

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA Bejaïa
Faculté de technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master en
Électrotechnique option Energies Renouvelables*

Thème

Gestion de puissance d'un Système Hybride

Présenté par :

Mr : KHAMTACHE Hamza

Mr : MOALI Lamine

Devant le jury :

Mr: MEZIANLS

M^{me} : RAHRAH.K

Encadré par :

Mr : REKIOUA.T

Co-Encadré par :

Mr : MEBARKI.N



Année universitaire
2016/2017

Remerciements

Ce mémoire a été réalisé à Bejaia, dans le laboratoire de recherche (L.T.I.I) de l'université A-Mira campus Targa Ouzemour, faculté de technologie département de génie électrique.

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui ce Travail a pu être réalisé.

*Merci à nos parents d'avoir su nous écouter et nous motiver.
Merci à l'ensemble de nos amis(e), qui ont été là pendant les périodes de doute et de stress.*

Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promoteur Mr REKIOUA.T professeur à l'université de Béjaia pour avoir accepté de nous encadrer, et pour le thème qu'il nous a proposé.

Nous remercierons particulièrement notre Co-promoteur Mr Mebarki.N pour son aide précieuse, ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier Mr AZZI.H, ainsi que Mme MOUKRANI.Z, pour l'aide qu'ils nous ont apporté aussi bien sur le plan moral que travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

A toutes personnes ayant contribués de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.

Merci à vous qui allez lire ce mémoire ☺



Table Des Matières



Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Etat d'art des véhicules hybride

Introduction	1
I. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides (SEH)	1
I.1. Description d'un système d'énergie hybride (SEH)	1
I.1.1 Architectures des systèmes d'énergie hybrides (SEH)	1
a) Architecture à bus à courant continu(CC)	2
b) Architecture mixte à bus à CC/CA	2
I.1.2 Les convertisseurs statiques dans les SEH	4
I.1.3 Classification des SEH	4
I.1.4 Description de la gestion de puissance d'un SEH	5
I.1.5 L'importance de la gestion de puissance dans le système hybride	5
I.2 Généralités sur les différentes sources utilisables pour l'hybridation	6
I.2.1 L'énergie solaire	6
I.2.2 Historique.....	6
I.2.3 L'énergie solaire photovoltaïque	6
I.2.4 La cellule photovoltaïque	7
I.2.5 L'effet photovoltaïque	7
I.2.6 Principe de fonctionnement	8
I.2.7 Les différentes technologies	9
I.2.8 Comparatif des différentes technologies	9
I.2.9 Générateur photovoltaïque	12
I.2.10 Caractérisation des panneaux photovoltaïques	12
I.2.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV	13
I.3. Pile à combustible	13

I.3.1 La pile à combustible : historique et applications	14
I.3.2 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)	16
I.3.2.1 Principe de fonctionnement	16
I.3.2.2 La cellule	17
I.3.2.3 Les plaques bipolaires	18
I.3.2.4 Membranes polymères ioniques	18
I.3.2.5 Electrodes	18
I.3.3 Caractéristique électrique de la pile à combustible	19
I.3.4 Avantages et inconvénients de la PAC	20
I.4 Etat de l'Art des éléments de Stockage	21
I.4.1 Les différents types de stockage	21
I.4.1.1 Stockage à long terme	21
a. Les Batteries	21
a.1 Caractérisation des accumulateurs électriques	22
a.2 Différent type d'accumulateurs	23
I.4.1.2 Stockage à court terme	24
b. Les super condensateurs	24
b.1 Généralités sur les super condensateurs	24
b.2 Structure et fonctionnement des super condensateurs	25
b.3 Principe de fonctionnement des super condensateurs	25
I.4.1.3 Comparaison entre les batteries et le super condensateur	26
Conclusion	27

CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne de traction

Introduction.....	28
-------------------	----

II.1 Modélisation de la source hybride	28
II.1.1 Modélisation de la pile à combustible	28
II.1.1.1 Caractéristique électrique de la pile à combustible	28
a) polarisation d'activation	29
b) polarisation ohmique	30
c) polarisation de concentration	31
II.1.2 Modélisation de la chaine de production photovoltaïque	33
II.1.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque	33
a. Modèle de la cellule solaire	34
b. Les Modèles mathématiques	34
c. Modèle à une diode	34
II.1.2.2 Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale	36
a. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	36
II.1.2.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	38
a. Hacheur survolteur	38
II.1.3 Modélisation des dispositifs de stockage	39
II.1.3.1 Batterie	39
a. Modélisation de la capacité C_{batt}	40
a.1 Equations de la tension de décharge	41
a.2 Equations de la tension de charge	42
II.1.3.2 Super condensateur	42
II.1.3.3 Hacheur parallèle réversible en courant	43
II.1.3.4 Modélisation de la MSAP	44
a. Modélisation dans le repère triphasé	45
a.1 Equations Magnétiques	45

a.2 Equations électriques	46
a.3 Equation Mécanique	46
b. Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectoriel).....	47
b.1 Modélisation dans le repère diphasé (d,q)	47
II.1.3.5 Stratégie de commande du MSAP	48
a. Commande Vectorielle.....	48
a.1 Contrôle du courant	48
a.2 Contrôle de la vitesse	50
II.1.3.6 Modélisation de l'onduleur triphasé	50
a. L'onduleur de tension	51
II.1.3.7 Modélisation du véhicule électrique	53
Conclusion	55

CHAPITRE III : Dimensionnement et stratégie de gestion en puissance du système

etudie

Introduction	56
III. Dimensionnement	56
III.1. Démarche globale de dimensionnement	56
III.2. Dimensionnement d'un véhicule électrique hybride	57
a. Situations de conduite	57
b. Critères énergétiques.....	58
c. Problème de la masse du véhicule	58
III.3. Problème de choix entre la batterie et le super condensateur	58
III.4. Composition du véhicule et dimensionnement	58
III.4.1. Dimensionnement de la pile à combustible.....	59

III.4.2. Dimensionnement du GPV.....	60
III.4.3. Détermination des paramètres du modèle photovoltaïque	61
III.4.4. Détermination des paramètres du modèle de la pile à combustible.....	61
III.4.5. Caractéristiques du véhicule.....	61
III.4.6. Dimensionnement des super condensateurs	62
III.4.7. Caractéristiques des batterie	63
III.5 Stratégie de commande	63
III.5.1. Description du gestionnaire d'énergie.....	63
III.5.2. La source secondaire d'énergie	64
III.5.2.1. Principe d'hybridation des sources secondaire d'énergie	64
III.5.3. Présentation de la méthode de gestion.....	65
III.5.3.1. Différents modes d'opérations du groupe motopropulseur dans un VH.....	65
a. Modes de traction.....	65
b. Modes de freinage	66
c. Modes d'arrêt	66
III.5.3.2. L'organigramme de gestion d'énergie	66
III.5.3.3. Mode fonctionnement du système	69
III.5.3.4. Description du modèle de simulation.....	70
Conclusion	71

CHAPITRE IV: Résultats de simulation

Introduction.....	72
IV.1. Simulation générale appliqué au système global de véhicule à Pile à combustible	72
IV.2. Résultats de simulation	74
IV.2.1 Mode traction	78

IV.2.2 Mode freinage	79
IV.2.3 Mode arrêt	79
IV.2.4 Autre résultats.....	80
IV.3 Conclusion	81
Conclusion générale	82

Tables des figures

Fig. I.1 : Configuration du SEH à bus continu	2
Fig. I.2 : Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA	3
Fig. I.3 : Représentation d'une cellule photovoltaïque.....	7
Fig. I.4 : L'effet photovoltaïque.....	8
Fig. I.5 : Cellule, module, panneau et champ PV.....	12
Fig.I.6 : Caractéristiques des panneaux photovoltaïques.....	12
Fig. I.7 : Expérience de sir W. Grove en 1839.....	14
Fig. I.8 : Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC.	17
Fig. I.9 : Schéma d'une cellule de PEMFC.....	17
Fig. I.10 : Zones de triple contact à l'anode.....	19
Fig. I.11 : Fonctionnement d'une batterie.....	22
Fig. I.12 : Structure d'un super condensateur.....	25
Fig. I.13 : Schéma représentatif d'un super condensateur.....	25
Fig. I.14 : Etat déchargé.....	26
Fig. I.15 : Etat en charge.....	26
Fig.II.1 : Schémas équivalent d'une PEMFC.....	29
Fig. II.2 : Schéma bloc de la pile à combustible.....	32
Fig. II.3 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEMFC.....	33
Fig. II.4 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT.....	33
Fig.II.5 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.....	34
Fig. II.6 : Caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) dans les conditions standards.....	35
Fig. II.7 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.....	36
Fig. II.8 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	37
Fig. II.9 : Caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) avec commande MPPT.....	37
Fig.II.10 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	38
Fig. II.11 : Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	38
Fig. II.12 : Schéma équivalent de la batterie CIEMAT.....	40
Fig. II.13 : Schéma électrique équivalent d'un super condensateur.....	42
Fig. II.14 : Hacheur parallèle réversible en courant.....	44

