



**Mémoire de Fin d'Etude
d' Ingénieur**
Spécialité : **ELECTROTECHNIQUE**
Filière : **Réseaux Electriques**

Présenté par
**BRAHIMI
SAMIR**

Thème
**Contribution à la commande d' un
système pile à combustible /super
condensateur .Application au véhicule
électrique.**

Mémoire soutenu publiquement le

devant le jury composé de :

Mr. MUSTAPHA BOUHERAOUA

Maître de Conférences classe A, UMMTO, Président

Mr. NABIL BENYAHIA

Maître de Conférences classe B, UMMTO, Rapporteur

Mr. HAKIM DENOUN

Maître de Conférence classe A, UMMTO, Examineur

Mr. MUSTAPHA ZAOUIA

Maître de Conférences classe A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur Benyahia Nabil, Maître de conférence classe B, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour avoir dirigé ce travail, et pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Mes remerciements distingué vont à Monsieur Bouheraoua Mustapha, Maître de conférences classe A, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie vivement Monsieur Denoun Hakim, Maître de conférences classe A, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur Zaouia Mustapha, maître de conférence classe A, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour avoir accepté d'examiner ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre1 : Véhicule à pile à combustible état de l'art.....	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Véhicule hybride à pile à combustible.....	4
1.3 Architectures hybrides et les modes de fonctionnement.....	5
1.3.1 Les différentes architectures hybrides.....	5
1.3.2 Les modes de fonctionnement.....	8
1.4 Principaux types de véhicules hybrides.....	9
1.4.1 Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie	10
1.4.2 Le véhicule thermique assisté électriquement	10
1.4.3 Le véhicule électrique hybride proprement dit.....	10
1.5 Le véhicule à pile à combustible chez les différents constructeurs	12
1.6 Conclusion	13
Chapitre 2 : La pile à combustible	14
2.1 Introduction.....	15
2.2 La pile à combustible	15
2.2.1 Historique	15
2.3 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)	16
2.3.1 Principe de fonctionnement.....	16
2.4 Hydrogène	19
2.5 Construction de pile à combustible de type PEM	19
2.5.1 L'alimentation des piles en combustible	19
2.6 Système pile à combustible embarqué	20
2.7 Application des piles à combustible	22
2.7.1 Applications portables.....	22
2.7.2 Applications stationnaires	22
2.7.3 Applications embarquées.....	23
2.8 Conclusion	24
Chapitre 3: Les Super condensateurs.....	25
3.1 Introduction.....	26
3.2 Principe de fonctionnement.....	26
3.3 Applications courantes des supercondensateurs.....	28
3.4 Type de stockeur d'énergie	28
3.4.1 Stockeur d'énergie fixe.....	28

3.4.2 Stockeur d'énergie embarqué.....	30
3.5 Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs.....	30
3.6 Supercondensateurs : avantages, inconvénients.....	32
3.6.1 Les avantages	32
3.6.2 Les inconvénients	32
3.7 Modélisation comportementale des supercondensateurs.....	32
3.7.1 Modélisation des Supercondensateurs.....	33
3.7.2 Modèle d'une cellule sans branche lente.....	35
3.8 Conclusion	35
Chapitre 4 : Contrôle du système hybride	37
4.1 Introduction.....	38
4.2 Mode « buck » (commande hystérésis).....	38
4.2.1 Principe de fonctionnement	38
4.3 Commande par mode de glissement (SMC).....	39
4.3.1 Introduction.....	39
4.3.2 Principe.....	39
4.3.3 Description du système en régime glissant.....	41
4.4 Synthèse des lois de commande pour un hacheur élévateur	42
4.4.1 Modèle du convertisseur Boost.....	42
4.4.2 Commande par mode de glissement	42
4.5 Commande par PI.....	49
4.5.1 Modèle linéaire du hacheur	50
4.5.2 Synthèse des paramètres du correcteur	51
4.6 Résultats de simulation	54
4.7 Conclusion	56
Conclusion Générale.....	57
Bibliographie :	59

NOMENCLATURE

SMC	: commande par mode glissant
SC	: super condensateur
PI	: régulateur proportionnel intégrale
V_{SC}	: tension aux bornes du super condensateur
V_{bus}	: tension du bus continu
I_L	: le courant dans l'inductance du lissage
I_{ch}	: le courant dans la charge
V_{ref}	: la tension V_{bus} de référence
I_{ref}	: le courant de référence
K_1, K_2	: constantes
$S(x)$: surface de glissement
PEMFC	: pile à combustible à membrane électrolyte polymère

Résumé :

Les piles à combustible ressemblent de près aux batteries, sachant que les deux éléments produisent une tension continue à leurs bornes en utilisant un procédé électrochimique.

Deux électrodes séparées par un électrolyte forment une anode et une cathode, une paire appelée une cellule .Les groupes de cellules produisent une puissance et une tension utilisables. Contrairement aux batteries, les piles à combustible convertissent l'énergie de ce combustible riche en hydrogène directement en électricité .Elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées avec carburant .En outre, elles ont une grande constante de temps pour répondre à une augmentation ou une diminution de la puissance de sortie. Elles constituent un environnement propre, et une manière efficace pour produire de l'électricité .Elles ont besoin de certains types de circuits de conditionnement de puissance pour être utile.

L utilisation des supercondensateurs en tant que système de stockage de source hybrides, en utilisant des piles à combustible ou des batteries, est tout a fait approprié, permet un rasage de charge de pointe et compense les limites intrinsèques de la source principale.

Notre travail traite la conception des sources d'énergie hybride utilisant une pile à combustible comme source principale, une liaison à courant continu et des supercondensateurs comme des sources d'énergie transitoires pour la traction véhicule.

Mots clés :

Pile à combustible, supercondensateur, régulateur PI, contrôle par mode glissant , véhicule hybride ,hacheur boost , bus continu .

Introduction Générale

Dans les prochaines décennies, la stagnation probable de la production de pétrole entre 2020 et 2030, la concentration de la production du pétrole brut au Proche Orient et les conséquences du changement climatique obligeront les gouvernements à employer l'énergie de façon plus efficace et à recourir à de nouvelles sources d'énergie moins polluantes.

L'hydrogène se présente comme une solution portable. Sa capacité de stockage, de l'ordre de 30000 Wh/Kg, a conduit au développement de nouvelles technologies à base de piles à combustible. L'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines : stationnaires ou embarquées [1].

Les véhicules hybrides dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutenir le moteur à combustion interne sont une alternative prometteuse à court terme favorisant la limitation en consommation de combustible et constituant une étape intermédiaire vers un « tout électrique ».

Dans cette thématique, s'intègrent les véhicules hybrides à pile à combustible qui combinent d'une part une pile à combustible pour la production embarquée d'électricité et d'autre part un élément de stockage de l'énergie électrique (super capacités, batteries...). Ces véhicules possèdent les bénéfices des voitures électriques concernant notamment une zéro émission et une indépendance totale du pétrole d'une part et d'autre part l'avantage d'un véhicule conventionnel à savoir une autonomie meilleure et une possibilité de ravitaillement rapide avec l'utilisation de l'hydrogène stocké dans des réservoirs sous pression ou produit à bord .

Si les véhicules hybrides sont mondialement commercialisés, les véhicules à pile à combustible restent au niveau prototypes bien que la plupart des grands constructeurs automobiles soient impliqués dans une phase de recherche et de développement dessus.

Une des situations idéales visées serait la production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique, son stockage et sa distribution dans des stations venant remplacer les stations à essence existants partout. [2]. Dans un futur proche, l'utilisation des systèmes hybrides électriques deviendra plus importante, ce phénomène s'expliquant par la réduction de la production de pétrole et la demande de réduction des émissions de gaz dangereux.

Le plus souvent, les sources électriques diverses comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustibles ou les éoliennes, les organes de stockage comme les batteries ou les super

Introduction Générale

condensateurs sont présents en nombre dans ce type de système [3].

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du contrôle d'une source hybride utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible et des supercondensateurs pour traction électrique «Véhicule hybride ». Il est équipé des éléments suivants :

- Une pile à combustible de type PEM, utilisé comme source principale.
- Un module de supercondensateurs, employé comme source d'appoint de puissance.

L'adaptation des niveaux de tension entre les sources et la charge dans le véhicule nécessite deux convertisseurs statiques, l'un de type Boost, l'autre Buck-boost, permettant de maintenir constante la tension du bus continu à une valeur constante et d'imposer la puissance ou le courant demandé par la charge.

Chapitre1 : Véhicule à pile à combustible état de l'art

1.1 Introduction

Au cours de ce premier chapitre, nous allons placer l'étude dans son contexte général tout en décrivant brièvement les différents éléments mis en jeu au cours de cette étude. Partant du principe même du développement durable, nous abordons le domaine du transport avec un bref état de l'art des véhicules hybrides conventionnels. Nous introduisons ensuite les véhicules à pile à combustible en tant que véhicules hybrides de configuration série dans lesquels une pile à combustible vient remplacer l'ensemble moteur thermique et générateur électrique. Le principe de fonctionnement de la pile est décrit ici, partant du cœur de pile, en passant par le système pile et ses auxiliaires, jusqu'au système hybride combinant le système pile et un élément de stockage. La problématique traitée dans cette étude, qui n'est autre que la gestion optimale de l'énergie électrique du système, est ensuite introduite [2].

1.2 Véhicule hybride à pile à combustible

Une automobile hybride est un véhicule faisant appel à plusieurs sources d'énergie distinctes pour se mouvoir. Le concept d'un véhicule hybride électrique remonte aux débuts de l'histoire de l'automobile sauf que le but principal n'était pas de réduire la consommation de combustible mais plutôt d'aider le moteur à combustion interne, à cette époque à faible performance, à assurer un niveau acceptable de compétences. A ce propos, si les premiers véhicules hybrides étaient montrés au salon de Paris en 1899, ce n'est qu'à la fin du 20^{ème} siècle, précisément en 1997, que la commercialisation des premières voitures hybrides a commencé avec la Toyota Prius et la Honda Insight. [2]

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont : [8]

Assister en puissance la pile à combustible :

La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).

Récupérer l'énergie cinétique lors de freinages : la récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.

Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances : l'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride (Fig. 1.1), plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents.

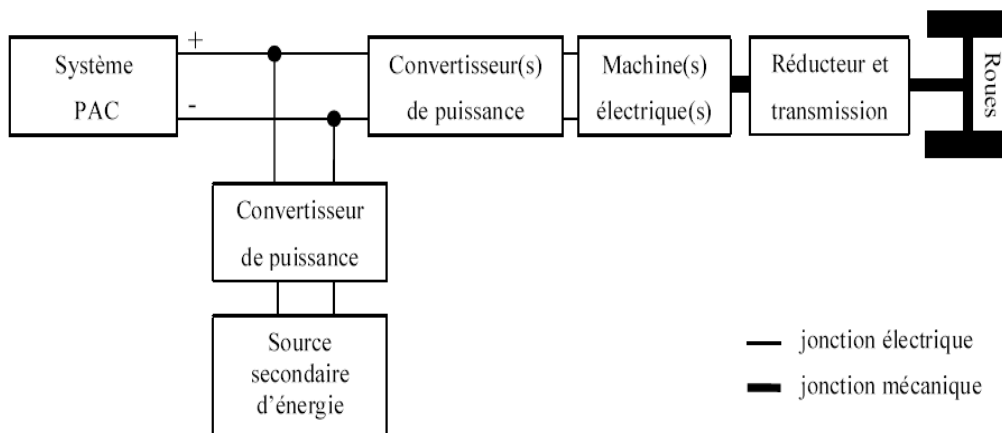


Fig. 1.1: Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride. [4]

1.3 Architectures hybrides et les modes de fonctionnement

1.3.1 Les différentes architectures hybrides

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique.

1.3.1.1 Hybride série

Ce type de véhicule est équipé d'une propulsion électrique (voir la Fig. 1.1) qui est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. Une source auxiliaire d'énergie permet d'effectuer les opérations de démarrages du véhicule. La source principale d'énergie assure la recharge de la source auxiliaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Quand on a besoin d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source auxiliaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Le moteur thermique peut être un moteur Diesel ou à essence mais d'autres solutions sont envisagées, comme les batteries, la turbine et la pile à combustible.

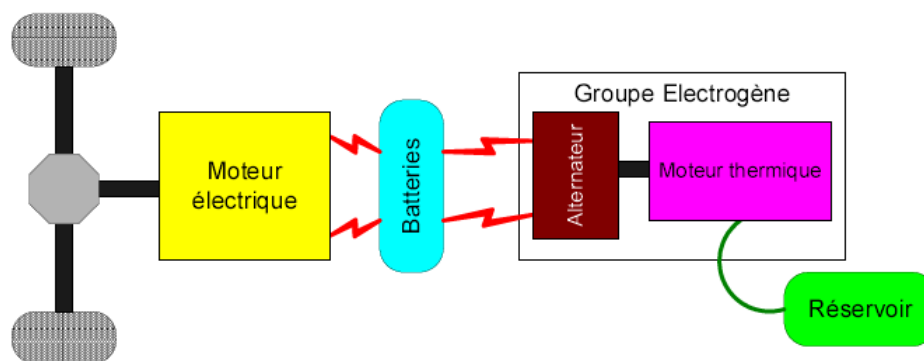


Fig. 1.2 : Véhicule hybride série. [5]

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l'art

Parmi les avantages du véhicule hybride série nous citons :

- La source principale d'énergie peut être un moteur thermique (connecté à une génératrice), des batteries, une pile à combustible....
- La liaison mécanique entre l'arbre moteur et l'axe des roues motrices est assurée via une simple boîte de vitesse.
- La possibilité d'utilisation de stratégies de contrôle simples.
- La possibilité d'utiliser deux moteurs ou même quatre, au lieu d'un, sans complexité au niveau de la transmission de la puissance aux roues.

Et parmi les inconvénients du véhicule hybride série nous citons :

- Des frais supplémentaires concernant le prix et le poids de la génératrice couplée au moteur thermique.
- Les pertes énergétiques dues à la conversion de l'énergie mécanique du moteur thermique à l'énergie électrique via la génératrice électrique.
- Le moteur de traction doit être dimensionné pour répondre à la forte demande de puissance, car il est seule source d'énergie reliée aux roues.

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite.

1.3.1.2 Architecture parallèle :

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, via une boîte à vitesse permet la transmission de la puissance aux roues Fig. I.3, on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre [5].

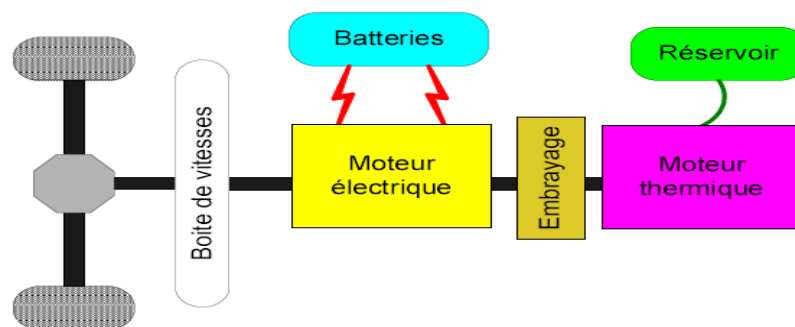


Fig. 1.3 :L'architecture hybride parallèle simple arbre[5].

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternateur-démarrateur et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l'art

par le moteur thermique et l'alternateur-démarrateur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative. Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, Fig. I.4. On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints. Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

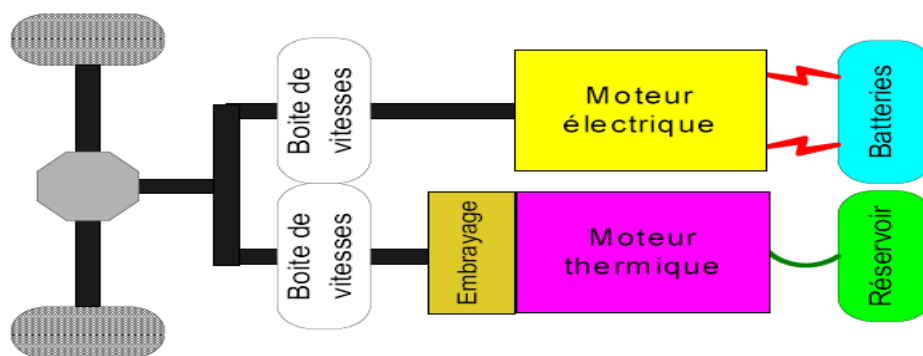


Fig. 1.4 : l'architecture double arbre[5].

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, Fig. I.4. Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable.

Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, Fig. I.5.

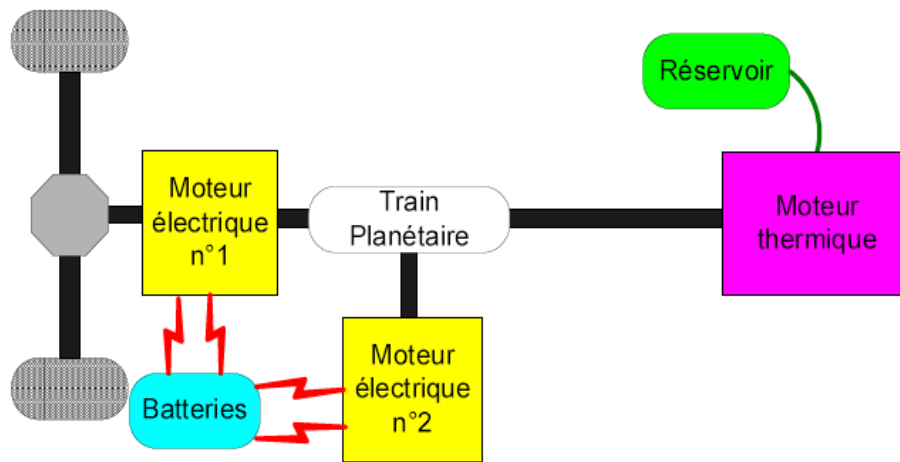


Fig. 1.5: L'architecture hybride combinée[5].

