



Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:**

**MASTER**

**Filière : Electrotechnique**

**Option : Commande Electrique**

***Thème***

Commande de roues motrices d'un véhicule électrique

**Présenté par :** -Saidani Redha

- Benkechida Alaeddine

**Devant le jury:**

**Président** : BENCHEIKH Abdelhalim Université de Bordj Bou Arreridj

**Examineur 1** : MERABET Elkheir Université de Bordj Bou Arreridj

**Examineur 1** : CHOUDAR Adel Université de Bordj Bou Arreridj

**Rapporteur** : ZEBIRI Fouad Université de Bordj Bou Arreridj

# REMERCIEMENTS

Nous remercions dieu ALLAH qui nous à donné la force et la volonté d'accomplir ce  
modeste travail.

Cette tache n'aurai pu aboutir sans le soutien de plusieurs personnes aux quelles nous  
exprimons ici toute notre reconnaissances et sympathie.

On remercie très profondément : mon encadreur Monsieur ZEBIRI Fouad, pour avoir dirigé  
ces travaux par ses précieux conseils, qui n'a pas hésiter à nous fournir ses remarques et  
son aide précieuse.

Nos sincères remerciements aux membres de jury qui ont bien voulu honorer de leur  
présence notre soutenance.

Nous remercions également tous les enseignants de l'institut .

En fin nous remercions vivement tous ceux qui de prés ou de loin, ont contribué d'une  
manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire.

---

# *Dédicace*

Je dédie cette thèse.

- A mes très chers parents.
- A ma femme et mes enfants.
- A mes très chers sœurs et frères.
  - A toute ma famille.
  - A tous mes collègues.

Saidani ridha

---

# *Dédicace*

Je dédie cet humble travail:

A mes chers parents pour les encourager

Les sacrifices que vous avez faits.

À mes frères et soeurs.

À mes chers amis qui se soucient de moi et de tous mes amis.

À tous les membres de ma famille de près ou de loin.

Pour tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Alaeddine Ben kechida

---

## Résumé

L'objectif de ce projet était de réaliser par simulation, la commande des roues motrices d'un véhicule électrique, le choix du système de traction proposé dans cette mémoire est un véhicule électrique avec deux moteurs à courant continu sans balais (BLDC) qui sont alimentés par une batterie à travers un convertisseur pour entraîner les deux roues motrices du véhicule. Les moteurs sont commandés indépendamment en utilisant un différentiel électronique. Toutefois, les contrôleurs mis en œuvre dans ce travail pour les moteurs sont basés sur la commande par un contrôleur PI.

Pour cela on a construit un modèle Simulink de cette commande après une étude théorique suivie d'une modélisation mathématique des différents éléments de la structure véhicule ainsi de la commande tel que le moteur BLDC, les convertisseurs buck et boost .

**Mots clés :** Véhicule Électrique (VE), Moteur synchrone autopilotée à aimant permanent (PMBLDC), PI, Commande linéaire, la commande des roues motrices d'un véhicule électrique.

### الملخص

الهدف من هذا المشروع هو التحكم في عجلات قيادة مركبة كهربائية عن طريق المحاكاة، حيث تم اختيار نظام جر يتمثل في سيارة كهربائية بمحركين تيار مستمر بدون فرش حيث تتم تغذيتهما بواسطة بطارية عن طريق محول. المحركان يتحكم فيهما كل على حدى وذلك باستعمال نظام تفاضلي الكتروني والتحكم المستعمل في هذا العمل للمحركان يركز على المتحكم التناسبي التفاضلي.

لهذا الغرض تم بناء نموذج محاكاة للمتحكم التناسبي التفاضلي وذلك بعد دراسة نظرية متبوعة بنمذجة رياضية لمختلف العناصر المكونة للسيارة الكهربائية وكذا نظام التحكم لكل من محرك تيار مستمر بدون فرش ومحول تيار مستمر-مستمر خافض ورافع.

**الكلمات المفتاحية:** مركبة كهربائية، محرك تيار مستمر بدون فرش ،المتحكم التناسبي التفاضلي ،التحكم الخطي التحكم في عجلات قيادة السيارة الكهربائية.

# Sommaire :

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 01:</b>	<b>Généralités Sur Les Véhicules Electriques</b>
1. Généralités Sur Les Véhicules Electriques.....	2
Introduction.....	2
Historique des véhicules électriques.....	2
Différents types de véhicule électrique.....	3
Véhicules hybrides.....	3
1.1                Architecture des véhicules hybrides.....	3
1.2                a) Les hybrides à moteur en série :.....	3
1.3                1.3.1                b) Les hybrides à moteurs en parallèle.....	4
1.3.1.1                c) Les hybrides compound ou dual.....	4
Avantages et inconvénients des véhicules hybrides.....	5
Véhicules 100%électriques.....	5
1.3.1.2                Description Générale De La Chaîne De Traction.....	5
1.3.2                Principe de base :.....	5
1.4                1.4.1                Architecture d'une chaîne de traction d'un VE :.....	6
1.4.2                Les sources d'énergie.....	8
1.4.3                1.4.3.1                Batteries.....	8
1.4.3.2                Piles à combustible.....	10
1.4.3.3                Supercondensateur (SC).....	11
1.4.4                Contrôle électronique.....	11
1.4.5                Convertisseur d'énergie électrique.....	11
1.4.6                a) Convertisseur DC-DC.....	12
1.4.7                b) Convertisseur DC-AC :.....	13
1.4.7.1                Architecture de motorisation.....	13
Motorisation de la chaîne de traction.....	14
1.4.7.2                Moteur à courant continu.....	15
a) Moteur à excitation série.....	15
b) Moteur à excitation séparée.....	15
c) Moteur à aimants permanents.....	15
Moteur à courant alternatif.....	15
a) Moteur asynchrone.....	15
b) Moteur synchrone.....	16
→ Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....	16
→ Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	17

	→ Moteur synchrone à reluctance variable (MRV) .....	17
	Choix du moteur de traction.....	18
	Transmission mécanique.....	19
	Le type de véhicule électrique.....	19
	Véhicule électrique mono-moteur.....	20
	Véhicule électrique multi-moteur .....	20
1.4.8	Chargement.....	20
1.4.9	Avantages et inconvénients des véhicules électriques a batteries.....	22
1.4.10	Conclusion .....	22
1.4.10.1		
1.4.10.2		
1.4.11	<b>Chapitre 02: Modélisation des convertisseurs et du moteur</b>	
1.5	2. Modélisation des convertisseurs et du moteur.....	23
1.6	2.1. Introduction.....	23
	2.2. Modélisation des convertisseurs : .....	23
	2.3. Mode de fonctionnement du convertisseur statique.....	24
	2.3.1. Mode de Conduction Continue (MCC) :.....	24
	2.3.2. Mode de Conduction Discontinue (MCD) : .....	24
	2.4. Hypothèses.....	24
	2.5. Hacheur Buck (dévolteur) :.....	24
	2.6. Etude du convertisseur BUCK en régime permanent. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
	2.6.1. Etude Théorique En Conduction Continue globale : .....	25
	2.6.2. Dimensionnement des composants : .....	29
	2.7. Etude du convertisseur BUCK en régime dynamique .....	33
	2.7.1. Modélisation par modèle d'état moyen « state-space averaging methods » « model moyen grands signaux ».....	33
	2.7.1.1. Fonctionnement en mode continu : .....	33
	2.7.1.2. Linéarisation des équations différentielles : .....	36
	2.7.1.3. La fonction de transfert pour les petits signaux de perturbation : .....	37
	2.7.2. Régulation d'un Buck à l'aide d'un correcteur PI : .....	38
	2.8. Hacheur Boost (survolteur) : .....	39
	2.9. Convertisseur bidirectionnel DC/DC : .....	41
	2.9.1. En mode Boost : .....	41
	2.9.2. En mode Buck : .....	42
	2.10. Résultats de simulation : .....	43
	2.10.1. Convertisseur BUCK : .....	43
	2.10.2. Convertisseur BOOST : .....	45
	2.10.3. Convertisseur Bidirectionnel : .....	48



---

# **Introduction générale**

---

# Introduction générale

Le développement récent du véhicule électrique répond essentiellement à un souci de protection de l'environnement et à un impératif d'économie d'énergie[7].

A côté de ces deux principales qualités, le véhicule électrique est d'un entretien plus simple et est plus fiable que le véhicule classique à moteur à combustion interne. De plus, la durée de vie d'un moteur électrique est généralement de loin supérieure à celle de son équivalent à combustion interne[5].

La capacité de développer très rapidement et avec précision le couple nécessaire dans toutes les conditions de conduite est très intéressant dans les véhicules[7].

Un véhicule électrique peut être motorisé de différentes façons selon le degré de simplification mécanique souhaité de la chaîne de traction, les moteurs peuvent aussi être entièrement intégrés dans les roues[6].

L'objectif de notre travail est de réaliser par simulation, la commande des roues motrices d'un véhicule électrique, notre choix est porté sur le moteur BLDC suivie d'une étude du régulateur de vitesse PI dans la commande trapézoïdale d'un moteur BLDC.

Ceci va nécessiter une modélisation mathématique après une étude théorique suivie de la conception de modèles Simulink des différents éléments composant la structure générale de la voiture électrique tel que le moteur BLDC, les convertisseurs buck et boost, avec ses commande.

Pour satisfaire les besoins de ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de trois chapitres :

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre intitulé, on a abordé des généralités sur les véhicules électriques avec une description générale de la chaîne de traction.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre a été consacré à la description et à la modélisation des convertisseurs et du moteur où on a présenté le modèle mathématique de ces différents éléments ainsi que la commande de la tension.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre a été consacré à la modélisation et la commandes des roues motrices du véhicule électrique. Dans lequel ; nous avons réalisé l'objectif de notre travail par la commande d'un moteur BLDC en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

---

# **Chapitre 01**

---

**GENERALITES SUR LES  
VEHICULES ELECTRIQUES**

# 1. Généralités Sur Les Véhicules Electriques

## 1.1 Introduction

Les véhicules électriques (VE's) constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants).

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est le véhicule électrique. Il commence par une présentation d'un bref état d'art de la traction électrique (la classification des voitures électriques, le système de puissance, le choix du type de configuration). Ensuite, nous discutons les principaux composants de la chaîne de traction (batteries, motorisation...) et nous déterminons la configuration la plus avantageuse. Enfin, nous citons quelques avantages et inconvénients des véhicules électriques.

## 1.2 Historique des véhicules électriques

La voiture électrique est apparue très tôt dans l'histoire de l'automobile, les premières datent des années 1830 (la date exacte est inconnue). Jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la plupart des automobiles étaient électriques[5].

Le véhicule électrique à batteries, souvent perçu comme ayant une motorisation « nouvelle », est en réalité à peu près aussi ancien que le véhicule à essence. C'est en 1880 que Charles Jeantaud, Camille Faure, Gustave Trouvé et Nicolas Raffard réalisent les premiers véhicules électriques. Cette prouesse technologique est rendue possible grâce à l'invention, vingt et un ans plus tôt, de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté et Camille Faure. Mais c'est en 1899 que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux du monde entier. En effet, la « Jamais Contente », pilotée par C. Jenatzy, est la première voiture à dépasser 100km/h. Chemin faisant, la voiture électrique est commercialisée un peu partout. En 1911, on trouve à Paris ainsi qu'à Londres des taxis électriques. Avant la Première Guerre mondiale, un tiers des véhicules américains roulent à l'électricité[6].

En plus d'être écologiques, elles étaient plus performantes et plus silencieuses que leurs rivales. Ce n'est qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle que la voiture à essence connaît un succès plus important[5]. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence[5].

Les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique[5].

Au début des années 60 les états se sont intéressés au développement de ce type de véhicules et il en résulte l'apparition au début des années 90 des véhicules tel que ( la Peugeot 106 construit par le groupe PSA et la EV1 faite par l'américain général Motors). Seules durant les trente dernières années ont apporté des progrès réels, ils concernent principalement le stockage de l'énergie, avec l'apparition sur le commerce des premières batteries au Lithium-Ion.

Plusieurs programmes de recherche sur les véhicules électriques ont eu lieu récemment pour déclarer l'arrivée prochaine de cette technologie, en raison de la hausse des prix du pétrole et de l'émergence de certains problèmes environnementaux comme la pollution de l'air dans les zones urbaines, qui résultait de l'utilisation incontrôlée du moteur à essence conventionnel. Cependant,

le véhicule électrique semble être une solution prometteuse pour réduire le trafic dans les grandes villes, car ce type de voiture n'induit pas de pollution atmosphérique et sonore [7].

## 1.3 Différents types de véhicule électrique

Il existe 2 grandes familles de véhicules électriques :

100% électriques et les véhicules "*hybrides*" qui utilise un moteur électrique pour améliorer le rendement de la partie thermique et augmente l'autonomie entre deux pleins.

### 1.3.1 Véhicules hybrides

Les technologies hybrides ont été inventées pour plusieurs raisons : le respect de l'environnement, le confort du conducteur, de meilleures performances, mais aussi pour améliorer le rendement de la partie thermique et augmenter l'autonomie entre deux pleins.

Un véhicule hybride, est la combinaison d'une motorisation électrique avec une motorisation thermique, assurant la propulsion du véhicule.

Les véhicules hybrides sont une innovation emballante en technologie. Ces véhicules comprennent généralement un moteur à combustion interne, un moteur électrique, un générateur et un bloc-batterie. Il est possible de varier la nature, la configuration et l'intégration de ces composantes afin de maximiser la performance et l'efficacité du véhicule et de réduire les émissions.

Le véhicule hybride est équipé d'un groupe motopropulseur combinant :

Un *générateur*, qui est réversible, caractérisé par une énergie massique élevée assurant l'autonomie du véhicule, et qui est susceptible de fournir la puissance moyenne nécessaire au véhicule.

Un *accumulateur d'énergie réversible*, fournissant une puissance supérieure à celle du générateur et possédant une énergie au moins égale à l'énergie cinétique de véhicule à pleine charge.

Un *système de transmission et de commande*, capable de répartir les flux , ce sont les reflux l'énergie entre générateur, accumulateur et utilisation.

#### 1.3.1.1 Architecture des véhicules hybrides

L'architecture des véhicules hybrides se résume à trois variantes essentielles :

##### a) Les hybrides à moteur en série :

Le système Hybride série permet au moteur électrique de diriger seul la rotation des roues en utilisant la puissance générée par le moteur thermique. Un Hybride série, est composé d'un moteur électrique, d'un moteur thermique, d'un générateur, d'une batterie et d'un inverseur. Lors des faibles vitesses, le moteur thermique est utilisé par intermittence pour alimenter soit le moteur électrique, soit pour recharger la batterie. Le tout électrique, est utilisé en ville, sur route le moteur thermique assure la recharge de la batterie ainsi que l'alimentation du moteur électrique. Le nom série vient du fait que le moteur thermique, est directement lié en série au moteur électrique[5].

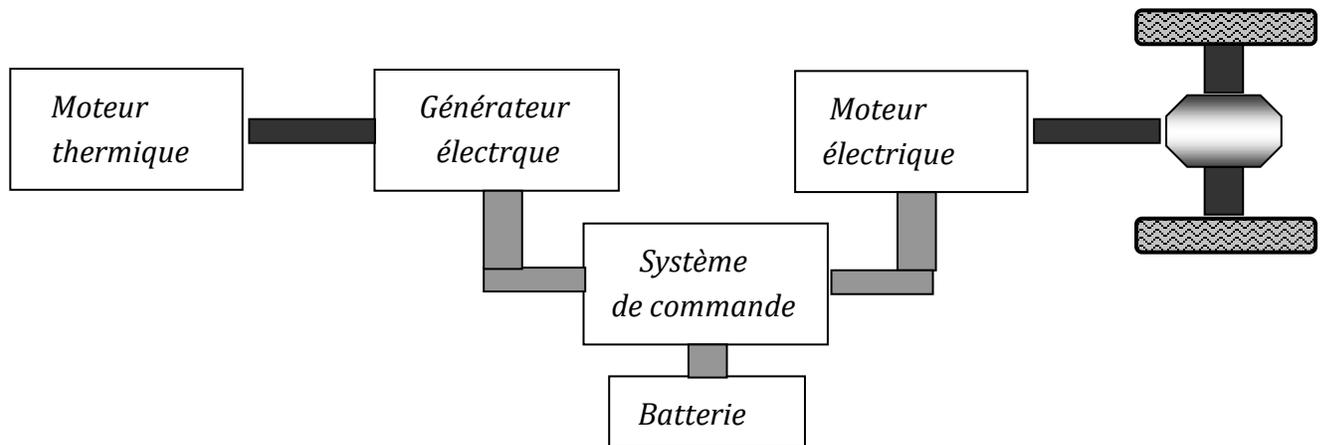


Figure 1.1 Véhicule hybride : configuration en série

### b) Les hybrides à moteurs en parallèle

les moteurs électrique et thermique assurent tous les deux la rotation des roues, par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie. Un hybride parallèle se compose d'un moteur thermique, un moteur électrique, une batterie, un inverseur, et d'une transmission. Le moteur électrique, est alimenté cette fois par la batterie et non par le moteur thermique, il fonctionne également en tant que générateur pour recharger la batterie. L'inconvénient est qu'il ne peut produire de l'électricité durant la conduite. Encore une fois le moteur électrique fonctionne lors des conduites en ville et le moteur thermique lors des plus fortes demandes en puissance soit sur la route. Le nom parallèle vient du fait que le courant est parallèle[5].

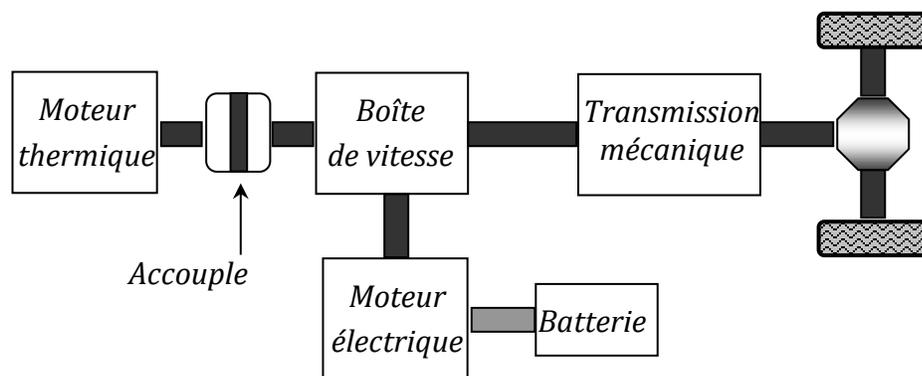


Figure 1.2 Véhicule hybride : configuration en parallèle

### c) Les hybrides compound ou dual

Le système série/parallèle est la combinaison du moteur électrique et thermique permettant la rotation des roues en rendant de l'électricité à la recharge de la batterie par l'intermédiaire du générateur. Ce système a l'avantage de pouvoir sélectionner les moteurs soit électrique soit thermique ainsi qu'une recharge permanente des batteries. Il est composé d'un moteur électrique, d'un moteur thermique, un générateur, un répartiteur d'énergie, d'un module de commande l'alimentation (inverseur/convertisseur). Le répartiteur, permet de faire fonctionner le moteur électrique ainsi que de produire de l'électricité pour recharger les batteries, ceci tout en essayant d'obtenir le meilleur rendement possible en fonction des conduites (ville, route...) [5].

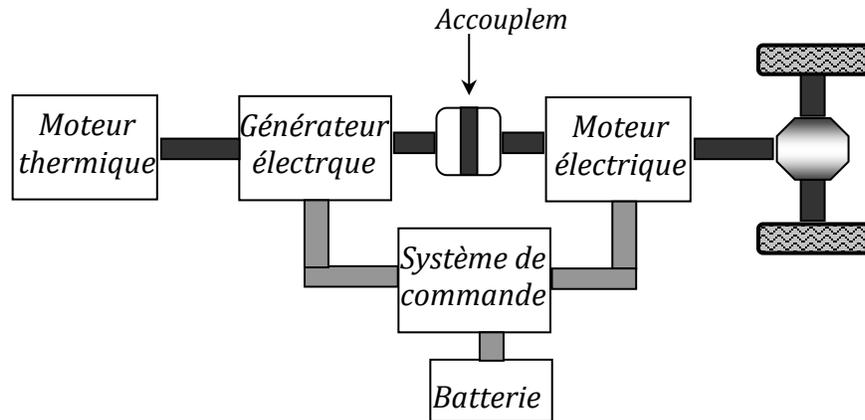


Figure 1.3 Véhicule hybride : configuration en série-parallèle

### 1.3.1.2 Avantages et inconvénients des véhicules hybrides

Parmi les avantages on site :

- L'économie de carburant.
- Faibles émissions en ce qui concerne la pollution.
- Une conduite agréable et performante.
- Un rendement près de deux fois supérieur à celui des véhicules classiques.
- Une très bonne autonomie

Les points majeurs des inconvénients sont :

- Le prix reste bien élevé comparé aux automobiles "classiques".
- Le poids est plus lourd suite à l'utilisation de pièces supplémentaires.

### 1.3.2 Véhicules 100%électriques

Un Véhicule Electrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue.

C'est un système complexe constitué de composants très variés de natures différentes (mécanique, électrique, électrochimique,) en interaction. Son comportement est donc sensible à toute variation des caractéristiques de l'un de ses composants à travers ces interactions.

## 1.4 Description Générale De La Chaîne De Traction

### 1.4.1 Principe de base :

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la figure 1.4. Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique.

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Elle possède en plus des propriétés intéressantes comme un silence de fonctionnement

presque total ainsi que la capacité à se recharger dans les phases de décélération du véhicule, de plus les émissions polluantes sont nulles sur le lieu d'utilisation.

Une chaîne de traction se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel) [7] [6] [5].

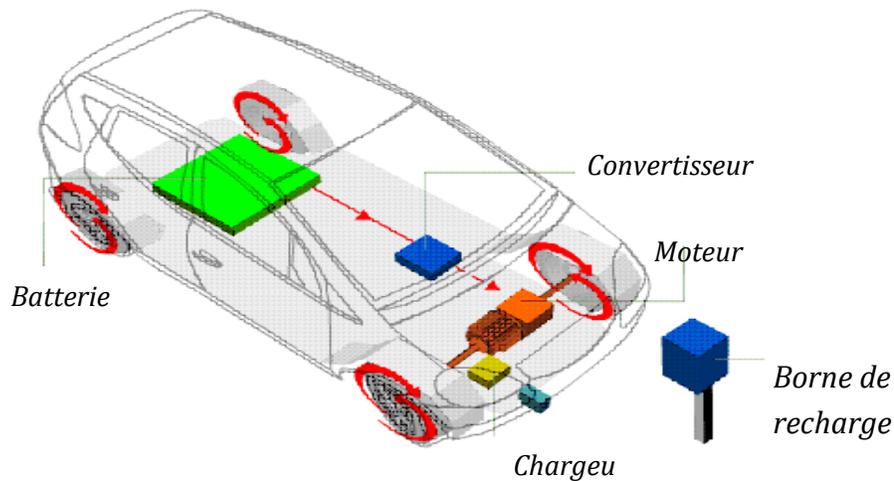


Figure 1.4 fonctionnement d'un véhicule électrique

### 1.4.2 Architecture d'une chaîne de traction d'un VE :

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses.

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur.

Grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la Figure1.5[5].

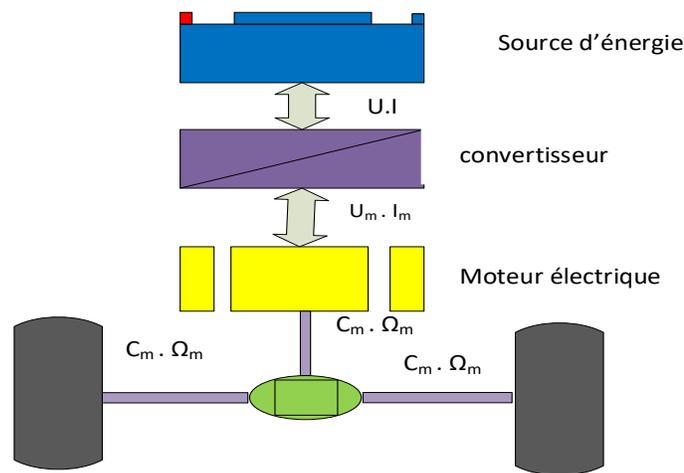


Figure 1.5 Chaîne de traction électrique[5].

Le Système de traction est un ensemble des organes traversés par le flux d'énergie, et qui assurent à un véhicule sa capacité de mouvement. Il est composé d'une chaîne de traction et d'un générateur d'énergie embarquée.

- Chaîne de traction ; Organe du système de traction assurant la transmission mécanique du mouvement. Elle est composée des roues, du différentiel de la transmission ou boîte de vitesse (BV) et d'un moteur convertissant l'énergie sortant du générateur embarqué en énergie mécanique
- Générateur ou source d'énergie embarquée : Organe du système de traction assurant le stockage et l'adaptation de l'énergie. Il est composé d'un système de stockage et d'un système d'adaptation (convertisseur et /ou transformateur).
- Convertisseur d'énergie : Système qui change la nature de l'énergie.
- Transformateur d'énergie : Système qui conserve la nature de l'énergie mais change son typage (boîte de vitesse, convertisseur électrique DC/AC .
- Typage de l'énergie : Caractérise les paramètres d'une énergie de même nature (pour l'électrique : tension, courant, fréquence,).
- Nature de l'énergie : Caractérise les différentes formes que peut prendre l'énergie (mécanique, électrique .... Un différentiel est un système mécanique qui a pour fonction de distribuer une vitesse de rotation par répartition de l'effort cinématique, de façon adaptative, immédiate et automatique, aux besoins d'un ensemble mécanique.
- Un engrenage est un système mécanique composé de deux roues dentées servant la transmission du mouvement de rotation
- Un réducteur est système d'engrenage dont le rapport de transmission est inférieur à 1, pour augmenter le couple moteur d'une rotation[5].