Tables des figures

Fig. II.15 : Schéma bloc de la régulation de I_d	49
Fig. II.16 : Schéma bloc de la régulation de I_q	49
Fig. II.17 : Schéma d'un onduleur de tension.....	51
Fig. II.18 : Schéma bloc de la MSAP avec commande vectorielle.....	52
Fig. II.19 : Représentation des forces agissant sur le véhicule.	53
Fig. III.1 : Caractéristiques du super condensateur utilisé.....	62
Fig. III.2 : Structure du système hybride avec stockage hybride étudié.....	63
Fig. III.3 : Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides.....	64
Fig. III.4 : Organigramme de la mise en charge des éléments de stockage par le PV	67
Fig. III.5 : Organigramme de gestion d'énergie.....	68
Fig. III.6 : Schéma bloc global de la gestion en puissance du système étudié	70
Fig. IV.1 : Schéma globale de simulation.....	73
Fig. IV.2 : Vitesse de référence en km/h	74
Fig. IV.3 : Vitesse du moteur électrique en km/h	75
Fig. IV.4 : Profil de la puissance demandé.....	75
Fig. IV.5 : Puissance délivrée par la pile à combustible (a)	76
Fig. IV.6 : Puissance délivrée par les panneaux PV (b)	76
Fig. IV.7 : Puissance délivrée par la batterie (c)	76
Fig. IV.8 : Puissance du super-condensateur (d).....	77
Fig. IV.9 : Tension au niveau du bus continu	78
Fig. IV.10 : Profil des puissances durant le mode de traction	78
Fig. IV.11 : Profil des puissances durant le mode de freinage.....	79
Fig. IV.12 : Profil de toutes les puissances	80
Fig. IV.13 : Etat de charge des super-condensateurs.....	80
Fig. IV.14 : Etat de charge des batteries.....	81

Liste des tableaux

Tab.I.1 : Classification des SEH par gamme de puissance.....	4
Tab.I.2 : Caractéristiques des différents types de PAC.....	15
Tab.I.3 : caractéristiques techniques des principaux accumulateurs.....	23
Tab.I.4 : Les différents types de super condensateurs	24
Tab.I.5 : Résumé les performances du super-condensateur et de la batterie.....	27
Tab.III.1 : Caractéristiques du panneau utilisé.....	60
Tab.III.2 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV utilisé.....	61
Tab.III.3 : Principales caractéristiques de la PAC	61
Tab.III.4 : Principales caractéristiques du VEH.....	61
Tab.III.5 : Caractéristiques de la batterie utilisée.....	63
Tab.III.6 : Flux énergétiques au sein du groupe motopulseur.....	70

Nomenclature

LTII : Laboratoire de technologie industrielle et de l'information.

GPV : Générateur photovoltaïque

Esref : représentent l'éclairement sous conditions STC

Tjref : représentent la température sous conditions STC.

Tj : température de jonction.

Isat : courant inverse de saturation de la diode.

q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

A : coefficient d'idéalité de la cellule.

Ns : nombre de cellules connectées en série.

Np : nombre de cellules connectées en parallèle.

Eg : énergie de gap.

P4 : paramètre constant.

SSE : Système de stockage Electrique/Energie

SC : Super Condensateur

SOC : State of charge (en français EDC : Etat de charge).

DOD : Depth of Discharge (en français EDD : Etat de Decharge).

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (en français transistor bipolaire à grille isolée).

PAC : Pile à combustible.

AFC : Alkaline fuel cells en français piles alcalines.

PEMFC : piles à membrane échangeuse de protons.

PAFC : phosphoric acid fuel cells en français piles à acide phosphorique.

SOFC : Solid oxide fuel cells en français piles à électrolyte solide.

DMFC : direct-methanol fuel cell en français piles à méthanol direct.