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, Fig. 1.5, alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur).

Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.) [5].

1.3.2 Les modes de fonctionnement [6]

1.3.2.1 Stop-and-Start : Nommé aussi Stop-and-Go ou Stop-Start selon les constructeurs, ce système permet au moteur thermique d'être démarré rapidement, et sans vibration, après un arrêt de courte durée. Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors d'arrêt aux feux rouges, ou bien dans des embouteillages. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, une faible quantité d'énergie électrique est utilisée à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti.

1.3.2.2 Mode régénération : Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur). L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, afin d'être réutilisée ultérieurement.

1.3.2.3 Mode freinage récupératif : Il s'agit du fonctionnement d'un moteur électrique utilisé pour fournir un couple résistant, dans le but de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée.

1.3.2.4 Mode boost : Le mode boost correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l'art

mode peut être actionné pour décharger le moteur thermique à condition de placer celui-ci sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité. Il peut aussi être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne.

1.3.2.5 Mode alternateur : Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes de la supercapacité), le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension. Ce mode n'est pas optimal d'un point de vue énergétique, puisqu'il est utilisé, sur les véhicules traditionnels, quel que soit le point de fonctionnement du moteur thermique, même lorsque celui-ci est au ralenti.

1.3.2.6 Mode thermique pur : Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

1.3.2.7 Mode électrique pur : Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants ("zéro émission"), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

I.4 Principaux types de véhicules hybrides [7]

Comme le montre la Fig. I.6, trois types de véhicules électriques hybrides sont communément identifiés suivant le poids relatif des deux sources d'énergie : le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, le véhicule thermique assisté électriquement et le véhicule hybride proprement dit.

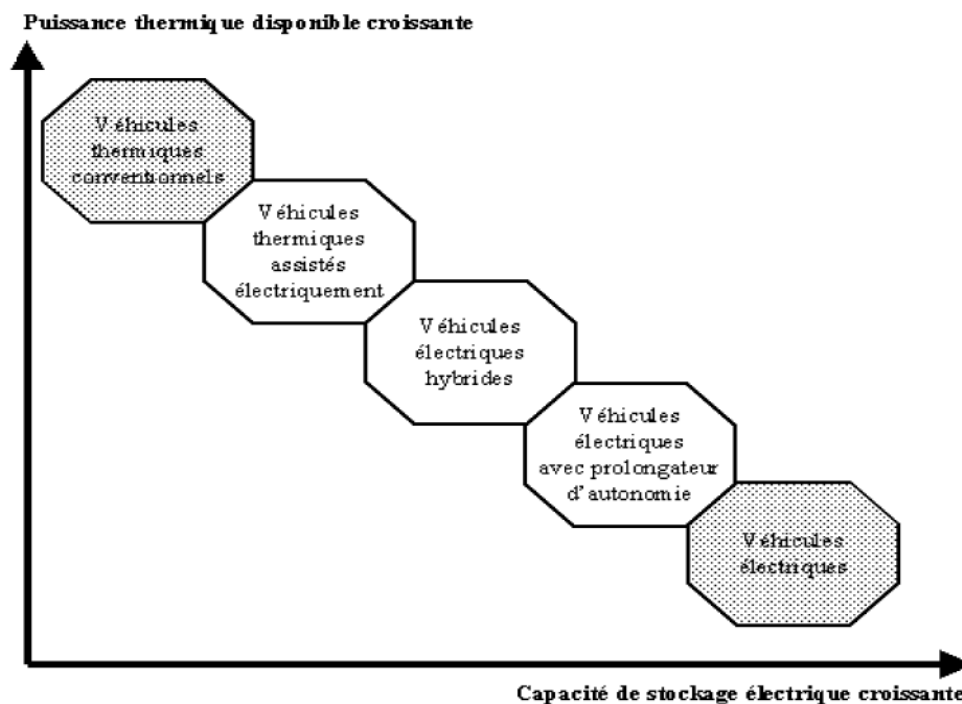


Fig. I.6 : Spectre des différents types d'hybrides[7].

1.4.1 Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie :

Le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie, est un hybride de type série, avec une utilisation très proche du véhicule électrique. Il s'en distingue par une capacité à rouler hors des plages d'autonomie de la batterie. Pour cela, il est équipé avec une batterie de grande taille et un petit moteur thermique. Suivant l'option choisie, le moteur thermique peut fournir la puissance permettant au véhicule de continuer à fonctionner lorsque la batterie est déchargée, mais avec un niveau de puissance maximale réduit : le véhicule est alors majoritairement utilisé comme un véhicule électrique. Une autre solution consiste à fournir la puissance moyenne nécessaire au fonctionnement du véhicule par le moteur thermique et le complément par rapport à la puissance demandée par la batterie. Le fonctionnement du véhicule dans ce cas est majoritairement effectué en mode hybride [7].

1.4.2 Le véhicule thermique assisté électriquement :

Situé à l'autre bout du spectre des hybrides et très proche du véhicule conventionnel, le véhicule thermique assisté électriquement ou power assist utilise un système de propulsion électrique en plus du moteur thermique pour diminuer les émissions et la consommation de carburant ; c'est un hybride de type parallèle. Le moteur thermique doit dans ce cas être capable de fournir la puissance moyenne nécessaire au véhicule pour fonctionner dans toutes les conditions de circulation [7].








1.4.3 Le véhicule électrique hybride proprement dit :

Le véhicule électrique hybride désignera par la suite un véhicule possédant deux sources d'énergie d'égale importance. Cet hybride a donc la capacité de rouler uniquement en électrique

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l' art

grâce à une batterie permettant de parcourir une distance en tout électrique significative et possède un moteur thermique suffisamment important pour fournir la puissance nécessaire à toutes les conditions de circulation. C'est l'hybride le plus flexible puisqu'il peut opérer comme un véhicule électrique (avec éventuellement une recharge de la batterie la nuit) et peut aussi être utilisé pour de longs trajets sans la limitation d'autonomie de la batterie. Après cette description des véhicules hybrides suivant trois critères, architecture, modes de fonctionnement et dimensionnement, regardons les catégories de véhicule hybride étudiées à la Direction de la Recherche de Renault [7].

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l'art

Constructeur	Véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda /Honda/	FCX 	86 kW (Honda)	Super-condensateurs	Réservoir haute pression (156,6 l, 350 bar)	430 km	80 kW
Toyota /Toyota/	Highlander FCHV* 	90 kW (Toyota)	Batteries Ni-MH	Version 3: Hydrure métallique Version 4: Réservoir haute pression Version 5: Reformeur	300 km 250 km -	80 kW
Nissan /Nissan/	X-Trail FCHV* 	90 kW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kW
General Motors /GM/	Zafira Hydrogen3 	94 kW	sans	Version liquide: Réservoir d'hydrogène liquide (68 l) Version gaz: Réservoir haute pression (77,4 l, 700 bar)	400 km 270 km	60 kW
Daimler-Chrysler /AFH2/	Class A F-Cell 	85 kW (Ballard)	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (350 bar)	150 km	65 kW
PSA /PSA/	Partner Taxi-PAC 	5,5 kW	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (300 bar)	250 km	22 kW
Michelin-PSI /Michelin/ /Büchi et al. 2007/	Hy-Light 	30 kW (PSI)	Super-condensateurs	Réservoir d'hydrogène haute pression (200 bar) + Réservoir d'oxygène haute pression (350 bar)	500 km	2 moteurs-roues de 30 kW à l'avant.

* : Fuel Cell Hybrid Vehicle

Tab.1.2 : Exemples de véhicules à pile à combustible[7].

1.5 Le véhicule à pile à combustible chez les différents constructeurs [8]

Le choix généralisé de l'alimentation directe en hydrogène l'une des premières questions qui se pose pour les véhicules à pile à combustible est de savoir comment stocker l'hydrogène à bord.

Chapitre 1 : véhicule à pile à combustible état de l'art

Si la molécule de H₂ est très énergétique (120 MJ/kg contre 43 MJ/kg pour l'essence), l'hydrogène est aussi le plus léger des éléments chimiques et occupe beaucoup plus de place qu'un autre gaz à poids égal. Par conséquent, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimé à plusieurs centaines de bars. La grande majorité des constructeurs engagés dans des recherches sur le véhicule à pile à combustible a néanmoins choisi de stocker l'hydrogène à bord du véhicule, sous forme liquide ou gazeuse, dans un réservoir adapté : c'est la voie dite de "l'hydrogène direct". Voici un rapide tour d'horizon des véhicules équipés de piles à combustible PEMFC proposés par ces constructeurs. Fer de lance de ce secteur aux États-Unis, l'armée américaine dispose du premier véhicule militaire à pile à combustible qui ne soit pas réservé à quelques usages très spécifiques, et qui pourrait être utilisé à très grande échelle puisque l'armée achète plusieurs dizaines de milliers de véhicules chaque année. Il s'agit d'un pick-up Chevrolet Silverado, qui embarque deux piles à combustible de 94 kW chacune, pour 250 ch, 3400 kg, et 200 km d'autonomie.

1.6 Conclusion :

Un véhicule hybride cumule deux sources d'énergie pour avancer, l'électricité et l'essence. Lorsqu'il démarre, c'est le moteur électrique qui se met en marche, il est alimenté par des batteries ou des supercondensateurs. Lors de fortes accélérations, ou au-delà d'une certaine vitesse, un autre moteur, à combustion thermique alimenté par de l'essence prend progressivement le relais, jusqu'à le surmonter complètement.

Dans ce premier chapitre nous avons rappelé la définition d'un véhicule hybride ainsi que quelques éléments de base des véhicules hybrides. Différents composants du véhicule hybride ont été présentés ainsi que les trois grandes familles d'architectures que l'on peut rencontrer : série, parallèle et combinée. Le travail a été finalisé par l'énumération des véhicules hybrides utilisés par les différents constructeurs.

Chapitre 2 : La pile à combustible

2.1 Introduction

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles attendues vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Dans cet intérêt, l'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines stationnaires, portables et mobiles. Dans cette dernière catégorie, la pile à combustible est généralement associée à un élément de stockage de l'énergie électrique pour alimenter un moteur électrique dans une structure dite 'hybride' [2].

2.2 La pile à combustible

2.2.1 Historique

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (Fig.2.1), rebaptisée plus tard pile à combustible /Fuel Cell Today/ /SAE/.

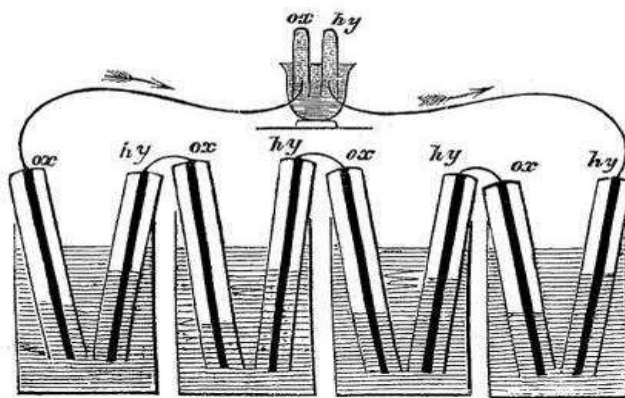


Fig. 2.1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/.

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux. La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 /Burke 2003/, et l'eau

Chapitre 2 : La pile à combustible

produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes. Il s'agit d'une des premières utilisations concrètes des piles à combustible. L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité. En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise

Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz /Prater 1992/. La pile à combustible était de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton »). L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires. Parmi les différents types de pile à combustible, la pile de type PEM (« Proton Exchange Membrane », également appelée PEFC (« Polymer Electrolyte Fuel Cell »), est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile.

Plusieurs raisons expliquent ce choix /Lachaize 2004/ /Emadi et al. 2005/ /Boettner et al. 2002/ :

Densité de puissance :

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

Température de fonctionnement :

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50 °C et 80 °C, ce qui est adapté à un usage automobile.

Structure solide :

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile [9].

2.3 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

2.3.1 Principe de fonctionnement [6,10]

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le

Chapitre 2 : La pile à combustible

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électriques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :



Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples » (Fig. 2.2) en ces points nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H^+ .
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons.
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.

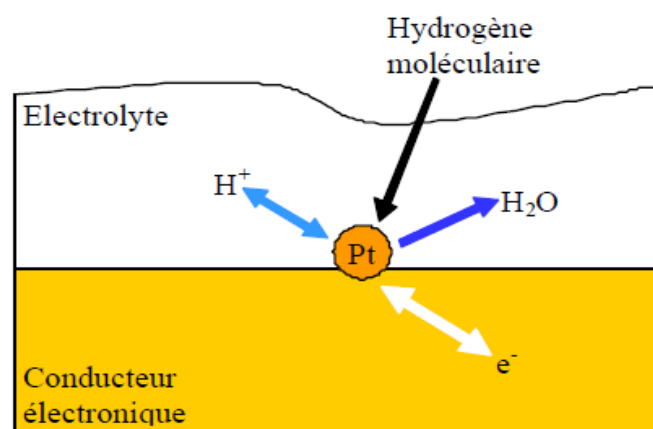


Fig.2.2 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique[10].

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

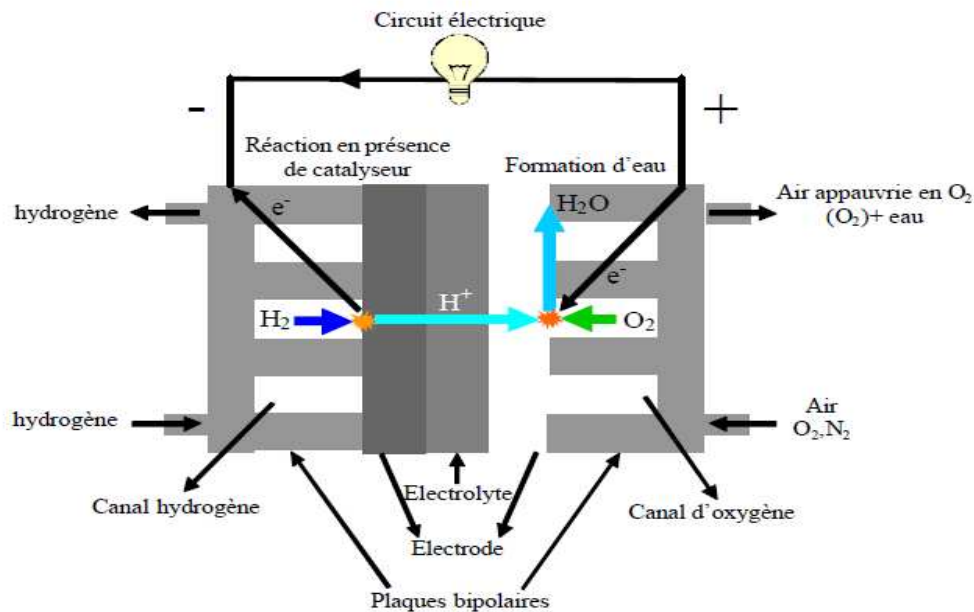


Fig. 2.3 : schéma de principe d'une pile a combustible PEMFC [11].

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes.

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants.

L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

La figure (Fig.2.4) présente les réactions à l'anode et à la cathode. Les PAC sont groupées en fonction du type d'ion qui assure le transfert de charge.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{\cdot-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{\cdot-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{\cdot-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{\cdot-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{\cdot-}$	600-1000 °C

Fig.2.4 : schéma du principe de fonctionnement d'une pile [14].

2.4 Hydrogène [15]

L'hydrogène (H_2) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H_2) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H_2O).

Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH_4), le charbon ou le pétrole. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui vient des carburants fossiles. Seulement sept pour cent viennent des sources d'énergie renouvelable. Dans une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire.

Il y a plusieurs manières de faire cela. Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique.

En raison de l'abondance de gaz naturel, de la disponibilité du méthanol et du propane, et du manque d'une infrastructure de production et de distribution de l'hydrogène, on prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire de l'hydrogène.

2.5 Construction de pile à combustible de type PEM

2.5.1 L'alimentation des piles en combustible

Les piles fonctionnent essentiellement par l'hydrogène comme combustible, ou dans certains cas avec un mélange hydrogène monoxyde de carbone. L'intégration d'une unité de reformage dans le système, permettrait l'utilisation d'autres combustibles, tels que le gaz naturel et des hydrocarbures légers. L'unité de reformage permet de produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un composé hydrocarboné (méthanol, éthanol, méthane, essence) et d'air et/ou d'eau. On distingue deux systèmes de production de l'hydrogène au sein d'une pile, soit le reformage interne pour les piles fonctionnant à haute température, MCFC et SOFC, soit le reformage externe pour les piles fonctionnant à des basses et moyennes températures, PEMFC et PAFC [14].

