constituée d'un convertisseur cc à cc, de capteurs de courant et d'un capteur de tension pour le bus cc. La carte électronique présentée à la figure 5.2, montre le convertisseur cc/cc qui est constitué d'interrupteurs de puissance de type IGBT avec le circuit de commande qui permet d'enclencher les interrupteurs.

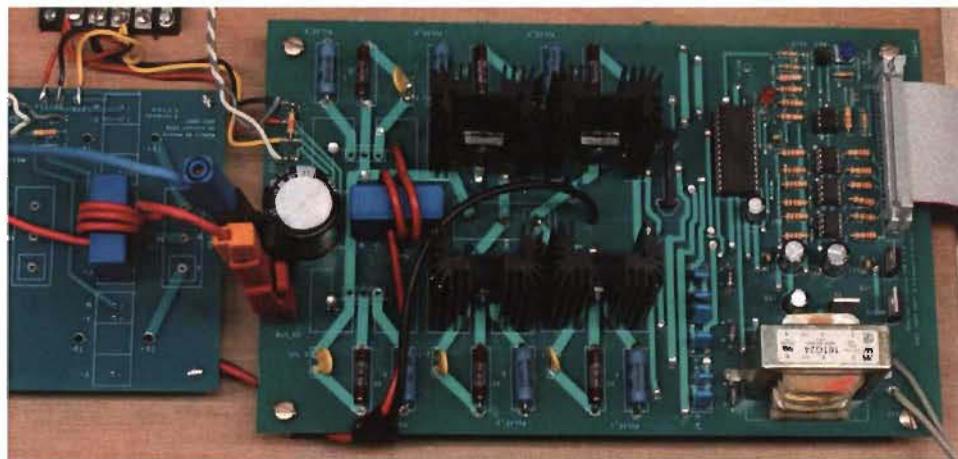


Figure 5-2 : Convertisseur cc/cc

L'observateur, l'émulation et la structure de commande sont implantés dans une plate-forme temps réel RT-Lab. La plate-forme permet d'introduire les fichiers de programmation Simulink, de les convertir en code machine et de les exécuter sur les processeurs de la console, figure 5-3. L'interfaçage se fait par carte d'entrée/sortie analogique et numérique. Ainsi, il est possible de générer les signaux de commande, de traiter les mesures de vitesse et de courant nécessaires à l'application des algorithmes en temps réel.

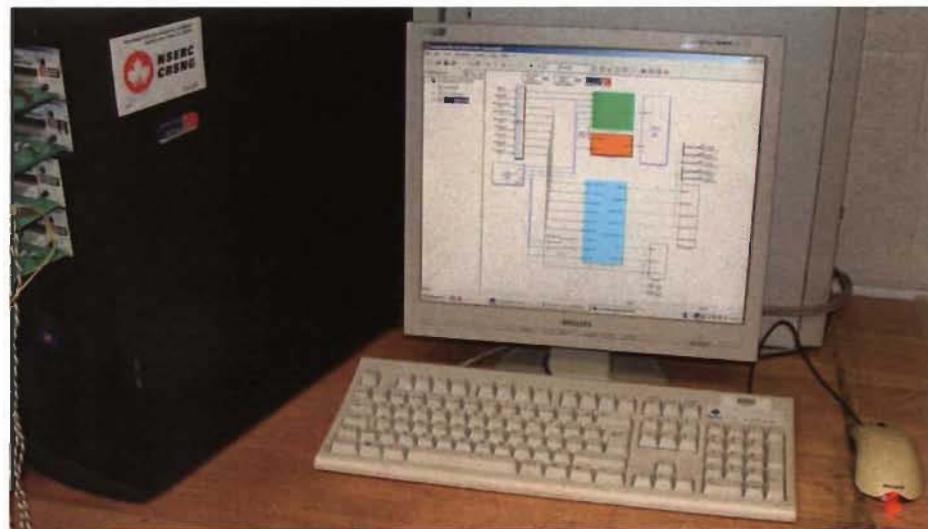


Figure 5-3 : Console temps-réel RT-Lab

Le test expérimental consiste à appliquer un même profil de couple cycliste au banc d'essais et au modèle de simulation. Par la suite, les résultats sont comparés afin de valider que le comportement obtenu expérimentalement est similaire au modèle de simulation.