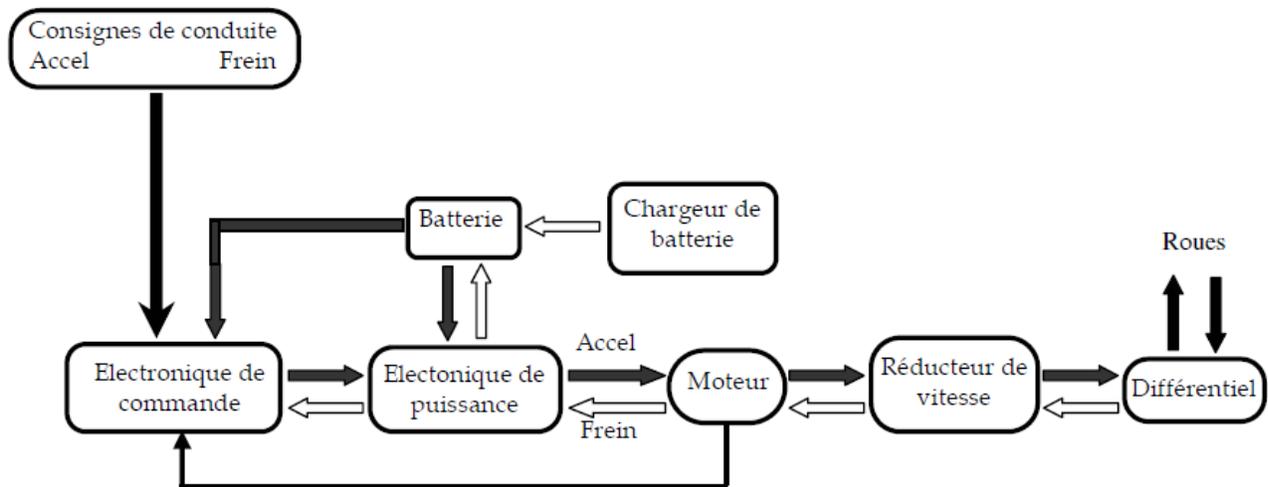


Figure 1.6 Schéma synoptique d'une chaîne de traction

### 1.4.3 Les sources d'énergie

L'utilisation de l'électricité comme source d'énergies pour propulser un véhicule automobile est donc un véritable défi. Concernant le stockage embarqué de l'énergie électrique pour les VE, les accumulateurs électrochimiques offrent actuellement les meilleures performances en termes d'énergie massique ou volumique. Le stockage de l'énergie électrique est le problème majeur du véhicule électrique. Dans cette partie, nous présenterons de manière succincte les technologies possible

#### 1.4.3.1 Batteries

De nos jours, les systèmes de stockage les plus efficaces et les plus prometteurs sont constitués de batteries ou de systèmes hybrides (par exemple batteries plus SC). Une batterie se compose de deux ou plusieurs cellules électriques combinées en série ou en chaînes parallèles pour atteindre la tension et la capacité souhaitées. Les cellules convertissent l'énergie chimique en énergie électrique. Les cellules comprennent des électrodes négatives et positives dans un électrolyte. L'électricité CC est générée par la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte. Comme pour les batteries secondaires ou rechargeables, la réaction chimique peut être inversée en inversant le courant et la batterie est remise à un état chargé. Le BEV réel est relativement faible en termes de densité d'énergie, ce qui peut directement influencer la distance maximale de conduite entièrement électrique de l'EV.

L'autonomie du véhicule est fonction de l'énergie stockée dans la batterie (énergie massique de la batterie). Les nouvelles générations de batteries permettent des autonomies plus importantes, sans que l'on soit obligé d'embarquer des quantités trop importantes de batteries, on attend d'une batterie de traction les caractéristiques suivantes[6] :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance /poids en W/kg) permettant des accélérations importantes.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles charge/ décharge, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Entretien faible et recyclable.

- Possibilité de recharge rapide, c-à-d dans le temps le plus court possible

Parmi ces différentes technologies de batteries, certaines batteries peuvent être utilisées sur les véhicules électriques notamment :

#### ❖ Batterie au plomb:

Cette technologie offre des performances à haut débit, des performances modérées à basse et haute température, une indication facile de l'état de charge et une bonne rétention de charge pour les applications de charge intermittente. Il y a peu d'inconvénients comme : une faible densité d'énergie et une longue durée de charge, lourde et qu'elle nécessite un entretien soigneux.

#### ❖ Batterie au nickel- cadmium (NiCd):

Elle a été utilisée au début de l'exploration spatiale. Elle a un long cycle de vie, une bonne basse température et peut être complètement déchargé sans dommage. Comme inconvénients, elle est coûteuse, comme le cadmium est très toxique, l'utilisation de ces batteries dans les VE est donc interdite.

#### ❖ Batterie au nickel-hydrure métallique (NiMH) :

Ces cellules ont une capacité plus élevée que celles au nickel-cadmium, une capacité de recharge rapide, une longue durée de vie et une longue durée de conservation. Les inconvénients de cette technologie sont qu'elle présente une faible efficacité de charge et de décharge, un coût élevé, une mauvaises performances par temps froid.

#### ❖ Batterie au sodium-chlorure de nickel (Na/NiCl) :

Certains avantages de ces batteries sont leur densité d'énergie relativement élevée de 90 à 120 Wh / kg, ainsi que leur insensibilité à la température ambiante. Cependant, le principal inconvénient de ces batteries est qu'elles doivent être rechargées lorsqu'elles ne sont pas utilisées donc elles sont également inefficaces car elles consomment de l'énergie même lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

#### ❖ Batterie Lithium-Ion (Li-ion) :

Les batteries Li-ion se caractérisent par leur densité d'énergie, ce qui permet au véhicule d'avoir une plus longue autonomie électrique uniquement ; cependant, ils n'ont généralement pas la puissance spécifique pour fournir ou accepter des pics de puissance importants. Elles sont utilisées principalement dans les derniers véhicules électriques de nos jours.

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous présente quelques chiffres permettant de situer les différentes technologies de batteries :

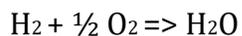
Couple	<i>Pb/PbO<sub>2</sub></i>	<i>Ni /Cd</i>	<i>Ni / MH</i>	<i>Na/ NiCl</i>	<i>Li / NiO<sub>2</sub></i>	<i>Li / M<sub>3</sub>O<sub>z</sub></i>
Température dfonctionnement [°C]	0→45	0→50	300	270→350	ambiante	ambiante
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	170	236	55→ 80	794	175	275

Densité d'énergie [Wh/kg]	30 → 40	45→65	140→160	70→90	90→150	150→200
Puissance spécifique (à80%DOD) [W/kg]	60 → 130	100→180	160→200	100→180	150→300	150→200
Temps de charge [h]	7 → 9	5 → 8	6 → 12	7 → 10	12 → 24	12 → 14
Coefficient de surchage [%]	5 → 10	10 → 15	5 → 12	1 → 2	1 → 2	1 → 5
Rendement énergétique [%]	65 → 85	70 → 80	75 → 85	80 → 90	85 → 95	90 → 95
Tension par cellule chargée [V]	2,1	1,35	1,2	2,58	3,2	3,2

Table 1.1 Caractéristiques des batteries[6].

### 1.4.3.2 Piles à combustible

La pile à combustible peut être une autre source d'énergie pour le véhicule électrique. Le principe de la pile à combustible a été démontré par le Gallois William Grove, en 1839 : il est généralement décrit comme l'inverse de celui de l'électrolyse. Plus précisément, il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique non polluante globale universellement connue [6]:



Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments :

- Deux électrodes,
- Un électrolyte.

Elle fournit plutôt que stocké de l'énergie électrique et continue de le faire tant que l'alimentation en carburant est continue.

Les avantages de la pile à combustible sont [6] :

- Elle convertit le carburant en électricité de manière efficace,
- Elle produit des émissions nulles ou très faibles.
- Elle fonctionne silencieusement et peut récupérer la chaleur perdue.
- En plus de sa flexibilité, sa fiabilité et sa durabilité en matière de carburant

Quant à leurs inconvénients :

- Le temps de réponse des piles à combustible est relativement plus long que celui des batteries.
- De plus, elles sont plus chères .

### 1.4.3.3 Supercondensateur (SC)

Les SC également appelés ultra-condensateurs et condensateurs électriques à double couche (EDLC) sont similaires aux condensateurs électrostatiques ou électrolytiques conventionnels, avec l'avantage de pouvoir stocker ou libérer plus d'énergie en raison de leur capacité élevée. La cellule EDLC est constituée de deux électrodes de carbone poreuses immergées dans un électrolyte. L'application d'une tension aux électrodes fait migrer les ions négatifs de l'électrolyte vers l'électrode positive, et à leur tour, les ions positifs migrent vers l'électrode négative. Deux couches de charges sont alors formées (une couche à chaque électrode), d'où le nom de condensateur double couche. En raison de la porosité de l'électrode et de la distance extrêmement faible séparant les charges, une capacité élevée est obtenue.

La densité de puissance du SC est nettement supérieure à celle de la batterie ; Une faible résistance interne donne un rendement élevé au SC, mais peut entraîner une forte rafale de courants de sortie si le SC est chargé à un état de charge très bas. Une autre caractéristique du SC est que la tension aux bornes se compare directement avec le SOC. Le développement de l'électronique d'interface permet au SC de fonctionner sur toute sa plage de tension variable

La technologie SC est prometteuse pour les véhicules électriques car elle offre une puissance spécifique exceptionnellement élevée et une durée de vie pratiquement illimitée. Cependant, le SC doit être considérablement amélioré avant d'être utilisé comme seule source d'énergie pour les véhicules électriques - son énergie spécifique (5 à 6 Wh / kg) doit être considérablement augmentée, tandis que son coût initial (2400 à 6000 USD / kWh) doit être considérablement réduit . Les SC peuvent être utilisés comme dispositifs auxiliaires de stockage d'énergie pour les véhicules électriques. En conduite urbaine, il existe de nombreuses conditions de conduite à arrêts multiples et la puissance totale requise est relativement faible. Les SC sont très appropriés pour capturer l'électricité du freinage par récupération et fournir rapidement de la puissance pour l'accélération en raison de leurs taux de charge et de décharge rapides. Dans les applications EV, les batteries et les SC pourraient être combinés pour maximiser les avantages des deux composants [6] .

### 1.4.4 Contrôle électronique

La traction électrique pour les véhicules électriques est réalisée par un élément contrôlant l'énergie transférée de la batterie vers le moteur. Celui-ci permet une optimisation au niveau de la batterie et du moteur et de faire en permanence un autodiagnostic. Il gère tous les ordres du conducteur en fonction des capacités de la voiture électrique. C'est la raison pour laquelle il reçoit une quantité d'informations telles que la température, la vitesse de rotation, et les courants électriques. Cela lui permet, d'une part, d'effectuer un bilan sur l'état du véhicule, et d'autre part, d'ajuster les différentes commandes appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie[6].

### 1.4.5 Convertisseur d'énergie électrique

L'électronique de puissance est utilisée pour convertir l'énergie électrique et gérer le flux d'énergie dans le véhicule. Suivant l'utilisation de machine à courant continu ou à courant alternatif, les convertisseurs d'énergie devront être différents. La nature de la source d'énergie est de type continu [5].

De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), on l'appelle redresseurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC-DC), on l'appelle hacheurs.

- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC), on l'appelle onduleurs.

### a) Convertisseur DC-DC

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables, différents des valeurs d'entrée et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation de divers récepteurs (moteurs, batteries, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels [5] [6] :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

En effet, on ne peut pas envisager le branchement brutal d'un moteur à courant continu sur une source d'énergie à tension fixe (batterie d'accumulateur par exemple) pour les raisons suivantes :

- Aucun réglage du couple moteur ni de la vitesse du moteur ne serait possible
- Le régime transitoire à la mise sous tension directe du moteur serait destructif tant du point de vue électrique (surintensité) que mécanique (sur couple).

L'utilisation d'un hacheur permet en effet de maintenir le courant moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur.

Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

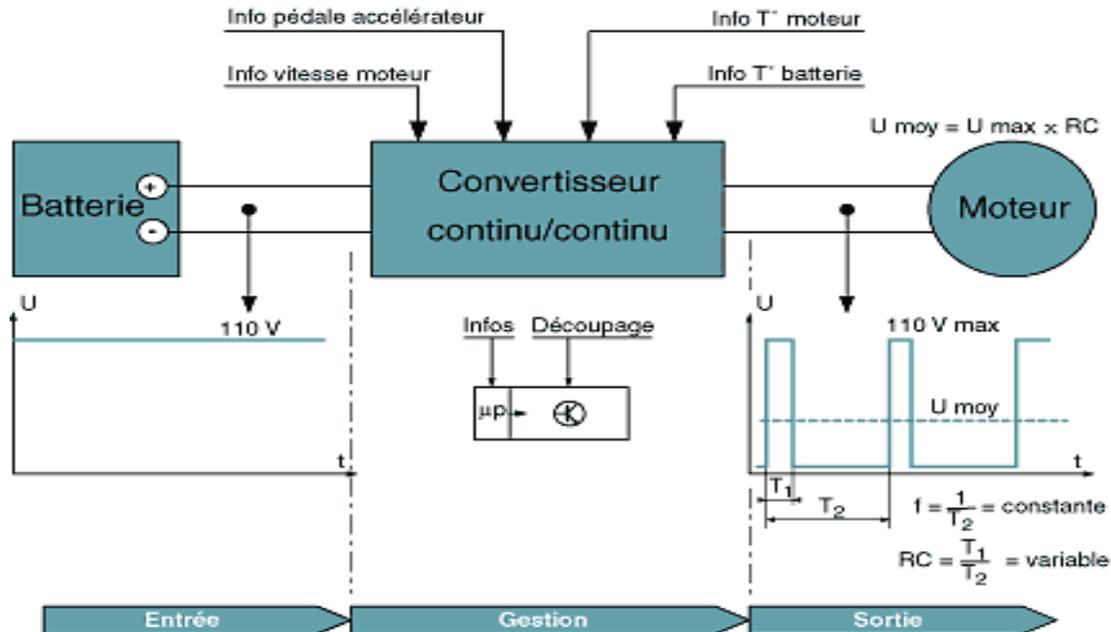


Figure 1.8 Convertisseur DC-DC pour l'alimentation de moteur[6]

### b) Convertisseur DC-AC :

En traction électrique, l'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, qui permet d'obtenir trois phases de courant alternatif, décalée de  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ), de fréquence variable à partir du courant batterie.

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule. La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières[5] [6].

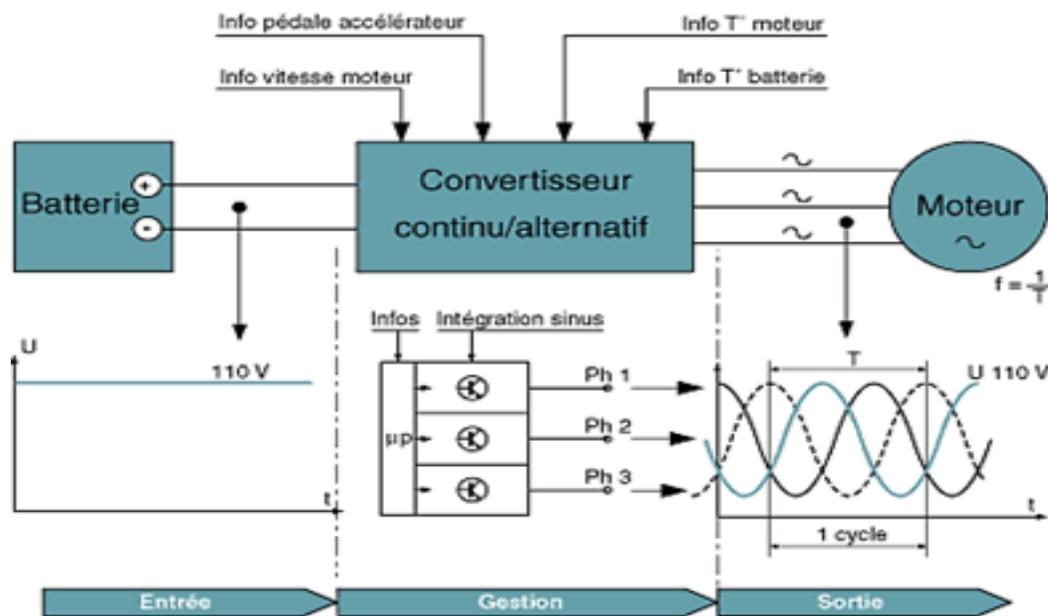


Figure 1.9 Convertisseur DC-AC pour l'alimentation de moteur de traction [6]

### 1.4.6 Architecture de motorisation

L'architecture des véhicules électrique se compose de deux variantes :

- Monomoteur.
- Multimoteur.

Alors que la première présente une seule chaîne de traction (Fig. 1.9), le multimoteur en comporte plusieurs (Fig1.10) [31].

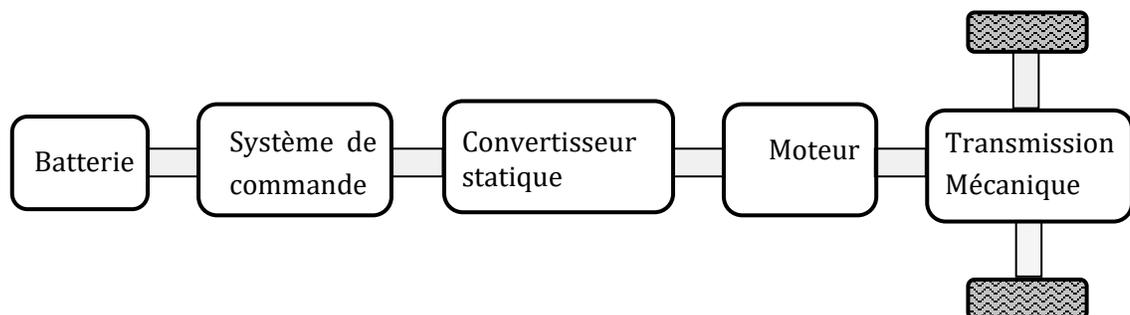


Figure 1.10 monomoteur

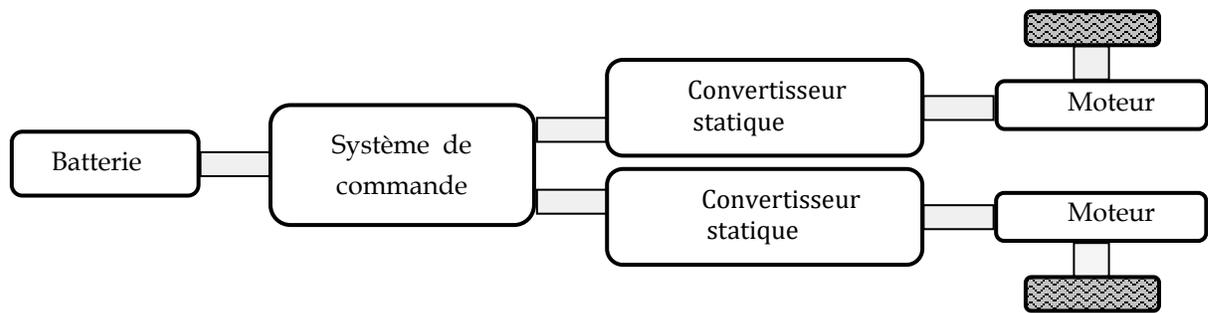


Figure 1.11 multimoteur

Dans la version multimoteur, la machine électrique est parfois intégrée dans la roue, ce qui permet souvent de simplifier la transmission mécanique.

### 1.4.7 Motorisation de la chaîne de traction

Les machines électriques, y compris les générateurs et les moteurs, sont des dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa.

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. La relation est étroite entre l'augmentation des performances des moteurs et la réalisation de hautes performances des VE en exploitation. Il existe plusieurs types de motorisation pour une chaîne de traction électrique. On distingue trois grandes familles de moteurs électriques :

- Moteur DC (courant continu), à excitation série ou séparée ;
- Moteur AC (courant alternatif) synchrone ;
- Moteur AC asynchrone.

Le moteur électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- Un couple élevé à basse vitesse, ainsi qu'un bon rendement ;
- Une puissance massique et volumique les plus élevées possible ;
- Une stratégie de pilotage optimisant correctement la consommation d'énergie ;
- Une possibilité de récupération d'énergie au freinage ;
- Large plage de vitesse, couvrant la rampe à basse vitesse et la croisière à grande vitesse ;
- Rendement élevé sur de larges plages de couple et de vitesse ;
- Large capacité de fonctionnement à puissance constante ;
- Réponse de couple rapide ;
- Capacité de couple élevée pour le lancement électrique et l'escalade de côte ;
- Capacité de surcharge intermittente élevée pour les dépassements ;
- Fiabilité et robustesse élevées pour l'environnement des véhicules ;
- Faible bruit acoustique ;
- Coût raisonnable.

En ce qui concerne la récupération d'énergie, on se base sur la réversibilité des moteurs employés. La plupart des VE dispose aussi du freinage électromagnétique, qui fait fonctionner le moteur en génératrice grâce à l'énergie cinétique du véhicule, et ralentit celui-ci, l'énergie générée doit servir à la recharge des batteries.

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le Moteur à Courant Continu (MCC), à Induction (MI), Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), à Reluctance Variable (MRV) etc [6] [7].

### 1.4.7.1 Moteur à courant continu

Ces moteurs disposent d'excellentes caractéristiques pour la traction électrique. En effet, ils sont connus pour leur capacité à atteindre un couple élevé à faible vitesse et leurs caractéristiques couple-vitesse répondent aux exigences de traction. La vitesse du moteur est réglée à travers une tension variable Bien adaptés dans le rôle de propulseur de véhicule et faciles à contrôler.

On définit ainsi un moteur à courant continu selon la manière dont le moteur est excité.

#### a) Moteur à excitation série

C'est le premier qui à été implanté dans les véhicules électriques, en raison de sa fiabilité d'adaptation. Le champ magnétique est généré par des électroaimants. Les enroulements sont connectés en série avec l'armature : un même courant électrique les traverse.

#### b) Moteur à excitation séparée

Les moteurs à courant continu à excitation séparée conviennent à un fonctionnement d'affaiblissement du flux en raison de leurs caractéristiques de couple découplé et de contrôle du flux ; un mode d'affaiblissement du flux offre une plage étendue de fonctionnement à puissance constante. Les moteurs shunt sont faciles à contrôler que les moteurs série.

Les moteurs à courant continu à excitation séparée, sont commandés par un hacheur de puissance agissant sur l'induit du moteur et un hacheur de plus faible puissance commandant l'excitation ou inducteur. L'électronique permet d'optimiser la valeur de consigne du courant d'induit et d'excitation, en fonction de la caractéristique couple/vitesse désirée, grâce à un système de thyristors relativement simple et peu coûteux.

#### c) Moteur à aimants permanents

Le moteur MCAP a une densité de puissance relativement plus élevée et un rendement plus élevé que les types à champ bobiné alors qu'il ne peut pas atteindre les caractéristiques de fonctionnement avec contrôle de flux puisque l'excitation de champ dans le moteur MCAP est incontrôlable et l'excitation est produite par un ensemble d'aimants permanents. Ces aimants font appel pour leur composition, à des terres rares, dont le coût est très élevé. Ils sont également très sensibles aux montées en température.

La commande des moteurs à courant continu à une structure complexe, un rendement et une fiabilité faibles et un besoin constant de maintenance. Cela est dû à la présence de balais et de collecteur mécanique. Il est difficile de réduire la taille des moteurs à courant continu à balais, ce qui les rend plus lourds et plus chers. De plus, le frottement balais / collecteur conduit à limiter la vitesse maximale du moteur.

### 1.4.7.2 Moteur à courant alternatif

Ils sont de plus en plus utilisés dans les applications de traction électrique, car étant légers et moins coûteux que les moteurs à courant continu. Néanmoins, l'électronique de contrôle et les contrôleurs sont plus onéreux et plus complexes. Le choix s'oriente donc plus vers cette solution, car des évolutions notables sur l'électronique sont plus probables que celles concernant la technologie de moteurs.

#### a) Moteur asynchrone

Pour des applications de traction électrique à grandes vitesse, le moteur de traction à courant continu est de plus en plus remplacé par le moteur asynchrone. Les avantages sont multiples :

- Construction mécanique plus robuste (pas de collecteur);
- Pour une puissance équivalente, dimensions et poids réduits ;
- Pour les mêmes dimensions, puissance plus élevée ;
- Vitesse de rotation maximale plus élevée ;

- Pas d'entretien, puis qu'il n'y a pas de collecteur.

Deux types de machine asynchrone peuvent être distingués : la machine asynchrone à rotor à bagues et la machine asynchrone à cage d'écuriel. Cette dernière est la plus répandue.

L'excédent en matériel d'électronique de puissance et de circuits de réglages et de commande est un inconvénient. Cependant, ceci n'empêche pas l'introduction des moteurs synchrones dans le domaine de la traction électrique, vu que les avantages mentionnés prédominent.

Les avantages principaux du moteur asynchrone sont sa fiabilité, sa robustesse et surtout son coût. Bien qu'il soit plus lourd et son rendement est moins élevé que celui des machines synchrones.

Leur commande nécessite l'emploi d'un onduleur électronique. Sa fonction est de convertir le courant continu des batteries en courant alternatif triphasé, et de contrôler avec précision le fonctionnement du moteur pendant les phases d'accélération et en régime de croisière. De plus, l'onduleur transforme le courant alternatif généré par le moteur durant les décélérations et le freinage en courant continu pour recharger la batterie et améliorer le frein moteur. Pour assurer la régulation, l'onduleur augmente ou diminue la fréquence du courant alternatif fourni au moteur en fonction de la demande du conducteur, donc de la position de la pédale d'accélérateur. L'arrivée de l'électronique a surtout permis d'augmenter considérablement la vitesse de rotation.

### **b) Moteur synchrone**

Le principe de fonctionnement de ce moteur est analogue à celui des moteurs à courant continu, si ce n'est que la commutation est cette fois électrique et non mécanique.

Les moteurs synchrones présentent de bon rendement (de l'ordre de 90%, onduleur compris), peu de pertes thermiques. Ils sont légers et leur fabrication est très flexible.

Deux types de machine synchrone peuvent être distingués

#### → **Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)**

Les MSAP sont couramment utilisées dans différentes applications industrielles dans une gamme de puissance d'une certaine de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires...). Les performances des MSAP sont intrinsèquement liées aux matériaux magnétiques mis en œuvre au sein de leur structure.