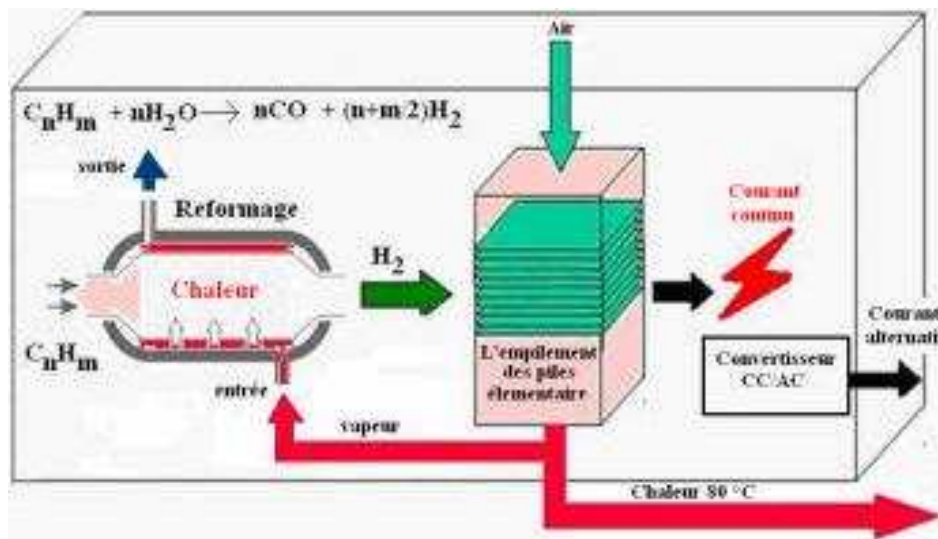


Fig.2.5: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène [14].

2.6 Système pile à combustible embarqué :

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué.

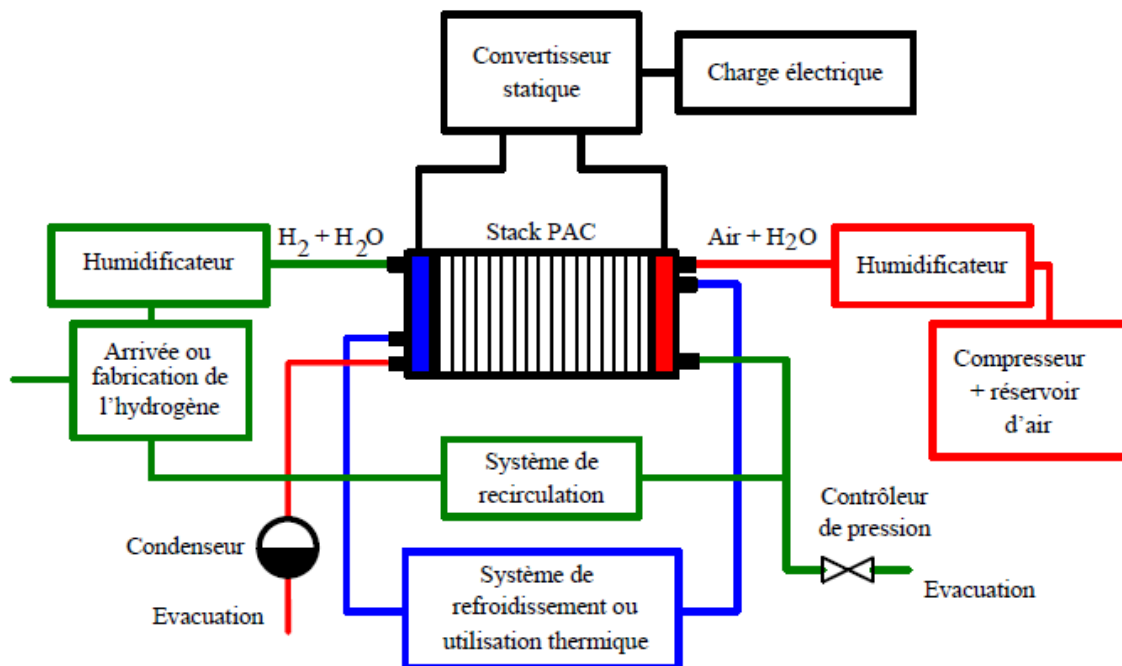


Fig.2.6 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PAC [16].

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique. Il est ainsi possible de décomposer le système PAC en plusieurs sous-systèmes assurant ces fonctions de base au sein d'un véhicule.

A. Le conditionnement entrée-sortie cathode

La PAC peut être alimentée soit directement en oxygène pur stocké sous pression dans un réservoir [Die05], soit en air. Dans ce cas, l'air est fourni au moyen d'un compresseur ou d'une soufflante. Le choix de la pression de fonctionnement a une influence sur le rendement de la conversion électrochimique, sur le procédé d'humidification des réactifs et sur la consommation en énergie du compresseur. Un fonctionnement à haute pression permet d'obtenir de plus fortes densités de puissance pour la pile ; il facilite aussi la gestion hydrique et thermique. L'utilisation d'une turbine de détente en sortie cathode peut éventuellement permettre de récupérer une partie de l'énergie de compression. Un fonctionnement à basse pression conduit au niveau de la pile à un rendement en tension moins bon et oblige à augmenter la capacité de l'ensemble humidification condensation. Par contre, à basse pression, la consommation du compresseur est réduite. L'air sort de la cathode généralement saturé d'humidité et en présence d'un flux d'eau liquide [9].

B. Le conditionnement entrée-sortie anode

Le combustible utilisé au sein de la pile PEM est l'hydrogène. Il peut être stocké dans un réservoir ou bien produit à partir d'un hydrocarbure, généralement du méthanol, au moyen d'un reformeur. Une alimentation en hydrogène pur permet l'optimisation de la quantité d'énergie embarquée : il est ainsi possible de faire réagir au moins 90 % de l'hydrogène embarqué, l'hydrogène non consommé correspondant à des purges. Le circuit hydrogène peut intégrer une boucle de recirculation (avec pompe). Des humidificateurs et condenseurs peuvent aussi être mis en œuvre.

C. Le refroidissement et l'humidification

Dans un générateur PAC, les sources de chaleur sont nombreuses : pertes thermiques de la réaction électrochimique, échauffement de l'air lors du travail de compression, échauffement des organes électriques tels que les moteurs de pompes et les convertisseurs, chaleur libérée par les réactions exothermiques liées au processus de reformage. A contrario, des apports de chaleur sont nécessaires à l'humidification des gaz, aux réactions endothermiques dans le cas du reformage (vapo-reformage). Dans une pile PEM, il n'est guère envisageable d'effectuer des échanges de chaleur entre les sources et les puits de chaleur : ainsi, la chaleur due à la réaction dans la pile, maintenue à une température souvent inférieure à 80 °C environ, ne permet-elle pas d'humidifier les réactifs. Le circuit de refroidissement d'un système PAC destiné à une application automobile est souvent complexe ; il peut être scindé en plusieurs circuits. La stratégie de refroidissement des stocks est beaucoup discutée et aucune solution universelle n'a encore été trouvée. Bien que la PAC soit un générateur à haut rendement, l'énergie thermique à évacuer n'est pas négligeable. La contribution des flux des gaz à

Chapitre 2 : La pile à combustible

l'évacuation de la chaleur étant très faible, un système de refroidissement doit dans la plupart des cas être intégré au stock. Le problème du refroidissement de la pile peut cependant être envisagé en fonction du niveau de puissance. Pour des piles dont la puissance maximale est environ 1 kW, un refroidissement par air (convection) peut être effectué. Pour des piles dont la puissance est supérieure à 1 kW, le refroidissement est généralement réalisé par un fluide. Nous avons vu qu'il était impératif de préserver la charge en eau dans la membrane de la pile. Il convient donc souvent d'humidifier les gaz avant leur entrée dans le stock.

D. La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique

L'énergie électrique issue du stock doit en général être conditionnée (adaptation de la tension à l'aide d'un convertisseur électronique élévateur) de manière à pouvoir être utilisée au niveau du groupe motopropulseur. De plus, la supervision du système PAC doit être assurée par des dispositifs de contrôle électroniques.

Tous les auxiliaires, s'ils sont indispensables au fonctionnement de la pile, n'en sont pas moins des consommateurs d'énergie parasitant directement la production de la pile. Ces organes peuvent représenter jusqu'à 60% en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20% [9].

2.7 Application des piles à combustible [9]

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées.

2.7.1 Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh [9].

2.7.2 Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à

Chapitre 2 : La pile à combustible

quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

2.7.3 Applications embarquées :

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [9].

2.7.3.1 Véhicules légers

Tous les constructeurs américains, japonais ou européens ont déjà sorti des prototypes et prévoient des préséries dont l'échéance a tendance à reculer d'une année tous les ans. Les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et acquérir de l'expérience. La technologie ne devrait devenir financièrement rentable qu'à partir de 2010 voire 2020. A l'horizon de 2030, ce sera le marché mondial qui sera visé avec une production annuelle qui pourrait atteindre 10 à 20 % du marché. La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC, même si quelques expériences utilisent l'AFC ou la PAFC. Le coût objectif de cette filière est d'environ 130 €/kW pour l'ensemble de la chaîne de traction dont un tiers pour la pile seule [9].

2.7.3.2 Véhicules lourds

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993. La compagnie canadienne Ballard Power Systems a fait office de pionnier avec 6 autobus (pile PEM), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago. La compagnie allemande Daimler-Chrysler, sur la base de la même technologie que Ballard a annoncé le lancement d'une présérie de 30 bus, en vue d'une mise en service dans plusieurs villes

Chapitre 2 : La pile à combustible

européennes. Compte tenu de la durée de vie attendue pour ce type de véhicule, les systèmes développés se rapprochent des systèmes stationnaires. A côté de ces applications routières, certains constructeurs pensent à un tramway propre et sans caténaire, utilisant une pile à combustible. Il faut enfin noter un intérêt croissant de constructeurs de navires pour la pile SOFC, au niveau du MW ou plus, essentiellement comme source d'appoint ou de secours.

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. On a abordés l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement et l'architecture de ses systèmes.

Un intérêt majeur est porté aux cellules des piles à combustible, ce qui fait que des travaux importants sont encore nécessaires au niveau de la cellule. En effet, tous les éléments d'une cellule élémentaire sont encore perfectibles. Que ce soit le catalyseur (amélioration de l'existant et recherche de nouveaux catalyseurs), la membrane (membrane fonctionnant à plus hautes températures) ou la structure elle-même de la cellule (forme géométrique, matériau des plaques bipolaires, modes de refroidissement).

Chapitre 3: Les Super condensateurs

3.1 Introduction [19]

La recherche s'est accentuée ces dernières années sur les moyens énergétiques pour remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la pile à combustible.... La complexité de l'intégration de ces alternatives réside dans leurs applications aux systèmes embarqués comme pour le cas des véhicules hybrides et véhicule pile à combustible. En effet, le problème est que ces sources d'énergie sont limitées en puissance. Les récents développements dans le domaine électrochimique ont donné naissance à un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique ; le supercondensateur qui s'avère une des solutions à ce type de problème. Il est placé entre les batteries et les condensateurs classiques aux niveaux puissance et énergie. Sa capacité peut atteindre des valeurs très élevées (jusqu'à 5000F[19]) avec une tension maximale de charge jusqu'à 2,7V. Pour sa forte puissance, il se montre aujourd'hui comme une bonne alternative permettant une amélioration de la puissance des systèmes. Par exemple, il peut être introduit en parallèle avec la pile à combustible et ainsi répondre aux demandes de fortes puissances en régime transitoire (accélération, récupération de l'énergie de freinage). Une bonne gestion de l'énergie disponible permet d'optimiser la consommation énergétique des systèmes et ainsi d'améliorer le rendement. Pour assurer le bon fonctionnement de ces éléments, une caractérisation des supercondensateurs en fonction des contraintes auxquels seront soumis est obligatoire. Ces contraintes sont : la température du milieu, la fréquence d'utilisation et la tension de charge.

3.2 Principe de fonctionnement

En 1853, le physicien Hermann Von Helmholtz observa, suite à l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un électrolyte, que le phénomène de décomposition de l'électrolyte faisait apparaître un seuil de tension en dessous duquel le comportement du système était principalement capacitif. Ce faisant Helmholtz découvrait le principe de base des supercondensateurs, à savoir les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide.

Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace, appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres, et dans laquelle règne un champ électrique, relativement intense, de l'ordre de $10 \text{ kV} \cdot \mu \text{ m}^{-1}$. Un supercondensateur peut donc être schématisé, comme figure 3.1, par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte.

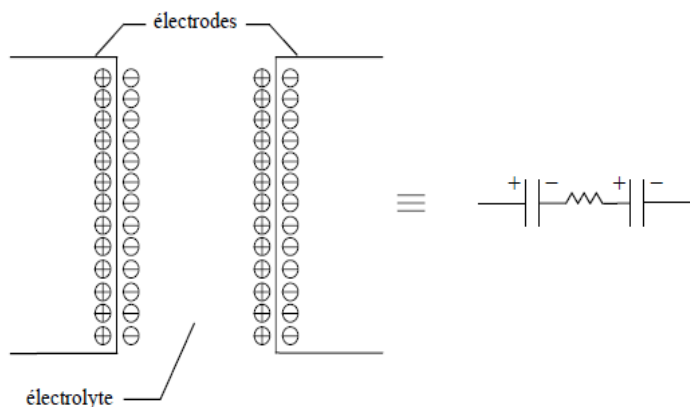


Fig.3.1 Principe de la couche double électrique

Les supercondensateurs sont donc, pour la plupart des dispositifs commercialisés (en l'occurrence ceux qui nous intéressent ici, c'est-à-dire ceux dits à couche double électrique), des capacités à part entière. Le stockage d'énergie est, de fait, d'origine électrostatique, et non pas électrochimique comme dans le cas des accumulateurs, ce qui leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques.

Leur différence fondamentale avec ces derniers réside dans l'absence apparente de couche diélectrique, la fonction diélectrique du dispositif étant assurée par les molécules du solvant. Il en résulte des capacités surfaciques élevées, comprises entre $10 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ et $30 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$, et en revanche une tenue en tension modeste, limitée par la décomposition du solvant, de l'ordre de 2.5 V nominal pour un solvant organique [20].

Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble.

On a recours pour ce faire à des matériaux d'électrodes poreux de très grande surface spécifique, comme le charbon actif qui présente des surfaces spécifiques supérieures à $1000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ (Fig. 3.2).

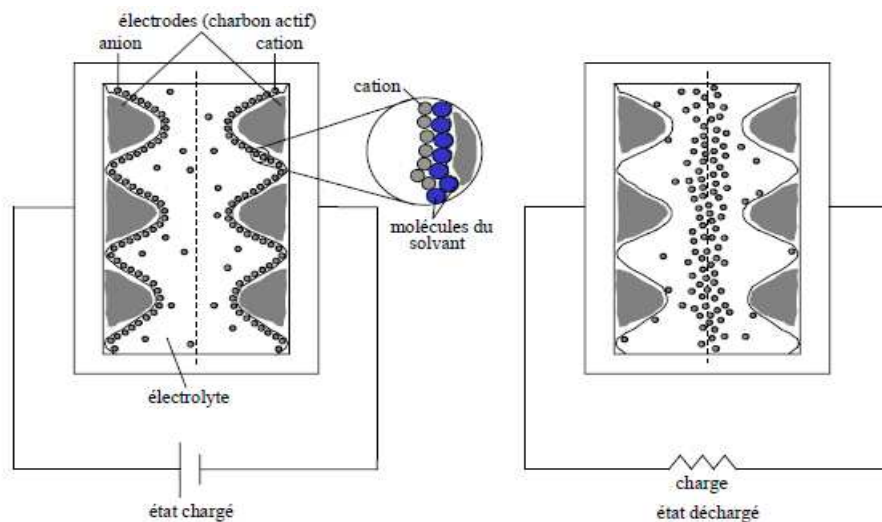


Fig. 3.2 : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique

Notons donc deux caractéristiques importantes des supercondensateurs, conséquences du principe de stockage d'énergie électrostatique par couche double électrique : leur réversibilité en tension, bien que ces dispositifs soient fournis avec un sens de polarisation, et leur faible tenue en tension, limitée à quelques volts (par cellule élémentaire), suivant la nature du solvant électrolytique. L'énergie spécifique des supercondensateurs, typiquement de 5 Wh.kg^{-1} , reste néanmoins nettement supérieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques, conséquence de valeurs de capacité extrêmement élevées. Toutefois, pour la plupart des applications d'électronique de puissance, cette limitation sévère en tenue en tension rend incontournables la mise en série et les différents problèmes associés (équilibrage, mise en parallèle, ...) [21].

3.3 Applications courantes des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont utilisés dans les applications du domaine du transport, pour la conception des véhicules électriques et hybrides, dans le but de diminuer l'émission de gaz à effet de serre et de la pollution acoustique, en améliorant l'efficacité énergétique et en minimisant le coût de transport grâce à la récupération d'énergie notamment.

Deux exemples d'applications couramment envisagées sont :

- De permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des supercondensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).
- La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt.

3.4 Type de stockeur d'énergie

3.4.1 Stockeur d'énergie fixe [22]

Les autorités de quelques villes européennes telles que Cologne, Dresde et Madrid, ainsi que de Portland Oregon, aux États-Unis, ont décidé d'introduire des systèmes de stockage à base de supercondensateurs pour récupérer l'énergie de freinage dans le domaine du transport

Chapitre 3 : Les supercondensateurs

ferroviaire urbain. Le système, développé par les ingénieurs de Siemens construit sous le nom de « SITRAS[®] SES » [19], équipe des sous-stations du réseau d'alimentation. Son introduction à Dresde et à Portland en 2002 a permis d'effectuer des économies de plus de 30 %. Le principal intérêt réside cependant dans la stabilisation du réseau d'alimentation électrique, car le stockeur fournit localement les pics de puissance réclamés lors de la phase de démarrage des trams.