5.1 Observation du couple cycliste

Afin de valider expérimentalement l'émulation, le banc de test a été soumis à l'émulation du parcours présenté à la section précédente. Le couple estimé $T_{rouleau_est}$ et la vitesse $\Omega_{machine_mea}$ ont été mémorisés tout au long de l'exercice. Par la suite le signal de couple $T_{rouleau_est}$ a été appliqué au modèle en simulation. On retrouve à la figure 5.4 le profil de couple, en rouge, imposé lors d'un essai expérimental. La courbe en bleu correspond à l'estimation de ce couple lors du test expérimental. La courbe présentée à la figure 5-4 présente des valeurs filtrées avec une moyenne glissante. On observe que le couple estimé parvient à bien suivre le signal de couple appliqué.

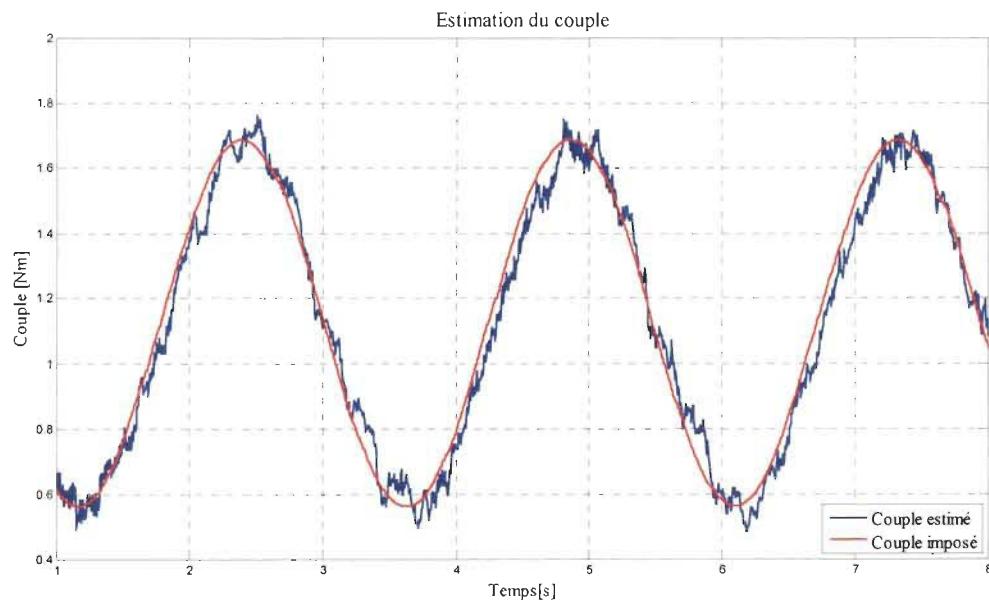


Figure 5-4 : Signal de couple imposé lors du test expérimental

5.2 Environnement du cycliste

Les forces exercées par l'environnement sur le cycliste lors de la réalisation de l'essai expérimental et pour la validation en simulation ont été comparées. Le profil de parcours, voir la figure 5-5, est celui qui a été imposé lors de l'essai.