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- Puissances massives importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- l'impossibilité du réglage de l'excitation.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

→ **Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)**

Ce moteur peut présenter une alternative très intéressante. En comparaison avec le moteur synchrone à aimants permanents Les masses polaires du rotor sont des électroaimants alimentés en courant continu. La valeur de l'induction peut alors varier par action sur le courant d'excitation. Ce type de moteur dispose d'un degré de liberté supplémentaire, en comparaison avec celui à aimants permanents ; Le flux d'excitation est créé par un courant que l'on injecte dans les enroulements rotoriques. Dans cette machine, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine. Il donne facilement la possibilité de défluxage que l'on peut effectuer par une simple réduction du courant d'excitation. Il est possible d'adapter des lois de commande permettant l'optimisation du rendement.

**Les inconvénients :**

- Les bobines d'excitation sont difficilement refroidies.
- La densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes.
- Les contacts glissants (balais- bagues) limitant le fonctionnement à très haute vitesse et par conséquent l'usure des balais.
- Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles.

→ **Moteur synchrone à reluctance variable (MRV)**

Ce type de moteur présente un rapport puissance/poids très important et un faible coût. La principale difficulté reste la commande. En effet, ce moteur produit un couple très pulsatoire à haute vitesse engendrant des problèmes de vibrations mécaniques et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents, il en demeure néanmoins bruyant.

Le tableau (I.1) récapitule les avantages et les inconvénients des différents moteurs électriques de motorisation de la chaîne de traction d'un véhicule [8], [2].

	<b>AVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENTS</b>
<b>Moteur à courant continu à excitation série</b>	-Commande par un seul hacheur ; -Défluxage automatique.	-Freinage dynamique difficile à mettre en place ; - Prix du moteur élevé ; Le procédé de fabrication est difficile à automatiser ; -Puissance massique relativement faible.
<b>Moteur à courant continu à excitation séparée</b>	-Commande par un seul hacheur de puissance sur l'induit et un hacheur de faible puissance pour la commande du courant d'excitation ; -Défluxage facile.	-Prix du moteur élevé ; -Le procédé de fabrication est difficile à automatiser ; -Puissance massique relativement faible.
<b>Moteur à courant continu à aimants permanents</b>	-Commande avec un seul hacheur ; -freinage relativement simple à mettre en oeuvre ; -excellent rendement (surtout avec aimants terres rares).	-Défluxage difficile ; -prix élevé (voire prohibitif avec des terres rares).

<b>Moteurs asynchrones</b>	-Facilement industrialisables, donc de faible prix de revient ; - puissance massique élevée; rendement acceptable -moteur robuste; défluxage automatique	- Electronique relativement chère ; -tension d'alimentation élevée pour faciliter la fabrication du moteur.
<b>Moteurs synchrones à rotor bobine</b>	-Défluxage facile ; -alimentations simple et moins chère.	-Technologie peu courante ; -fragilité du système bagues-balais.
<b>Moteurs synchrones à aimants permanents</b>	-Puissance massique élevée (avec aimants terres rares) ; -rendement élevé (avec aimants terres rares) ; -freinage dynamique relativement facile.	-Prix élevé (surtout avec aimants terres rares) ; -défluxage difficile ; -électronique de prix élevé.
<b>Moteur à réluctance variable</b>	-Couple massique élevé (en théorie).	-Mauvais rendement dû aux fréquences élevées au mauvais facteur de puissance ; -Prix élevé de l'électronique de puissance ; -Les moteurs très performants en puissance massique ont un entrefer faible et sont relativement fragiles.

Table 1.2 Avantages et Inconvénients des différents moteurs électriques de motorisation de la chaîne de traction

### 1.4.8 Choix du moteur de traction

Le cahier de charge idéal des moteurs est : encombrement nul, rendement énergétique 100%, coût nul, souplesse de fonctionnement dans tous les régimes prévisibles normaux ou accidentels pour un véhicule en marche ou à l'arrêt. Le choix des moteurs électriques : induction, aimants permanents, réluctance variable, etc., implique des compromis. Le moteur à induction est robuste et bon marché, le moteur à aimants permanents a, en général, un meilleur rendement mais plus coûteux. Dans la configuration multimoteur les choix sont plus complexes mais restent fondamentalement similaires.

Les choix des moteurs électriques sont à pondérer avec des problèmes d'architecture véhicule

- **Encombrement** : Il est déjà fonction du nombre de sous-ensembles mécaniques conservés :
  - différentiel
  - réducteur et rapport de réducteur

Cela amène à quelques solutions typiques :

- un moteur par roue avec un ou sans réducteur incorporé,
- un moteur par essieu,

- un moteur central pour les deux essieux (ou un seul essieu moteur).

La solution électrique se prête plus facilement pour les solutions multi-moteurs.

- **Rendement énergétique** : Si l'on décide que le rendement énergétique est prioritaire, nous classerons arbitrairement les moteurs ainsi :
  - moteurs synchrones à aimants,
  - moteurs synchrones,
  - moteurs à réluctance variable,
  - moteurs à courant continu, à collecteur avec ou sans aimants permanents.

Les moteurs synchrones à aimants exigent des aimants à forte densité d'énergie (dans la plupart des cas on trouvera des aimants NdFeB). Le prix des aimants permanents n'a pas baissé de façon significative ces dernières années.

Ces moteurs sont donc plutôt chers mais peuvent atteindre des rendements maximums d'environ 94% dans les puissances envisagées (10 à 40kW). Les aimants sont sensibles aux températures supérieures à 150°C, Ces moteurs doivent être associés à un système de refroidissement adapté[7].

### 1.4.9 Transmission mécanique

L'objet de la transmission mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Dans les véhicules conventionnels, le moteur est lié à un embrayage qui est, à son tour, lié à une boîte de vitesses, un arbre de transmission et un différentiel qui égalise le couple sur les roues motrices à différentes vitesses. En revanche, la transmission des véhicules électriques est plus simple que celle des véhicules conventionnels. Il n'y a pas besoin d'un embrayage ou d'une boîte de vitesses conventionnelle puisque le moteur électrique peut fournir un couple à partir de la vitesse nulle et au-dessus, et un engrenage à rapport unique est généralement suffisant.

L'engrenage est un simple dispositif de transmission de puissance mécanique qui augmente le couple et réduit la vitesse. Ce dispositif maintient le flux constant de puissance basé sur la loi de la conservation de l'énergie, car le couple multiplié par la vitesse est une puissance toujours constante au cas où aucune perte d'énergie ne se produirait.

### 1.4.10 Le type de véhicule électrique

La motorisation d'un véhicule électrique est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multi-moteurs :

### 1.4.10.1 Véhicule électrique mono-moteur

Le véhicule électrique monomoteur présente une seule chaîne de traction, figure 1.11 [5] [7].

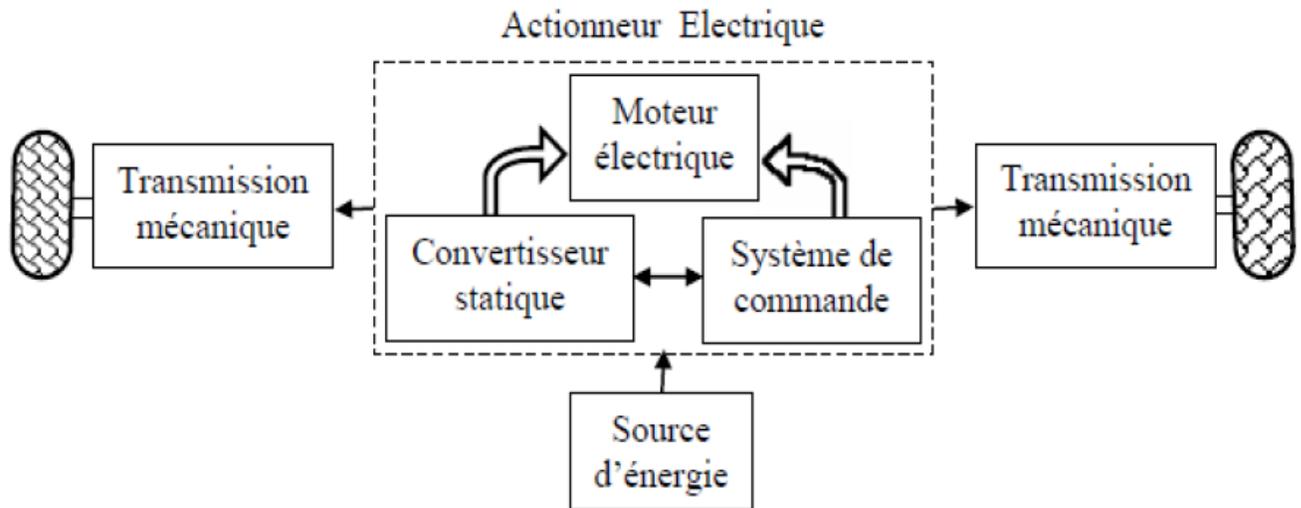


Figure 1.12 chaîne de traction monomoteur

La figure 1.12 montre trois exemples schématiques de motorisations mono-moteur [5] [7] :

- Un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel, figure (1.12.a) ;
- Un seul moteur électrique + embrayage + BV + différentiel, figure (1.12.b) ;
- Un seul moteur électrique + boîte de transfert + BV + deux différentiels, figure (1.12.c) ;

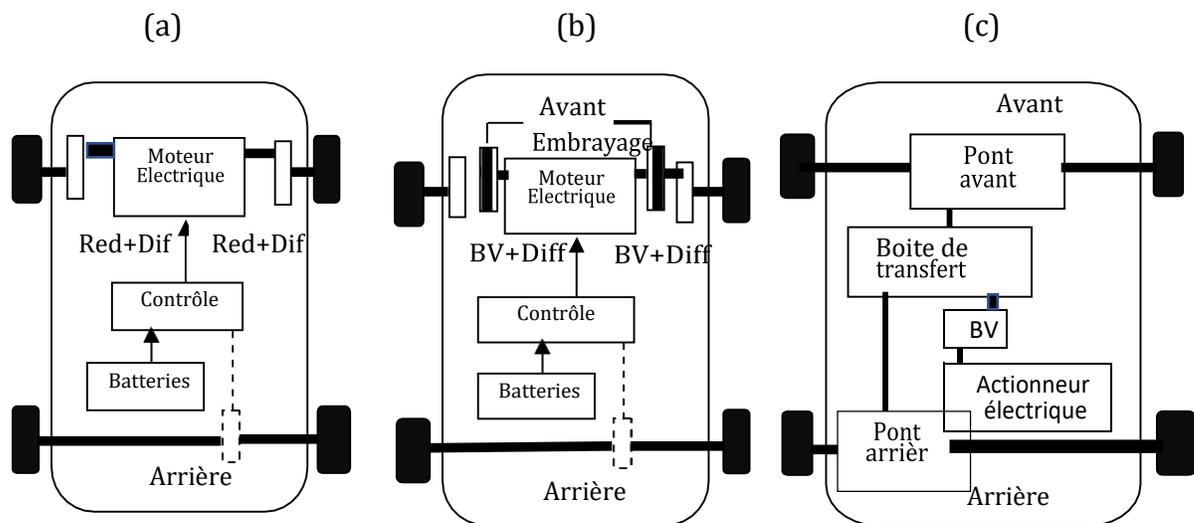


Figure 1.13 .Exemples schématiques de motorisations mono-moteur

### 1.4.10.2 Véhicule électrique multi-moteur

Le véhicule électrique multi-moteurs présente plusieurs chaînes de traction indépendantes, (Fig1.13). Il peut sembler a priori intéressant de motoriser indépendamment pour les principales qualités de cette configuration à savoir [5] [7] :

- Elimination de tous les dispositifs mécaniques de transmission comme la boîte de vitesse, l'embrayage et le différentiel mécanique.

- Introduction à la réalisation d'un différentiel électronique
- La structure globale d'un véhicule électrique devient simple et légère.

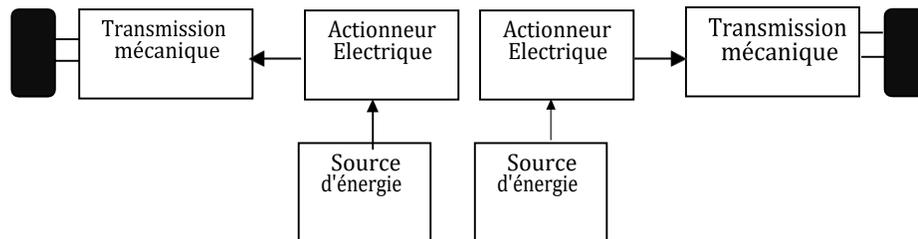


Figure 1.14 Véhicule multi-moteurs

On peut donc réaliser des véhicules à deux roues motrices, soit à l'arrière figure (I.14.a) soit à l'avant figure (I.14.b), ou encore à quatre roues motrices figure (I.14.c) [7].

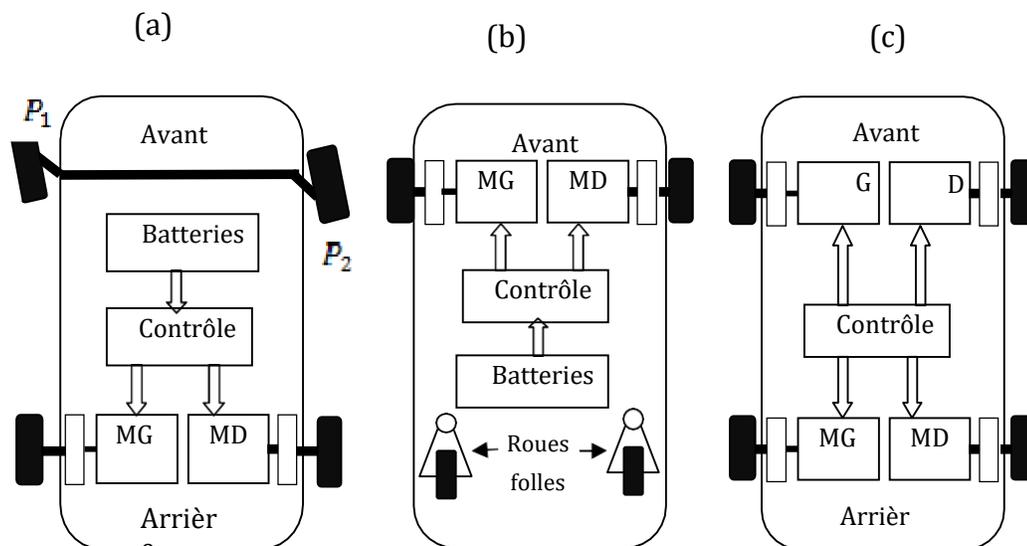


Figure 1.15 Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs

### 1.4.11 Chargement

En VE, la batterie peut être rechargée à partir du réseau électrique à l'aide d'un dispositif de charge externe. Un chargeur est essentiel dans le processus de charge car l'alimentation électrique du réseau électrique est sous forme CA, tandis que la batterie est sous forme CC. Le rôle du chargeur EV est de redresser le niveau de puissance CA du réseau à un niveau de puissance CC adéquat pour que la batterie EV soit chargée correctement. Pour cette tâche, un chargeur EV est généralement construit comme un convertisseur ou redresseur CA / CC. Dans certains cas, pour un processus de charge rapide, un convertisseur DC / DC supplémentaire est inclus dans la conception du chargeur EV pour une conversion d'énergie optimale.

Des chargeurs de VE peuvent être installés à bord et à l'extérieur des véhicules. Le chargeur embarqué est souvent conçu comme un appareil de petite taille pour réduire le poids des véhicules électriques. Il a également une faible puissance nominale et est particulièrement utilisé pour une charge lente de la batterie. D'autre part, le chargeur EV externe est installé à des endroits spécifiques pour répondre aux services de charge rapide.

## 1.5 Avantages et inconvénients des véhicules électriques a batteries

- ❖ Avantages [6].
  - Propreté
    - Aucune émission d'hydrocarbure, de fumées ou de particules
    - Les composants de la batterie sont 100% recyclables
  - Economie
    - Aucune consommation pendant les phases de ralenti
    - Les batteries se rechargent pendant les phases de décélération
  - Fiabilité
    - Possibilité de parcourir jusqu'à 1 million de kilomètres
    - Les dépendances d'entretien sont réduites de 30 à 40%
    - Les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses
  - L'agrément de conduite
    - Le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage)
    - Le moteur est parfaitement silencieux
- ❖ Inconvénients [6].
  - Densité d'énergie des batteries est très inférieur devant celle du carburant ;
  - Rechargeabilité très lente ;
  - Poids important du véhicule électrique ;
  - Coût élevé par rapport à celui du véhicule classique.

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur le véhicule électrique. Nous avons cité un aperçu historique sur les différents types de véhicules électriques classifiés selon leur source d'énergie. Ensuite nous avons présenté l'architecture de la chaîne de traction des VE en insistant sur les différentes technologies disponibles.

Par la suite nous avons abordé une modélisation de quelques composants du véhicule électrique.

---

# Chapitre 02

---

MODELISATION DES  
CONVERTISSEURS ET DU  
MOTEUR

## 2. Modélisation des convertisseurs et du moteur

### 2.1. Introduction

La modélisation des convertisseurs DC-DC de puissance est un domaine de recherche très actif. Dans beaucoup d'applications industrielles, on a besoin de convertir une tension continue fixe en une tension continue variable.

On dispose de différents procédés pour transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable permettant la commande d'un moteur à courant continu.

On peut faire appel à un groupe convertisseur qui peut être, soit électronique, soit électrique. Ces équipements sont encombrants et coûteux. C'est pourquoi on leur préfère un système électronique que l'on appelle Hacheur.

Par moment nous assistons à un besoin d'une topologie permet le transfert d'énergie des sources à la charge et de la charge aux sources il sera question de convertisseur bidirectionnel

Nombreuses sont les applications pour et les alimentations à découpage et la commande des machines à courant continu.

Le monde industriel a durant longtemps connu les moteurs à courant continu qui sont tout à fait adaptés aux fonctionnements en régime variable, mais ils présentent de gros inconvénients liés à la présence du contact mobile entre balais et collecteur (entretien, problème de commutation).

Afin de contourner ces inconvénients on a donc cherché à les remplacer par des machines qui utilisent un commutateur électronique à la place du commutateur mécanique : ce sont les moteurs sans balais

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant créé par les enroulements statoriques.

Dans la littérature, de nombreuses techniques ont été proposées pour le moteur Brushless, en fonction des objectifs de commande.

Dans ce chapitre, nous travaillons sur la modélisation des différents types convertisseurs ainsi qu'au principes de fonctionnement et les Modèles mathématique du Moteur BLDC.

### 2.2. Modélisation des convertisseurs :

Dans beaucoup d'applications industrielles, on a besoin de convertir une tension continue fixe en une tension continue variable. Grâce au développement de l'électronique de puissance, ils sont apparus les hacheurs.

Un hacheur convertit directement du DC au DC. Il peut être utilisé comme un convertisseur DC-DC, abaisseur ou élévateur.

Un convertisseur **DC/DC** a pour vocation d'assurer le transfert d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu.

La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée par la fig (2.1) [24] [1].

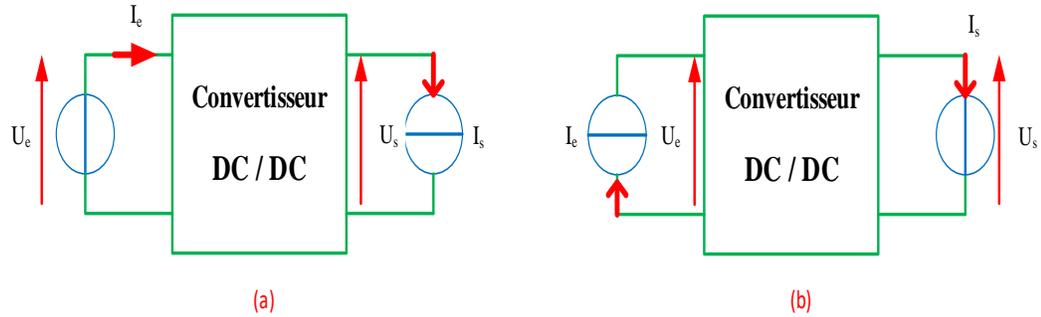


Figure 2.1 Convertisseur DC/DC.

## 2.3. Mode de fonctionnement du convertisseur statique.

Le convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnements dépendant de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. Ces deux modes sont [3] [2]:

### 2.3.1. Mode de Conduction Continue (MCC) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation.

### 2.3.2. Mode de Conduction Discontinue (MCD) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une de commutation.

notre travail se fait en mode continu (MCC).

## 2.4. Hypothèses

Dans cette étude théorique, nous admettrons les hypothèses suivantes :

- Tous les composants sont parfaits (sans pertes).
- Le régime sera supposé établi.

## 2.5. Hacheur Buck (dévolteur) :

Un convertisseur Buck est une alimentation à découpage qui convertit une tension d'entrée continue en une autre tension de sortie continue plus faible. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage spontané (diode). La charge est constituée par la résistance  $R$ . les éléments  $L$  et  $C$  forme un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie [3] [29].

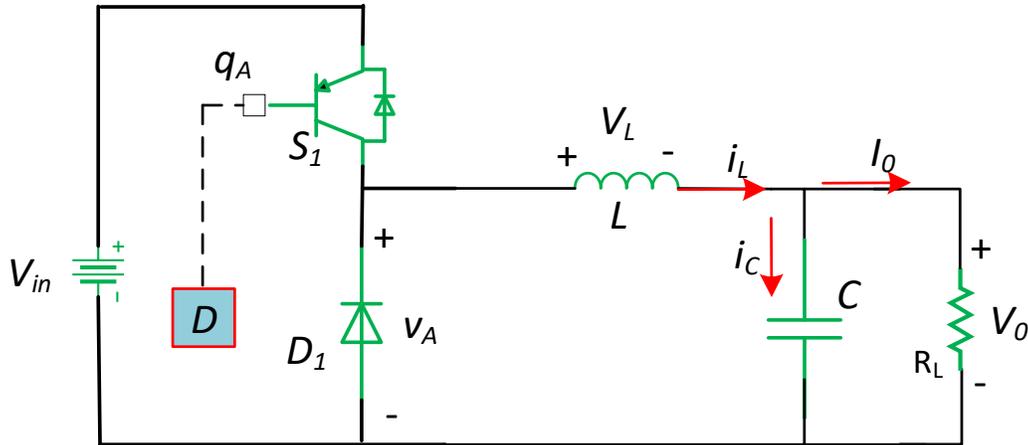


Figure 2.2 le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Buck.

## 2.6. Etude du convertisseur BUCK en régime permanent

La fig (2.2) représente un circuit convertisseur de base muni d'un filtre passe-bas 'LC'. La diode laisse passer le courant de l'inductance lorsque le commutateur est ouvert et elle est polarisée en inverse lorsque l'interrupteur est fermé. Ce circuit est appelé un convertisseur abaisseur de tension ou tout simplement un convertisseur abaisseur car la tension de sortie est toujours inférieure à celle de l'entrée.

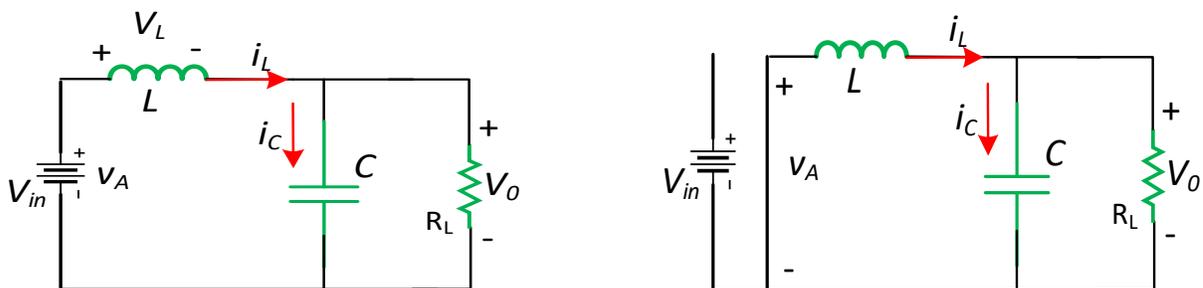
### 2.6.1. Etude Théorique En Conduction Continue globale :

L'objectif de la modélisation analytique d'un convertisseur est de fournir un model simple et rapide, De plus il est primordial de définir les pertes et par conséquent le rendement du système pour un point de fonctionnement donné.

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes :

- Lors de la première « l'intervalle d'activation ( $T_{on}$ ) », on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $DT$  ( $T_{on}$ ), avec  $D$  compris entre  $0$  et  $1$ . (Fig (2.3-(a))).
- Lors de la seconde « Durant l'intervalle de désactivation ( $T_{off}$ ) », on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de  $DT$  à  $T$  ( $T_{off}$ ). (Fig (2.3-(b))).

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur  $S_1$ .



(a) : Hacheur Buck avec S1 fermé et D bloquée

(b) : Hacheur Buck avec S1 ouvert et D fermée

Figure 2.3 circuits équivalents.

En général les convertisseurs abaisseurs « Buck », ont les propriétés suivantes lors de fonctionnement en régime permanent

Le courant qui traverse l'inductance est périodique :

$$i_L(t) = i_L(t + T) \quad (2.1)$$

Le principe Volt-Sec dans l'inductance conduit à ce que la tension moyenne d'inductance est nulle donc :

$$V_L = \frac{1}{T} \int_i^{i+T} V_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.2)$$

Le principe Amp-Sec dans le condensateur conduit à ce que le courant moyen du condensateur est nul, donc :

$$I_C = \frac{1}{T} \int_i^{i+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.3)$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, la puissance fournie par la source est la même que la puissance délivrée à la charge

Afin de déterminer la tension de sortie  $V_o$ , il faut examiner la tension et le courant de l'inductance pour les deux états du commutateur : fermé, puis ouvert.

- Durant l'intervalle  $T_{on}$  on a :

$$v_L(t) = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

Donc :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.5)$$

La variation du courant lorsque le commutateur S1 est fermé est calculé en modifiant l'équation précédente :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2.6)$$

Donc :

$$\Delta i_{L(fermé)} = \left( \frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT \quad (2.7)$$

- Durant l'intervalle  $T_{off}$  on a :

$$v_L(t) = -V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.8)$$

Donc :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_0}{L} \quad (2.9)$$

La variation de courant dans l'inductance lorsque le commutateur S1 est ouvert est [3]:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_0}{L} \quad (2.10)$$

Donc :

$$\Delta i_{L(\text{ouvert})} = \left( \frac{-V_0}{L} \right) (1-D)T \quad (2.11)$$

Etant donné que la tension d'inductance moyenne est égale à zéro (principe Amp-sec) durant une période :

$$v_{L,(ON)}T_{ON} + v_{L,(OFF)}T_{OFF} = 0 \quad (2.12)$$

$$(V_{in} - V_0)DT - V_0(1-D)T = 0$$

$$V_0 = DV_{in}$$

$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \quad (2.13)$$

Avec D : le rapport cyclique.