Les supercondensateurs BCAP0010 de Maxwell, qui sont utilisés dans le système "SITRAS[®] SES", sont caractérisés par une capacité de 2600 Farads, une résistance interne de 0.4 mohm et une tension d'utilisation de 2.5 Volts. Le stockeur d'énergie de 64 Farads, composé de 1300 BCAP0010, est conçu pour une tension nominale de 750 Vdc. Avec la cabine, le convertisseur et l'électronique de contrôle, le système occupe un volume de 2.8 m x 2.9 m x 2.8 m et pèse 5.5 tonnes. Il fournit une puissance maximale de 1 mégawatt dans un rayon de 3 km. La batterie de supercondensateurs permet de réduire en moyenne la puissance consommée de 50 kW.



Fig. 3.3 : Pack de supercondensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage [19]

Dans le cas de transport souterrain l'avantage est encore plus marqué. Lors du freinage, l'énergie du véhicule ne peut pas toujours être réinjectée dans le réseau, comme en soirée lorsque le nombre d'utilisateurs est faible. Dans un réseau seul 60% de cette énergie en Moyenne peut être reprise par le réseau. L'énergie étant emmagasinée dans les supercondensateurs plutôt que dissipée sous forme de chaleur dans des résistances, l'élévation de température environnementale se trouve fortement réduite. Les opérateurs qui ont mis en place un système « SITRAS[®] SES » réalisent des économies de coûts de fourniture d'énergie pouvant se monter jusqu'à 150 000 euros par année. Parallèlement à cette économie financière, le système évite l'émission équivalente de plus de 300 tonnes de CO₂.

3.4.2 Stockeur d'énergie embarqué [22]

Lorsqu'il est question d'économie d'énergie de freinage de système de transport léger ou de réduction de l'intensité des pics de puissance dans un réseau, les ingénieurs se trouvent devant le choix, soit de placer le stockeur d'énergie à bord du véhicule, soit de le laisser fixe dans une sous-station du réseau.

Bombardier test son système économiseur d'énergie « MITRAC® » [23], sur un tram de la ville de Mannheim, depuis septembre 2003. Il est équipé d'un stockeur d'énergie capacitif se trouvant dans un conteneur de 1.9 m x 0.95 m x 4.5 m, pesant 450 kg, placé sur le toit du tram. Sa tension nominale est de 750 Vdc.

Sans compter les gains effectués sur les investissements qui eussent été nécessaires pour renforcer la puissance du réseau, l'économie annuelle d'énergie se monte à 30 000 €. A l'avantage économique s'ajoute encore l'amélioration de la situation environnementale, liée à la réduction d'émission de CO₂.



Fig.3.4 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie [23].

La résistance entre la sous-station et le véhicule augmente à mesure que la distance les séparant en fait de même. Pour un courant typique de 1000 A, la chute de potentiel, vue par le tram à l'endroit le plus éloigné de l'alimentation, est de l'ordre de 100 Vdc. En réduisant l'intensité du courant, cette chute de potentiel diminue proportionnellement. En plus du gain en stabilité de tension, le système profite de la réduction des pertes ohmiques dans la Caténaire. Les mesures ont démontré qu'avec un stockeur capacitif embarqué, les pointes de puissance échangées avec le véhicule sont réduites de 40%. Ce résultat se traduit par un choix conceptuel pour dimensionner l'infrastructure : soit les sous-stations peuvent être éloignées les unes des autres en gardant des performances et des coûts d'exploitation constants, soit ces derniers sont améliorés en maintenant les caractéristiques de l'infrastructure. Les calculs montrent que la distance entre les sous-stations pourrait être augmentée jusqu'à 70%.

3.5 Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs

Le supercondensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des

Chapitre 3 : Les supercondensateurs

batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans). Sur le diagramme de Ragone (Fig. 3.6), nous avons représenté les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique-énergie spécifique. Ce diagramme montre que les condensateurs électrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la mn. En ce qui concerne la pile à combustible c'est un convertisseur d'énergie et non pas un élément de stockage. Entre les batteries et les condensateurs électrochimiques se trouvent les supercondensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. Le tableau ci-dessous résume les performances des trois éléments de stockage présentés ci-dessus [12].

	Condensateur électrolytique	supercondensateurs	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	$1\text{heure} < t < 5\text{heures}$
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	$0.3\text{ heures} < t < 3\text{heures}$
Rendement (charge /décharge)	$>95\%$	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/Kg)	$>10^6$	10^4	$<10^3$
Densité d'énergie (Wh/Kg)	Entre 10 et 100	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^{10}	10^6	10^3

Tab.3.1 : comparaison entre les éléments de stockage[12].

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le supercondensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Son utilisation permet dans le domaine de l'automobile de diminuer la pollution liée aux gaz d'échappement. Des études réalisées dans ce domaine ont démontrées que l'utilisation des supercondensateurs dans le véhicule permet de réduire d'environ 15% sa consommation, et jusqu'à 20% celle des bus pour le transport collectif.

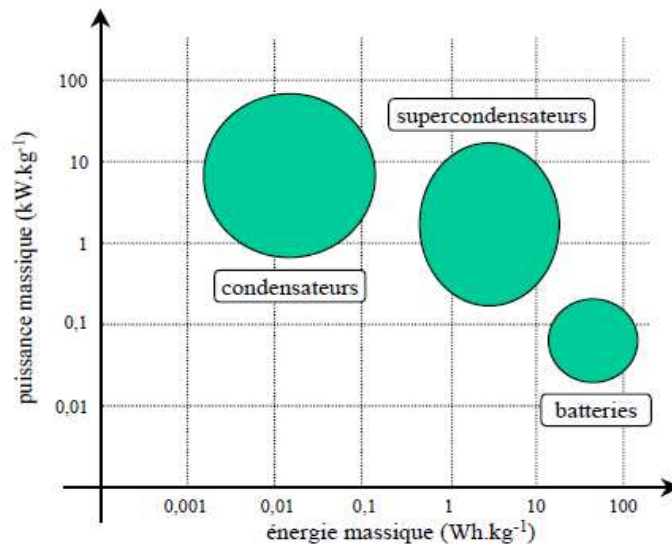


Fig.3.5: Schéma comparatif[12].

3.6 Supercondensateurs : avantages, inconvénients

3.6.1 Les avantages [24]

- Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques ;
- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques ;
- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides ;
- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement) ;
- ESR (résistance série) très basse ;
- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée) ;
- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel ;
- Charge très rapide.

3.6.2 Les inconvénients [24]

- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg) ;
- Plage de tension limitée ;
- Technologie moins mûre que celle des batteries ;
- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques ;
- Energie spécifique plus faible que celle des batteries ;
- Coût.

3.7 Modélisation comportementale des supercondensateurs [24]

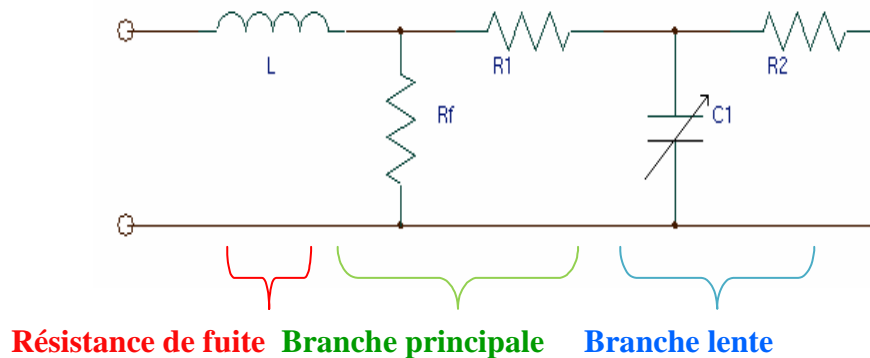
Le but de ce travail de modélisation consiste à définir tout d'abord le modèle comportemental d'une cellule puis celui du pack des super condensateurs formé de plusieurs cellules en série. Dans la littérature de nombreux modèles sont proposés [17], [18]. En d'autres

Chapitre 3 : Les supercondensateurs

termes, plus le modèle de la cellule élémentaire est complexe, plus le modèle du pack des super condensateurs devient difficile voir impossible à mettre en équation. C'est pour cette raison qu'on ne cherchera pas à établir un modèle sophistiqué qui tient compte de tous les phénomènes physique des super condensateurs. Notre approche consiste donc à étudier et à simplifier les modèles comportementaux existants sans que la précision et le comportement électrique du composant soient altérés.

3.7.1 Modélisation des Supercondensateurs

On peut modéliser assez simplement un supercondensateur par le modèle suivant :



La cellule représentée par la branche principale R1-C1 détermine l'évolution de l'énergie pendant les cycles de charge et décharge.

La branche R2-C2 est la branche lente qui intervient lors du phénomène de redistribution des charges internes du composant intervenant à la fin de la charge (ou décharge).

Une inductance L (de quelques nH) peut être ajoutée en série et représente la « limitation » en fréquence du composant mais elle peut être négligée dans la plus part des applications.

La capacité C1 varie en fonction de la tension présente à ses bornes : nous avons $C1 = C0 + Cv (V1)$.

La résistance R1 est la résistance série du composant ; en pratique est de l'ordre de 1mW pour des « gros » supercondensateurs.

La résistance Rf est la résistance de fuite du composant ; elle symbolise l'autodécharge du supercondensateur (de l'ordre de plusieurs kW).

La détermination des paramètres du modèle équivalent d'un supercondensateur se fait par une charge à courant constant du composant. On obtient la courbe suivante :

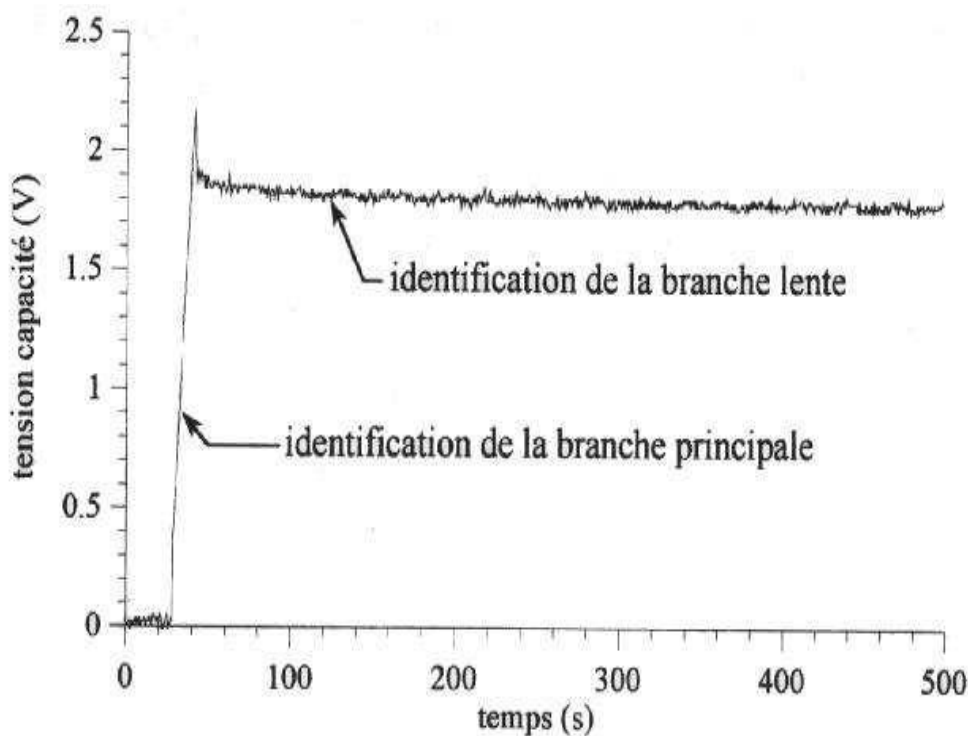


Fig.3.6 : Modèle des super condensateurs à deux branches RC [24].

C'est R. Bonert et L. Zubieta qui avaient présenté le premier véritable modèle des super condensateurs de puissance, Fig. 3.7 Ce modèle à deux branches RC

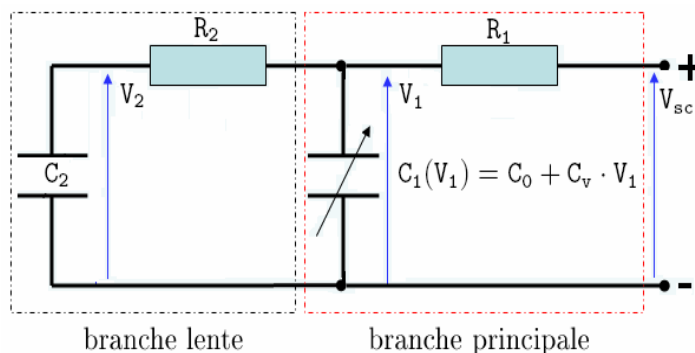


Fig. 3.7: Modèle de R. Bonert et L. Zubieta

Repose sur la partition de l'énergie électrostatique des supercondensateurs en deux :

- Énergie rapidement stockée
- Énergie lentement stockée.

Et comporte par conséquent deux cellules (Fig. 3.7) :

- la première, dite principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge, et correspond aux premières cellules RC d'un modèle à constantes réparties,
- la deuxième, dite lente, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie après lesdits événements, et correspond aux dernières cellules RC d'un modèle à constantes réparties.

Comme le montre la figure ci-dessus, et de façon à tenir compte, d'une part de la nature distribuée de la charge stockée, d'autre part de la non-linéarité physique des capacités développées par les interfaces électrode-électrolyte, la capacité de la branche principale est

choisie variable en fonction de la tension à ses bornes. Par ailleurs, et dans un souci de simplicité, la loi de variation adoptée est linéaire :

$$C_1(V_1) = C_0 + K_V V_1$$

La capacité C_2 de la branche lente devrait théoriquement répondre du même choix, mais nous verrons qu'une capacité constante, bien plus aisée à identifier, suffit amplement pour décrire le phénomène de redistribution interne de l'énergie. Au demeurant, il peut être fait appel à une troisième branche pour une précision accrue dans les temps très longs.

3.7.2 Modèle d'une cellule sans branche lente [14,19]

En négligeant la branche lente du modèle de R. Bonert et L. Zubieta, Fig.3.8, le modèle du super condensateur devient équivalent à la branche principale, Fig.3.8. Pour une cellule, la résistance R_1 correspond à la résistance interne (ESR) du composant et la capacité $C_1(V_1)$ renferme deux composantes. La première C_0 , est constante et la seconde $k_v \cdot V_1$, est variable en fonction de la tension aux bornes de la capacité.

Ce modèle, bien que simplifié, s'avère être suffisant dans notre étude de commandes du convertisseur, pour retranscrire de manière satisfaisante le comportement du système.

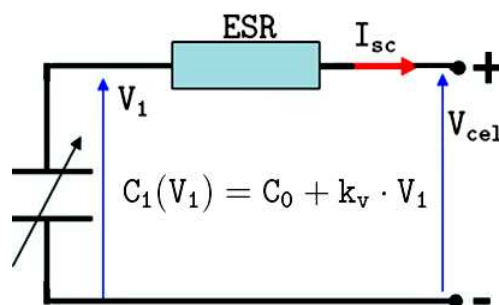


Fig.3.8: Modèle de la cellule sans branche lente.

3.8 Conclusion

Les supercondensateurs montrent des propriétés intéressantes pour les applications de grande puissance de courte durée, et possèdent des durées de vie élevées par rapport aux accumulateurs. Le domaine d'application des supercondensateurs est vaste (transport, industrie, électronique domotique, véhicule électrique...) Les supercondensateurs sont utilisés dans notre application, comme moyen fiable de stockage et d'échange d'énergie à forte puissance et courte durée, via un hacheur. Ils peuvent être représentés dans notre étude par une association en série (condensateur C_{sc} , résistance R_{sc}). Donc il a été question des principes de stockage d'énergie dans les supercondensateurs à couche double électrique, principes qui débouchent sur deux propriétés fondamentales de la capacité de stockage de ce type de dispositifs :

- non-linéarité, conséquence de la nature même de la couche double électrique,

Chapitre 3 : Les supercondensateurs

- distribution spatiale, conséquence de la structure poreuse des électrodes.

La modélisation du comportement des supercondensateurs doit tenir compte des propriétés suscitées, puisqu'ils sont des dispositifs de stockage, de leur comportement énergétique.

De ce point de vue, le modèle à deux branches élaboré par R. Bonert et L. Zubieta est intéressant, et nous conserverons d'ailleurs son principe de partition de l'énergie, principe qui pose clairement la problématique de la disponibilité de l'énergie stockée dans les supercondensateurs.

Chapitre 4 : Contrôle du système hybride

4.1 Introduction

Le but du présent chapitre est l'étude des stratégies de contrôle du convertisseur statique d'énergie associé à des supercondensateurs. Nous nous intéressons à la partie Boost (survolteur) du convertisseur étant donné qu'il est plus difficile à contrôler qu'un convertisseur Buck (abaisseur). En effet le convertisseur Boost est un système à non minimum de phase. Ces dernières années, la théorie du contrôle appliquée à la commande des systèmes électriques a considérablement amélioré les performances dynamiques de ces systèmes. Dans le domaine des convertisseurs statiques, les travaux de recherche visent à améliorer la stabilité, réduire la sensibilité aux perturbations et améliorer les performances dynamiques et statiques [25, 26,27].