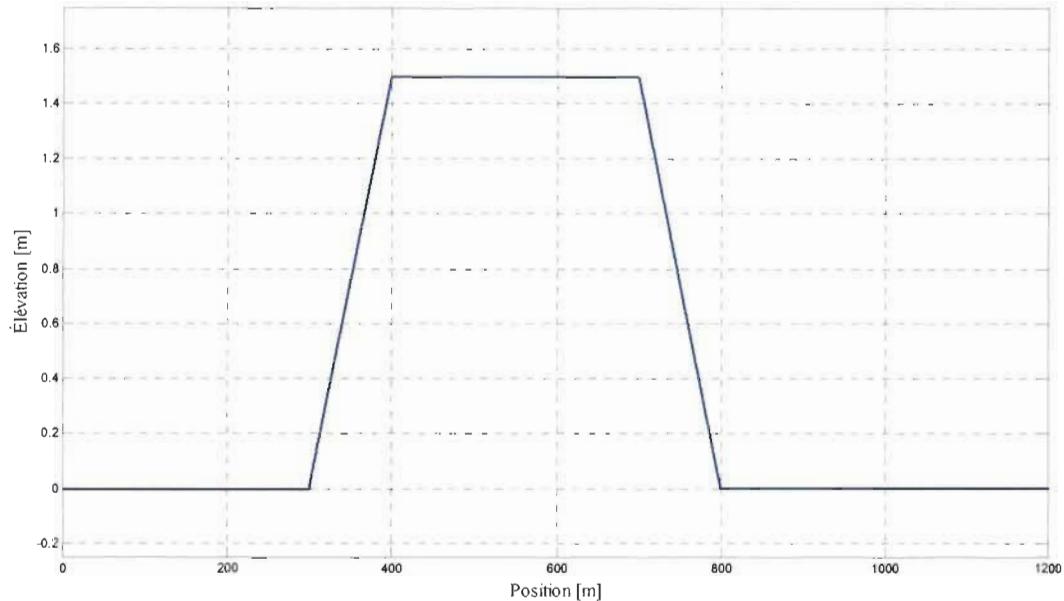


Figure 5-5 : Profil de parcours

On remarque à la figure 5-6, l'équivalence entre les forces exercées lors de l'expérimentation et lors de la validation en simulation. Les courbes de forces exercées correspondent à la somme des forces résistantes statique de friction, d'aérodynamisme et de gravité. Le calcul de l'erreur relative entre les forces résistantes obtenues lors de la simulation et de l'émulation HIL a été obtenu à partir de l'équation 5.1.

$$\varepsilon_{\text{forces résistantes}} = \frac{[F_{\text{rest simulation}} - F_{\text{rest Banc essais}}]^2}{F_{\text{rest simulation}}} \quad (5.1)$$