MCFC : Molten-carbonate fuel cell en français piles à carbonate fondu.

ENernst : La tension instantanée de Nernst.

Vact : Les pertes d'activation.

Vohm : Les pertes ohmiques.

Vconc : Pertes de concentration.

T : Température opératoire absolue de la pile (K).

Nomenclature

$P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

P_{cath} : La pression de l'oxygène à la cathode,

P_{anode} : Est la pression de l'hydrogène à l'anode,

$\chi_{H_2O}^{Sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau

m : la masse totale du véhicule en [kg] ;

g : la gravité en [m/s^2] ;

f_{ro} : la constante de la force de résistance due au déplacement ;

ρ_{air} : la densité de l'air en [kg/m^3] ;

A_f : la surface frontale du véhicule [m^2] ;

C_d : le coefficient de trainée aérodynamique ;

V_e : la vitesse du véhicule en [m/s] ;

β : l'angle de pente de la route en [rad].

P_{ME} : Puissance de la machine électrique.

P_{SYSPAC} : Puissance du système PAC.

P_{SSE} : Puissance de source secondaire d'énergie.

VEH : Véhicule électrique hybride

ME : Machine électrique

MSAP : Machine Synchrone à Aiment permanent

SEH : Système Electrique Hybride

CA : courant alternatif

CC : courant continu

f.e.m : force électromotrice



Introduction Générale



Introduction générale

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable pour la production de l'énergie électrique, la combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'intermittence des énergies renouvelables posent des problèmes d'approvisionnement. Dans ce cas, au moins un élément de stockage de l'énergie devient alors obligatoire pour assurer la continuité de la fourniture d'électricité. Ces sources d'énergies renouvelables et les éléments de stockage associés constituent ainsi un système hybride. Le terme « Système d'Energie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. [1]

Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules dit les véhicules tout électriques. Ces derniers ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels ; d'où le développement d'un autre concept : les véhicules électriques hybrides. [2]

Les Systèmes d'Energies Hybrides sont généralement élaborés pour les systèmes stationnaires ou embarqués ayant des besoins ponctuels de puissance, l'association d'une source d'énergie (pile à combustible, panneaux photovoltaïques, batteries, etc.) avec une source de puissance (super condensateurs, volant d'inertie, etc.) Permet de bénéficier de l'apport de chacune en les sollicitant suivant leurs caractéristiques et le profil de mission à satisfaire. [3]

Notre travail comporte 4 parties.

Dans le premier chapitre, nous avons donné dans un premier lieu une brève présentation des éléments de notre système hybride étudié, qui comprend un générateur photovoltaïque (PV) et une pile à combustible (PEMFC), associés à l'ensemble batteries-super condensateur. L'ensemble de ces sources sera orné par une gestion de puissance permettant une meilleure exploitation du système dédié à la traction électrique, donc nous avons commencé par un bref

historique sur les sources, l'énoncé de leur principe de fonctionnement, champs d'application et leurs avantages et inconvénients.

Le second chapitre est consacré quant à lui, à la modélisation statique des différents éléments qui composent notre système notamment la pile à combustible, panneau photovoltaïque avec une commande MPPT basé la méthode perturbation et observation (P&O), le super condensateur, la batterie ainsi que le véhicule électrique et les éléments d'électroniques de puissance (convertisseur DC/DC et convertisseur DC/AC) utilisés.

Dans le troisième chapitre un dimensionnement et une description du gestionnaire d'énergie est présentée au début, car l'ajout d'un système de supervision est indispensable vu la complexité du système d'énergie hybride étudié, et pour une meilleure intégration des sources interconnectées, il faut non seulement des systèmes de commandes individuels mais aussi un système global pour gérer la répartition de ces puissances, et c'est là que réside le point le plus rude du système hybride. Le contrôleur d'énergie proposé est basé sur des règles qui permettent une permutation souple des différents modes de fonctionnement afin de répondre aux besoins demandée par la charge et la protection des équipements.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation et interprétation des résultats de simulation.

<<Le travail est fait au niveau de Laboratoire de recherche L.T.I.I.>>



Chapitre I

Etat d'art sur les véhicules hybride



Introduction

Par définition, une source hybride dite multi-sources, est le résultat de la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie. L'hybridation est un sujet de recherche depuis les années 90. C'est dans ce contexte que vient s'inscrire notre étude.