Ce résultat illustre que le convertisseur Buck produit une tension de sortie qui est toujours inférieure ou égale à l'entrée et on remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique.

Pour un fonctionnement en régime permanent ; le courant moyen inducteur doit être le même que celui de la résistance de charge, puisque le courant moyen du condensateur doit être zéro ; donc :

$$\bar{i}_L = \bar{i}_C + I_0 = I_0 \quad (2.14)$$

$$I_L = I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (2.15)$$

Les formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck sont présentés dans la figure (2.4) [12].

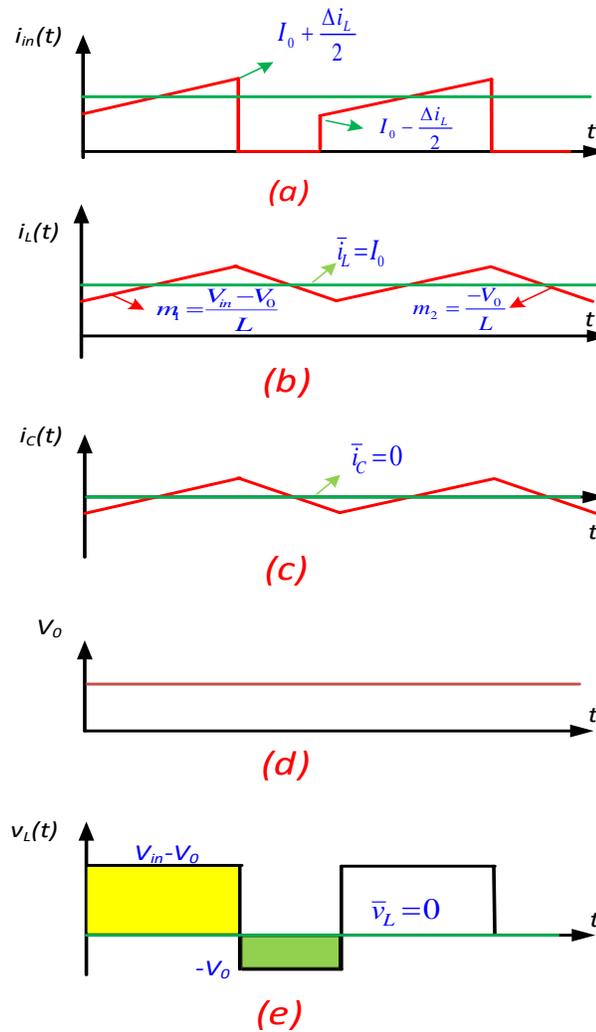


Figure 2.4(a) Courant de d'entrée  
 (b) Courant d'inductance (c) Courant de capacité (d) Tension de sortie (e) Tension d'inductance.

• **Ondulation de la tension de sortie :**

Le courant  $i_c$  traversant le condensateur est égal à la différence entre le courant circulant dans l'inductance  $L$  et le courant de sortie est égale à :

$$i_c(t) = i_L(t) - I_0$$

L'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée comme suit :

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} \tag{2.16}$$

Avec  $\Delta Q$  la variation positive de charge du condensateur  $C_s$ . Géométriquement  $\Delta Q$  c'est l'aire du triangle en jaune, dont la base vaut  $T_s/2$  et la hauteur  $\Delta i_L / 2$  (2.5) [12].

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} T_s \frac{\Delta i_L}{2} \tag{2.17}$$

Donc :

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} = \frac{\Delta i_L}{8Cf} \quad (2.18)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.19)$$

Avec  $f$  est la fréquence de commutation.

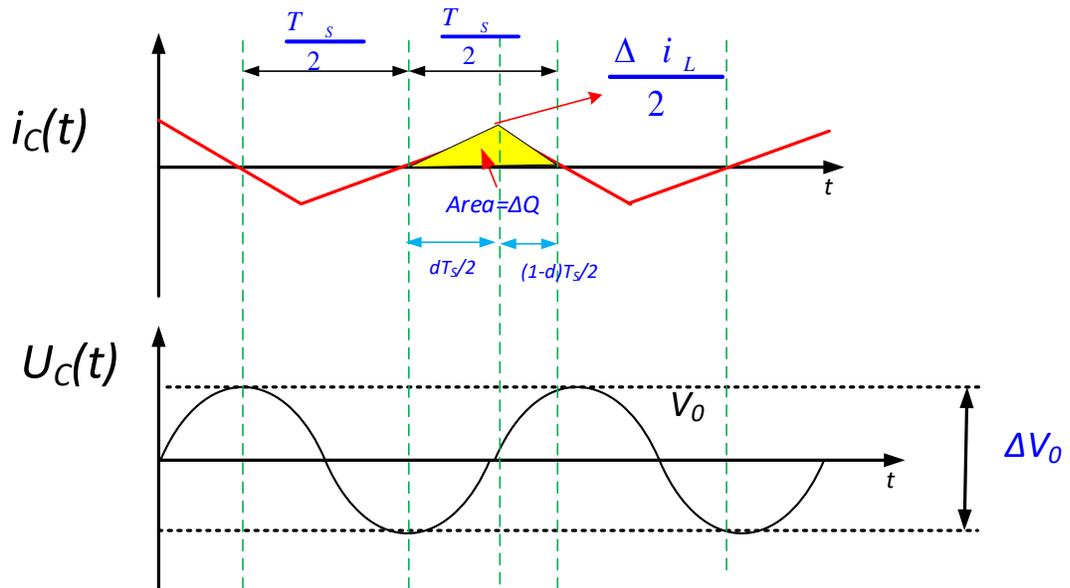


Figure 2.5 Forme d'onde de sortie du convertisseur Buck (tension et courant).

### 2.6.2. Dimensionnement des composants :

L'étude théorique développée permet la conception des convertisseurs DC-DC qui répondent parfaitement aux exigences de l'application désirée. Comme exemple, pour concevoir un convertisseur DC-DC de type « Buck », nous allons d'abord présenter les étapes à suivre pour choisir les différents paramètres de la configuration qui dépendent directement du cahier de charge imposé par l'application. Par la suite, les paramètres sélectionnés seront validés par une simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.

A titre d'exemple Un véhicule électrique exige un convertisseur capable de produire une tension de sortie donnée qui va alimenter une charge d'une résistance. La charge utilisée est fortement sensible à la qualité de la tension de sortie du convertisseur, ce qui nous pousse à imposer un taux d'ondulation de la tension de sortie.

L'objectif est de spécifier le rapport cyclique, la fréquence de commutation, dimensionner ensuite l'inductance et le condensateur de sortie et de déterminer la tension nominale maximale.

Dans cette partie on s'intéresse à des méthodes de conception et les équations des composants d'un convertisseur abaisseur, notamment l'inductance de filtre  $L$  et le condensateur de filtrage  $C$  ainsi que la sélection des MOSFET et des diodes.

Le schéma de base d'un convertisseur Buck est :

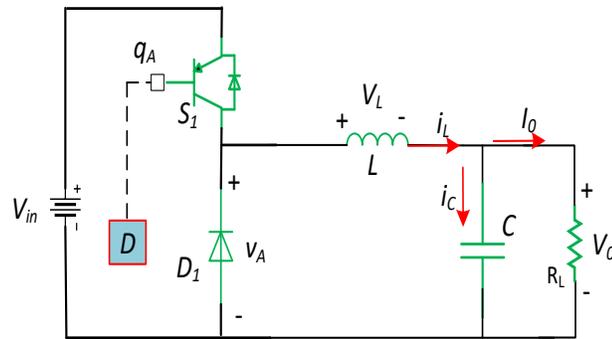


Figure 2.6 schéma de base d'un convertisseur buck.

La relation entrée sortie du convertisseur est donnée par :

$$D = \frac{V_0}{V_{in}}$$

Nous considérerons principalement les applications où la tension de sortie doit être maintenue constante avec une tension d'entrée ainsi des valeurs de courant de charge qui changeant, donc pour ces applications, la plage de variation du rapport cyclique  $D$  est donnée par :

$$\left( \frac{V_0}{V_{in,max}} \right) \leq D \leq \left( \frac{V_0}{V_{in,min}} \right) \quad (2.20)$$

Avant de commencer la conception d'un convertisseur abaisseur ou de tout autre convertisseur, il est important d'établir la plage de variation du rapport cyclique  $D$  car cela sera nécessaire lorsque nous essaierons de déterminer quelle est la pire des conditions pour la conception de divers éléments comme le  $L$  et  $C$ .

Nous avons deux méthodes pour les conceptions de convertisseur abaisseur :

• **Méthode 1** :  $L$  et  $C$  déterminent l'ondulation de la tension de sortie

L'une des spécifications de performances les plus importantes est le contenu de l'ondulation de la tension de sortie. Dans un convertisseur abaisseur, ce sont les  $L$  et  $C$  ensemble qui déterminent l'ondulation de la tension de sortie.

• **Méthode 2** :  $L$  sélectionnée pour limiter l'ondulation du courant de l'inductance à une valeur demandée.

Le courant inductance est une variable interne contrairement à la tension de sortie ou au courant d'entrée et donc nous sommes vraiment libres de choisir ce  $\Delta i_L$  pour faire une valeur arbitraire ; nous pouvons choisir par exemple 10% à 20% de sa valeur moyenne et dans un convertisseur abaisseur, le courant d'inductance moyen que nous connaissons est le courant de sortie, nous pouvons donc faire en sorte que le  $\Delta i_L$  soit de 10% à 20% du courant de charge [12].

De l'équation (2.6) on a :

$$\Delta i_L = \frac{V_0(1-D)T_s}{L} \Rightarrow L = \frac{V_0(1-D)T_s}{\Delta i_L} \quad (2.21)$$

A partir de cette équation, nous pouvons voir que la tension de sortie  $V_0$  est une constante au moins pour les applications de tension de sortie constante, la période de commutation est également une constante car la plupart du temps, nous considérerons le type de contrôle à fréquence de commutation constante et  $\Delta i_L$  est la valeur que nous avons choisie.

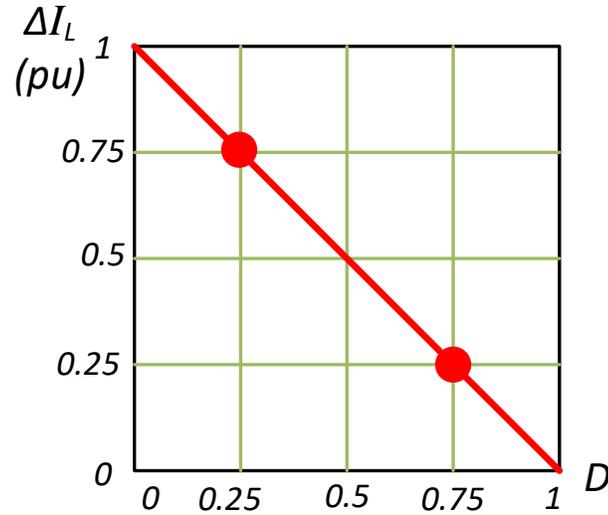


Figure 2.7 la relation entre  $\Delta i_L$  et  $D$ .

La relation entre  $\Delta i_L$  et  $D$  est représenté sur la figure suivante :

On constate : pour que la variation de courant ne dépasse pas un seuil donné, il faut que la valeur de  $D$  de descend pas au-dessous d'une valeur min.

Donc :

$$L = \frac{V_0 (1 - D_{min}) T_s}{\Delta i_L} \quad (2.22)$$

- **Dimensionnement de l'inductance :**

Le courant max dans inductance est :

$$I_{L-max} = I_{0-max} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.23)$$

La valeur efficace de ce courant est donnée par la formule suivante :

$$I_{L.RMS} = \sqrt{I_{0-max}^2 + \frac{(\Delta I_L)^2}{12}} \quad (2.24)$$

- **Dimensionnement de l'inductance**

La valeur de la capacité est choisie pour limiter la variation de tension de sortie donc :

Si le condensateur est parfait :

$$\Delta V_0 = \Delta V_C \quad (2.25)$$

Dans la réalité, les condensateurs ne sont pas parfaits et l'on doit tenir compte de leur résistance série équivalente, notée ESR, qui introduit une ondulation supplémentaire  $\Delta V_{ESR}$  en phase avec l'ondulation de courant  $\Delta I$ , sa présence change de manière significative l'ordre de grandeur de l'ondulation de la tension  $\Delta V_C$  ainsi que la forme d'onde.

$$\Delta V_{ESR} = ESR \cdot \Delta I \quad (2.26)$$

Donc :

$$ESR \leq \frac{\Delta V_0}{\Delta I_C} = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_L}$$

A partir de l'équation (2.18), on a :

$$C = \frac{T \Delta i_L}{8 \Delta V_0} = \frac{\Delta i_L}{8 \Delta V_0 f} \quad (2.27)$$

$$I_{C.RMS} = \sqrt{\frac{1}{DT/2} \int_0^{DT} \left( \frac{\Delta I_L}{DT} t \right)^2 dt} = \frac{\Delta I_L}{2\sqrt{3}} \quad (2.28)$$

- **Le choix du MOSFET :**

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants.

- Le courant crête  $I_M$  dans l'interrupteur  $S_1$  est atteint à  $t = DT$  :

$$I_{M=I_{L,max}} = I_{o,max} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.29)$$

- La valeur moyenne du courant dans l'interrupteur est égale au courant d'entrée :

$$I_{S_1,moy} = DI_0 \quad (2.30)$$

- Tension maximale aux bornes de l'interrupteur  $S_1$  :

$$V_{S_1,max} = V_{in-max} \quad (2.31)$$

- On démontre que la valeur efficace s'écrit :

$$I_{S_1,eff} = I_{o,max} \sqrt{D_{max}} \quad (2.32)$$

- **Le choix de la diode :**

Le même raisonnement que le MOSFET à savoir :

- Le courant crête dans la diode est identique à celui traversant l'interrupteur  $S_1$ .
- La valeur moyenne du courant dans la diode est égale à :

$$I_{D,moy} = I_{o,max} (1 - D_{min}) \quad (2.33)$$

- La valeur efficace du courant dans la diode la valeur approchée :

$$I_{D,eff} = I_{o,max} \sqrt{(1-D_{min})} \quad (2.34)$$

- La tension maximale aux bornes de la diode D est égale à :

$$V_{D,max} = V_{in-max} \quad (2.35)$$

## 2.7. Etude du convertisseur BUCK en régime dynamique

Le modèle est issu du traitement global des équations d'état du convertisseur. Il s'agit des « state-space averaging methods »

Le travail consiste à analyser le fonctionnement du convertisseur au cours d'une période de découpage. En considérant un seul mode de conduction, le fonctionnement fait apparaître plusieurs topologies. Chacune de ces K topologies est présente durant une fraction d, de la période de découpage. Pour chacune des topologies, il faut écrire une équation différentielle ordinaire, dont les variables d'état sont les courants dans les inductances, et les tensions aux bornes des condensateurs[33].

Le modèle moyen d'état correspond est :

$$\hat{x}(t) = \sum_K d_1 A_1 x(t) + \sum_K d_1 B_1(t) \quad (2.36)$$

Où K le nombre de topologies du circuit sur une période de découpage

Pour notre cas, nous avons deux topologies à savoir :

Interrupteur ouvert (Ton) :

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 e$$

$$y = C_1 x$$

Interrupteur ferme (Toff) :

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 e$$

$$y = C_2 x$$

Les grandeurs d'état sont ici le courant dans l'inductance  $i_L$  et la tension aux bornes du condensateur  $v_C$ .

### 2.7.1. Modélisation par modèle d'état moyen « state-space averaging methods » « model moyen grands signaux ».

#### 2.7.1.1. Fonctionnement en mode continu :

- S1 est fermé et D est bloquée :

A partir de la figure (2.6-a) et en appliquant les lois de KIRCHHOFF (mailles et nœuds) :

$$V_{in} = r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + v_C \quad (2.37)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r_L}{L} i_L - \frac{1}{L} v_C + \frac{1}{L} V_{in} \quad (2.38)$$

Avec :

$$i_R = i_L - i_C \quad (2.39)$$

Donc :

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R} \quad (2.40)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{CR} v_C \quad (2.41)$$

Avec :

$$y = R i_R = v_C \quad (2.42)$$

La représentation d'état pour l'interrupteur ferme est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (2.43)$$

$$y = [R \quad 0] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

On a :

$$x_1 = i_L \Rightarrow \dot{x}_1 = \frac{di_L}{dt} \quad (2.45)$$

$$x_2 = v_C \Rightarrow \dot{x}_2 = \frac{dv_C}{dt} \quad (2.46)$$

On déduit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Donc :

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \quad et \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad et \quad C_1 = [R \quad 0] \quad (2.48)$$

- **S1 est ouvert et D fermée :**
- A partir de la figure (2.6-b) et en appliquant les lois de KIRCHOUF (mailles et nœuds) :  
Les équations d'état sont présentes sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 e \\ y = C_2 x \end{cases} \quad (2.49)$$

De la même manière, ces équations deviennent :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} e \quad (2.50)$$

$$y = \begin{bmatrix} R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

On remarque dans ce mode, les matrices  $A_1$  et  $C_1$  restent sans changement pendant la période (1-D) T donc :

$$A_1 = A_2 \quad \text{et} \quad C_1 = C_2 \quad \text{par contre} \quad B_2 = 0 \quad (2.52)$$

On a également la relation liant les valeurs moyennes :

$$\begin{cases} \dot{x} = [A_1 D + A_2 (1-D)] x + [B_1 D + B_2 (1-D)] \\ y = [C_1 D + C_2 (1-D)] x \end{cases} \quad (2.53)$$

La matrice moyenne A est égale à :

$$A = [A_1 D + A_2 (1-D)] \quad (2.54)$$

Donc :

$$A = A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

La matrice moyenne B est égale à :

$$B = [B_1 D + B_2 (1-D)] \quad (2.56)$$

En remplaçant dans les équations (2.34) et (2.39) et on trouve :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} D + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1-D) \quad (2.57)$$

La matrice moyenne C est égale à :

$$C = [C_1 D + C_2 (1-D)] \quad (2.58)$$

Donc :

$$C = C_1 = C_2 = [R \quad 0] \quad (2.59)$$

Donc La représentation d'état moyenne d'hacheur Buck peut être écrite de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Be \\ y = Ce \end{cases} \quad (2.60)$$

Avec :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} e \quad (2.61)$$

$$y = [R \quad 0]e \quad (2.62)$$

### 2.7.1.2. Linéarisation des équations différentielles :

Les relations (2.61-2.62) sont non linéaires car elles contiennent la multiplication de variables dépendantes du temps. Par exemple, le courant dans le condensateur dépend du produit de la variable de commande  $d(t)$  par la composante  $i_L(t)$ . Cette multiplication est un processus non linéaire générant des harmoniques. La plupart des techniques d'analyse telles que la transformée de Laplace ne sont pas utilisables pour des systèmes non linéaires. Il est donc nécessaire de linéariser les relations (2.43) et (2.44) [33].

Sachant que le convertisseur Buck travaille autour d'un point de fonctionnement, on peut écrire.

$$x = X + \hat{x} \quad \text{et} \quad d = D + \hat{d} \quad \text{et} \quad y = Y + \hat{y} \quad (2.63)$$

Où les signaux  $X, D$  et  $E$  représente les valeurs d'équilibres (régime permanent),  $X, D, Y$  et  $\hat{x}, \hat{d}, \hat{y}$ , sont des signaux de faibles amplitudes (petits signaux).

Pour l'état d'équilibre (DC)  $\dot{X} = 0$  et les valeurs des petits signaux sont zéro. Donc :

$$\begin{aligned} 0 &= AX + BE \\ X &= -A^{-1}BE \\ Y &= -CA^{-1}BE \end{aligned} \quad (2.64)$$

La fonction de transfert pour l'état d'équilibre est :

$$\frac{Y}{E} = -CA^{-1}B \quad (2.65)$$

Pour les petites signaux (AC) de perturbation, la dérive de la composant d'équilibre est nul :

$$\dot{x} = \dot{X} + \dot{\hat{x}} = 0 + \dot{\hat{x}} = \dot{\hat{x}} \quad (2.66)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \left[ A_1(\hat{d} + D) + A_2(1 - (\hat{d} + D)) \right] (X + \hat{x}) + \left[ B_1(\hat{d} + D) + B_2(1 - (\hat{d} + D)) \right] (\hat{e} + E) \\ y = \left[ C_1(\hat{d} + D) + C_2(1 - (\hat{d} + D)) \right] (X + \hat{x}) \end{cases} \quad (2.67)$$

Si le produit des valeurs de petits signaux peut être négligés et la perturbation  $\hat{e}$  est zéro dans la tension d'entrée pour simplifier notre analyse. Par conséquent  $e = E$  on a donc :

$$\begin{cases} \hat{x} = [A_1 D + A_2 (1-D)] \hat{x} + [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) E] \hat{d} \\ Y + \hat{y} = [C_1 D + C_2 (1-D)] (X + \hat{x}) + [(C_1 - C_2) X] \hat{d} \end{cases} \quad (2.68)$$

On pose :

$$A = [A_1 D + A_2 (1-D)] \quad \text{et} \quad C = [C_1 D + C_2 (1-D)]$$

L'équation (2.55) devient :

$$\begin{cases} \hat{x} = A \hat{x} + [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) E] \hat{d} \\ \hat{y} = C \hat{x} + C X + [(C_1 - C_2) X] \hat{d} \end{cases} \quad (2.69)$$

### 2.7.1.3. La fonction de transfert pour les petits signaux de perturbation :

La transformation de Laplace de l'équation (2.55) est :

$$s \hat{x}(s) = A \hat{x}(s) + [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) E] \hat{d}(s) \quad (2.70)$$

$$\begin{cases} \hat{x}(s) = [sI - A]^{-1} [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) E] \hat{d}(s) \\ \hat{y}(s) = C \hat{x}(s) + C X + [(C_1 - C_2) X] \hat{d}(s) \end{cases} \quad (2.71)$$

Où  $I$  est une matrice d'identité et  $[sI - A]^{-1} = \frac{Adj[sI - A]}{dét[sI - A]}$

$$[sI - A] = s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s + \frac{r_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Suite aux calculs on trouve :

$$\hat{x} = \frac{E}{s^2 + \left(\frac{1}{CR} + \frac{r_L}{L}\right)s + \frac{1}{CL}} \begin{bmatrix} \frac{1}{L} s + \frac{1}{CLR} \\ \frac{1}{CL} \end{bmatrix} \hat{d} \quad (2.73)$$

Et quand :  $\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix}$  et  $\hat{v}_C = \hat{y}$

Par identification on peut déduire La fonction de transfert d'un hacheur Buck :

$$T_p(s) = \frac{\hat{y}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{E}{LC \left\{ s^2 + s \left( \frac{1}{RC} + \frac{r_L}{L} \right) + 1 \right\}} \quad (2.74)$$

On pose :

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.75)$$

$$\xi = \frac{1/CR + r_L/L}{2w_0} \quad (2.76)$$

La fonction de transfert devient :

$$T_p(s) = \frac{\hat{y}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{E}{\frac{s^2}{w_0^2} + \frac{2\xi}{w_0^2}s + 1} \quad (2.77)$$

### 2.7.2. Régulation d'un Buck à l'aide d'un correcteur PI :

Soit  $V^*(t)$  le signal de référence (la consigne) et  $V(t)$  le signal de sortie du système à contrôler. Le régulateur PI est connu par une loi de commande.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \quad (2.78)$$

a) Action proportionnelle

☑ Si  $K_p$  est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.

☑ Si  $K_p$  est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

b) Action intégrale :

L'action intégrale réagit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action  $U(t)$  augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

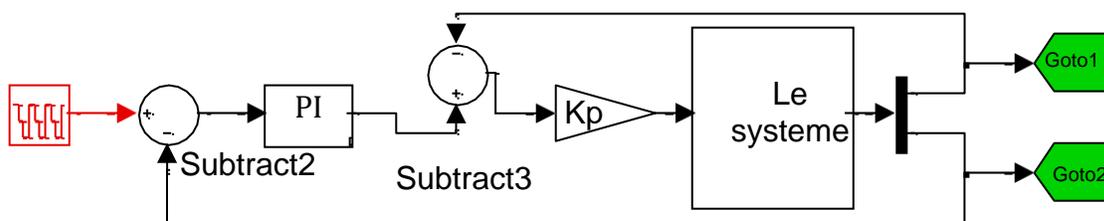


Figure 2.8 schéma du principe de régulation par PI

Le schéma et les résultats de simulation du Buck avec le régulateur PI sont illustrés dans la rubrique 2.8.

## 2.8. Hacheur Boost (survolteur) :

Un convertisseur élévateur 'Boost', ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Boost. La figure 2.9 montre la structure de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en parallèle de l'interrupteur avec la source.

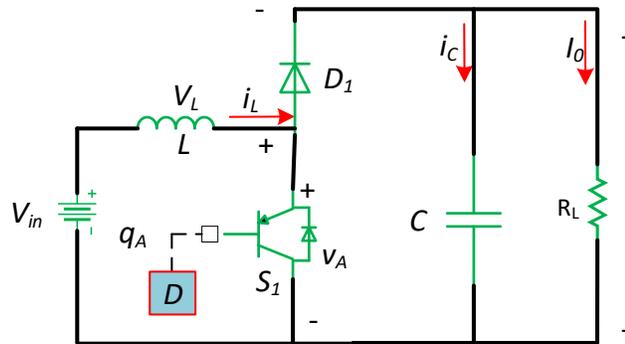


Figure 2.9 le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Boost.