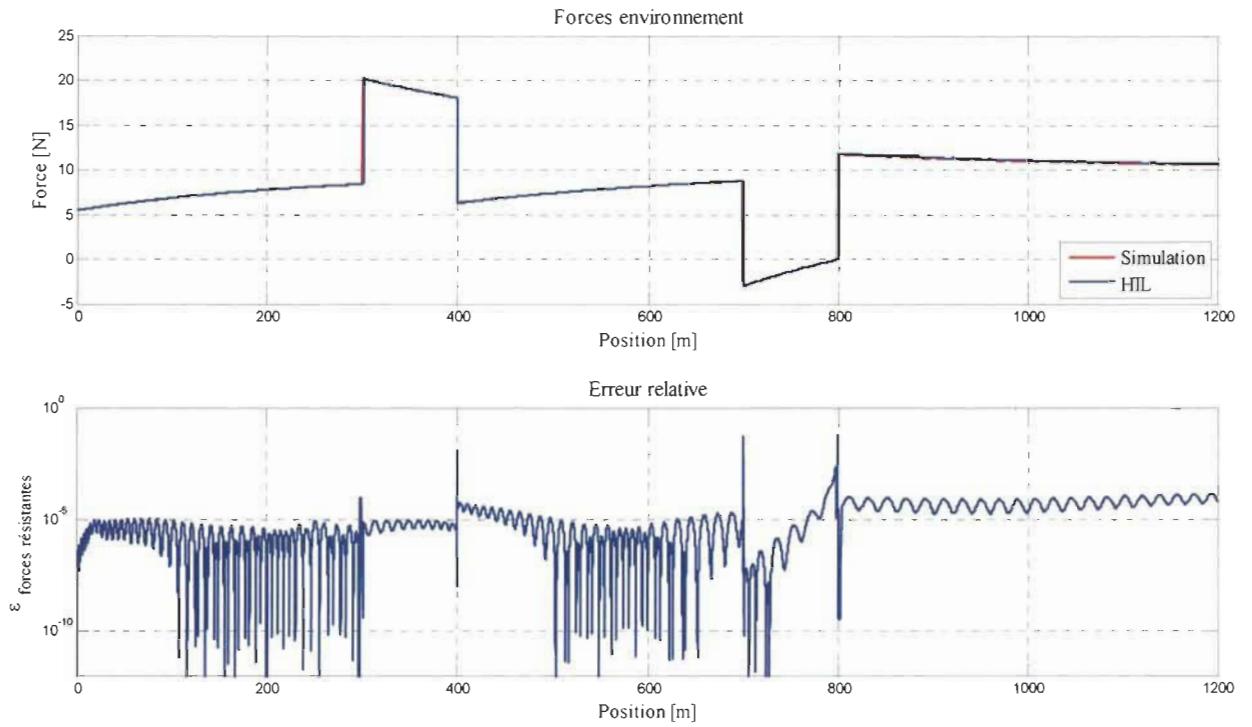


Figure 5-6 : Force imposée par le modèle d'environnement

5.3 Comparaison des vitesses

On remarque, à la figure 5-7, les profils de vitesses obtenus expérimentalement et lors de la validation en simulation. On y retrouve une faible divergence entre les vitesses, l'erreur relative demeure en dessous de 1%, ce qui implique que le chargement du vélo est comparable en simulation et sur le banc d'essais. Nous pouvons déduire que le modèle d'environnement utilisé en simulation modélisant l'environnement du cycliste a bien été reproduit sur le banc d'essais à l'aide de la commande de la machine cc exécutée sur la console temps réel.

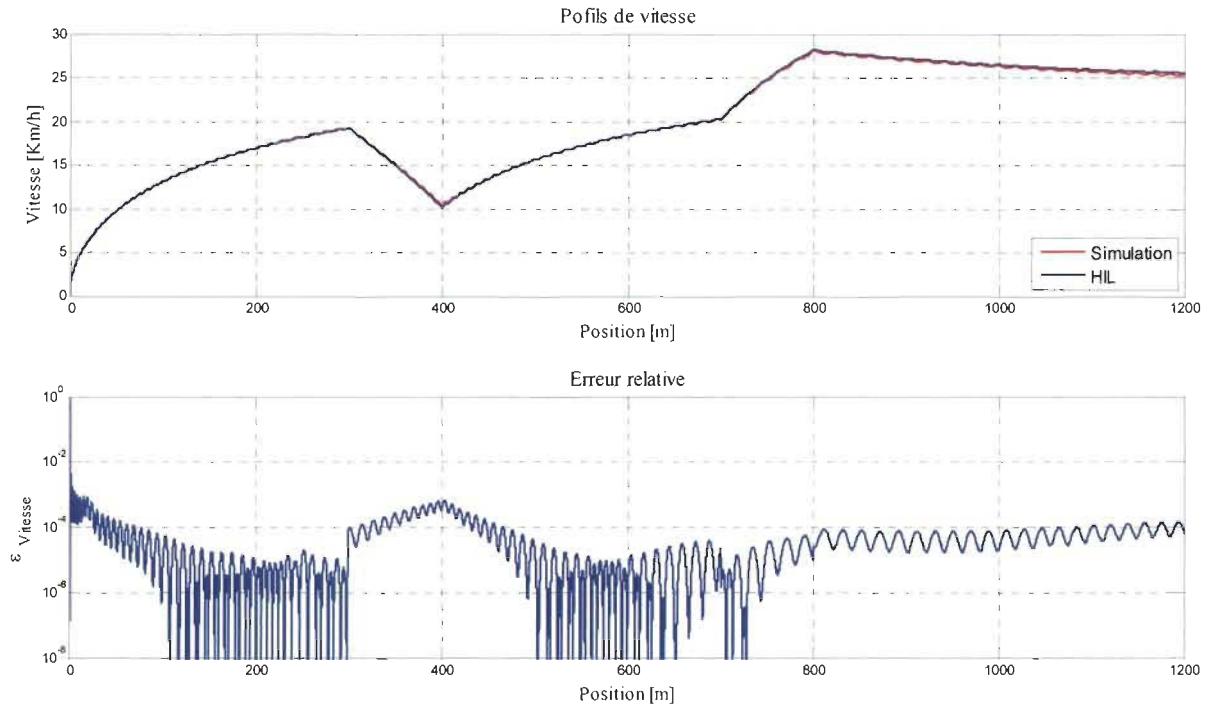


Figure 5-7 : Comparaison des vitesses en simulation et lors de l’émulation sur le banc d’essais

Comme observé lors de la comparaison entre le modèle cycliste moyen et le modèle du banc d’essais, on retrouve une composante sinusoïdale, correspondant au cycle de pédalage du cycliste, superposée au profil de vitesse. La composante sinusoïdale, figure 5-8, montre cette caractéristique reproduite expérimentalement.