4.2 Mode « buck » (commande hystérésis)

4.2.1 Principe de fonctionnement

La recharge du pack de SC se fait à courant moyen constant comme indiqué à la Figure 4.1. l'information du courant I_L , mesurée par le capteur I_L sera ensuite comparée par hystérésis à aux références min et max du courant de recharge. Le résultat 0-1 de cette comparaison sert directement de commande pour la grille du transistor « buck » T2. (La roue libre de la bobine se faisant via la diode D1 du transistor « boost » T1, toujours bloqué ici).

La gestion d'énergie surveillera la tension aux bornes du pack de SC de façon à ne jamais dépasser $V_{sc} = 21.6 \text{ V}$ (soit 2.7 V par élément), et que la recharge s'effectue quand sa tension est inférieure ou égale à 15 V .

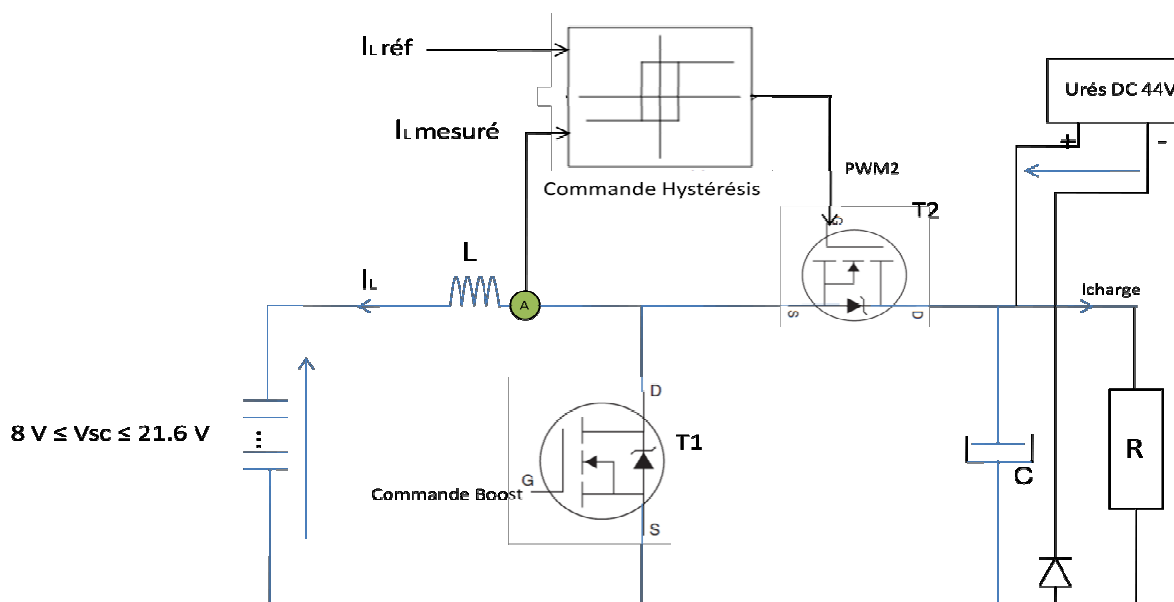


Figure 4.1 : commande par hystérésis pour la recharge des SC

4.3 Commande par mode de glissement (SMC)

4.3.1 Introduction

La commande par mode glissant (SMC pour Sliding Mode Control) est un contrôle de type non linéaire, qui a été introduit initialement pour le contrôle des systèmes à structure variable. Ses principaux avantages sont la garantie de la stabilité et de la robustesse pour de larges variations des paramètres du système, de l'entrée et des perturbations sur le système. De plus, étant donné sa flexibilité en ce qui concerne la synthèse, la commande par mode glissant est relativement facile à mettre en œuvre par rapport à d'autres types de commande non linéaires. Ces propriétés font que cette loi de commande est adaptée à de nombreuses applications industrielles, comme dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique [28].

Cette première partie est consacrée aux rappels théoriques sur la commande par mode glissant, ainsi qu'à un bref survol des travaux s'intéressant à l'application de ce type de commande dans le domaine des convertisseurs DC-DC, sujet de notre étude.

4.3.2 Principe

La commande par mode glissant est une commande robuste qui se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée [29]. Le contrôle généré par la commande par mode glissant est du type tout ou rien. Dans ce type de commande, l'état du système définit l'état de commutation de l'organe de contrôle. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement, qui délimite deux sous espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande (figure 4.1). La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision.

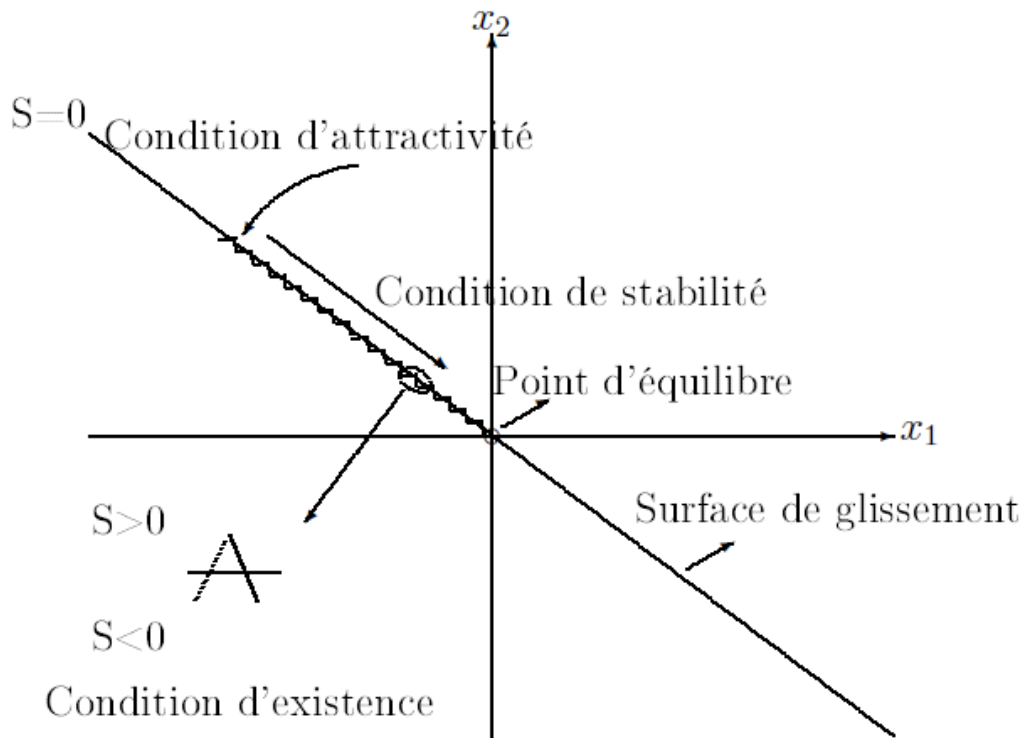


Figure 4.2 : mode glissant.

Ce principe de commande repose donc essentiellement sur l'utilisation d'une commande discontinue ayant pour but de maintenir l'évolution du système sur une surface de commutation (surface de glissement) judicieusement choisie. La synthèse doit donc viser à rendre la surface de glissement attractive (condition d'attractivité) depuis tout point de l'espace d'état. Une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface (condition de glissement) et la stabilité du système (condition de stabilité). En d'autre terme, il faut trouver la condition pour laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers le point d'équilibre désiré (figure 4.1). Sur la surface, la dynamique du système est indépendante de celle du processus initial, ce qui implique que ce type de contrôle entre dans le domaine des commandes robustes. Ces notions de stabilité sont démontrées en tenant compte du principe de stabilité suivant le critère de Lyapunov (théorème 1) rappelé ci-dessous.

Théorème 1 :

Soit $V(x)$ une fonction différentiable de R^n dans R^n , dite fonction de Lyapunov, qui satisfait les conditions suivantes [30] :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 \forall x \neq 0 \\ V(x) \leq 0 \forall x \neq 0 \end{cases}$$

Si ces trois conditions sont satisfaites, $x = 0$ est un point d'équilibre stable, si la dernière condition devient $V(x) < 0$ pour $x \neq 0$ le point $x = 0$ est asymptotiquement stable.

Dans le cas de la commande par mode glissant, cette fonction de Lyapunov est déduite à l'aide d'une pseudo-sortie qui est la surface de glissement

4.3.3 Description du système en régime glissant

Pour mieux illustrer ce concept de stabilité, considérons le comportement d'un système mono-entrée qui peut être décrit par l'équation suivante:

$$\dot{x} = f(x, u), R^n \rightarrow R^n \quad (4.1)$$

$x \in R^n$ Est le vecteur d'état, $t \in R^+$ est le temps, $f \in R^n$ est le champ de fonction qui décrit l'évolution de l'état du système au cours de temps et $u \in R^n$ est la commande de système.

Définissons aussi une loi de commande discontinue u définie par :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x, t) < 0 \\ u^- & \text{si } S(x, t) \geq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Considérons x^+ et x^- les états qui correspondent respectivement à u^+ et u^- . Une condition suffisante pour que la surface soit attractive est la suivante :

$$\begin{cases} x^+ \in S(x, t) > 0 \\ x^- \in S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

4.3.3.1 Condition d'existence du glissement

La condition d'existence du régime glissant implique que $(x, t) = 0$. Cette condition se traduit par [31] :

$$\begin{cases} \lim_{S \rightarrow \infty^+} \dot{S} < 0 \\ \lim_{S \rightarrow \infty^-} \dot{S} > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Ces conditions sont déduites du théorème (1) en appliquant le critère de stabilité de Lyapunov dans un voisinage de la surface de glissement et en prenant $(V(x) = \frac{S^2}{2})$ comme fonction candidate de Lyapunov. Dans ce cas la dérivée de la fonction de Lyapunov est égale à $S\dot{S}$. Les conditions de Lyapunov énoncés dans le théorème 1 sont vérifiées si S et \dot{S} sont de signe opposé. A noter que ces dernières conditions deviennent des conditions suffisantes pour assurer l'attractivité de la surface si elles sont valables sur tout l'espace d'état et non seulement dans une région proche de la surface de glissement.

4.3.3.2 Condition de stabilité

L'analyse de la stabilité du système revient à étudier la dynamique du système en mode de glissement, c'est-à-dire lorsque la surface de glissement est atteinte ($S(x, t) = 0$). Elle se base sur la méthode de la commande équivalente [32] qui consiste à admettre qu'en mode de glissement, tout se passe comme si le système était piloté par une commande continue, dite commande équivalente, rendant la surface invariante au cours de temps. Autrement dit $\forall t > t_s$ Ou t_s est le temps mis par le système pour atteindre la surface de glissement, on a :

$$\begin{cases} S(x, t) = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Considérons à titre d'exemple le système de la commande suivante :

$$\dot{x} = f(x) + \beta(x)u \quad (4.6)$$

Soit $S(x, t)$ la surface de glissement, en régime de glissement on a :

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} (f(x)) + \beta(x)u = 0 \quad (4.7)$$

On obtient l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \beta(x, t) \right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (4.8)$$

On remplace l'expression de la commande équivalente dans le modèle pour obtenir la dynamique équivalente dans la surface de glissement.

4.3.3 Phénomène de réticence

L'un des problèmes lié à la mise en œuvre du contrôle par mode glissant est le phénomène de réticence. Ce phénomène se traduit par des oscillations à hautes fréquences aux alentours de la surface de glissement. Ceci est dû aux erreurs de modélisation, mais aussi au fait que la commande par mode glissant nécessite une commutation de l'organe de commande à une fréquence théorique infinie, ce qui en pratique n'est pas réalisable. Pour parvenir à réduire ce problème, plusieurs solutions ont été proposées. Les méthodes les plus répandues sont de rendre la fonction de commutation plus régulière aux alentours de la surface ou bien l'augmentation de l'ordre du mode de glissement. Pour un mode de glissement d'ordre r , l'algorithme de contrôle doit faire tendre non seulement la surface de glissement S vers 0 mais également les dérivées successives de cette surface jusqu'au ordre $(r-1)$.

4.4 Synthèse des lois de commande pour un hacheur élévateur

4.4.1 Modèle du convertisseur Boost

En faisant l'hypothèse d'une conduction continue, le modèle mathématique du hacheur survolteur peut être déduit en appliquant la loi de Kirchhoff dans le cas où l'interrupteur S_1 est passant ou bloqué. On obtient alors le modèle instantané du hacheur :

$$C \frac{dV_{bus}}{dt} = (1 - u)i_L - i_{ch} \quad (4.9)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{sc} - (1 - u)V_{bus} \quad (4.10)$$

u étant l'état de l'interrupteur S_1 , V_{bus} la tension du bus continu, i_L le courant dans l'inductance de lissage, V_{sc} la tension aux bornes des supercondensateurs et i_{ch} le courant dans la charge.

4.4.2 Commande par mode de glissement

Pour la synthèse d'un correcteur par mode de glissement pour un hacheur Boost, la loi de commande adoptée est celle présentée par l'équation (4.11).

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S < 0 \\ 0 & \text{si } S > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Chapitre 4 : Contrôle du système hybride

La synthèse d'un contrôleur par mode glissant se décompose en plusieurs étapes :

Le choix de la surface de glissement, la vérification de l'attractivité de la surface de glissement, la démonstration de l'existence du mode de glissement, l'étude de la stabilité de la commande sur la surface de glissement. Nous abordons ces points dans les paragraphes suivants.

4.4.2.1 Choix de la surface de glissement

Le but de la commande du hacheur Boost est de faire tendre la tension V_{bus} en la sortie du convertisseur vers une tension de référence V_{ref} . Il a été démontré dans [33] qu'une seule boucle de tension ne suffit pas pour contrôler le hacheur dans le cas du SMC. Une solution à ce problème est d'intégrer le courant traversant l'inductance dans la loi de commande.

Nous proposons donc d'étudier la surface de glissement suivante :

$$S = K_1(V_{bus} - V_{ref}) + K_2(i_L - I_{ref}) \quad (4.12)$$

Où K_1 et K_2 sont deux constantes, V_{ref} la tension V_{bus} de référence, I_{ref} le courant i_L de référence.

Le courant de référence n'est pas connu a priori, nous le déduisons à partir des paramètres du circuit en appliquant la conservation de puissance au niveau du converti

$$I_{ref} = \frac{V_{ref}}{V_{sc}} i_{ch} \quad (4.13)$$

Le courant de référence est donc variable en régime dynamique et dépend du courant de charge et de la tension aux bornes des SC. Il tend en régime statique vers le courant d'équilibre (I_{ref}^{eq}) correspondant à l'état d'équilibre (I_{ref}^{eq}, V_{ref}).

En remplaçant I_{ref} par son expression (4.13) en fonction du point de fonctionnement (V_{sc}, I_{ch}) dans l'équation (4.12), nous obtenons :

$$S = K_1(V_{bus} - V_{ref}) + K_2 i_L - K_2 \frac{V_{ref}}{RV_{sc}} V_{bus} \quad (4.14)$$

$$S = \left(K_1 - K_2 \frac{V_{ref}}{RV_{sc}} \right) V_{bus} + K_2 i_L + K_1 V_{ref} \quad (4.15)$$

Définissons les deux nouvelles variables :

$$e_1 = V_{bus} - V_{ref} \quad (4.16)$$

$$e_2 = i_L - I_{ref}^{eq} \quad (4.17)$$

Dans le nouveau espace d'état (e_1, e_2), la surface de glissement devient :

$$S = \left(K_1 - K_2 \frac{V_{ref}}{RV_{sc}} \right) e_1 + \left(K_1 - K_2 \frac{V_{ref}}{RV_{sc}} \right) V_{ref} + K_2 e_2 + K_2 I_{ref}^{eq} - K_1 V_{ref} \quad (4.18)$$

De plus (I_{ref}^{eq}, V_{ref}) est un point d'équilibre pour lequel I_{ref}^{eq} est égal à :

$$I_{ref}^{eq} = \frac{V_{bus}}{V_{sc}} i_{ch} = \frac{V_{ref}^2}{RV_{sc}} \quad (4.19)$$

La surface de glissement peut donc s'écrire :

$$S = \dot{K}_1 e_1 + K_2 e_2 \quad (4.20)$$

4.4.2.2 Condition d'attractivité

L'attractivité de la surface de glissement (paragraphe 4.2.3.1) est assurée si la dynamique du système a tendance à se diriger vers la surface indépendamment des conditions initiales. Cela peut être facilement démontré en traçant la dynamique du système dans le plan (e_1, e_2) (figure 4.2).