Les circuits équivalents du convertisseurs Boost se présentent comme suit :

L'interrupteur S1 fermé, la diode D est bloquée : L'interrupteur S1 ouvert, la diode D est passante :

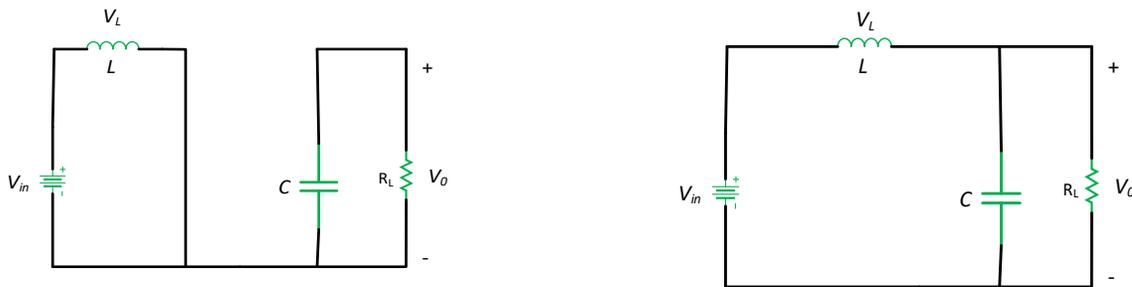


Figure 2.10 Les circuits équivalents du convertisseurs Boost.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par :

L'interrupteur S1 fermé, la diode D est bloquée :

$$V_{in} = V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \tag{2.79}$$

L'interrupteur S1 ouvert, la diode D est passante :

$$V_{in} - V_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_0}{L} \tag{2.80}$$

La variation du courant dans l'inductance est calculée comme suit :

L'interrupteur S1 fermé, la diode D est bloquée :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L}$$

$$\Delta i_{L(\text{fermé})} = \frac{DTV_{in}}{L} \quad (2.81)$$

L'interrupteur S1 ouvert, la diode D est passante :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_{in} - V_0}{L}$$

$$\Delta i_{L(\text{ouvert})} = \frac{(V_{in} - V_0)(1-D)T}{L}$$

(2.82)

Pour le fonctionnement en régime permanent, la variation nette du courant qui parcourt l'inductance doit être nulle :

$$\Delta i_{L(\text{fermé})} + \Delta i_{L(\text{ouvert})} = 0 \quad (2.83)$$

En utilisant les formules précédentes on aura :

$$\frac{DTV_{in}}{L} + \frac{(V_{in} - V_0)(1-D)T}{L} = 0$$

Donc la tension de sortie  $V_0$  est donnée comme suit :

$$V_0 = \frac{V_{in}}{(1-D)T} \quad (2.84)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension.

Le même travail effectué pour le buck est à reprendre, c'est-à-dire la linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

La fonction de transfert est donnée comme suit :

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2} \left( 1 - s \frac{L_e}{R} \right) \frac{1}{L_e C (s^2 + s \left( \frac{1}{RC} \right))} \quad (2.85)$$

Avec :

$$L_e = \frac{L}{(1-D)^2} \quad (2.86)$$

## 2.9. Convertisseur bidirectionnel DC/DC :

Cette la topologie permet le transfert d'énergie des sources à la charge et de la charge aux sources et aussi de d'une source à l'autre, quel que soit le fournisseur ou le destinataire. Le courant,  $I_{DC}$ , peut être positif ou négatif alors que la tension aux bornes du bus DC est toujours positif. Dans cette topologie également, les SC ou les batteries peuvent être ajoutées ou retirées sans changer le schéma global du convertisseur DC-DC [4].

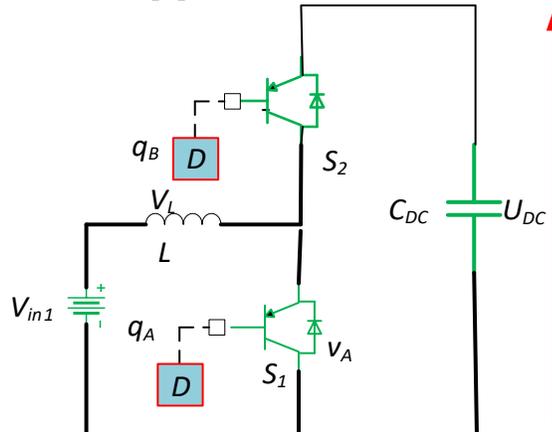


Figure 2.11 Convertisseur bidirectionnel.

Étant donné que les convertisseurs (buck et boost) sont modélisés avant, donc la même approche est appliquée avec ce convertisseur.

### 2.9.1. En mode Boost :

Afin de permettre le transfert d'énergie des sources vers le bus DC, le convertisseur DC-DC fonctionne en mode boost, augmentant la tension. Le fonctionnement du mode boost est illustré à la Figure 2.14. Pendant la phase de charge de l'inducteur en mode boost, le commutateur  $q_A$  est activé et le  $q_B$  est désactivé, de sorte que le courant peut suivre le chemin indiqué sur la figure 2.12 (a). Pendant la phase de décharge de l'inducteur en mode boost, le commutateur  $q_A$  est désactivé et le  $q_B$  est activé, de sorte que le courant peut suivre le chemin indiqué sur la figure 2.12(b) [4].

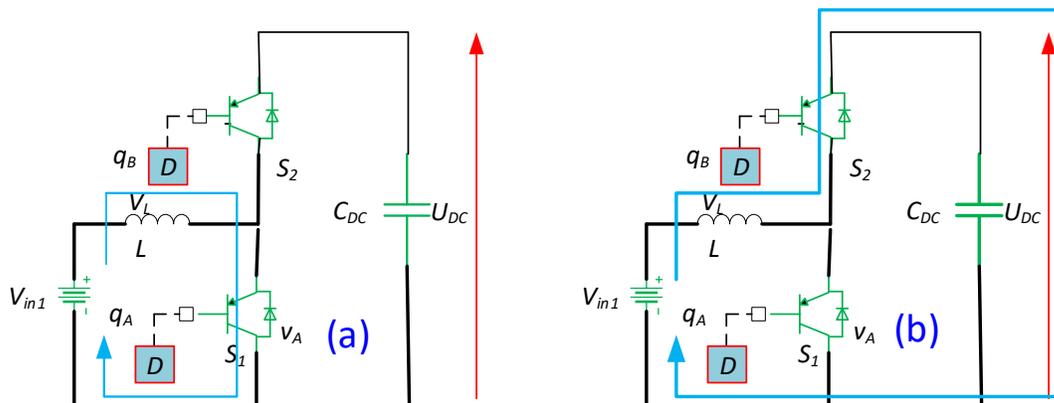


Figure 2.12 Mode Boost Phase de charge et de décharge de l'inducteur.

$$\begin{cases} U_{BT} = L_{BT} \cdot \frac{dI_{BT}}{dt} \\ I_{BT} = \frac{1}{L_{BT}} \cdot \int_0^{DT} U_{BT} dt \end{cases} \quad (2.87)$$

$$\begin{cases} U_{BT} + U_L = U_{DC} \\ I_{BT} = \frac{1}{L_{BT}} \cdot \int_{DT}^{(1-D)T} (U_{BT} - U_{DC}) dt \end{cases} \quad (2.88)$$

Où  $U_L$  est la tension aux bornes de l'inducteur,  $I_{BT}$  est le courant d'inducteur respectif et  $U_{DC}$  est la tension sur le condensateur de sortie.  $DT$  représente le temps de conduction de  $q_A$  et  $D$  est le rapport cyclique compris entre 0 et 1, et qui est multiplié par la période de temps entraîne le temps de conduction du commutateur [11].

La relation caractérisant le convertisseur parallèle sans perte reliant la tension de la source  $U_{BT}$  à celle du bus continu  $U_{DC}$  selon le rapport cyclique  $D$  associé à la conduction de l'interrupteur commandé est donné par l'équation suivante :

$$U_{DC} = \frac{U_{BT}}{1-D} \quad (2.89)$$

### 2.9.2. En mode Buck :

En mode buck, l'énergie peut être stockée sur les sources sélectionnées du bus DC, soit provenant d'une coupure régénérative ou entre sources [4].

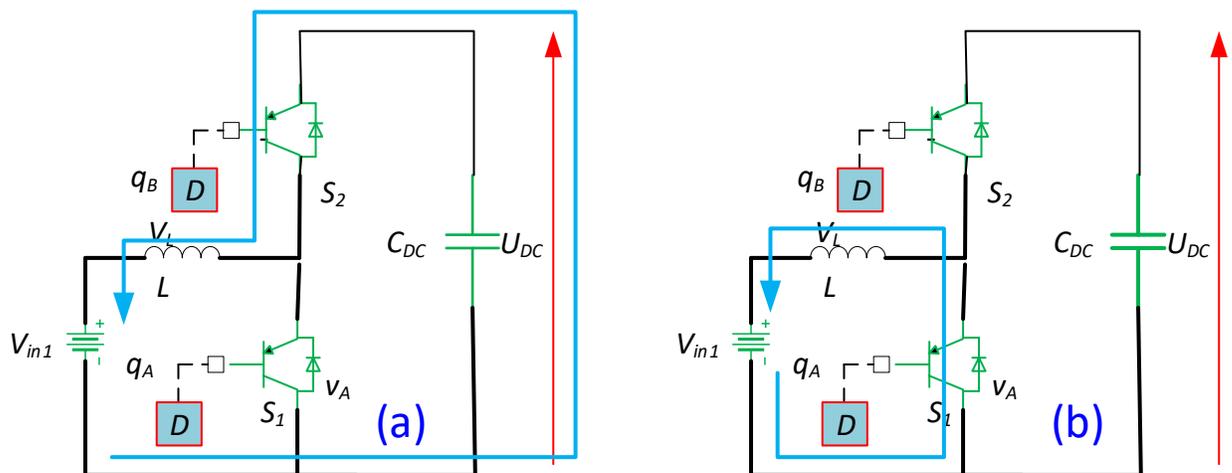


Figure 2.13 Buck mode Inductor charge and discharge phase.

Pendant la phase de charge de l'inducteur en mode abaisseur,  $q_A$  est éteint et  $q_B$  est allumé, donc l'énergie passe par l'interrupteur supérieur et l'inducteur  $L_{BT}$  jusqu'à la source Figure 2.13 (a). Ensuite, dans la phase de décharge de l'inducteur en mode abaisseur,  $q_A$  est activé et  $q_B$  est

désactivé. Dans cette phase, l'inducteur maintient le flux de courant comme indiqué sur la figure 2.13 (b) [11].

Formules

$$\begin{cases} U_{BT} = U_{DC} - L_{BT} \cdot \frac{dI_{BT}}{dt} \\ I_{BT} = \frac{1}{L_{BT}} \cdot \int_0^{DT} (U_{DC} - U_{BT}) dt \end{cases} \quad (2.90)$$

$$\begin{cases} U_{BT} = L_{BT} \cdot \frac{dI_{BT}}{dt} \\ I_{BT} = \int_{DT}^{(1-D)T} -\frac{U_{BT}}{L_{BT}} dt \end{cases} \quad (2.91)$$

Les équations présentées ci-dessus peuvent être réarrangées pour donner l'équation (2.92) comme :

$$U_{BT} = D \cdot U_{DC} \quad (2.93)$$

## 2.10. Résultats de simulation :

### 2.10.1. Convertisseur BUCK :

Les spécifications de notre simulation sont :

fd\_buck=20e3;

Td\_buck=1/fd\_buck;

% Td=Td\_buck/25; Tc=Td\_buck;

Vin\_max=30; Vin\_min=20; (input voltage)

Vo=20; (output voltage)

Io\_max=5; Io\_min=2; (load current range 1A-5A DC)

Delta\_V=0.005\*Vo; (Maximal voltage rippel in output voltage (0.5% of Vo))

Delta\_iL=0.01\*5; (Maximal current rippel in inductor (20% off Io or iL))

fd=20e3;% switching frequency

L\_bat=Vo\*(1-D\_min)\*Td/Delta\_iL;

IL\_peak=Io\_max+Delta\_iL/2;%-----For MOSFET and Doide selection

IL\_rms= sqrt(Io\_max^2+Delta\_iL^2/12); %For MOSFET and Doide selection

Io\_avg= Io\_max\*(1-D\_min);%-----For Doide selection

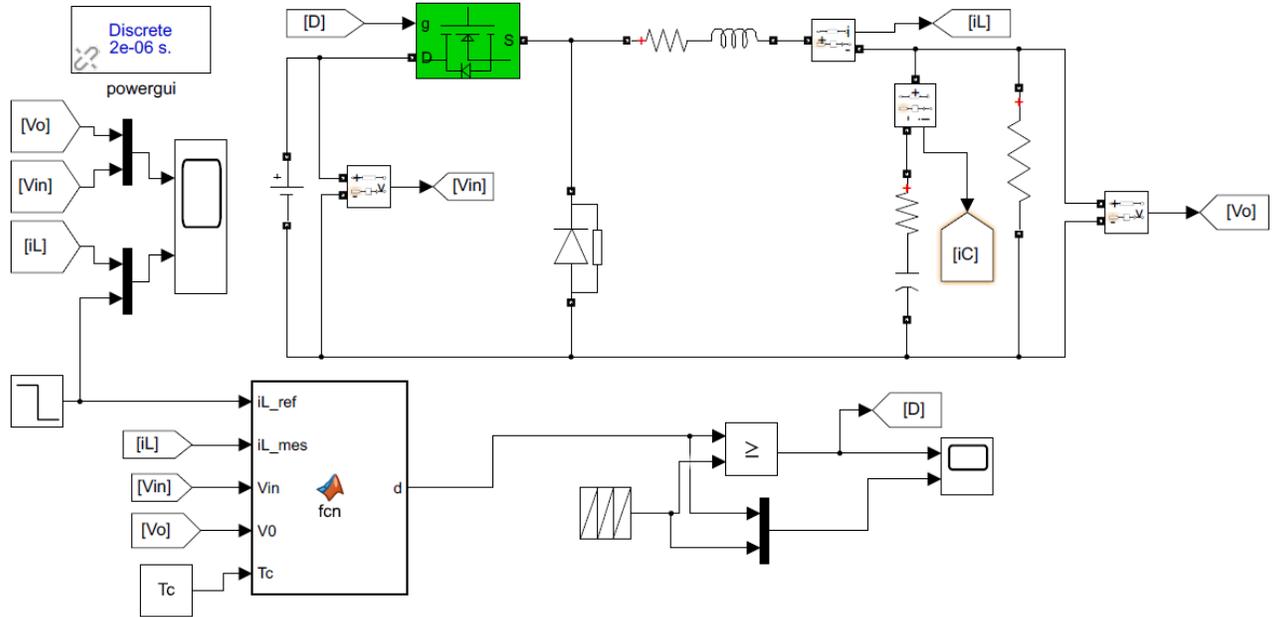


Figure 2.14 Le schéma de simulation du Buck avec le régulateur

Les résultats de simulation en boucle fermée du convertisseur BUCK sont représentés ci-dessous dans la figure (2.15)

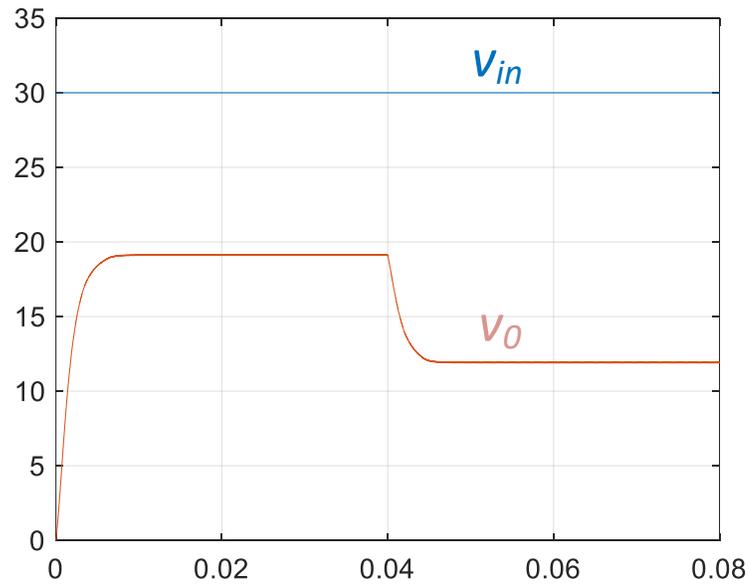


Figure 2.15 Tension de sortie  $V_0$

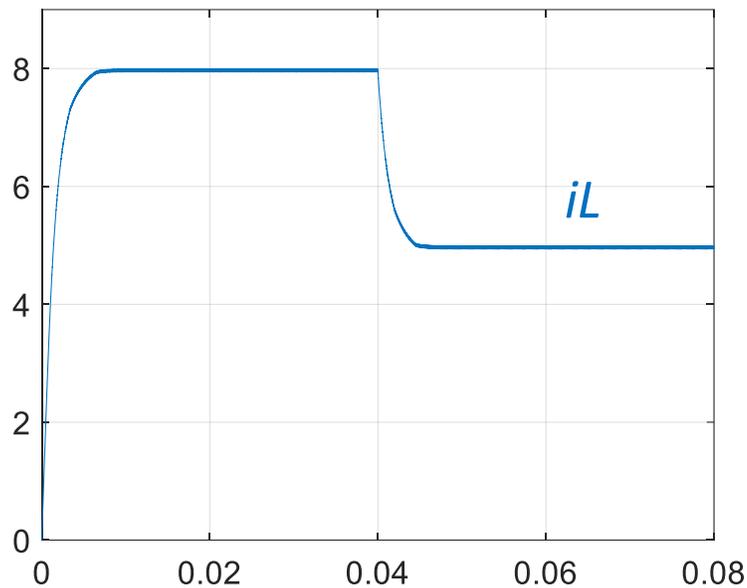


Figure 2.16 Courant de sortie pour d'inductance  $i_L$

On remarque sur les deux figures (2.15) et (2.116) que les résultats de simulation obtenus de la tension de sortie  $V_c$  est inférieur de la tension d'entrée donc c'est un convertisseur élévateur.

### 2.10.2. Convertisseur BOOST :

Les spécifications de notre simulation sont :

$fd\_boost=20e3;$

$Td\_boost=1/fd\_boost;$

$\% Td=Td\_boost/25$

$; Tc=Td\_boost;$

$Vin\_max=12; Vin\_min=10;$  (input voltage )

$Vo=20;$  (output voltage)

$Io\_max=5; Io\_min=2;$  ( load current range 1A-5A DC)

$\Delta V=0.005*Vo;$  (Maximal voltage rippel in output voltage (0.5% of  $Vo$ ))

$\Delta i_L=0.1*5;$  (Maximal current rippel in inductor (10% off  $Io$  or  $i_L$ ))

Control circuit

$fd=20e3;$  ( switching frequency) :

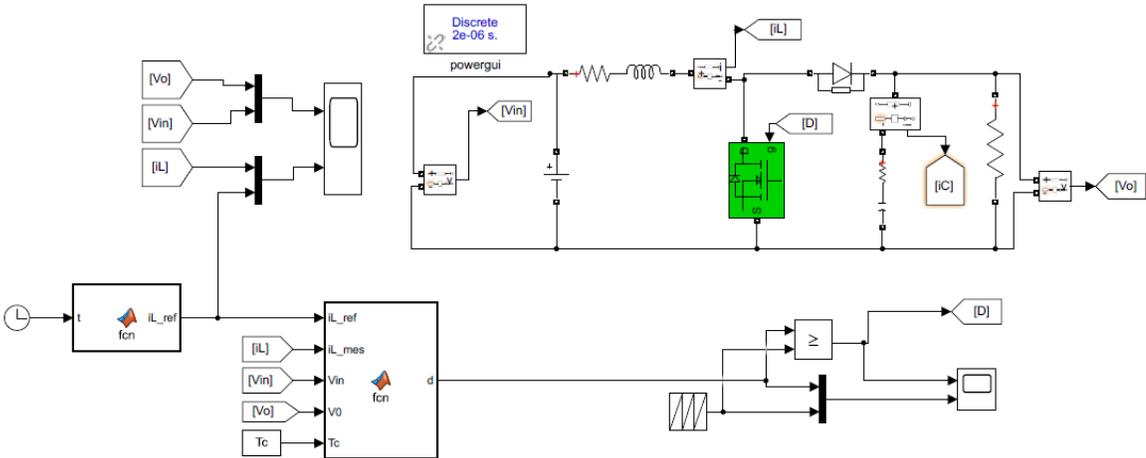


Figure 2.17 Simulation convertisseur boost avec contrôleur.

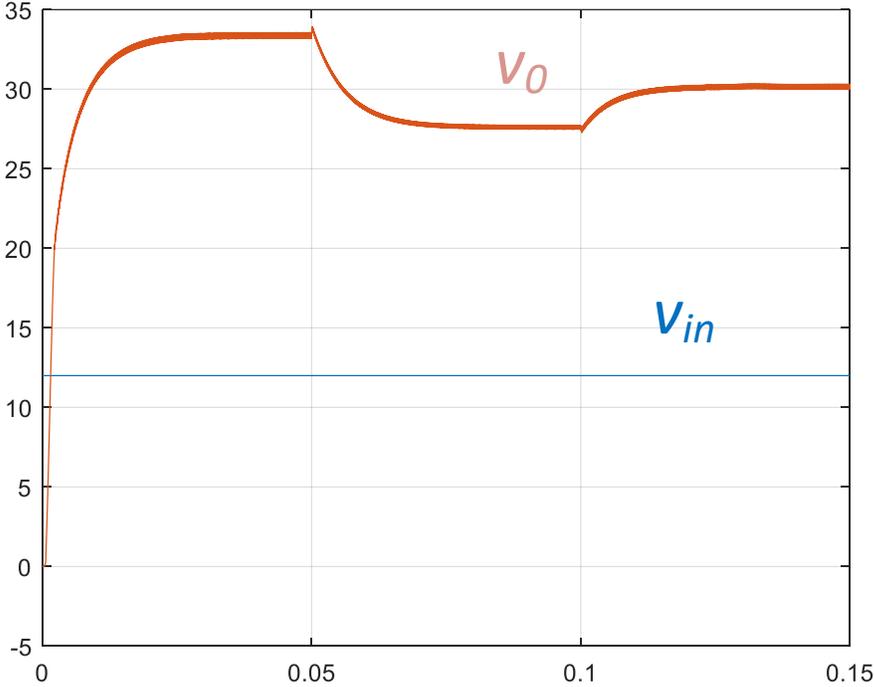


Figure 2.18 Tension de sortie Vc

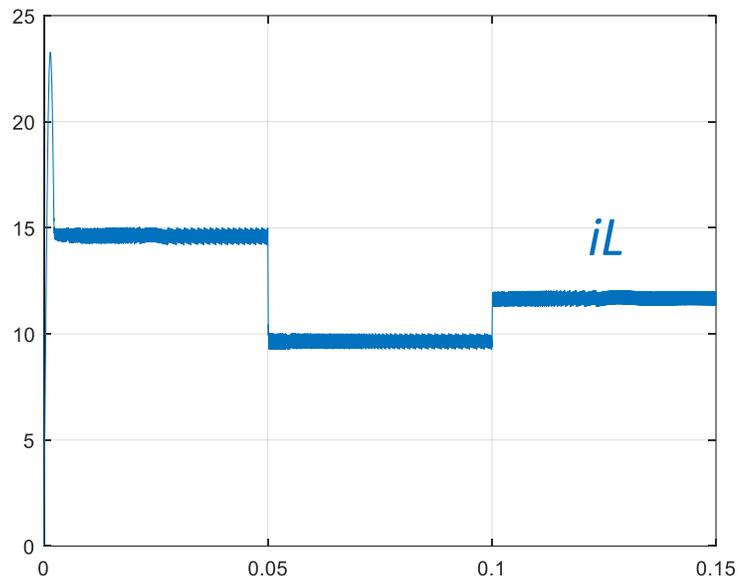


Figure 2.19 Courant de sortie pour d'inductance  $i_L$

On remarque sur les deux figures (2.18) et (2.19) que les résultats de simulation obtenus de la tension de sortie  $V_c$  est supérieur de la tension d'entrée donc c'est un convertisseur élévateur.

### 2.10.3. Convertisseur Bidirectionnel :

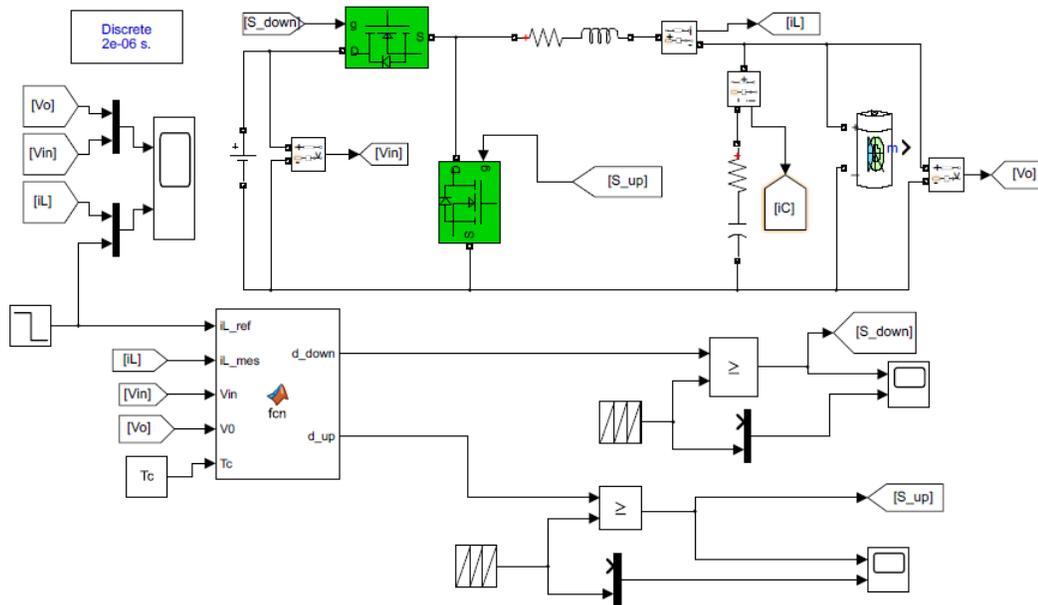


Figure 2.20 Simulation convertisseur bidirectionnel avec contrôleur

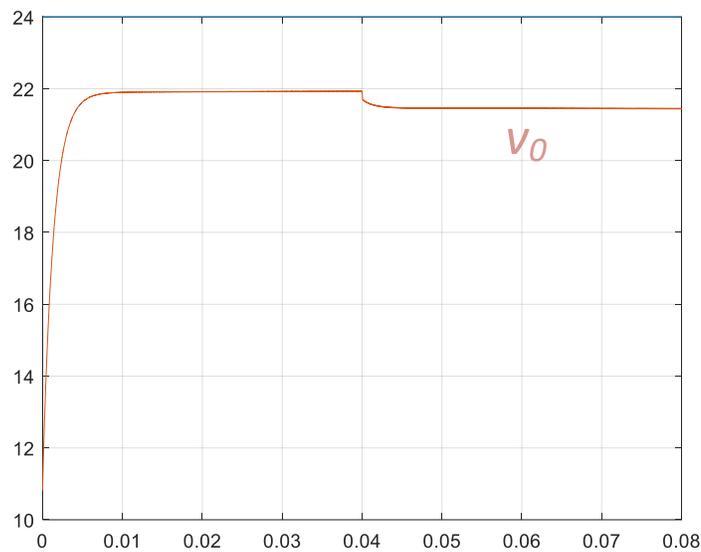


Figure 2.21 Tension de sortie  $V_0$

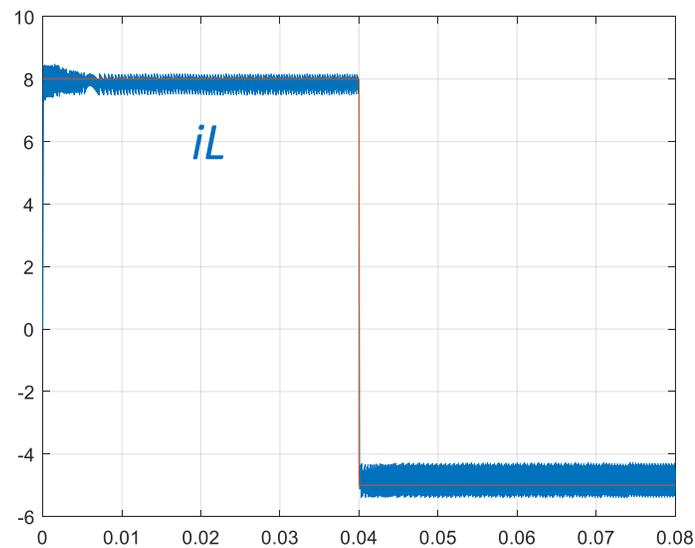


Figure 2.22 Courant de sortie pour d'inductance  $i_L$

On remarque sur les deux figures (22) et (23) que les résultats de simulation obtenus du courant change de signe. Cela veut dire que le courant à deux sens.