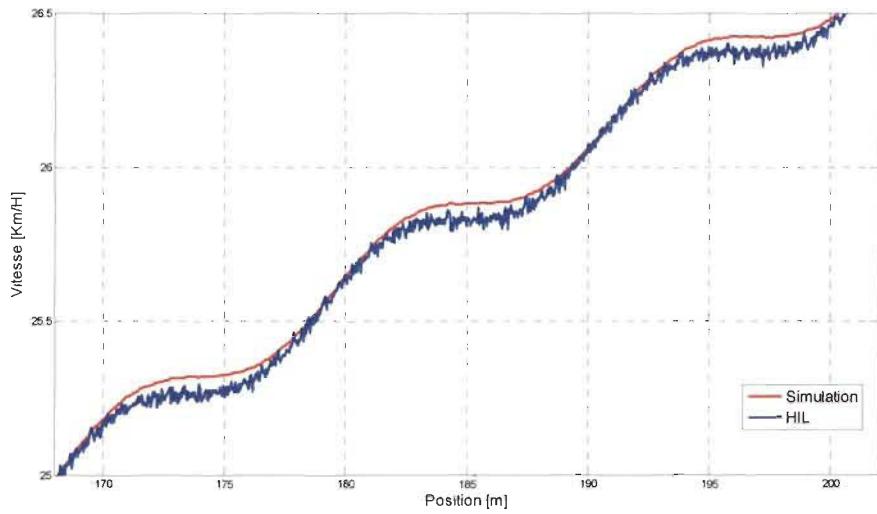


Figure 5-8 : Comparaison de l'effet du couple sur la vitesse cycliste lors de la simulation et des résultats HIL

Chapitre - 6 Conclusion

Les systèmes HIL offrent plusieurs avantages entre autres au niveau du développement, de la validation de lois de commande et de la mise en marché. Mais aussi, cette méthode peut s'intégrer dans la conception de systèmes divers dont, entre autres, les systèmes d'entraînement.

La méthodologie appliquée ici, montre qu'à partir d'une modélisation d'un phénomène dynamique, il est possible de définir les éléments nécessaires au développement d'une architecture HIL et d'établir le modèle de la dynamique à reproduire.

Cette méthodologie a été appliquée en utilisant un même outil, la REM, représentant le comportement énergétique des éléments qui le constituent. L'outil s'est avéré efficace à la fois pour le développement du modèle, mais aussi pour l'établissement de la structure de commande et l'observation de variables. L'outil a permis de poursuivre facilement vers les étapes de simulation et d'intégration pratique de par sa représentation graphique et son organisation structurante en bloc.

La validation du système développé a été effectuée successivement en diverses étapes. Premièrement en simulation, par l'utilisation d'un modèle moyen. Par la suite, en utilisant une modélisation plus fine des détails d'implantation du circuit de chargement électromécanique avec la bibliothèque SimPower System. Finalement, par un banc d'essai expérimental pourvu d'une console temps-réel. La comparaison des résultats de simulation

du cycliste sur un parcours prédéfini et de l'émulation ont permis de valider que la structure développée à partir de la REM accomplit le travail d'émulation de la charge. Par la suite, les données de force recueillies en pratique ont permis de comparer le comportement en simulation avec la pratique. Ainsi, il est possible d'admettre que le comportement dynamique à reproduire correspond bien à celui obtenu en pratique.

Cette recherche a permis d'établir une méthodologie complète pour l'élaboration d'un système de commande axé vers les systèmes énergétiques. Ce travail a permis de réaliser un article de conférence [Leblanc-10a] qui couvre le développement de ce système. Un article technique connexe [Leblanc-10b], découlant de l'approche HIL et de la modélisation par la REM, permet d'approfondir l'élaboration des lois de commande utilisées par cette approche et permet de couvrir la régulation du bus qui n'a pas été traitée ici. Le travail présenté peut s'étendre au développement de bancs de test pour véhicules électriques ou hybrides de toutes sortes.