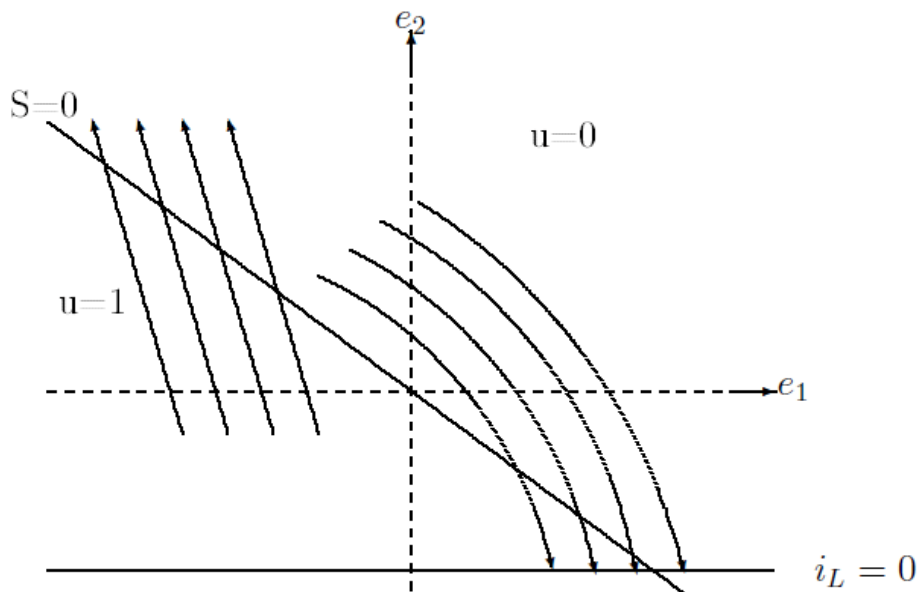


Figure 4.3 : Dynamique du système et surface de glissement pour un hacheur survolteur

Si le système se trouve dans le demi plan < 0 , la commande u égale à 1. Dans ce cas le courant dans l'inductance augmente, donc on se dirige vers la frontière de la surface de glissement $= 0$. De même si $S > 0$, le courant dans l'inductance diminue et on se dirige de nouveau vers la surface de glissement $= 0$.

4.4.2.3 Condition d'existence du régime glissant

Démontrons maintenant que la commande discontinue adoptée (eq 4.11) garantit la condition de glissement au moins dans une zone entourant le point d'équilibre. L'existence du régime glissant impose que S et \dot{S} tendent vers zéro lorsqu'on se rapproche de la surface de glissement (paragraphe 4.2.3.2). Il faut donc prouver les conditions d'existence du régime glissant (équation 4.4) dans un espace proche de la surface de glissement.

En écrivons tout d'abord le modèle du hacheur (eq. 4.9 et 4.10) dans le nouvel espace d'état (e_1, e_2) , nous obtenons :

$$C \frac{de_1}{dt} = (1 - u)(e_2 + I_{ref}^{eq}) - \left(\frac{e_1 + V_{ref}}{R} \right) \quad (4.21)$$

$$L \frac{de_2}{dt} = V_{sc} - (1 - u)(e_1 + V_{ref}) \quad (4.22)$$

La dérivée de la surface de glissement \dot{S} obtenu à l'aide des équations (4.20, 4.21 et 4.22) s'écrit :

$$\dot{S} = \dot{K}_1 e_1 + K_2 \dot{e}_2 \quad (4.23)$$

$$\dot{S} = \frac{\dot{K}_1}{C} \left((1 - u)(e_2 + I_{ref}^{eq}) - \left(\frac{e_1 + V_{ref}}{R} \right) \right) + \frac{K_2}{L} (V_{sc} - (1 - u)(e_1 + V_{ref})) \quad (4.24)$$

Si $S > 0$ la commande u est égale à 0 et la condition de glissement impose que \dot{S} soit négatif.

En remplaçant u par sa valeur dans l'équation 4.24, nous déterminons la première condition d'existence du régime glissant c'est-à-dire si $S > 0$, $S < 0$:

$$D_1 = \dot{S}_1 = e_1 \left[\frac{-\dot{K}_1}{RC} - \frac{K_2}{L} \right] + \frac{e_2}{C} K_1 + K_2 \left[\frac{V_{sc}}{L} - \frac{V_{ref}}{L} \right] - \dot{K}_1 \left[\frac{V_{ref}}{RC} - \frac{I_{ref}^{eq}}{C} \right] < 0 \quad (4.25)$$

Similairement pour le cas de $S < 0$, $u=1$ et \dot{S} doit être positif, on obtient alors :

$$D_2 = \dot{S}_2 = -\frac{\dot{K}_1 e_1}{RC} + \frac{K_2}{L} V_{sc} - \frac{V_{ref} \dot{K}_1}{RC} > 0 \quad (4.26)$$

D_1 et D_2 sont des droites délimitant la zone de glissement.

A partir des équations 4.25 et 4.26 qui délimitent la zone glissante de la surface, nous déduisons que la surface de glissement n'est pas totalement glissante. Il faut donc s'assurer que le point d'équilibre soit inclus dans la zone de glissement. En remplaçant (e_1, e_2) par zéro dans les équations 4.25 et 4.26, cette condition impose :

$$\frac{\dot{K}_1}{K_2} < \frac{RCV_{sc}}{V_{ref}L} \Leftrightarrow \frac{K_1}{K_2} < \frac{RCV_{sc}}{V_{ref}L} + \frac{V_{ref}}{RV_{sc}} \quad (4.27)$$

4.4.2.4 Condition de stabilité

Pour déterminer la condition de stabilité sur la surface de glissement, on se sert de la notion de la commande équivalente introduite au paragraphe 4.2.3.3. En posant $S=0$ et $\dot{S} = 0$ on obtient l'expression de la commande équivalente (u_{eq}) à partir du modèle de convertisseur (4.21) et (4.22) :

$$u_{eq} = 1 - \frac{\frac{V_{sc}}{L} - \frac{\dot{K}_1(e_1 + V_{ref})}{K_2 RC}}{\frac{e_1 + V_{ref}}{L} - \frac{\dot{K}_1(e_1 + I_{ref}^{eq})}{K_2 C}} \quad (4.28)$$

En remplaçant u par l'expression u_{eq} de la commande équivalente dans l'équation (4.21) et en posant $S=0$, on obtient:

$$\frac{de_1}{dt} = \frac{V_{sc} \left(I_{ref}^{eq} - \frac{K_1 e_1}{K_2} \right) - \left(\frac{e_1 + V_{ref}}{R} \right)^2}{C(e_1 + V_{ref}) - L \left(I_{ref}^{eq} - \frac{K_1 e_1}{K_2} \right) \frac{K_1}{K_2}} \quad (4.29)$$

Définissons une fonction de Lyapunov V égale à $\frac{1}{2} e_1^2$. Pour assurer la stabilité du système, il faut prouver que la dérivée de la fonction de Lyapunov est négative.

Or on a :

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 = -e_1^2 \frac{V_{sc} \frac{K_1}{K_2} + \frac{e_1}{R} + V_{ref}}{C(e_1 + V_{ref}) - L \left(I_{ref}^{eq} - \frac{K_1 e_1}{K_2} \right) \frac{K_1}{K_2}} = -e_1^2 A \quad (4.30)$$

Le numérateur de A est positif étant donné que e_1 est toujours plus grand que $-V_{ref}$ (la tension à la sortie du convertisseur est toujours positive). Donc pour prouver la stabilité il faut que le dénominateur de A soit positif :

$$C(e_1 + V_{ref}) - L \left(I_{ref}^{eq} - \frac{K_1 e_1}{K_2} \right) \frac{K_1}{K_2} > 0 \quad (4.31)$$

Soit :

$$e_1 = e_{min} \quad (4.32)$$

Avec :

$$e_{min} = \frac{L I_{ref}^{eq} \frac{K_1}{K_2} - C V_{ref}}{C + L \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2} \quad (4.33)$$

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que la zone de glissement de la surface de glissement est limitée par deux inégalités (inégalités 4.25 et 4.26). L'intersection de la droite ($D_1 = 0$) (équation 4.25) avec la surface de glissement ($S=0$) constitue la limite inférieure de la zone de glissement, l'abscisse e_{gliss} de ce point est égal à :

$$e_{gliss} = \frac{L I_{ref}^{eq} \frac{K_1}{K_2} - C V_{ref}}{C + L \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 + \frac{K_1 L}{R}} + \frac{C V_{sc} - L V_{ref} \frac{K_1}{K_2}}{C + L \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 + \frac{K_1 L}{R}} \quad (4.34)$$

En prenant en considération la condition d'existence du régime de glissement (équation 4.27), nous démontrons que $e_{gliss} > e_{min}$ et donc l'inégalité (4.31) est prouvée. Donc, dans la zone de glissement la fonction de Lyapunov choisie est négative. Par conséquent, le système est donc asymptotiquement stable.

4.4.2.5 Influence des valeurs de gains du contrôleur sur les performances

L'équation (4.27) donne la condition de stabilité du système. Cependant, cette équation qui se présente sous la forme d'une inégalité, laisse un degré de liberté concernant le choix de gains

Chapitre 4 : Contrôle du système hybride

du contrôleur (K_1, K_2). Nous proposons d'étudier dans ce paragraphe l'influence du choix des gains sur la zone de glissement de la surface et sur la fréquence de découpage du hacheur.

4.4.2.5.1 Fréquence de découpage

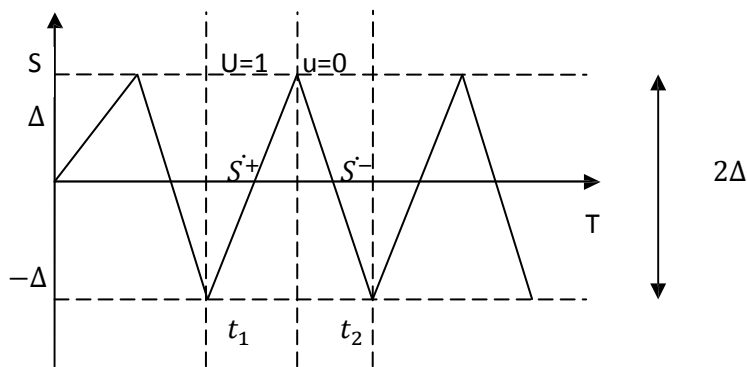


Figure 4.4 : Surface de glissement avec bande d'hystérésis

L'approche théorique de la commande par mode glissant fait l'hypothèse d'une hystérésis nulle et de ce fait d'une fréquence de découpage infinie. Il est clair que nous ne pouvons pas assurer cette hypothèse en pratique puisque que la fréquence de découpage dépend de la tenue des organes de commande, mais aussi du dimensionnement des composants et des pertes. Afin de fixer la fréquence de commutation de la commande, il faut adopter une loi avec hystérésis. Une bande d'hystérésis est donc ajoutée au voisinage de la surface de glissement. La loi de commande devient alors :

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S < -\Delta \\ 0 & \text{si } S > \Delta \end{cases} \quad (4.35)$$

La fréquence de découpage est étroitement liée à la valeur de la bande d'hystérésis. Pour calculer la fréquence, nous déterminons l'expression des temps t_1 respectivement t_2 mis pour passer de $-\Delta$ à $+\Delta$ respectivement pour passer de $+\Delta$ à $-\Delta$ (voir figure 4.3). On a :

$$t_1 = \frac{2\Delta}{S^+} \quad (4.36)$$

$$t_2 = \frac{2\Delta}{|S^-|} \quad (4.37)$$

A partir de (4.24) nous calculons S^+ et S^- en faisant l'hypothèse que le point d'équilibre est atteint ($e_1 = 0, e_2 = 0$), nous obtenons alors :

$$t_1 = \frac{2\Delta}{-V_{ref} \frac{K_1}{RC} + \frac{V_{sc} K_2}{L}} \quad (4.38)$$

$$t_2 = \frac{2\Delta}{\left| \frac{K_1}{C} \left(I_{ref}^{eq} - \frac{V_{ref}}{L} \right) + \frac{K_2}{L} (V_{sc} - V_{ref}) \right|} \quad (4.39)$$

La fréquence de découpage f est donc égale à :

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (4.40)$$

Pour la détermination de la fréquence de découpage en fonction de la bande d'hystérésis, nous

avons fait l'hypothèse que le système tend parfaitement vers le point d'équilibre (V_{ref}, I_{ref}^{eq}) , ce qui n'est juste que si la fréquence de découpage est infinie. En pratique des ondulations sont présentes au niveau de la tension de sortie du convertisseur et du courant dans l'inductance de lissage. Ces ondulations sont d'autant plus grandes que la fréquence est faible et donc que les pentes S^+ et S^- changent. Ceci affecte les valeurs des temps t_1 et t_2 et par conséquent la fréquence de découpage qui est fortement sensible aux valeurs de ces pentes.

4.4.2.5.2 Zone de glissement

Nous avons vu dans le paragraphe 4.4.2.3 que la surface de glissement est limitée à une certaine zone dépendant des paramètres de réglage. Nous avons pu délimiter cette zone de glissement par deux inégalités présentées par les équations 4.25 et 4.26. Le choix des gains du contrôleur doit donc prendre en compte ce résultat en essayant d'éviter que le système ne rattrape la surface en dehors de la zone de glissement. Ceci aurait un effet indésirable sur les performances du contrôleur conduisant sous certaines conditions à un « dépassement » sur la sortie. Nous illustrons sur la figure 4.5 le comportement du système s'il rattrapait la surface en dehors de la zone de glissement.

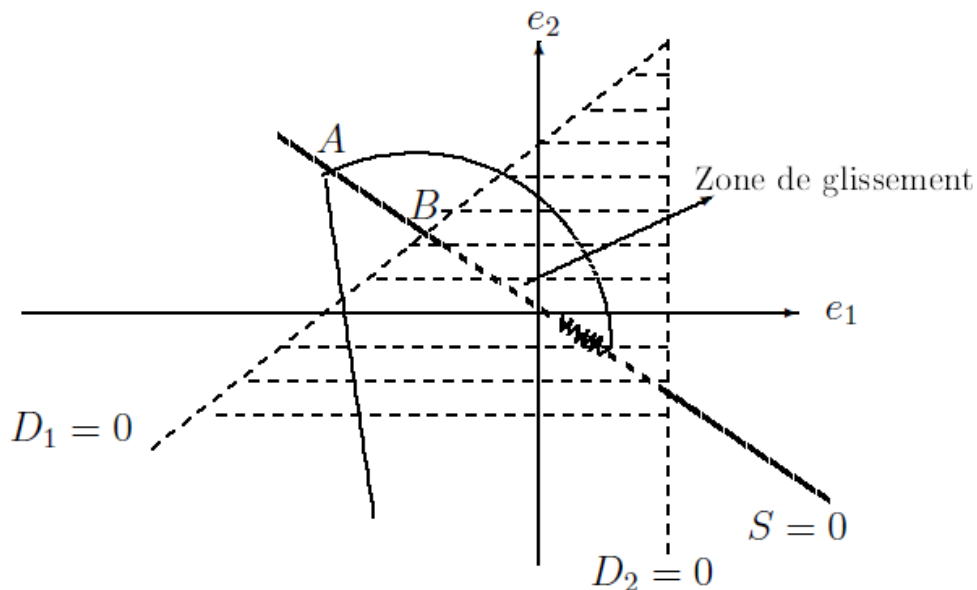


Figure 4.5 : Surface et zone de glissement.

Soit $A(e_{1A}, e_{2A})$ l'intersection de la dynamique du système avec la surface de glissement, soit $B(e_{1B}, e_{2B})$ la limite de la zone de glissement (voir figure 4.5). Supposons qu'à $t=0$ la tension de sortie du convertisseur soit égale à V_{ini} et que le courant dans l'inductance nul. Dans ce cas l'état de l'interrupteur u est 1. Les équations 4.21 et 4.22 deviennent :

$$C \frac{de_1}{dt} = - \left(\frac{e_1 + V_{ref}}{R} \right) \quad (4.41)$$

$$L \frac{de_2}{dt} = V_{sc} \quad (4.42)$$

Chapitre 4 : Contrôle du système hybride

La résolution de ces deux équations nous donne :

$$e_1 = V_{ini} \exp\left(-\frac{L(e_2 + I_{ref}^{eq})}{RCV_{sc}}\right) - V_{ref} \quad (4.43)$$

Le point A est sur la surface de glissement, donc on a :

$$e_{1A} = -\frac{K_2}{K_1} e_{2A} \quad (4.44)$$

Les coordonnées du point A sont alors reliées par l'équation suivante :

$$e_{2A} = \frac{\dot{K}_1}{K_2} \left(-V_{ini} \exp\left(\frac{L(e_{2A} + I_{ref}^{eq})}{RCV_{sc}}\right) + V_{ref} \right) \quad (4.45)$$

Nous déterminons ensuite l'intersection de la surface de glissement avec la limite de la zone de glissement :

$$e_{2B} = \frac{\dot{K}_1 K_1 \left(\frac{V_{ref}}{RC} - \frac{I_{ref}^{eq}}{C} \right) - \left(\frac{V_{sc}}{L} - \frac{V_{ref}}{L} \right)}{\frac{1}{C} \left(\frac{\dot{K}_1}{K_2} \right)^2 + \frac{\dot{K}_1}{K_2 RC} + \frac{1}{L}} \quad (4.46)$$

Pour que la dynamique du système rattrape la surface de glissement dans la zone de glissement, il faut que :

$$|OA| < |OB| \quad (4.47)$$

4.5 Commande par PI

Dans ce paragraphe nous étudions la commande par PI pour le hacheur Boost. Ce type de contrôle très répandu dans l'industrie rentre dans la classe des commandes linéaires qui se basent sur un modèle linéaire du système pour synthétiser le contrôleur.

Comme pour la commande par mode glissant, nous optons pour une commande par deux boucles de contrôle. Ceci a beaucoup d'intérêt pour l'amélioration des performances dynamiques et de la robustesse du contrôleur. Il permet aussi de simplifier le contrôle du hacheur Boost dont sa fonction de transfert présente un zéro dans la partie droite du plan rendant son contrôle par une seule boucle de tension compliqué dans certain cas [34,35]. La structure de la commande est représentée sur la figure 4.5.