## 2.11. Moteur synchrone autopilotée à aimant permanent (PMBLDC) :

Moteur synchrone autopilotée à aimant permanent aussi appelé moteur à courant continu sans balais (BLDC). Les moteurs synchrones à aimants permanents sont classés sur la base de la forme d'onde de leur force électromotrice (FEM) induite, c'est-à-dire sinusoïdale ou trapézoïdale.

Le type sinusoïdal est appelé moteur synchrone à aimants permanents ; le type trapézoïdal passe sous le nom de machine PM Brushless DC (BLDC). Les moteurs à aimant permanent avec balais et sans balais à courant continu incorporent une combinaison de l'aimant permanent et de champs électromagnétiques pour produire un couple (ou une force) entraînant un mouvement. Dans un moteur sans balai (BLDC), le rotor comprend les aimants et le stator contient les enroulements. Comme son nom l'indique, les balais sont absents et, dans ce cas, la commutation est mise en œuvre électroniquement avec un convertisseur commandé (onduleur) utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs pour modifier le courant dans les enroulements en fonction du retour d'information de la position du rotor.

Trois sondes à effet Hall (H1, H2 et H3) sont utilisées pour détecter le champ d'induction produit par l'aimant et pour ainsi mesurer grossièrement la position du rotor. Elles sont solidaires du stator, logées directement dans celui-ci ou sur une pièce fixée au stator en face d'un aimant auxiliaire solide du rotor ayant les mêmes caractéristiques que les aimants permanents du rotor. Comme indiqué précédemment, elles sont espacées de 60°, voire 120°. C'est sur la base de l'information qu'elles délivrent que les phases seront commutées.

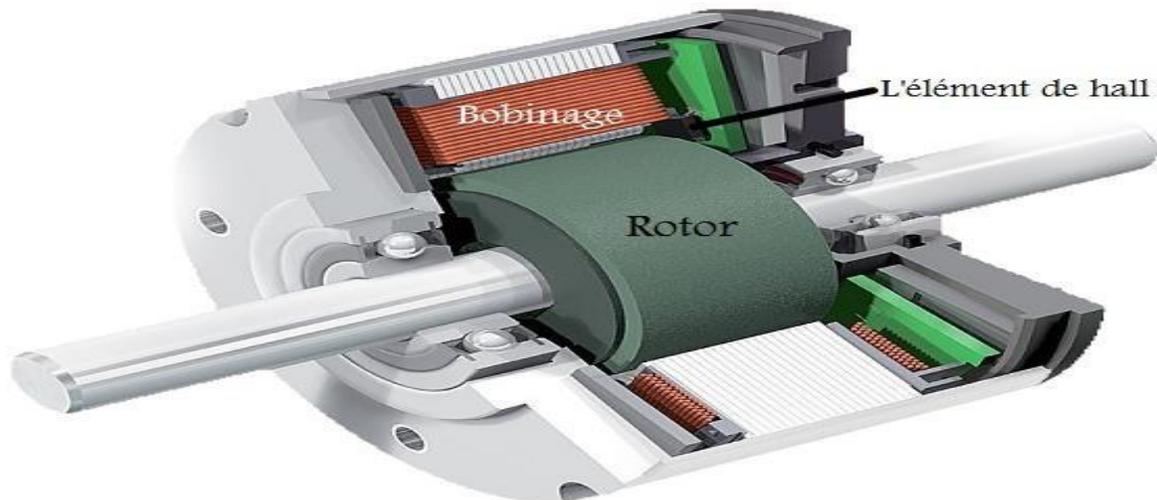


Figure 2.23 Moteur synchrone autopilotée à aimant permanent (PMBLDC).

## 2.12. Les avantages du moteur BLDC :

Les moteurs BLDC présentent de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu conventionnel et aux moteurs à induction. Certains d'entre eux :

- Réponse dynamique plus rapide.
- Une meilleure vitesse par rapport à des caractéristiques de couple ;
- Rendement élevé.
- Longue durée de vie.
- Fonctionnement silencieux.
- Plages de vitesse importante.

De plus, le rapport entre le couple fourni et la taille du moteur est plus élevé, ce qui le rend utile dans les applications où le poids est de facteur critique.

## 2.13. Principe de fonctionnement du moteur BLDC

Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La figure I.6 montre l'architecture du moteur et de son onduleur [15].

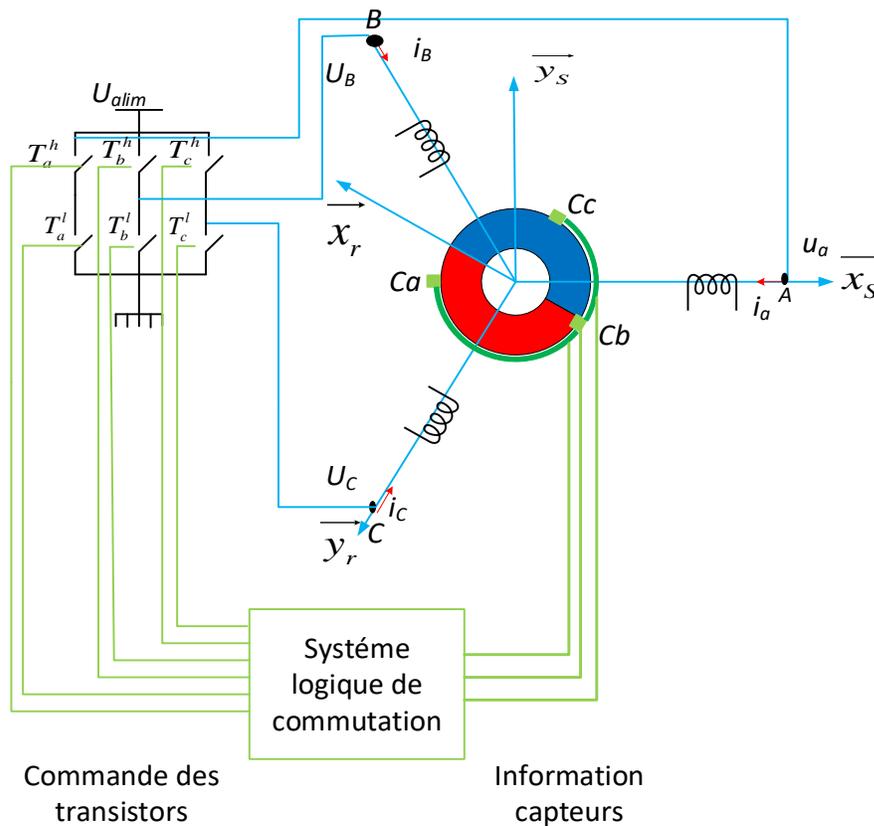


Figure 2.24 Exemple de situation de commutation [15].

Fig2.25 : Exemple de situation de commutation

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension d'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée. Prenons l'exemple de la figure 2.23 la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique  $\vec{B}$  dans le moteur dirigé suivant  $\vec{y}_s$ . Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique  $\vec{m}$ , orienté du sud vers le nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique[15].

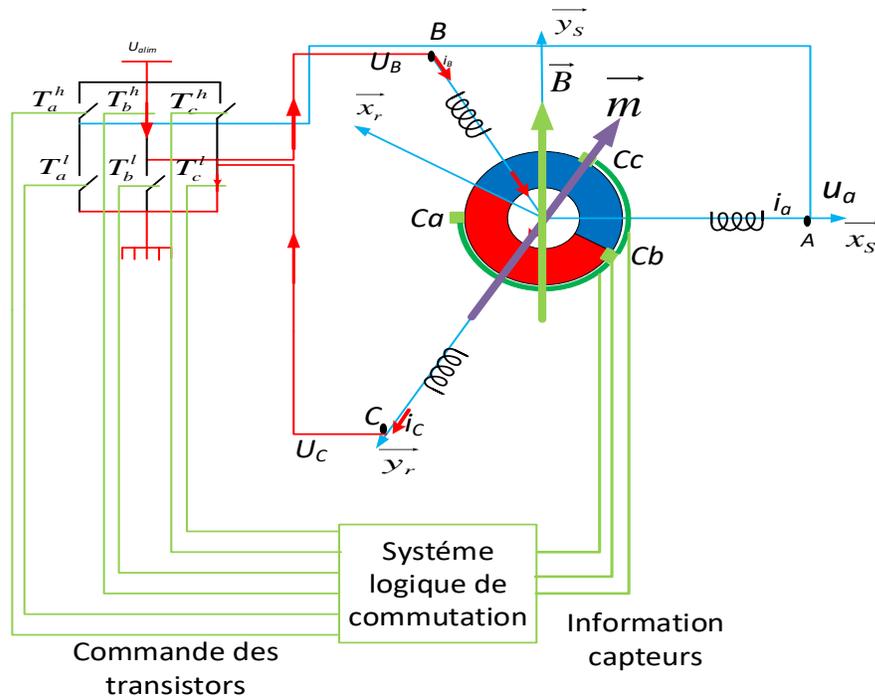


Figure 2.25 Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless[15].

Dès que le rotor s'approchera de  $\vec{y}_s$ , la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique  $\vec{B}$  tourne de  $\pi/6$ , de façon à attirer le rotor et poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique. L'angle entre  $\vec{m}$  et  $\vec{B}$  conduit à un couple magnétique  $C\vec{m} = \vec{m} \wedge \vec{B}$ .

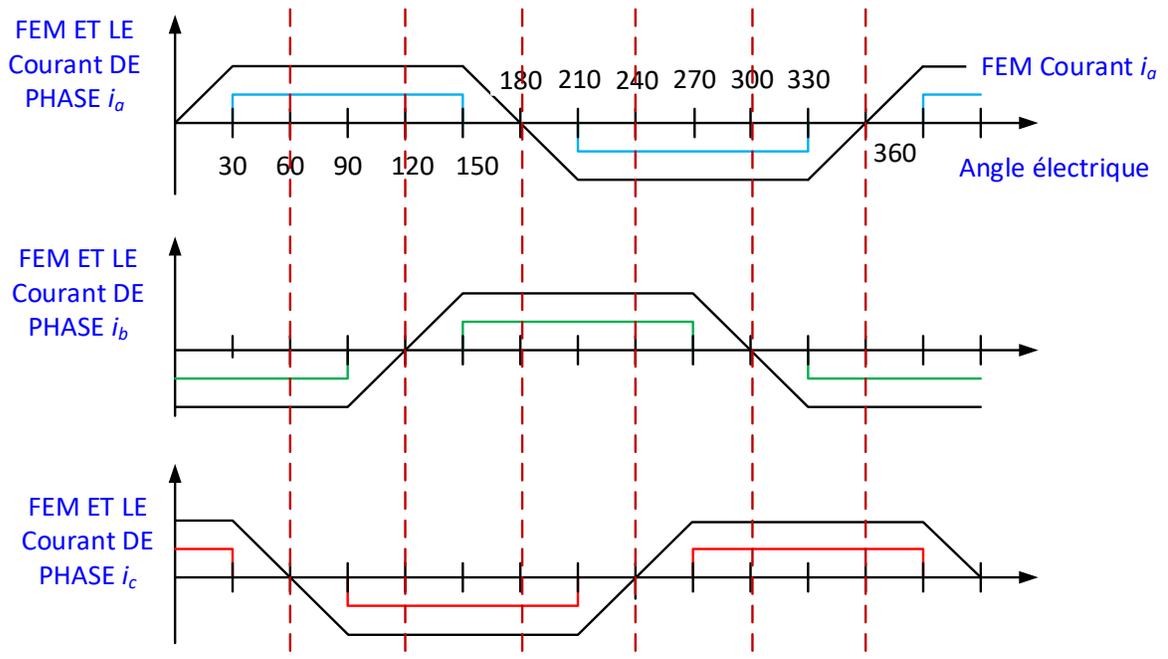


Figure 2.26 Séquences de commutation triphasée [5].

## 2.14. Le modèle dynamique du moteur BLDC :

### 2.14.1. Equations Electriques :

Les équations du circuit couplé des enroulements du stator en termes de constantes électriques du moteur sont [13] [2] [6][14]:

$$\begin{aligned} V_{an} &= R_a i_a + \frac{d}{dt} (L_{aa} i_a + L_{ba} i_b + L_{ca} i_c) + e_a \\ V_{bn} &= R_b i_b + \frac{d}{dt} (L_{ab} i_a + L_{bb} i_b + L_{cb} i_c) + e_b \\ V_{cn} &= R_c i_c + \frac{d}{dt} (L_{ac} i_a + L_{bc} i_b + L_{cc} i_c) + e_c \end{aligned} \quad (2.94)$$

Où :

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s$$

$$L_{ba} = L_{ab} = L_{ca} = L_{ac} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

Puisque :  $i_a + i_b + i_c = 0$ , et  $(L_s - M) = L$ , on a :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

Où :

R : la résistance statorique par phase.

$i_a, i_b, i_c$  : les courants statoriques.

$e_a, e_b, e_c$  : représente les forces contre-électromotrices de chaque phase.

Les B-EMFs instantanées induites sont toutes supposées trapézoïdales peuvent être écrites [13].

$$\begin{aligned} e_a &= f_a(\theta_r) \lambda_p \Omega \\ e_b &= f_a\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \lambda_p \Omega \\ e_c &= f_a\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \lambda_p \Omega \end{aligned} \quad (2.97)$$

Avec :

$\Omega$  : la vitesse angulaire électrique  $\frac{rad}{sec}$ .

$\lambda_p$  : le flux maximal induit par l'enroulement statorique.

La figure 2.26 représente un circuit équivalent triphasé de moteur BLDC, où chaque phase est composée de la résistance statorique R, de la self-inductance équivalente L, de l'inductance mutuelle M et d'une FCEM trapézoïdale en série [13].

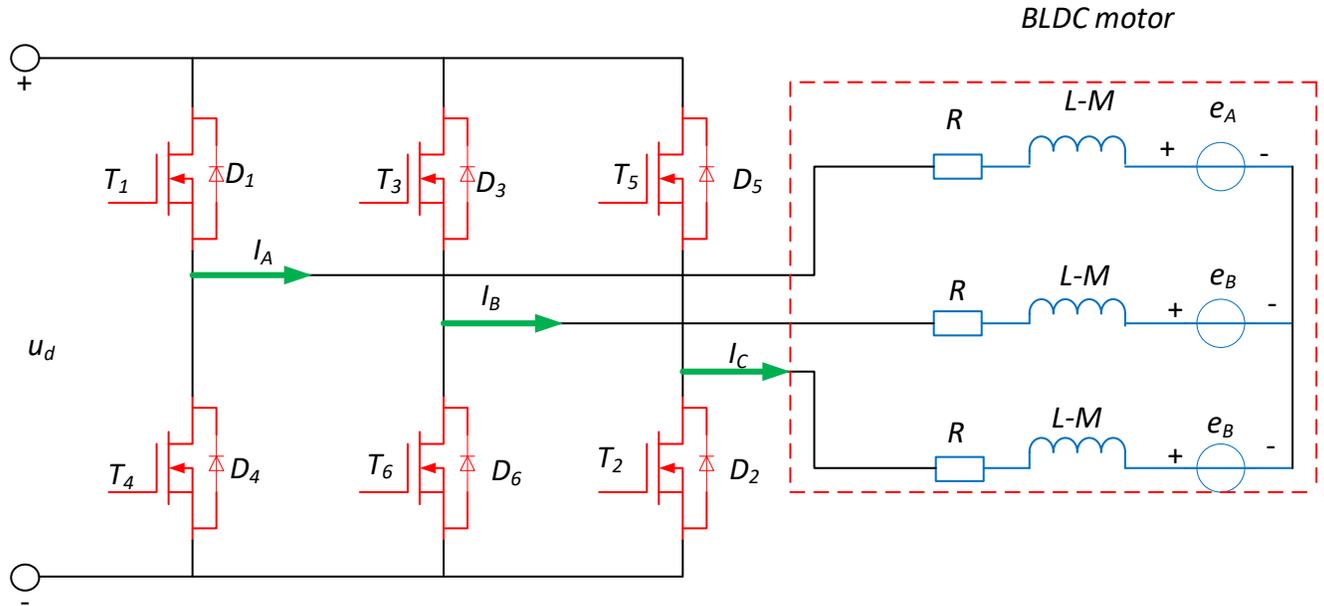


Figure 2.27 Circuit équivalent triphasé du moteur BLDC

Comme pour les moteurs à courant continu, l'analyse de la puissance et du couple du moteur BLDC peut être effectuée dans la perspective du transfert d'énergie. Lorsque le moteur fonctionne, la puissance de la source est absorbée et, bien qu'une petite partie soit transformée en perte joule et de fer, la plus grande partie de la puissance est transférée par l'entrefer au rotor sous l'effet du couple. La puissance transférée au rotor, appelée puissance électromagnétique, est égale à la somme du produit du courant et de la contre-FEM des trois phases [13] [2] [6].

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \tag{2.98}$$

Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par :

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\Omega} \tag{2.99}$$

### 2.14.2.L'Équation Mécanique du Mouvement :

La partie mécanique est exprimée par[13] :

$$J \left( \frac{d\Omega}{dt} \right) + B \Omega = T_e - T_L \tag{2.100}$$

Avec :

$\Omega$  : la vitesse angulaire du moteur en rad/s.

$T_e$  : le couple électromagnétique développé en N/m.

$T_L$  : le couple de charge en N/m.

$J$  : le moment d'inertie en N.m.s<sup>2</sup>/rad.

$B$  : le coefficient de frottement en N.m.s/rad.

## 2.15. Commande en boucle fermée du moteur BLDC :

### 2.15.1. Commande linéaire :

Les lois de commande définies sont associées avec un régulateur proportionnel-intégrale (PI) pour contrôler le couple électromagnétique et effectuer la régulation de la vitesse.

La figure (2.29) représente un schéma de contrôle de vitesse pour un moteur BLDC. Pour ce schéma de contrôle, les capteurs de vitesse et de position sont supposés être le générateur tachymétrique et le capteur à effet de hall. Comme on peut le voir sur la figure, il y a deux boucles la boucle de la vitesse, la deuxième, la boucle de contrôle de courant.

La vitesse du rotor est comparée à la valeur de référence et l'erreur de vitesse du rotor est amplifiée via un contrôleur PI. La sortie du contrôleur PI est ensuite utilisée comme couple de référence, à partir duquel, à leur tour, les références de courant de phase sont générées.

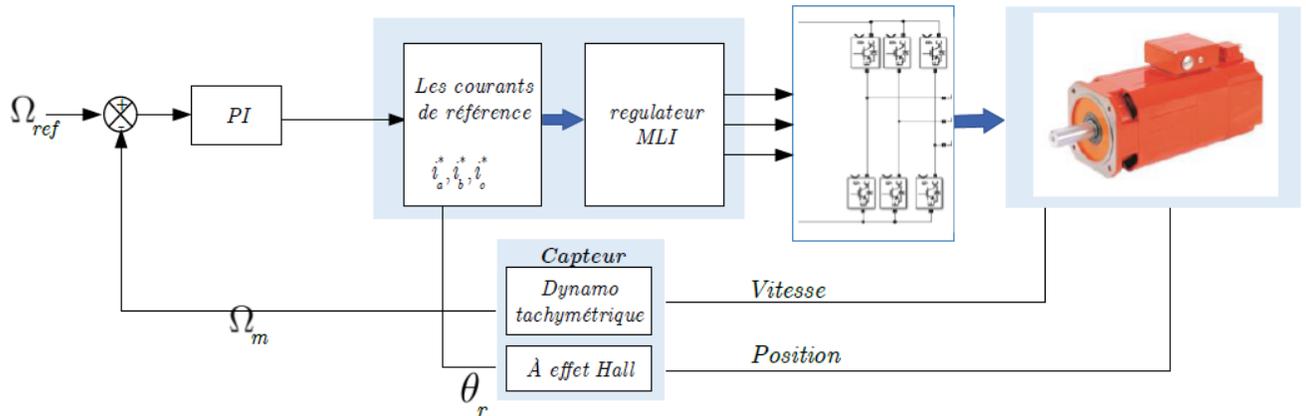


Figure 2.28 schémas de contrôle de moteur BLDC

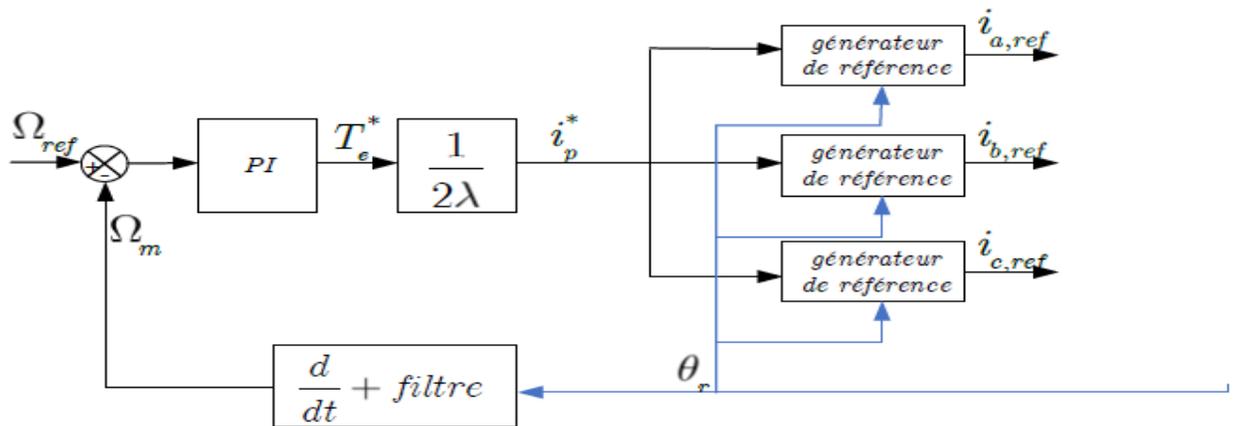


Figure 2.29 Schéma de principe représente le contrôle en vitesse du moteur BLDC

L'amplitude du courant de référence ( $i_p^*$ ) est déterminée à partir du couple de référence, selon la position du rotor, Les courants de phase de référence sont indiqués dans le tableau (2.1). Ces courants sont comparés avec les courants réels des phases mesurés. Les erreurs des courants sont calculées comme indiquent dans l'équation (2.102). Ces erreurs sont appliquées à la bande d'hystérésis de l'onduleur ( $\pm h_b$ ) et les signaux de commutation de l'onduleur MLI triphasé sont générés en fonction des états de commutation.

$$e_{ia} = i_{a.ref} - i_a, e_{ib} = i_{b.ref} - i_b, e_{ic} = i_{c.ref} - i_c \quad (2.101)$$

$$\begin{aligned} \text{si } e_{ai} \geq h_b \text{ alors } v_{an} &= V_{dc}/2 & \text{si } e_{ai} \leq -h_b \text{ alors } v_{an} &= -V_{dc}/2. \\ \text{si } e_{bi} \geq h_b \text{ alors } v_{bn} &= V_{dc}/2 & \text{si } e_{bi} \leq -h_b \text{ alors } v_{bn} &= -V_{dc}/2. \\ \text{si } e_{ci} \geq h_b \text{ alors } v_{cn} &= V_{dc}/2 & \text{si } e_{ci} \leq -h_b \text{ alors } v_{cn} &= -V_{dc}/2. \end{aligned}$$

Position de rotor ( $\theta$ )	Référence des courants		
	$i_{a.ref}$	$i_{b.ref}$	$i_{c.ref}$
0-30	0	$-i_p$	$i_p$
30-90	$i_p$	$-i_p$	0
90-150	$i_p$	0	$-i_p$
150-210	0	$i_p$	$-i_p$
210-270	$-i_p$	$i_p$	0
270-330	$-i_p$	0	$i_p$
330-360	0	$-i_p$	$i_p$

Table 2.1 Les courants de référence de moteur BLDC

### 2.15.2. Résultats de simulation :

Les figures 2.30 (a, b, c) montrent les réponses dynamiques de la vitesse, la fem et le courant, et du couple, respectivement.

On applique un échelon pour la vitesse de référence (600 tr/min) avec un couple de charge nul (à vide). A l'instant  $t = 0.2$  s, on effectue un changement de consigne de vitesse (de 600 vers 1500 tr/min) toujours à vide ; jusqu'à 0.5s nous avons appliqué un couple résistant 120N.

Les figures montrent que le régulateur PI donne des résultats satisfaisants et ce, par rapport à la grandeur de perturbation et par rapport à la grandeur de consigne.