Chapitre - 7 Bibliographie

- [Barre-06] P.J. Barre, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Dumetz, F. Giraud, J.P. Hautier, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, E. Semail. « Inversion-Based Control of Electromechanical Systems Using Causal Graphical Descriptions », IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics, 2006, Pages 5276-5281.
- [Béarée-06] R. Béarée, P.-J. Barre, J.-P. Hautier, « Control structure synthesis for electromechanical systems based on the concept of inverse model using Causal Ordering Graph », IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on 6-10 Nov. 2006 Page(s):5289 – 5294.
- [Bertucci-05] Bertucci M. W., Grappe F. et al.. « Effect on the crank torque when changing pedalling cadence in level ground and uphill road cycling », Journal of biomechanics, Elsevier, 2005, Volume 38, Pages 1003-1010.
- [Bertucci-11] Bertucci M. W., Grappe F., Crequy S. « Original Characteristics of a New Cycle Ergometer », International Sports Engineering Association, 2011, Volume 13, Issue 4, Pages 171-179.
- [Boulon-10a] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, O. Pape, M.-C. Péra, « Simulation Model of a Military HEV With a Highly Redundant Architecture », IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, Page(s): 2654-2663.

- [Boulon-10b] L. Boulon, K. Agbossou, Hissel, D., A. Bouscayrol, P. Sicard, A. Hernandez, Pera M.-C., , «Macroscopic Modelling and Representation of a PEM Fuel Cell Gas Supply taking into account the water phenomena», IEEE Vehicule Power and Propulsion Conference, 2010 Page(s):1 – 6.
- [Bouscayrol-08] A. Bouscayrol, , « Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives », IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008, Pages 2146 – 2151.
- [Bouscayrol-09] A. Bouscayrol, X. Guillaud, P. Delarue, B. Lemaire-Semail, « Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control Illustrated on a Wind-Energy Conversion System Using Hardware-in-the-Loop Simulation », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 56, Issue 12, 2009, pages 4826-4835.
- [Bouscayrol-10] A. Bouscayrol, W. Lhomme, C. Demian, A.L. Allègre, E. Chattot, S. El Fassi, « Experimental set-up to test the power transfer of an innovative subway using supercapacitors », IEEE Vehicule Power and Propulsion Conference, 2010, Pages 1-6.
- [Dingwell-08] Dingwell J.B., Joubert J.E., Diefenthaeler F.,Trinity J.D., « Changes in Muscle Activity and Kinematics of Highly Trained Cyclist During Fatigue », IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2008,Volume 55, Issue 11, Pages 2666-2674.
- [Dong-Soo-01] Don-Soo K., Gi-Hun Y., Chong-Won L., Jae-Cheol S., Youngjin P. Byungbo J., Doo Yong L., Kyungno L., Soon-Hang H., Byoung-Hyun Y.

- Kwan-Yun W., Jung-Hyun A. , « KAIST interactive bicycle simulator », IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, Volume 3, Pages 2313-2318.
- [EMR-12] EMR Library (2012, Décembre 10). [Disponible en ligne]. URL:www.emrwebsite.org/
- [Fennibay-10] D. Fennibay, A. Yurdakul, A. Sen, « Introducing Hardware-in-the-Loop Concept to the Hardware/Sofware Co-design of Real-time Embedded Systems », IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology, 2010, Pages 1902-1909.
- [Gauchia-10] L. Gauchia, J. Sanz, « A Per-Unit Hardware-in-the-Loop Simulation of a Fuel Cell/Battery Hybrid Energy System », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 4, 2010, Pages 1186-1194.
- [Gibson -11] Gibson T., « Turning sweat into watts », IEEE Spectrum, 2011, Volume 48, Numéro 7, Pages 50 – 55.
- [Grappe-05] F. Grappe, « Cyclisme et optimisation de la performance: sciences et méthodologie de l'entraînement », De Boeck Supérieur, 2005, Pages 295-299.
- [Leblanc-10a] M.-A. Leblanc, P. Sicard, « EMR and inversion-based control of a virtual reality bicycle trainer», IEEE Vehicule Power and Propulsion Conference, 2010, Pages 1-7.
- [Leblanc-10b] M.-A. Leblanc, P. Sicard, W. Lhomme, « Backstepping design of a supercapacitor storage subsystem for traction applications», IEEE Vehicule Power and Propulsion Conference, 2010, clé USB.