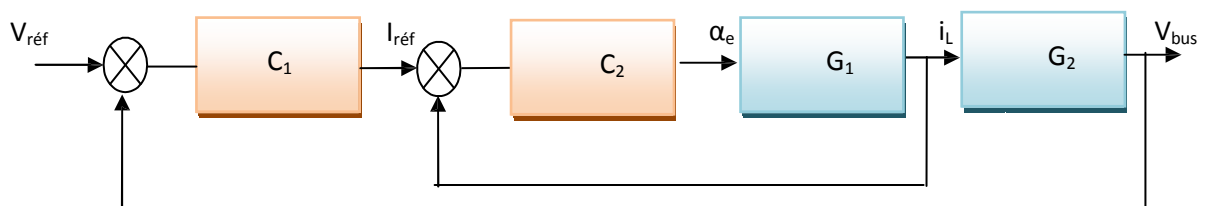


Figure 4.6 : Structure de la commande par deux boucles de contrôle.

L'erreur corrigée entre la tension mesurée et la tension de consigne sert de référence de

courant pour la boucle interne de courant. C'est la boucle de courant qui impose la valeur du rapport cyclique α_e .

4.5.1 Modèle linéaire du hacheur

La modélisation du hacheur vise à analyser son comportement dynamique dans le but de déterminer le correcteur convenable pour le contrôler. La synthèse des modèles des convertisseurs présente des difficultés liées à la nature même de ces derniers. Les convertisseurs sont non linéaires et à structure variable, puisqu'ils présentent plusieurs états possibles au cours d'une période de découpage. La méthode adoptée consiste à transformer ces systèmes en des systèmes invariants puis à linéariser le modèle obtenu autour d'un point de fonctionnement [36]. Cette méthode n'est juste qu'en faisant l'hypothèse que la période d'échantillonnage est très petite devant la dynamique du système. Pour les boucles de contrôle présentées sur la figure 4.5, nous avons besoin de déterminer les fonctions de transfert G_1 et G_2 . Nous nous référons aux travaux présentés dans [36,37]. Les fonctions de transfert suivantes linéarisées autour du point de fonctionnement (α, R) sont à considérer :

$$G1(S) = \frac{IL(S)}{\alpha(S)} = \frac{2Vbus}{R(1-\alpha)^2} \frac{1 + \frac{RC}{2} S}{1 + \frac{L}{R(1-\alpha)^2} S + \frac{LC}{(1-\alpha)^2} S^2} \quad (4.48)$$

$$G2(S) = \frac{Vbus(S)}{IL(S)} = \frac{(1-\alpha)R}{2} - \frac{1 - \frac{L}{R(1-\alpha)^2} S}{1 + \frac{RC}{2} S} \quad (4.49)$$

α est le rapport cyclique, les termes en X_S correspondent à des petites variations de la grandeur X considérées. L'analyse des fonctions de transfert montre la présence d'un zéro dans la partie droite du plan complexe. La pulsation W_Z de ce zéro RHPZ (Right Half Plan Zero) est égale à :

$$WZ = \frac{R(1-\alpha)^2}{L} \quad (4.50)$$

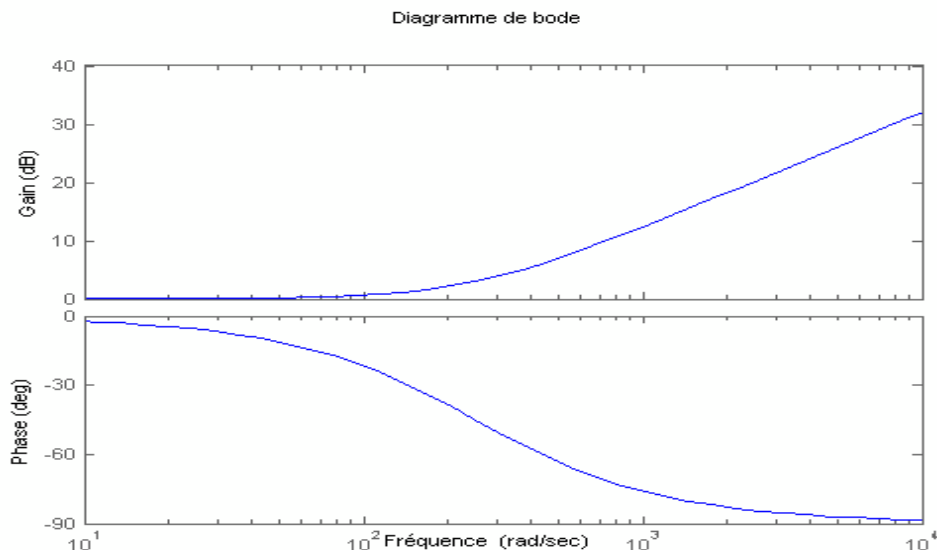


Figure 4.7 : Diagramme de Bode de $(1 - \frac{S}{W_z})$.

Comme nous pouvons le constater sur le diagramme de Bode de la figure 4.7, ce zéro ajoute un déphasage de 90° à la fonction de transfert. Si le zéro apparaît proche de la fréquence de coupure, il a une action néfaste à la marge de phase du système en diminuant cette dernière.

L'équation 4.52 présente la fonction de transfert du Boost pour une seule boucle de contrôle (boucle de tension) :

$$\frac{V_{bus}(S)}{\alpha(S)} = \frac{V_{SC}}{1 - \alpha} \frac{1 - \frac{L}{R(1 - \alpha)^2} S}{1 + \frac{L}{R(1 - \alpha)^2} S + \frac{LC}{(1 - \alpha)^2} S^2} \quad (4.51)$$

Nous remarquons que le RHPZ apparaît dans le même endroit que ce soit pour un contrôle avec une seule boucle de tension ou bien deux boucles. Cependant, les pôles complexes apparaissent dans la boucle de courant ce qui rend plus facile de compenser l'effet du RHPZ par un contrôle avec deux boucles.

Le zéro RHPZ est présent dans tous les convertisseurs qui stockent d'une manière indirecte l'énergie. Ces convertisseurs stockent tout d'abord l'énergie dans l'inductance et puis la renvoie vers la charge. Si la dynamique de changement du rapport cyclique par rapport à une perturbation est très rapide, l'inductance limite naturellement la montée en courant. D'une autre façon, le courant dans l'inductance ne va pas pouvoir augmenter à la même vitesse que le rapport cyclique. Cela se traduit automatiquement par une chute de tension de sortie du convertisseur et donc des oscillations. Pour s'affranchir de ce problème, on limite la dynamique de variation du rapport cyclique. Pour cela la fréquence de coupure (qui reflète la bande passante) du système sur le tracé de Bode est limitée à 30 % du minimum RHPZ [13].

4.5.2 Synthèse des paramètres du correcteur

Le point de référence retenu pour la synthèse des correcteurs est le point le plus critique au

Chapitre 4 : Contrôle du système hybride

niveau de la stabilité qui correspond au zéro le plus faible et les pôles le plus proches de l'axe des imaginaires. Cela correspond pour un hacheur « boost » à la tension d'entrée minimale (V_{smin}) et à charge maximale (R_{min}). Pour la détermination des correcteurs $C1(s)$ et $C2(s)$, nous utilisons le logiciel Sisotool® qui est intégré à Matlab®. La Figure 4.7 représente le diagramme de Bode en boucle ouverte de la boucle intérieure de courant.

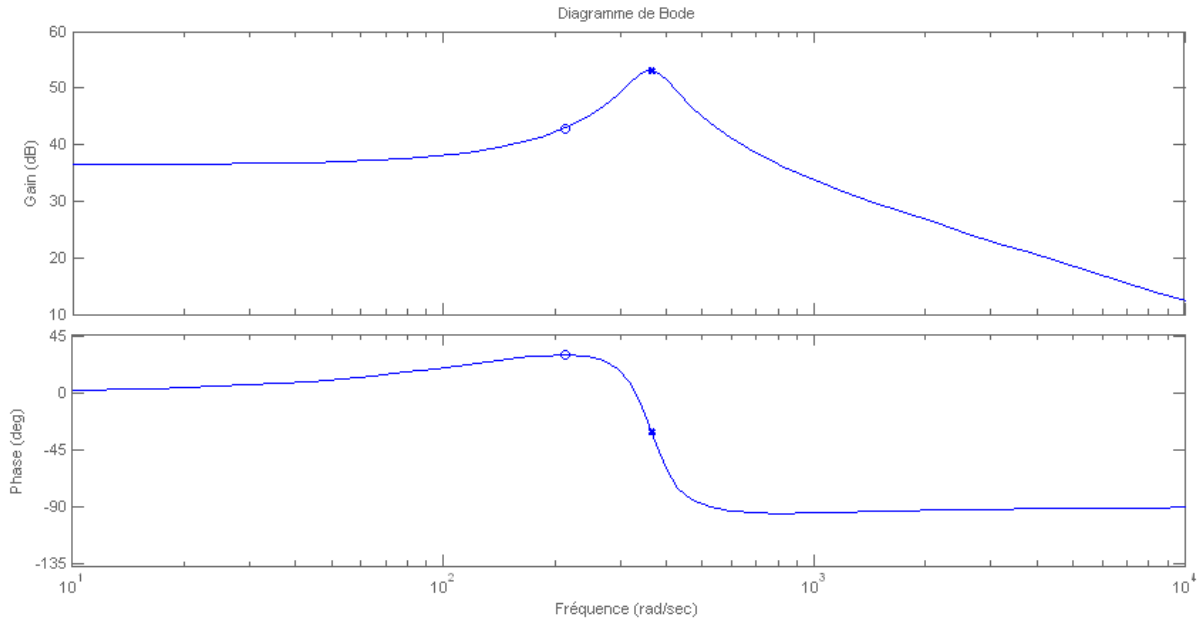


Figure 4.8 : diagramme de Bode de G1.

Nous réglons le contrôleur $C2$ de la boucle interne pour avoir un temps de réponse d'environ 1.5 ms. Nous obtenons le correcteur PI suivant :

$$C_2(s) = 165,05 \frac{1 + 0,00048s}{s} \quad (4.52)$$

La figure 4.9 donne la réponse indicielle de la fonction de transfert en boucle fermée pour la boucle de courant.

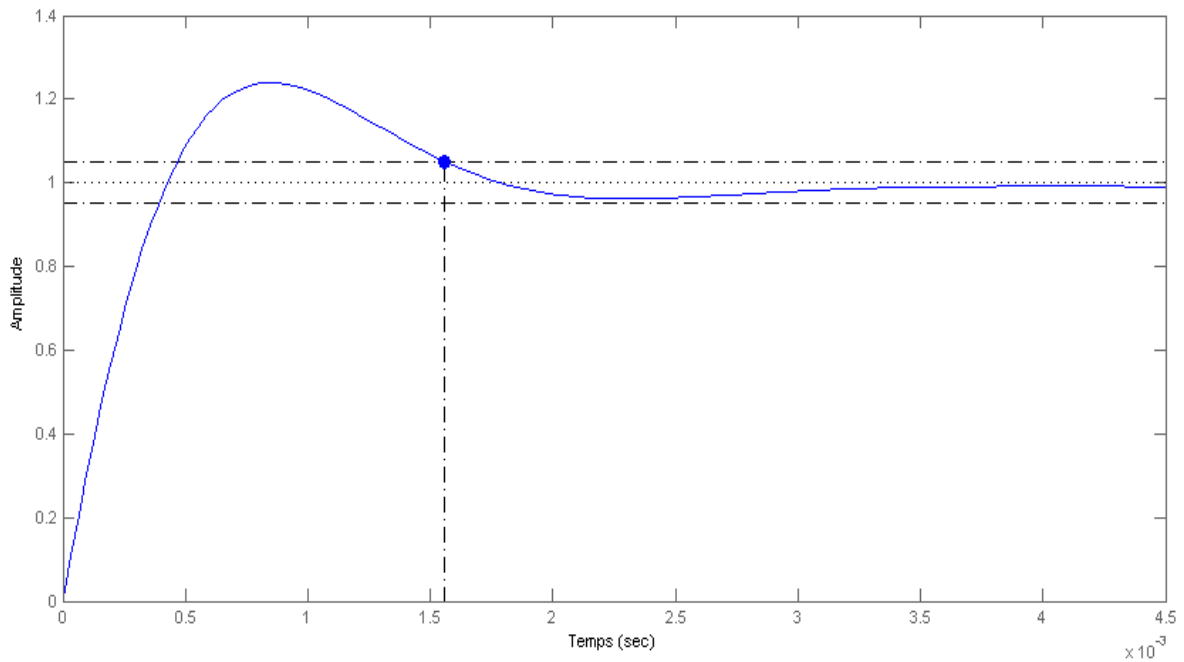


Figure 4.9 : réponse indicielle de la boucle de courant avec correcteur.

Le zéro minimal RPHZ de la fonction de transfert G_2 est égal à 1250 rd/s. Il est obtenu à partir de l'équation 4.51 pour le point correspondant à la résistance minimale et le rapport cyclique maximale. On limite dans ce cas la fréquence de coupure de la boucle extérieure à 375 rd/s. Nous optons aussi pour une marge de phase aux alentours de 60° . Nous trouvons le correcteur C_1 suivant :

$$C_1(S) = 822,01 \frac{1 + 0,0025S}{S} \quad (4.53)$$

Le diagramme de Bode, obtenu pour le système en boucle ouverte, est représenté sur la figure 4.10.

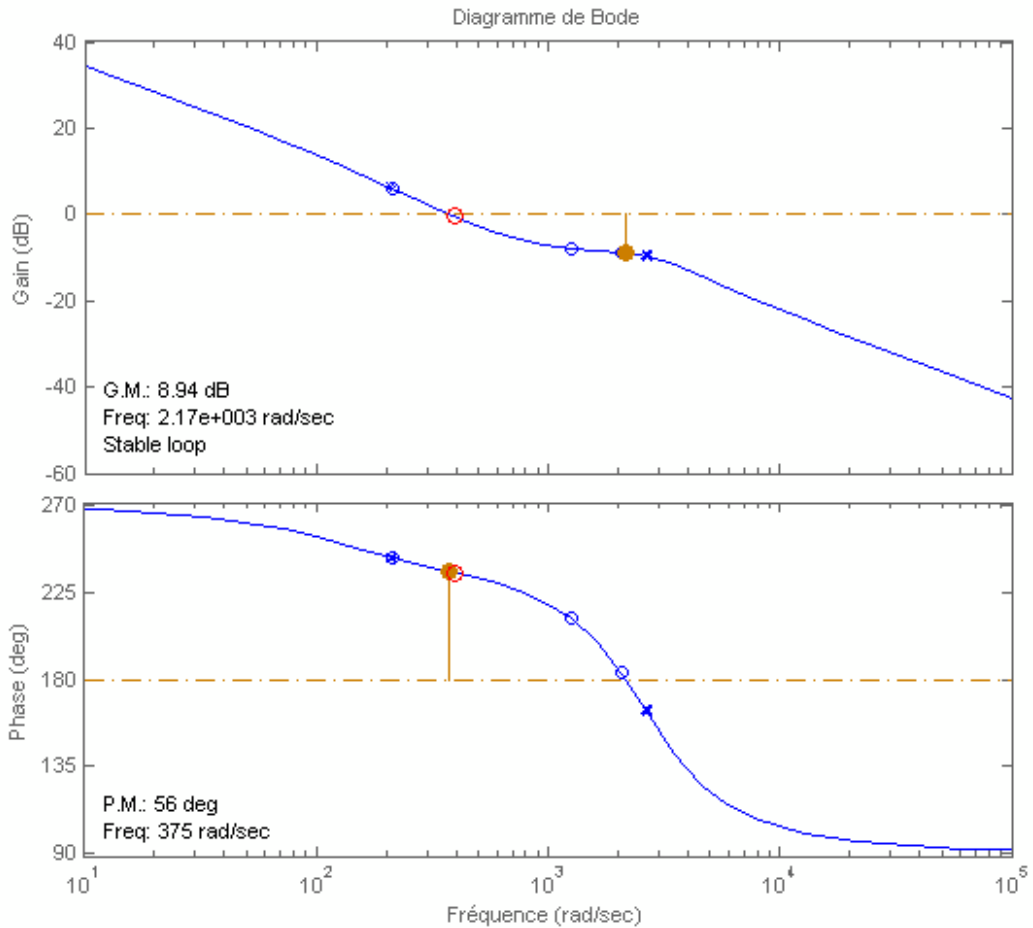


Figure 4.10 : Diagramme de Bode en boucle ouverte (boucle de tension).

4.6 Résultats de simulation

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les deux simulations, celle de la commande par mode de glissement (SMC) et la commande proportionnelle intégrale (PI) appliquée au convertisseur Boost. Celui-ci est connecté à la source de supercondensateur dont la tension est égale à $V_{sc} = 12V$, $V_{ref} = 42V$ et on fait varier la charge de convertisseur entre $R_{ch} = 5\Omega$ et $R_{ch} = 20\Omega$.