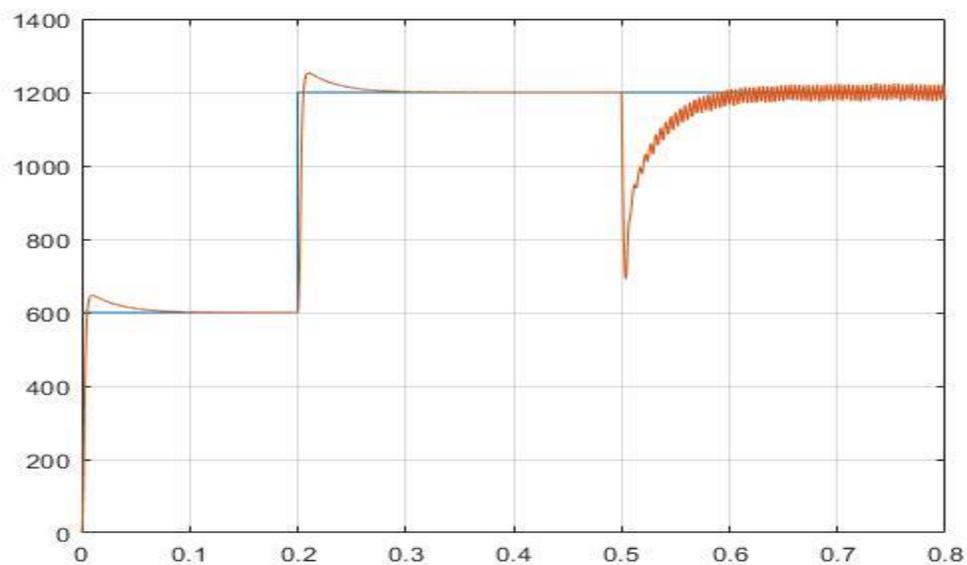


Figure 2.30-a La vitesse du rotor

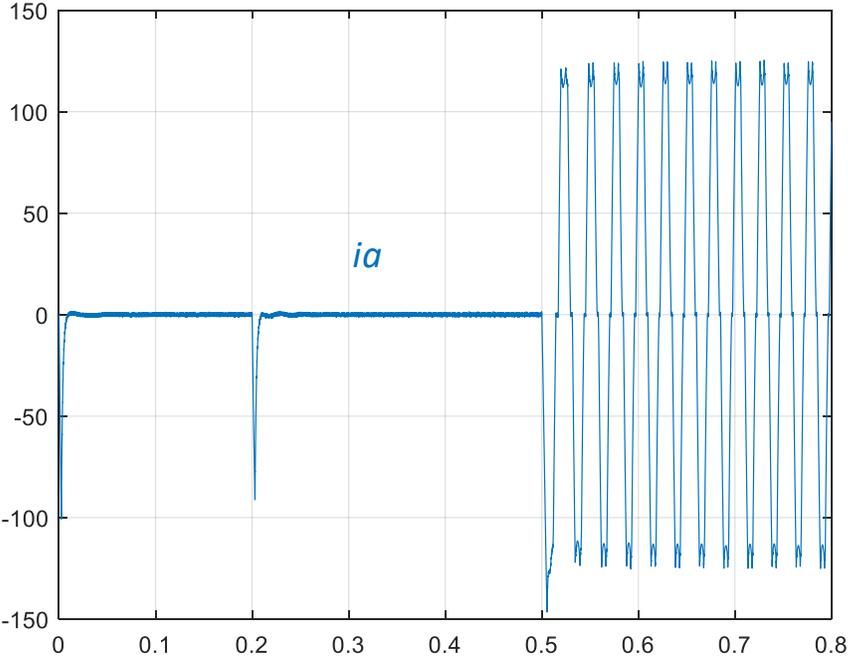


Figure 2.31-b- Le courant de phase  $i_a$

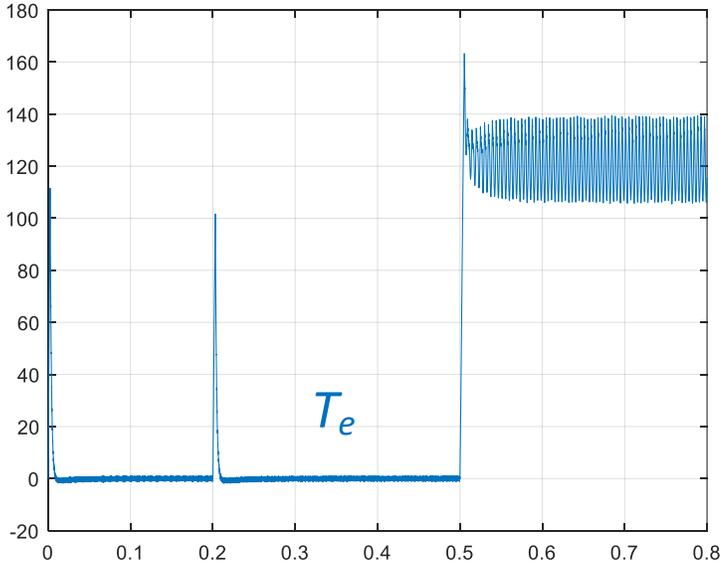


Figure 2.32-c- Le couple électromagnétique

- Démarrage direct de la machine à vide  $t \in [0 \ 0.5]$ .

Un démarrage direct du moteur est effectué en appliquant une tension continue nominale.

Vdc de 300V. Le moteur n'entraîne aucune charge, figure 2.33-c, la machine développe un couple maximal supérieur à celui appliqué par la charge afin de vaincre l'inertie du rotor de la machine.

L'allure de la vitesse de rotation de la machine donnée par la figure 2.31-a montre que le régime permanent s'établit à une vitesse de 600 tr/min au bout d'un temps d'environ 0.05s. une augmentation brusque en échelon de 600tr/min à l'instant  $t = 0.2s$ . la vitesse suit celle de la référence 1200 tr/min.

- Variation du couple de charge  $t \in [0.5 \ 0.8]$ .

Dans ce cas, le moteur fonctionnant en régime permanent, une augmentation brusque en échelon de 120N.m du couple de charge à l'instant  $t = 0.5s$ , le couple électromagnétique subit une augmentation est atteint une valeur moyenne de 120N.m avec des ondulations importantes, de l'ordre de 30%.

La vitesse toujours suit sa référence avec un dépassement lors de l'application du couple de charge ou le temps de changement de sa référence.

## 2.16. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des trois convertisseurs DC-DC (Buck,Boost et le bidirectionnel), ainsi que leurs principes de fonctionnement.

L'étude et la modélisation analytique du convertisseur du régime permanent pour fournir un model simple et rapide avec le dimensionnement des composants, celle en regime dynamique a permet d'établir les fonctions de transfert statiques des convertisseurs, et de comprendre leurs relations entrée-sortie.

Le modèle moyen est utilisé pour calculer la commande moyenne du convertisseur. La linéarisation autour d'un point d'équilibre désiré, a permet d'établir les caractéristiques locales, et de préparer ainsi le terrain pour l'application des techniques de commande linéaire[3].

Il était question aussi dans ce chapitre de présenté le Moteur BLDC à EMF trapézoïdale, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques , avons fait aussi la modélisation mathématique et construit le modèle Simulink de la commande trapézoïdale d'un moteur BLDC. On a modélisé l'onduleur de tension ainsi que des différents éléments qui constituent la structure de commande trapézoïdale tels que les capteurs à effet de Hall, le bloc de génération des tensions de référence ainsi que du bloc de génération des signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.

---

# Chapitre 03

---

MODELISATION ET  
COMMANDE DES ROUES  
MOTRICES DU VEHICULE  
ELECTRIQUE

## 3. Modélisation Et Commande Des Roues Du Véhicule Electrique

### 3.1. Introduction

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif ; la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender [7].

La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération [7].

Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui déterminent les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule [7].

### 3.2. Modélisation dynamique du véhicule

#### 3.2.1. Contraintes dynamiques sur le véhicule

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel, il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage [7][5].

##### 3.2.1.1. Contraintes d'accélération « accélération et freinage » :

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération  $\gamma$  qu'il peut fournir. Cela se traduit par [7]:

$$\gamma = \gamma_{max} \quad (3.1)$$

De même, le freinage du véhicule est contrôlé par une force de freinage qui est proportionnelle à la décélération des roues. Cette nouvelle contrainte impose [7][5] :

$$\gamma_{min} \leq \gamma \leq \gamma_{max} \quad (3.2)$$

##### 3.2.1.2 Contrainte de vitesse maximale :

Il semble naturel que le véhicule a une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes [7][5] :

$$0 \leq V_x \leq V_{x-max} \quad (3.3)$$

$$-\omega_{max} \leq \omega \leq \omega_{max} \quad (3.4)$$

##### 3.2.1.3. Contrainte de non-glissement :

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement  $\mu$  qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la

surface de contact. Si  $F$  tangentielle  $\geq \mu F$  normale alors il y aura glissement [18],[19] Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit :

$$M \gamma \geq \mu M . g \quad (3.5)$$

Ce qui implique :

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \geq \mu . g \quad (3.6)$$

Où :  $M$  : Masse du véhicule ;

$\gamma$  : Accélération tangentielle du véhicule;

$g$ : Accélération de pesanteur.

Donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \geq \mu^2 . g^2 \quad (3.7)$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire. Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés [20]:

$F$  adhérences =  $f$  (Poids, Pression des pneus, Température, Etat de revêtement de la route).

#### 3.2.1.4. Force d'entraînement :

Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force  $F$  qui est parallèle à l'axe  $X_v$ . Cette force est contrainte par l'expression :

$$0 \leq F \leq F_{max} \quad (3.8)$$

### 3.2.2. Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge la pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire.

Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion des roues au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement. Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent.

Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, figure (II-1), Soit  $\alpha$  l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale [21].

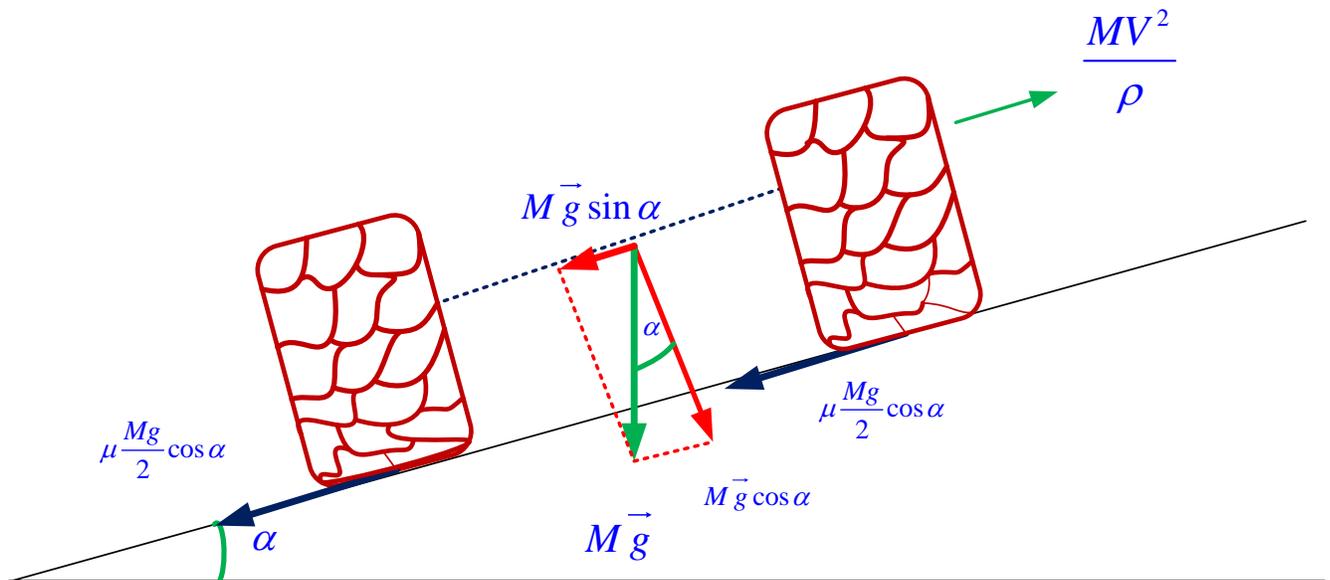


Figure 3.1 Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle  $\alpha$

La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{M.V^2}{\rho} \leq (M.g.\sin \alpha + \mu.M.g.\cos \alpha) \quad (3.9)$$

Où  $\rho$  : Rayon du virage.

$V$  : Vitesse du véhicule.

$\mu$  : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

Par suite, la valeur maximale  $V_{\max}$  de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut:

$$V_{\max} = \sqrt{\mu.g.\rho} \quad (3.10)$$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons :

- Diminuer la vitesse du véhicule  $V$ .
- Augmenter le rayon de courbure  $\rho$  de la trajectoire.
- Augmenter le Coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation [22].

### 3.2.3. Couples résistant au déplacement :

Le couple résistant à la roue ( $C_{r,roue}$ ) lié à l'effort résistant total ( $F_{rt}$ ) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation :

$$C_{r,roue} = F_{tr}.r = [R_r + R_a + R_p].r \quad (3.11)$$

Où  $R_r$  : Résistance au roulement.

$R_a$  : Résistance aérodynamique.

$R_p$  : Résistance due à la pente.

$r$  : rayon d'une roue.

Nous raisonnerons sur un véhicule de masse  $M$ , à deux roues motrices de rayon extérieur  $r$  situées à l'avant, son accélération est  $\gamma$ , sa vitesse  $V$ . Tous les couples résistants seront exprimés en fonction du facteur  $M_{gr}/2$  caractéristique du véhicule.

### 3.2.4. Roulement uniforme sur sol plat :

Les efforts résistants sont alors:

- La résistance au roulement qui fait intervenir les pertes d'énergie se produisant dans la surface de contact entre la roue et la surface de roulement.
- La résistance aérodynamique.

#### 3.2.4.1. Résistance au roulement $R_r$ :

L'expérience montre que la force qu'il faut appliquer à une roue pour la faire avancer en tournant est égale au produit du poids  $Mg$  par le coefficient de frottement de roulement  $f_r$  [23]

$$R_r = f_r \cdot M \cdot g \quad (3.12)$$

$g$  : accélération due à la gravité (9.81m/s<sup>2</sup>).

$M$  : masse totale du véhicule (kg)

$f_r$  : coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement.

#### 3.2.4.2. Résistance aérodynamique $R_a$ :

L'expression de la résistance aérodynamique est la suivante [24]

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S \cdot C_x \cdot (V \pm V_v)^2 \quad (3.13)$$

Où :  $\rho_a$  : désigne la masse volumique de l'air ( $\rho = 1.293$  kg/m<sup>3</sup>).

$S$  : est la surface frontale du véhicule en [m<sup>2</sup>].

$C_x$  : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement).

$V$  : est la vitesse du véhicule en [m/s].

$V_v$  : est la vitesse du vent en [m/s].

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de 60Km/h, mais devient rapidement prépondérante ensuite.

Le couple maximum de roulement à plat (hors pertes dans la transmission) sera donc, pour une roue [25].

Croulement = 0.08  $M_{gr}/2$  véhicule avec pneumatiques.

Croulement = 0.01  $M_{gr}/2$  véhicule avec bandage plein.

### 3.2.5. Franchissement de pente :

Appliquer le théorème de la résultante dynamique Figure (3.2), dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, conduit à l'équation suivante [16] :

$$R_p = Mg \sin \varphi \quad (3.14)$$

Le couple nécessaire au franchissement vaut pour une roue :

$$C_p = R_p \cdot r = \frac{1}{2} \cdot M \cdot g \cdot r \cdot \sin \varphi \quad (3.15)$$

Où :

M : masse du véhicule en [Kg].  
 g : l'accélération de pesanteur.  
 r : rayon d'une roue.  
 $\varphi$  : Angle de la pente.

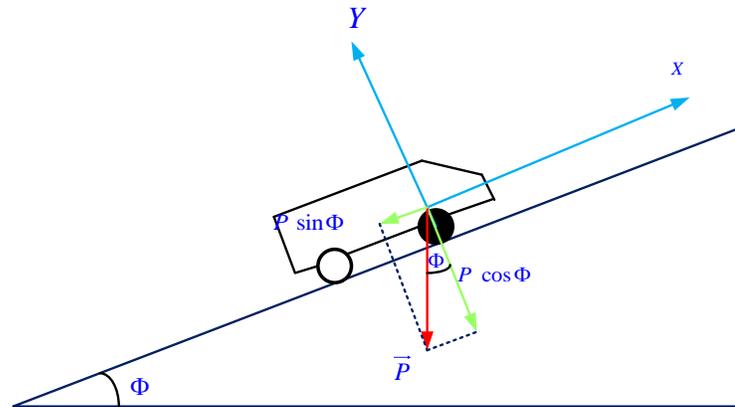


Figure 3.2 Franchissement de pente.

### 3.2.6. Franchissement d'obstacles :

Le véhicule doit, en principe, pouvoir franchir des obstacles jusqu'à une hauteur h égale au demi rayon de roue r/2 (figure 3.4). Le couple nécessaire au franchissement est [16] :

$$C_f = \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot M \cdot g \cdot r \quad \text{avec} \quad \varphi_{\max} = 60^\circ \quad (3.16)$$

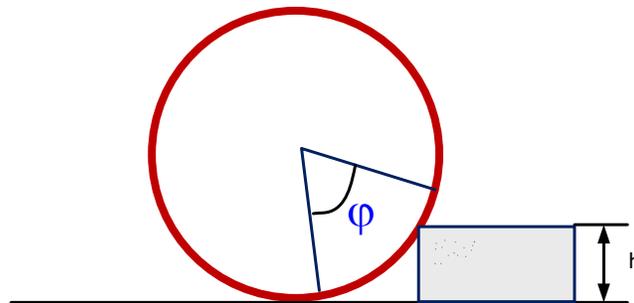


Figure 3.3 Franchissement d'obstacles [16].

Notons que ce couple estimé est surdimensionné ; en effet [18].

- Un obstacle n'est jamais attaqué à vitesse nulle.
- L'adhérence naturelle de la bande de roulement et/ou l'écrasement du pneumatique facilitent le franchissement.
- Le rayon de la roue doit être le plus grand possible, pour faciliter le franchissement des obstacles.

### 3.2.7. Accélération :

La résistance inertielle totale vaut :

$$R_i = M \cdot \gamma + \sum J \quad (3.17)$$

Au maximum, le deuxième terme est couramment estimé à 15% du premier. Le couple nécessaire à l'accélération du véhicule est donc, pour une roue [19]:

$$C_{acc} = 1.15 \frac{\gamma}{g} . M . g . \frac{r}{2} \quad (3.18)$$

Notons que ( $\gamma/g$ ) caractérise la performance du véhicule en accélération.

### 3.2.8. Résistance au glissement (adhérence) :

Pour qu'une roue tourne effectivement, il faut qu'elle adhère au sol. L'expérience montre que pour déplacer un corps sur une surface, il faut lui appliquer une force égale au produit de son poids par un coefficient de frottement de glissement.

$$R_g = \mu . M . g \quad (3.19)$$

Le coefficient  $\mu$  dépend également de la nature des surfaces en contact .

## 3.3. Efforts et couples résistant au déplacement :

L'effort total  $F_{tot}$  nécessaire au déplacement du véhicule est la somme de différentes composantes issues du bilan des forces mécaniques appliquées au véhicule [8] [9].

$$F_{tot} = F_{roul} + F_{aero} + F_{pente} + F_{acc} \quad (3.20)$$

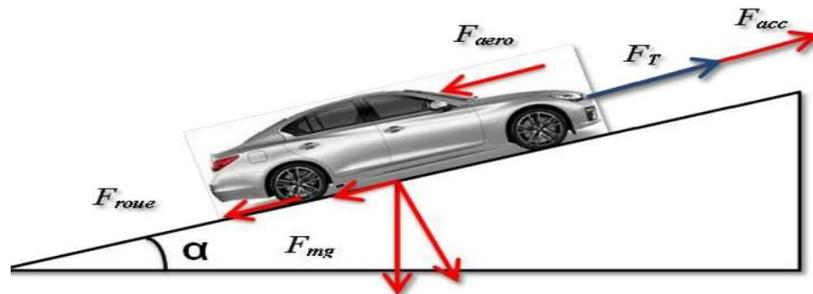


Figure 3.4 Forces appliquées sur un véhicule électrique en roulement [16].

- $F_{roul}$  est la force de résistance au roulement liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement, avec des pneumatiques modernes à très faible résistance au roulement, le coefficient de résistance au roulement ( $C_{rr}$ ) vaut environ 0.01 (environ 0.015 pour des pneus classiques). Ce coefficient dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier. Si les pneus avant sont différents (les pneus arrière, ou simplement si leurs pressions de gonflage sont différentes, l'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_{roul} = [C_{rr\_av} m_{av} + C_{rr\_ar} m_{ar}] g \approx g . M_v . C_{rr\_moy} \quad (3.21)$$

Ou  $m_{av}$  et  $m_{ar}$  sont respectivement les masses portées par les roues avant et arrière.

- $F_{aero}$  est la force de résistance aérodynamique, proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air qui prend des valeurs  $C_{px}$

$C_x$  [0.25-0.5] selon les formes de carrosserie. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S \cdot C_x \cdot (V \pm V_v)^2 \quad (3.22)$$

- $F_{pente}$  est la force de résistance due à la pente à gravir. Dans le cas où l'automobile devrait gravir une pente d'angle ( $\alpha_p$ ), il y a une force supplémentaire proportionnelle à la masse totale du véhicule qui s'oppose à son avancement. Cette force est donnée par :

$$F_{pente} = Mg \sin \alpha_p \quad (3.23)$$

- $F_{acc}$  représente le terme dynamique d'accélération ou de décélération du véhicule

$$F_{acc} = M \cdot \frac{dV}{dt} = M \cdot \gamma \quad (3.24)$$

Finalement, l'effort total de résistance au déplacement du véhicule vaut :

$$F_{tot} = g \cdot M_v \cdot C_{rr\_moy} + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S \cdot C_x \cdot (V \pm V_v)^2 + Mg \sin \alpha_p + M \cdot \gamma \quad (3.25)$$

Le couple résistant à la roue  $C_r$  est lié à l'effort résistant par la relation :

$$C_r = F_{tot} \cdot R_\omega \quad (3.26)$$

Avec  $R_\omega$  le rayon de la roue.

### 3.4. Conditions de déplacement du véhicule :

Pour faire avancer un véhicule il semble qu'il suffise de communiquer aux roues un effort susceptible de vaincre la résistance au roulement du véhicule. Ce n'est pas toujours le cas, car la roue peut tourner en s'accrochant sur le sol (adhérence) mais peut également glisser (perte d'adhérence).

Si on désigne par  $E_m$  la force appliquée aux roues, ou encore par  $C_m$  le couple de moteur, la condition de traction du véhicule est la suivante :

$$F_r Mg < F_m < \mu Mg \quad (3.27)$$

Ou encore

$$F_r P < \frac{C_m}{r} < \mu P \quad (3.28)$$

$r$  : étant le rayon de la roue.

Les trois autres cas suivants peuvent se présenter :

$F_m < F_r Mg < \mu Mg$  : Le couple est insuffisant, le véhicule reste immobile.

$F_r Mg < \mu Mg < F_m$  : Le couple est trop grand, la rotation des roues fait avancer le véhicule mais il y a patinage.

$\mu Mg < F_r Mg < F_m$  : L'adhérence est exceptionnellement plus faible que la résistance au roulement : les roues patinent et le véhicule reste sur place.

### 3.5. Différentiel électronique :

Le système considéré permet de développer un différentiel électronique de sorte que, sur une trajectoire droite les deux roues motrices roulent à la même vitesse. Dans une trajectoire courbée la différence entre les deux vitesses des roues assure la vitesse du véhicule. Étant donné que les deux roues arrière sont directement entraînées par deux moteurs indépendants [26] [27] [4]. la vitesse de la roue à la position extérieure de la courbe devra être supérieure à celle de la roue intérieure pendant le braquage, donné en figure (3.5)

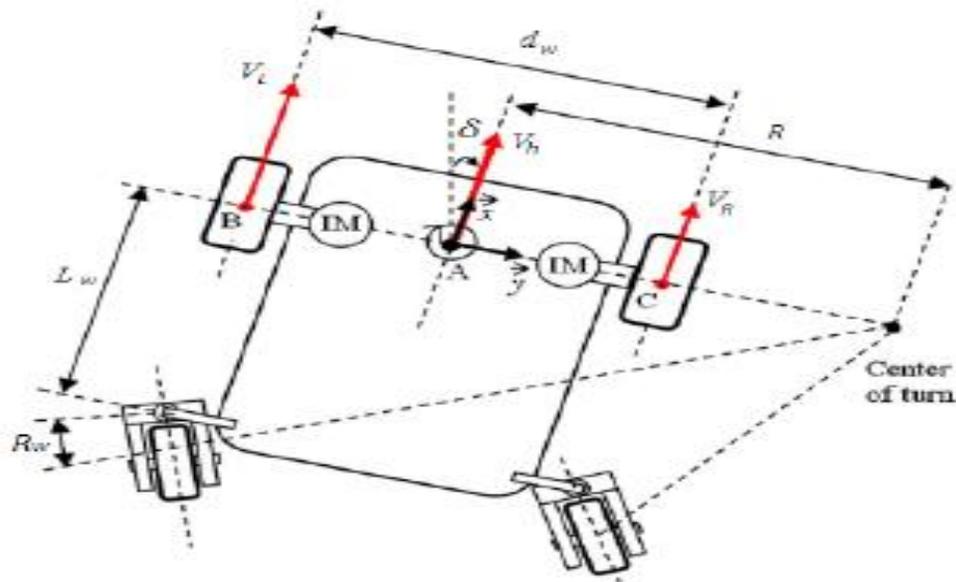


Figure 3.5 Modèle de conception de véhicule pendant le braquage [28].

$\delta > 0$  tourne à droite.  $\delta < 0$  tourne à gauche.  $\delta = 0$  trajectoire droit.