Dans ce chapitre. Nous commencerons par présenter brièvement les différents constituants du système étudié, notamment les différentes configurations que peuvent prendre les sources d'énergies d'un système électrique hybride. Puis nous présenterons les différentes sources utilisées, à savoir le générateur photovoltaïque, la pile à combustible, ainsi que sur les unités de stockage (batteries et super condensateur) dans le but d'assurer une alimentation sans interruption du véhicule électrique.

I. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides (SEH)

I.1 Description d'un système d'énergie hybride (SEH)

Un système multi-sources ou hybride est composé d'au moins deux sources énergétiques reliées entre elles par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fournis par chacune des différentes sources [4]. Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en fournissant une bonne qualité. [5]

I.1.1 Architectures des systèmes d'énergie hybrides (SEH)

Les sources d'énergie renouvelables peuvent être connectées au bus à courant alternatif(CA) ou à courant continu(CC) en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de composant de l'électronique de puissance : onduleurs, redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. En plus de la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires.

Les générateurs électriques d'un système hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte, deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitué de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage.[6]

a) Architecture à bus à courant continu(CC)

Dans le système hybride présenté dans la Figure 1, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu.[2]

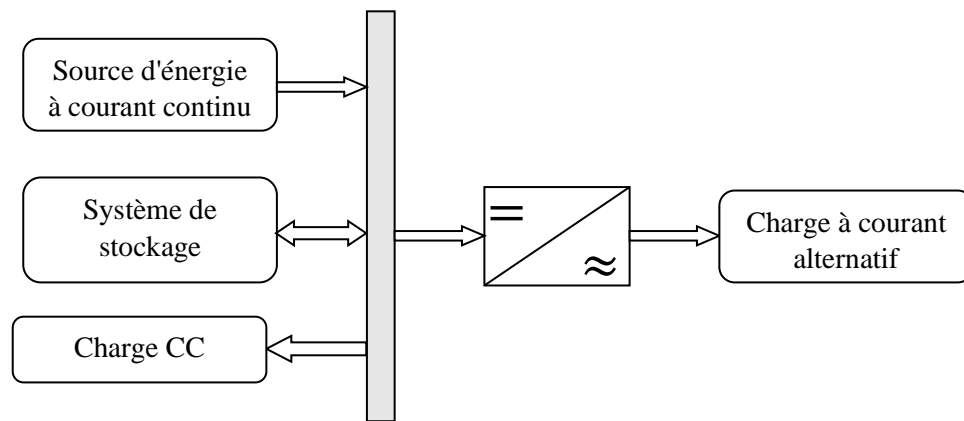


Fig. I.1 : Configuration du SEH à bus continu

Avantage :

- +La connexion de toutes les sources à un bus à CC simplifie le système de commande.
- + Le panneau photovoltaïque peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance maximale pendant la demande en puissance.

Inconvénients :

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les panneaux photovoltaïques et la pile à combustible ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

b) Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la (Fig. I.2). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration, les sources d'énergies peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent

être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur). [5] Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantage :

- + Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- + La possibilité de réduire la puissance nominale de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients :

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions de sortie du générateur CA).