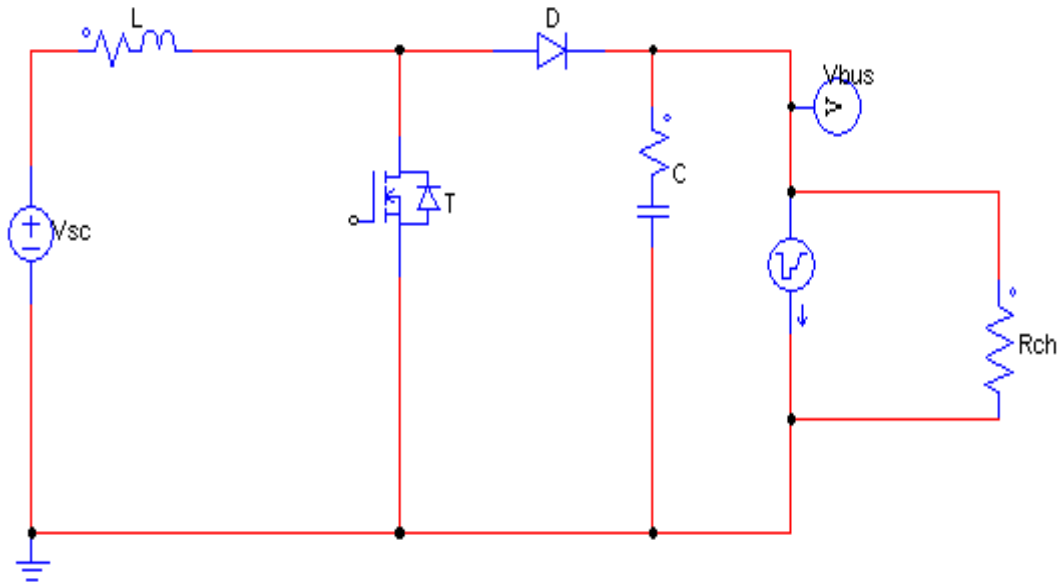


Figure 4-11: Structure du convertisseur Boost connecté à la source de supercondensateur.

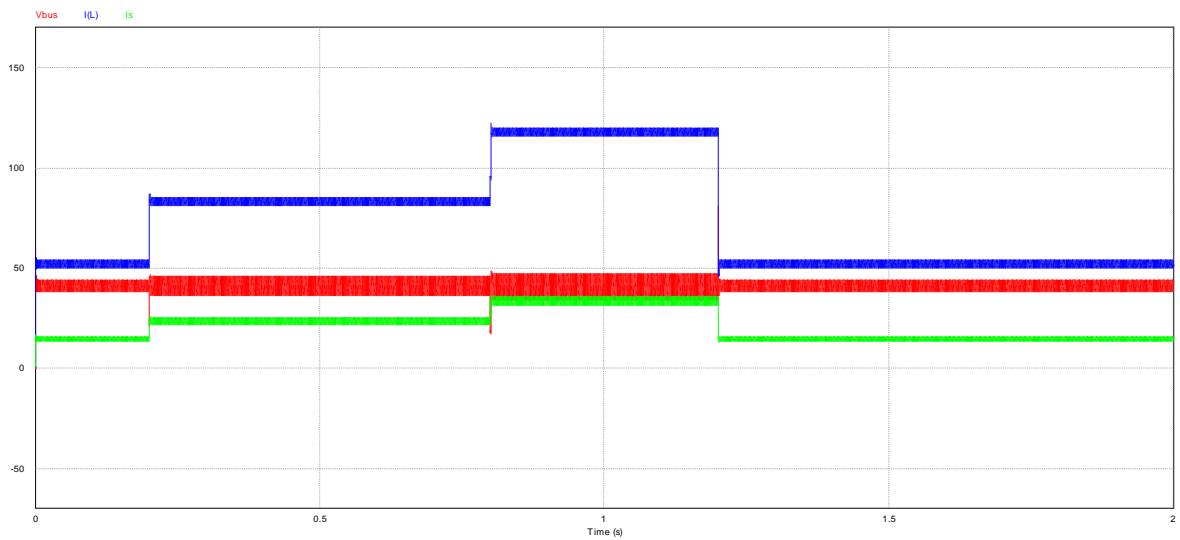


Figure 4.12 : la tension de bus continu dans le convertisseur (SMC).

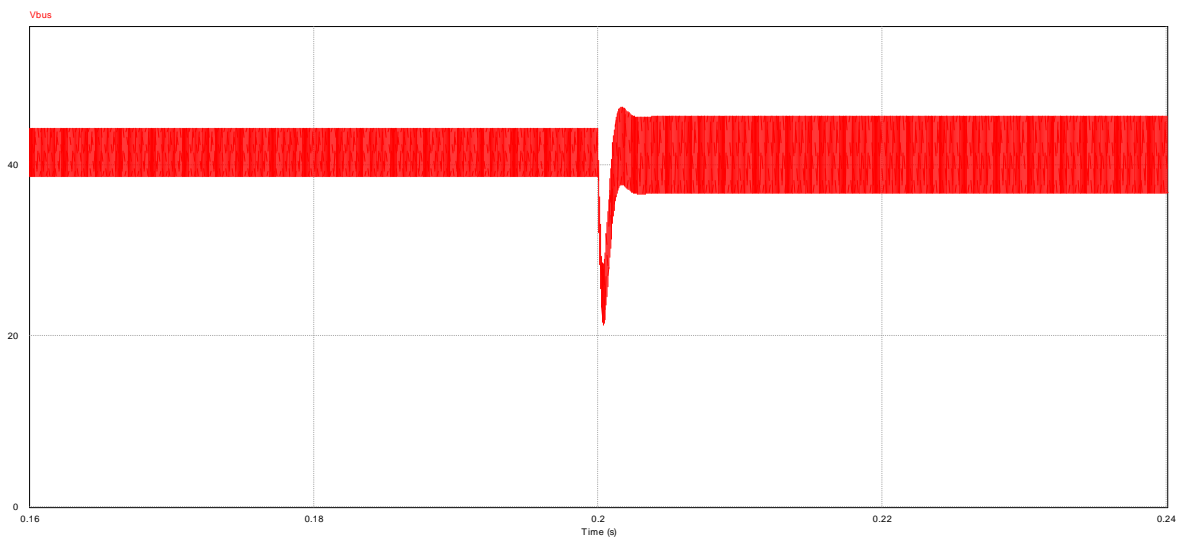


Figure 4.13 : la tension de bus continu entre 0.198 s et 0.204s (SMC).

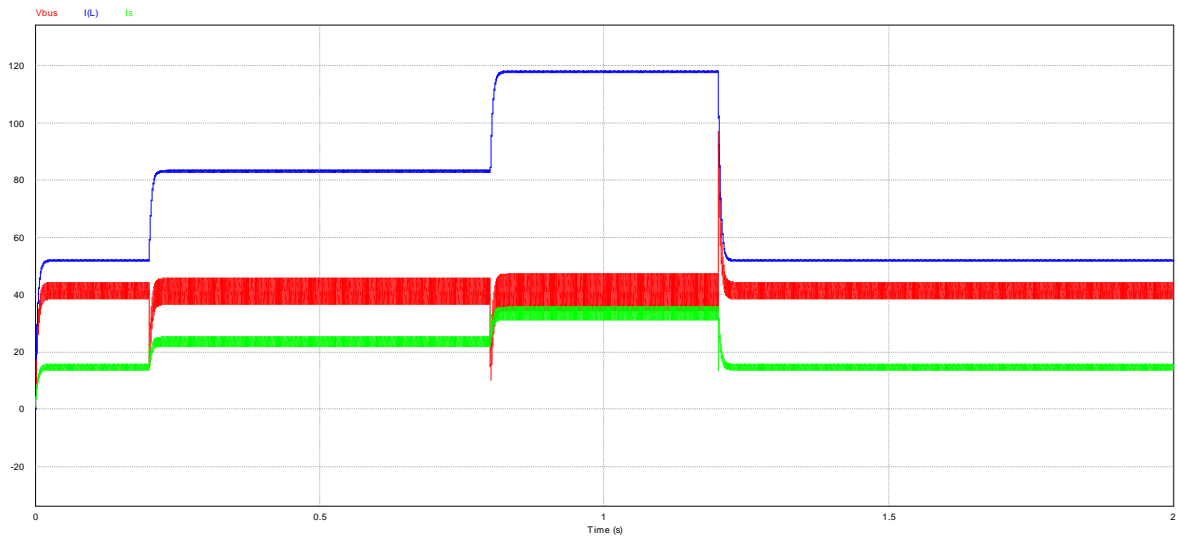


Figure 4.14 : la tension de bus continu dans le convertisseur (PI).

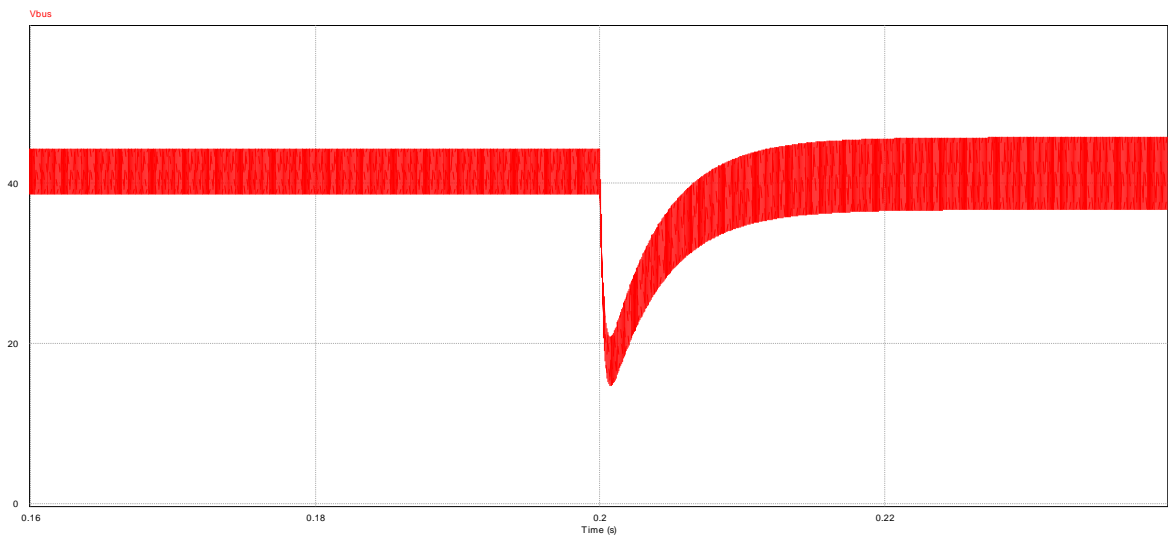


Figure 4.15 : la tension de bus continu entre 0.198 s et 0.204s (PI).

On conclut que la tension du bus continu V_{bus} est bien régulée par l'utilisation des deux méthodes commandes, excepté le temps de réponse qui a un peu augmenté pour la commande PI.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la comparaison entre deux types de contrôle (PI et mode de glissement) d'un hacheur survolteur a été réalisée. Les résultats montrent les excellentes performances dynamiques du contrôle par mode de glissement pour une plage de fonctionnement assez large qui a mis en évidence le caractère non linéaire du contrôleur. Cependant, l'erreur statique constatée sur la sortie ainsi que la variation de la fréquence de découpage du convertisseur constituent des inconvénients.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce présent travail concerne l'analyse d'une alimentation hybride pour la traction d'un véhicule hybride, constitué de deux sources et un convertisseur DC-DC. La principale source est une pile à combustible, la source auxiliaire est un supercondensateur. Notre objectif principal est le contrôle de cette source hybride via un bus continu, en appliquant une commande robuste afin d'assurer toujours une tension constante au niveau de notre bus continu quelque soit d'une part les variations brusque de la charge et d'autre part la dynamique rapide du supercondensateur.

Le chapitre 4 traite du problème de la commande de supercondensateurs pour répondre à des appels de puissance de courte durée. Nous nous sommes intéressés à la commande du hacheur Boost qui présente plus de difficultés qu'un hacheur Buck. Deux lois de commande issues de deux approches différentes (linéaire et non linéaire) ont été étudiées. Les résultats des simulations montrent les excellentes performances du contrôle par mode de glissement et ceci pour plusieurs variations de charge et de pertes du réseau d'alimentation, et indépendamment du point de fonctionnement. Ceci met clairement en évidence l'intérêt du caractère non linéaire du contrôle par mode de glissement. Toutefois, l'erreur statique constatée ainsi que la variation de la fréquence de commutation et la nécessité de mesurer les perturbations constituent des inconvénients majeurs pour ce type de contrôle par rapport à un contrôle proportionnel intégral (PI).

Comme perspective, il est envisageable d'ajouter un intégrateur dans la surface de glissement afin d'éliminer l'erreur statique. L'implémentation d'un algorithme de fixation de fréquence pourrait également être mise en œuvre, afin de s'affranchir du problème de variation de la fréquence de commutation avec le point de fonctionnement.

Bibliographie :

- [1] H.MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : Association Pile à Combustible et supercondensateurs », thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbéliard , 2008
- [2] W.HANKACHE,« Gestion Optimisée de l'Energie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, 2008.
- [3] M.ZANDI, « Contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAIN, 2010.
- [4] N.MAHERZI, « Etude, Conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des supercondensateurs mémoire d'ingénieur CNAM », Conservatoire National des Arts et METIERS LYON, 2010.
- [5] S.DELPERT, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle », doctorat de l'Université de Valenciennes et de Hainaut Cambresis ,2002
- [6] G.ROUSSEAU, « Véhicule hybride et commande optimale », L'école National Supérieure des Mines De Paris, 2008.
- [7] A.DUBRAY, « Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi », Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2002
- [8] J.BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, Université de Valenciennes, et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [9] B.WAHDAME,« Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [10] A.PAYMAN, « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Multi-sources Multi-charges », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [11] J.LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [12] I.VALERO EXPOSITO, « Interfaçage et contrôle commande de pile à combustible pour applications stationnaire et transport », Thèse de doctorat, Université JOSEPH FOURIER, 2004.

- [13] C. Bassot, « Switch-Mode Power Supply: Spice Simulations and Practical Designs» McGraw- Hill, 2008.
- [14] R. BENCHRIFA, D. ZEJLI, A. BENNOUNA; «Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité», International Congress on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [15] P.THONTHONG, « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs », Thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de LORRAINE, 2005.
- [16] I.SADLI ; « Modélisation par impédance d'une pile a combustible pour utilisation électronique de puissance » ; thèse de doctorat de L'INPL ; National Polytechnique de LORRAINE ; 2006
- [17] I. SADLI, P. THOUNTHONG, J.P. MARTIN, S. RAEL, B. DAVAT; « Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter»; Journal of Power Sources, Vol. 156, pp. 119-125, May 2006.
- [18] N .ROMANI , « Modélisation et Commande du système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat , Université Paris-SUD 11, 2007.
- [19] F.RAFIK, H.GUALOUS, R.GALLAY, A.CRAUSAZ, A.BERTHON, «Caractéristique électrique et thermique des supercondensateurs », Actes de Electronique de Puissance du Futur, 4p. Grenoble,2006.
- [20] M.Y.AYAD, « Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues », Institut National Polytechnique De Lorraine, 2004.
- [21] F.BELHACHEMI, « Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.
- [22] H.GUALOUS, R.GALLAY, A.BERTHON, « Utilisation des suprcndensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport », CH1728 Rossens, Suisse.
- [23] G.SARTORIELLI, T.SCHNEUWLU, J.AUER « Technologies et applications des supercon- densateurs » colloque Energies électrique : besoins, enjeux, technologies et applications UTBM, Belfort 18 Juin 2004.
- [24] D.BOUQUAIN, A.MIRAOUI, « Les supercondensateurs : PRINCIPE, MODELISATION ET APLICATIONS».UTBM, Belfort Cedex-France.
- [25] M. KUISMA, P. SILVENTOINEN, M. AHMED, «Comparison between PID Control and SlidingMode Control for Buck Converter», in *Proceedings of the Symposium on*

PowerElectronics, Electrical Drives Automation and Motion, Capri, 2004.

- [26] D. CORTES and J. ALVAREZ, «Robust sliding mode control for the boost converter, » in *Proceedings of VIII IEEE International Power Electronics Congress*, Toulouse, 2002, pp. 208-212.
- [27] V.S.C. RACIRAH and P.C. SEN, « Comparative Study Of Proportional-Integral Sliding Mode, and Fuzzy Logic Controllers for Power Converters, » *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol.33, no. 2, pp. 518-524, 1997.
- [28] W. PERRUQUETTI and J. P. BARBOT, « Sliding mode control in engineering, » Marcekdékker, Ed. NewYork, USA, 2002.
- [29] V.I. UTKIN, «Variable structure systems with sliding modes, » *IEEE Transaction On AutomaticControl*, vol. 12, no. 5, pp. 212-222, 1977.
- [30] J.J. SLOTINE, « Applied Non Linear Control. »: Prentice hall, 1992.
- [31] E. BARBASHIN, « Introduction to the theory of stability», English translation from russian: Wolters-Noordho Publishing, Ed., 1970.
- [32] V.I. UTKIN , « Sliding mode control and optimization, Springer-Verlag, Ed., 1992.
- [33] H. SIRA-RAMIREZ, « Sliding motions in bilinear switched networks, » *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 34, no. 8, pp. 919-933, 1987.
- [34] M. MITCHELLE, «Tricks of the Trade: Understanding the Right-Half-Plane Zero in Small-Signal DC-DC Converter Models, »*IEEE Power Electronics Society NEWSLETTER*, no. 1, 2001.
- [35] A.J. FORSYTH and S.V. MOLLOV, « Modelling and control of DC-DC converters, » *Power Engineering Journal*, vol. 12, no. 5, 1998.
- [36] F. FOREST, J.P. FERRIEUX, « Alimentations à découpage convertisseurs à résonance» 3rd ed: Dunod ,1999.
- [37] D. VIET, « Conception d'une interface électronique de puissance pour pile à combustible» Université Joseph Fourier, Grenoble, Thèse de doctorat 2006.