#### 3.5.1. Consignes de vitesse :

Il est possible de déterminer la vitesse de référence en rapport avec les exigences du conducteur, de sorte que lorsque le véhicule arrive au début d'un virage le conducteur applique un angle de braquage sur les roues [26]. Le différentiel électronique agit instantanément sur les deux moteurs, en réduisant la vitesse de la roue d'entraînement situé à l'intérieur du virage, ce qui augmente la vitesse de la roue d'entraînement situé à l'extérieur du virage [27] [10]. Les vitesses angulaires des roues motrices sont les suivantes [4] :

$$\begin{aligned}\omega_{r-R} &= \omega_v - \frac{d_w}{2L_w} \tan(\delta) \omega_v \\ \omega_{r-L} &= \omega_v + \frac{d_w}{2L_w} \tan(\delta) \omega_v\end{aligned}\tag{3.29}$$

$\omega_{r-R}$  et  $\omega_{r-L}$  sont les vitesses angulaires des roues motrices droite et gauche respectivement. La différence entre les vitesses angulaires des roues motrices est [4] :

$$\Delta\omega = \omega_{r-L} - \omega_{r-R} = \frac{d_w}{L_w} \tan(\delta) \omega_v \quad (3.30)$$

Les vitesses de référence des deux moteurs sont :

$$\begin{aligned} \omega_{mR}^* &= K_g \omega_{r-R} \\ \omega_{mL}^* &= K_g \omega_{r-L} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Avec :

$\omega_{mR}^*$  et  $\omega_{mL}^*$  : sont les vitesses de référence des deux moteurs droite et gauche respectivement.

$K_g$  : le rapport de réduction de vitesse des moteurs.

$V_h$  : la vitesse linéaire de véhicule.

La vitesse linéaire de chaque roue motrice est donnée par  $V_L$  et  $V_R$  comme suit [4] [10] :

$$\begin{aligned} V_L &= \omega_v \left( R + \frac{d_w}{2} \right) \\ V_R &= \omega_v \left( R - \frac{d_w}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$R$  : est le rayon de virage.

$R_w$  : le rayon de la roue.

### 3.6. Résultats de simulation :

Pour finaliser le montage de toute la chaîne de traction, nous avons procédé à l'assemblage de tous les éléments détaillés auparavant à savoir :

- La batterie.
- Le convertisseur bidirectionnel.
- Les moteurs BLDC.
- Le différentiel
- La partie commande.

On applique un échelon pour la vitesse de référence (800 tr/min) avec un couple de charge nul (à vide). A l'instant  $t=0.3$  s, la voiture passe par un virage de ( $\alpha : 10^\circ$ ) pendant une période de  $t=0.3$ s. A l'instant  $t=1.7$ s un changement de consigne de vitesse (de 800 vers 860 tr/min) toujours à vide ;

A l'instant  $t=2.5$  nous avons appliqué un couple résistant 20N.

Les figures montrent les réponses dynamiques de la vitesse, le courant, la tension, respectivement.

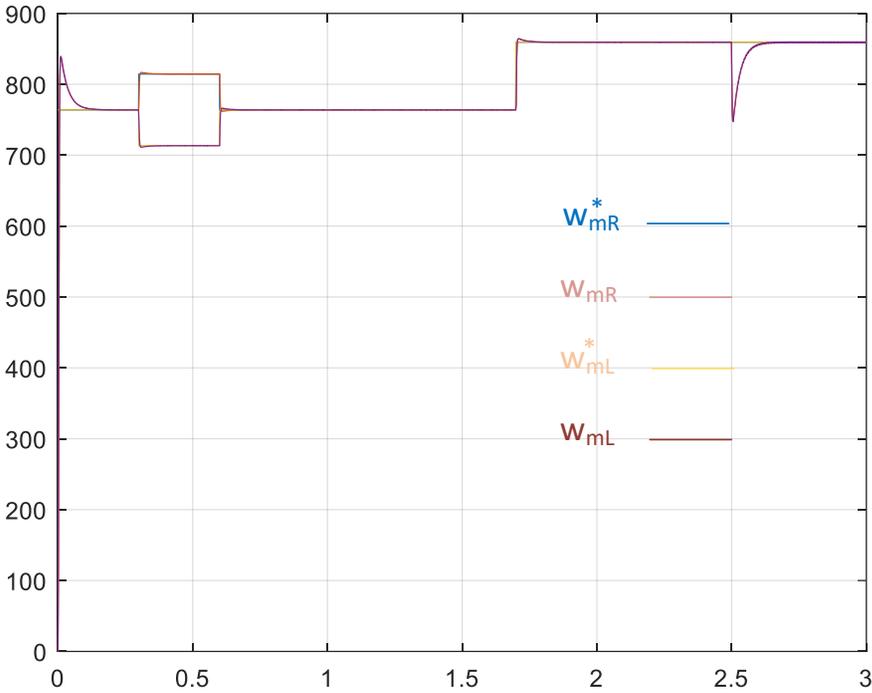


Figure 3.6 Vitesse des deux roues motrices

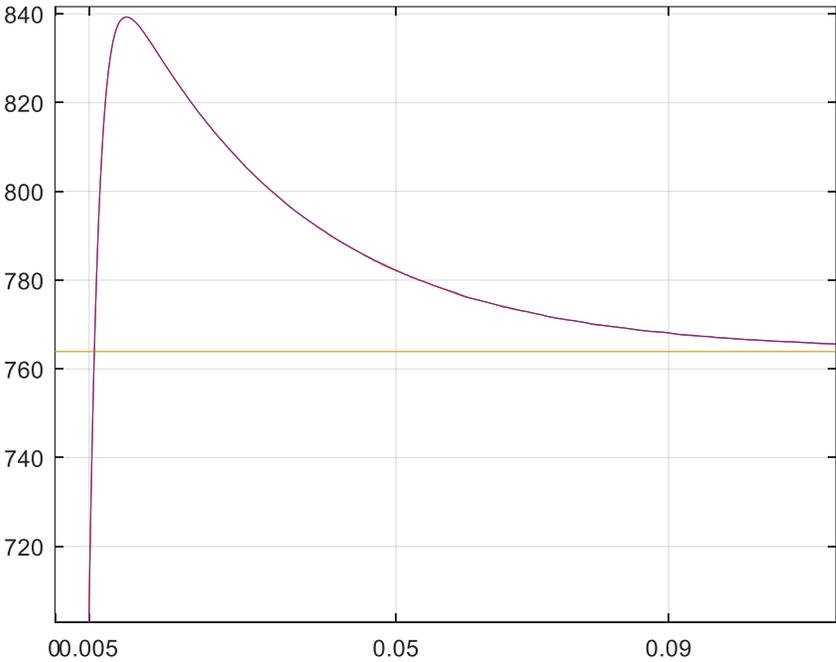


Figure 3.7 Vitesse des deux roues motrices – démarrage

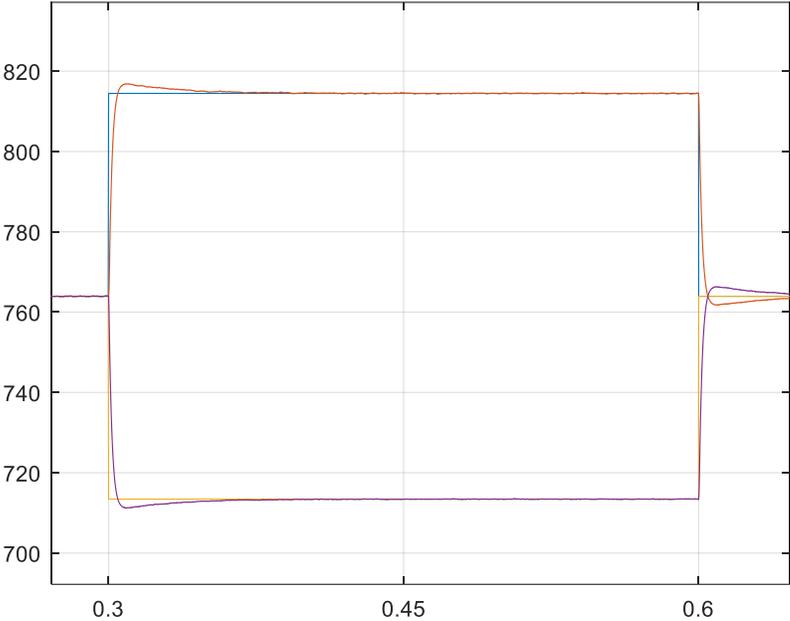


Figure 3.8 vitesse des deux roues motrices – virage

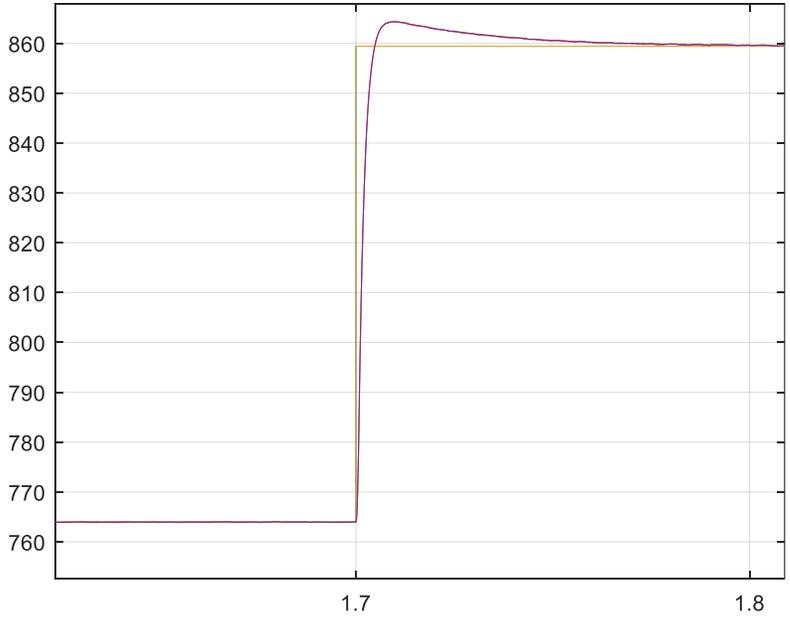


Figure 3.9 Vitesse des deux roues motrices – changement de vitesse.

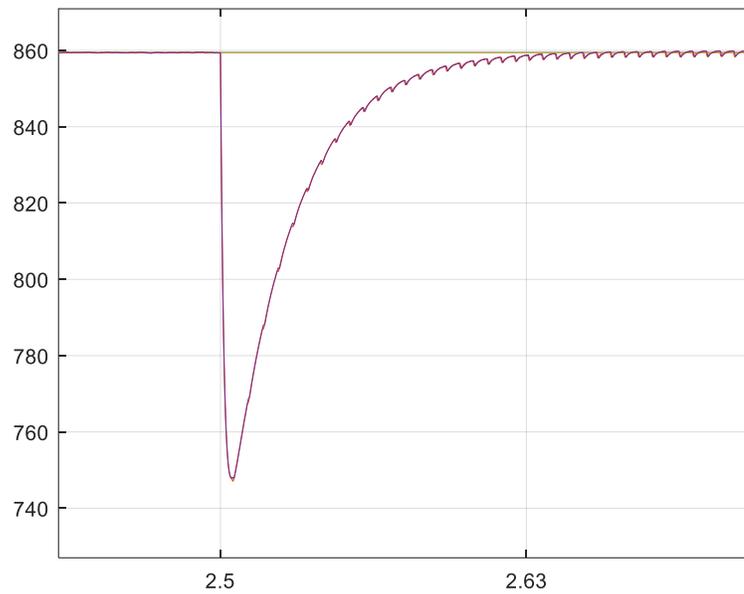


Figure 3.10 Vitesse des deux roues motrices- avec couple résistant

Les vitesses des roues (gauche et droite) mesurées suivent parfaitement les consignes ( $w_{ref}$ ) à vide. Lors du passage par le virage c'est même constat. En appliquant un couple de charge, la vitesse observe une baisse jusqu'à 800 tr/m puis elle rejoint la consigne de 860 tr/m après 0.05s.

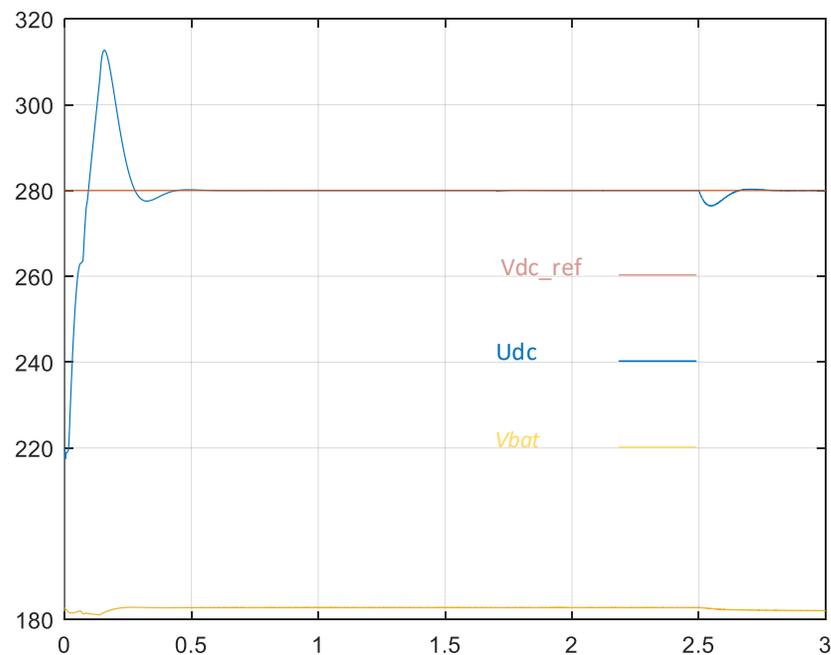


Figure 3.11 Les tensions  $U_{dc}$ -  $V_{dc\_ref}$  et  $V_{bat}$

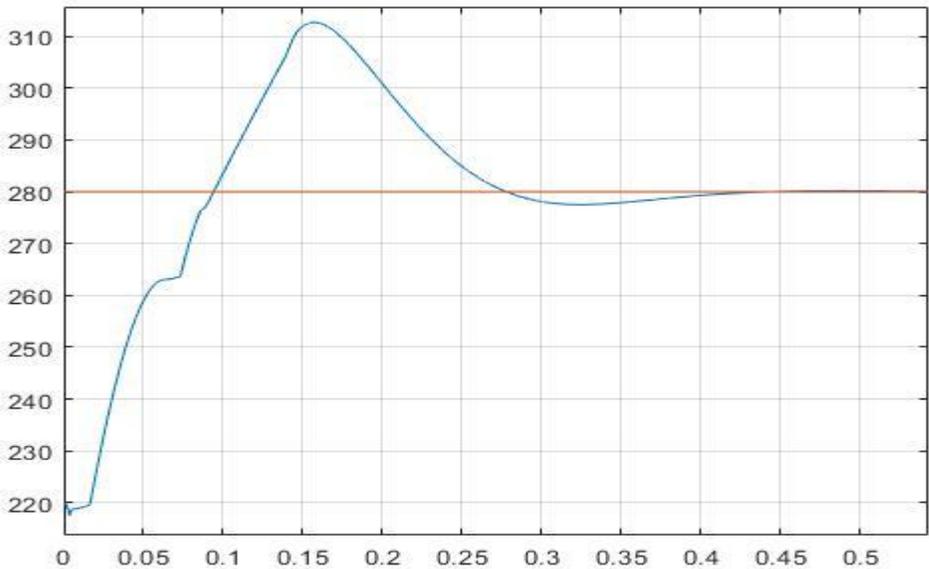


Figure 3.12 Les tensions  $U_{dc}$ -  $V_{dc\_ref}$  et  $V_{bat}$  – démarrage.

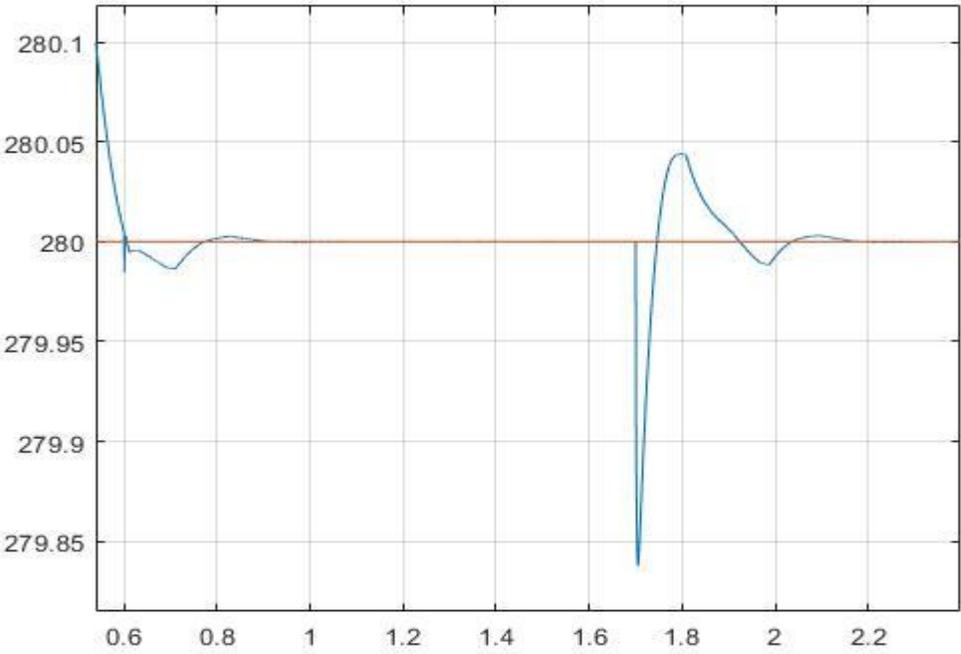


Figure 3.13 Les tensions  $U_{dc}$ -  $V_{dc\_ref}$  et  $V_{bat}$  – changement de vitesse

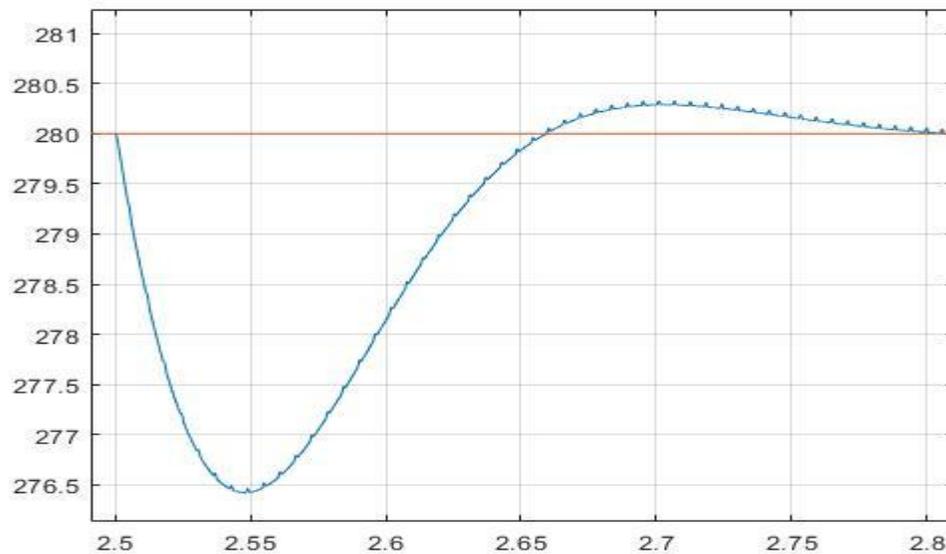


Figure 3.14 Les tensions  $U_{dc}$ -  $V_{dc\_ref}$  et  $V_{bat}$  – couple résistant

La tension de la batterie ( $V_{bat}$ ) reste sur la valeur de 182.8 V avec une légère baisse au moment où on a appliqué le couple résistant elle atteint 182.5V à la fin du parcours. La tension  $U_{dc}$  suit parfaitement la consigne  $V_{dc\_ref}$ .

Les figures montrent que le régulateur PI donne des résultats satisfaisants et ce, par rapport à la grandeur de perturbation et par rapport à la grandeur de consigne.

### 3.7. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la modélisation de la dynamique d'un VE à partir d'une étude dynamique en évoquant tous les efforts et résistances lors du déplacement d'un VE.

Nous avons examiné par la suite les conditions de déplacement d'un VE, en passant par la prise des virages et le rôle important du différentiel ainsi que la model de calcul des consignes de vitesse lors du braquage.

Une fois le modèle global est obtenu, nous avons simplifié le modèle de l'actionneur par utilisation de la commande par un régulateur PI, par la suite, nous avons dimensionné le réglage de vitesse du VE.

Les résultats de simulation ont montré des performances satisfaisantes (léger dépassement par rapport à la consigne).

---

# **Conclusion Générale**

---

## Conclusion générale

Notre travail est une étude sur l'entraînement d'une chaîne de traction électrique. Elle a été faite sur un véhicule électrique à deux roues motrices.

Cette configuration des différents composants du véhicule électrique confère au système un gain en mobilité grâce à un meilleur contrôle de la motricité, et permet également le contrôle de l'orientation.

Une loi de commande est alors recherchée afin de rentabiliser les éléments de la chaîne de traction tel que les convertisseurs bidirectionnels. Elle a permis d'analyser correctement le mouvement dans un environnement naturel.

La loi de contrôle autrement dit le couple de chaque roue motrice peut être contrôlé indépendamment, ce qui entraîne un contrôle efficace du véhicule notamment dans les virages rapides.

Le moteur BLDC présente plusieurs avantages par rapport aux autres moteurs pour le système de propulsion électrique, tels que réduction au niveau de volume, rendement élevé (dû à l'absence des pertes au niveau du rotor), la fiabilité élevée à cause de l'élimination de certains problèmes au niveau de l'excitation.

Pour les travaux futurs nous préconisons une réalisation pratique sur ce type de moteur sur la base de l'étude théorique que nous avons faite car ce moteur présente de nombreux avantages par rapport aux autres actionneurs avec d'autres techniques de régulateurs.

## Bibliographie

- [1] B.-H. K. ALIM, «Detailed Analysis of DC Choppers and An Example of PMDC Motor Speed Control,» *Eastern Anatolian Journal of Science*, vol. 4, n° %11, pp. 16-36, 21.05.2018.
- [2] H. K. -. H. I. O. -, «A Fuzzy Logic Speed and Current Controller For Brush Less DC Motors,» *Journal of Advances in Electronics Engineering.*, vol. 1, n° %1pp, p. 195–198, Aug. 2011.
- [3] K. H. D. Eddine, Analyse et commande des convertisseurs DC-DC ;, Oum El Bouaghi: Mémoire de fin d'études Université Larbi Ben M'Hidi, Juin 2019.
- [4] W. Khan et Wiwat Keyoonwong, High Performance BLDC Motor Control for, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2018.
- [5] G. Nouredine et Hammadi rachid, Étude comparative entre influence des différent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation, Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018/2019.
- [6] A. S. O. WEDDOU, Commande DTC d'un groupe motopropulseur synchrone pour une application de traction électrique, Saida: Mémoire de fin d'étude Centre Universitaire Dr. Moulay Tahar Saida, 2008.
- [7] M. B. ABDELLAH, Réalisation et commande d'un véhicule, Oran: Mémoire de fin d'étude Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [8] A. TAIBI, Commande DTFC d'un groupe motopropulseur sans capteur de vitesse dotée d'un observateur d'état à base de filtre de Kalman, Oran: Mémoire de fin d'étude Université des Sciences et Technologies Mohamed Boudiaf d'Oran, 2010.
- [9] C. Hicham, Abdelfatah Nasri et Korhan Kayisli, «A Novel Method of Electric Scooter Torque Estimation Using the Space Vector Modulation Control,» *Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10 , n° %12, pp. 355-364, 20 January 2021.
- [10] H. Chergui, A. Nasri et K. Korhan, «NON-LINEAR BACKSTEPPING SPEED CONTROL FOR ASIAN ELECTRIC SCOOTER USES,» *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 13, n° %11, pp. 400-423, 2021.

- [11] A. Idris, Contribution à l'amélioration des caractéristiques du fonctionnement d'un véhicule électrique, Sétif: Mémoire de fin d'étude University of Sétif, 2018.
- [12] S. Ali, Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP, OUM EL BOUAGHI: MEMOIRE DE FIN D'ETUDES UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, 05/06/2016.
- [13] Z. Fouad, Etude et implantation d'une commande non conventionnelle pour un système de pompage photovoltaïque., Sétif: THESE DOCTORAT EN SCIENCES UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1.
- [14] N. Khira et Alleg Anes, Etude et simulation de la commande trapézoïdale d'un moteur BLDC, Saïda: Mémoire de Fin d'Etudes Université Dr. Tahar Moulay, 2015-2016.
- [15] M. m. t. eddin et DOUGHA imad eddin, Commande par la logique floue type-2 d'un moteur BLDC, M'SILA: Mémoire de Fin d'Etudes UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019 /2020.
- [16] K. SALAH et SMAILI YUCEF, Contrôle commande d'un véhicule électrique à base d'un moteur synchrone a aimants permanents., Bouira: Mémoire de Fin d'Etudes Université Akli Mohand Oulhadj de, 2017 /2018.
- [17] A. A. amine, LE CONTROLE PID D'UN MOTEUR BRUSHLESS, ANNABA: Mémoire de Fin d'Etudes UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2019.
- [18] R. TRIGUI, Motorisation Asynchrone pour Véhicule Electrique, Nancy, Paris: Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1997.
- [19] U. Manual, DSP Based Electric Drives Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering University of Minnesota. .
- [20] H. BRIGHEN et S. HALAIMIA, Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale, TEBESSA: LARBI TEBSSI, TEBESSA, 2016.
- [21] B. .GASBAOUI, Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices, Béchar: Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.
- [22] H.CHENNOUFI, Contribution à l'Etude de la Commande d'un Véhicule Electrique à Deux Roues Motrices, Thèse Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Février2005.

- [23] A. Laguidi, Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique, Béchar: Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [24] Cours Sur les Hacheur, Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle. [47]..
- [25] S. Guy, Electronique de Puissance.
- [26] B. Gasbaoui, A Chaker , Laoufi A, Allaoua B et Nasri A, «The Efficiency of Direct Torque Control for Electric Vehicle Behavior Improvement,» *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, vol. pp, pp. 227-246, 2011.
- [27] Z. I, Nurazlin M.Y., Marizan S, Jurifa M. L, Ahmad Shukri A. H et Fizatul A.P, «Electric differential with SVPWM direct torque control using five-leg inverter for electric,» *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. pp, pp. 599-609, 2009.
- [28] Z. I, Nurazlin M.Y, Marizan S, Jurifa M.L, Ahmad Shukri A.H et Fizatul A.P, «Electric differential with SVPWM direct torque control using five-leg inverter for,» *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. pp, pp. 599-609, 2012.