- [Leclercq-04] A. Leclercq, P. Sicard, A. Bouscayrol, B. Lemaire-Semail, « Control of a triple drive paper system based on energetic macroscopic representation », IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004, Page(s): 889-893, Vol. 2.
- [Lhomme-09] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, P. Le Moigne, P. Barrade, A. Rufer, « Comparaison of control strategies for maximizing energy in a supercapacitor storage subsystem », EPE journal, Vol. 19, no. 3, 2009.
- [Li-06] H. Li, M. Steurer, K.L. Shi, S. Woodruff, D. Zhang, « Development of a Unified Design for Wind Energy Systems Based on Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 53, Issue 4, 2006, pages 1144-1151.
- [Martin-98] J. Martin, D. Milliken, J. Cobb, K. McFadden, A. Coggan, « Validation of a mathematical model for road cycling power », Journal of applied biomechanics, 1998, vol. 14, Pages 276-291.
- [Ranky-10] Ranky R., Sivak M., Lewis J., Gade V., Deutsh J.E., Mavroidis C., « VRACK - Virtual reality augmented cycling kit : Design and validation», IEEE Virtual Reality Conference, 2010, Pages 135-138.
- [Smith-08] P.M. Smith, M. L. Chapman, K. E. Hazlehurst, M. A. Goss-Sampson, « The influence of crank configuration on muscle activity and torque production during arm crank ergometry », Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol. 18, 2008, Pages 598-605.

- [Thiffault-05] C. Thiffault, P. Sicard, A. Bouscayrol, « Desensitization to Voltage Sags of a Rewinder by Using an Active Dancer Roll for Tension Control», Proceeding of the IEEE IEMDC'05, San Antonio, TX, mai 2005.
- [Wankam-06] Y.D. Wankam, P. Sicard, A. Bouscayrol, «Maximum control structure of a five-drive paper system using Energetic Macroscopic Representation », IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on, 6-10 Nov. 2006 Page(s):5332 – 5337.
- [Yamaguchi-05] Yamaguchi J., A. Azhim, Hirao Y., Kinouchi Y., Yamaguchi H., Yoshizahi K., « A Change of Blood Flow During Strenuous Physical Excercises Using Cycle Ergometer », IEEE 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, 2005, Pages 6615-6618.
- [Zhong-06] H. Zhong, A. Guoqiang, J. Qiang, L. Yang, B. Zhuo, « The Development of a Real-Time Hardware-in-the-Loop Test Bench for Hybrid Electric Vehicules Based on Multi-Thread Technology », IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2006, Pages 470-475.
- [Zhou-09] C. Zhou, K. Liu, H. Liu, « The Simulation Research of Parallel Hybrid Electric Vehicle Based on Virtual Prototype Technique », Power and Energy Engineering Conference, Asia-Pacific, 2009, Pages 1- 6.

Annexe A – Calculs des paramètres des contrôleurs

Les calculs des paramètres pour les contrôleurs se basent sur la dynamique du sous-système de premier ordre à commander, c'est-à-dire des blocs d'accumulations d'énergie à inverser.

$$H(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (\text{A.1})$$

Où :

$H(s)$: Fonction de transfert du système premier ordre à commander

τ : Constante de temps du système premier ordre à commander

k : Gain statique du système premier ordre à commander

Les contrôleurs utilisés sont de type PI.

$$C(s) = \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) k p_1 \quad (\text{A.2})$$

Où :

$C(s)$: Fonction de transfert du contrôleur PI

K_i : Gain intégral

K_p : Gain proportionnel

La fréquence naturelle est imposée par le choix d'un temps de stabilisation à 1% de la valeur finale et du facteur d'amortissement ζ .

La fréquence naturelle pour un facteur d'amortissement $\zeta = 1$, à imposer s'exprime approximativement par :

$$\omega_n = \frac{5}{\zeta \times t_s} \quad (\text{A.3})$$

Où :

t_s : Temps de stabilisation désirée

ζ : Facteur d'amortissement

Les paramètres des contrôleurs sont déduits des équations suivantes :

$$K_i = \frac{\tau \times \omega_n^2}{k \ K_p} \quad (\text{A.4})$$

$$K_p = \frac{2 \times \zeta \times \omega_n \times \tau - 1}{k} \quad (\text{A.5})$$

Où :

τ : Constante de temps du système premier ordre à commander

k : Gain statique du système premier ordre à commander

ζ : Facteur d'amortissement désiré

ω_n : Fréquence naturelle désirée

Annexe B –Paramètres de simulation

Cycliste et environnement			
Couple minimal appliqué au pédalier par le cycliste	$T_{pédalier_min}$	10	Nm
Couple maximal appliqué au pédalier par le cycliste	$T_{pédalier_max}$	35	Nm
Fréquence du signal de couple produit par le cycliste	f_{couple}	12,6	rad/sec
Nombre de dent du plateau	D_{av}	50	
Nombre de dent du pignon	D_{arr}	13	
Masse du cycliste	$M_{cycliste}$	70	Kg
Masse du vélo	$M_{vélo}$	10	Kg
Inertie de la roue arrière du vélo, ramenée à la machine à cc	J_{roue_arr}	0.0011	Kg·m ²
Inertie de la roue avant du vélo, ramenée à la machine à cc	J_{roue_av}	0.0010	Kg·m ²
Rayon des roues du vélo	R_{Roue}	0.35	m
Densité de l'air	ρ	1.2234	Kg/m ³
Surface de front du cycliste	S	0.264	m ²
Coefficient aérodynamique	$C_{aéro}$	0.6685	
Coefficient de friction entre la roue et la route	$C_{friction}$	0.0032	

Couplage mécanique			
Rayon du rouleau	$R_{rouleau}$	0.1016	m

Machine à courant continu			
Constante de couple/tension de la machine à cc	$K\Phi$	0.64	Nm/A
Inductance d'induit	L	43.34	mH
Résistance de l'induit	R	6.4	Ω
Inertie	$J_{machine}$	0.0548	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Coefficient de frottement visqueux	B	0.0053	N.m.s
Coefficient de frottement sec	T_c	0.4958	Nm
Inductance de l'inducteur	L_f	113.36	mH

Contrôleur de vitesse		
Gain de l'intégrateur	Ki_1	0.03
Gain proportionnel	Kp_1	4

Contrôleur du courant		
Gain de l'intégrateur	Ki_2	500

Gain proportionnel	Kp_2	100
--------------------	--------	-----

Observateur de couple rouleau		
Gain de l'intégrateur	Ki_3	850
Gain proportionnel	Kp_3	0.25

Annexe C – Cycliste et système de traction

Calcul de la fréquence du signal de couple produit par le cycliste :

$$f_{couple} = \frac{\Omega_{pédalier} \times \pi}{15} \quad (\text{C.1})$$

Tel que schématisé à la figure 2.5, le couple fourni par le cycliste est transmis par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenage et d'une chaîne à la roue arrière. Ainsi, à partir du dimensionnement mécanique du vélo, il est possible d'obtenir le profil de force qui constitue l'entrée du système d'émulation.

$$K_{trans} = \frac{D_{av}}{D_{arr}} \quad (\text{C.2})$$

$$T_{pédalier} = K_{trans} \times T_{roue} \quad (\text{C.3})$$

$$\Omega_{roue} = K_{trans} \times \Omega_{pédalier} \quad (\text{C.4})$$

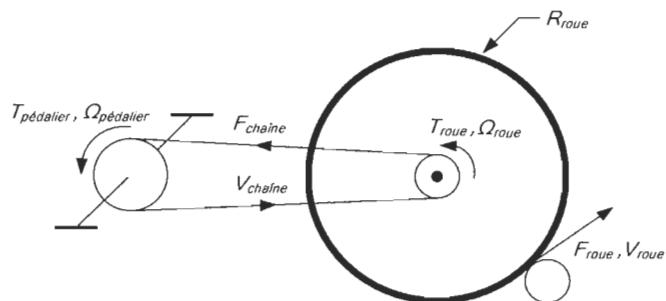


Figure C-1 : Variables du système de transmission du vélo