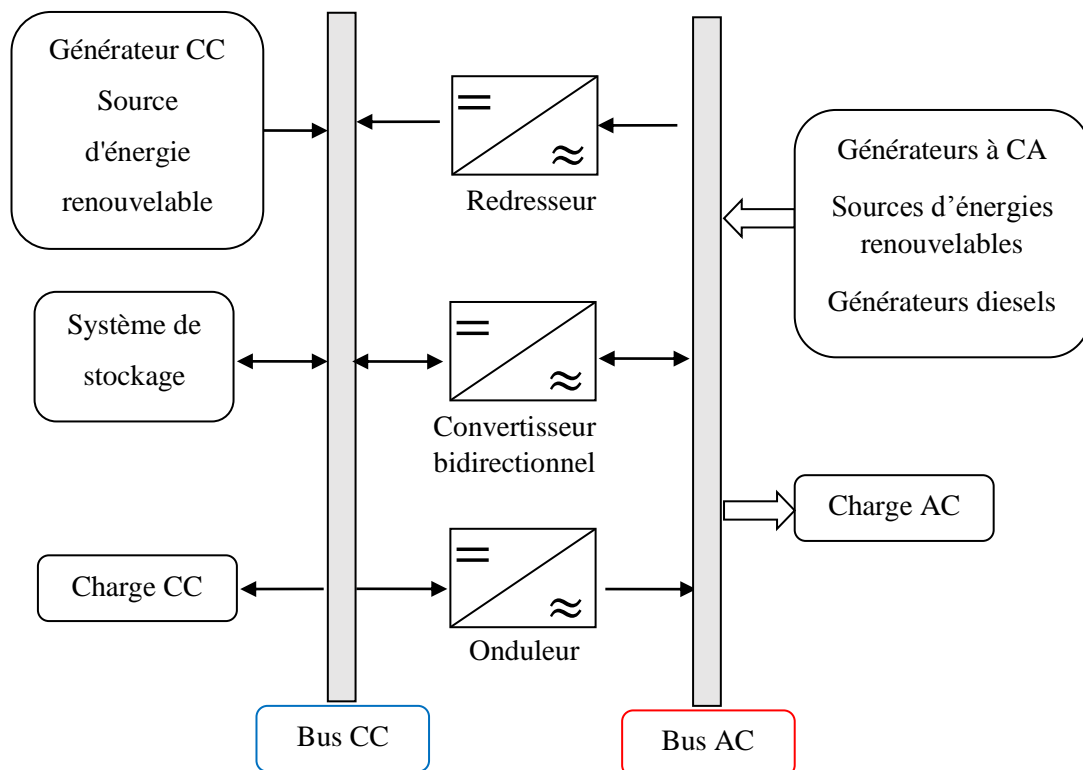


Fig. I.2 : Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA

I.1.2 Les convertisseurs statiques dans les SEH

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger les batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH à savoir les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.[7]

- Les redresseurs réalisant la conversion CA/CC. Dans un SHE, ils sont souvent utilisés pour charge les batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simple, pas chers et a bon rendement.
- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge, l'ondeleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner.
- Les hacheurs, convertisseurs CC/CC utilisés pour adapter la tension entre deux sources différentes.

I.1.3 Classification des SEH

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de Classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tab. I.1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.[6]

PUISSANCE DU SEH [KW]	APPLICATION
Faible :< 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées
Moyenne : 10 - 250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande :> 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Tab. I.1 : Classification des SEH par gamme de puissance [5]

I.1.4 Description de la gestion de puissance d'un SEH

Le problème de la gestion de l'énergie consiste à trouver la meilleure répartition des puissances entre les sources d'énergie du système. La présence d'un système de stockage électrique (SSE) introduit des degrés de liberté supplémentaires dans la fourniture de la puissance demandée. Mais cette répartition doit satisfaire la demande de puissance de la charge et respecter les contraintes de fonctionnement (puissance de la PAC, bornes de l'état de charge de la batterie). Plusieurs critères de performance peuvent intervenir dans le choix de cette répartition ; le critère le plus utilisé est la consommation du combustible (rayonnement pour les panneaux PV, hydrogène pour les PAC).[7]

I.1.5 L'importance de la gestion de puissance dans le système hybride

Il est important de noter qu'un dimensionnement optimal de la chaîne énergétique combiné à une gestion d'énergie efficace permet de concevoir des systèmes hybrides intelligents et efficaces à moindre coût. Afin de parvenir à cette efficacité, Plusieurs technologies et techniques de gestion et de dimensionnement ont été adoptées afin d'améliorer ses performances .La complexité des systèmes hybrides rend la prise de décision difficile. Toutefois, une stratégie de contrôle intelligente est nécessaire pour gérer le comportement et la répartition de la puissance du système multi-source ces sources énergétiques doivent alimenter la charge suivant ses besoins en respectant les différentes contraintes liées au fonctionnement des sources (production, puissance maximale, rendement, pertes énergétiques) et des éléments de stockage (état de charge, dynamique, vieillissement). Cette gestion d'énergie s'effectue par l'intermédiaire de l'électronique de puissance qui assure la répartition des flux entre les sources, les éléments de stockage et la charge, par le biais des convertisseurs. [8]

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du SEH doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources utilisées. Dans ce but, les sources du SEH étudié seront dimensionnées puis modélisées dans le travail visé pour notre projet de fin d'étude.

I.2 Généralités sur les différentes sources utilisables pour l'hybridation

I.2.1 L'énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante d'où la première énergie disponible en grande quantité sur la surface terrestre est l'énergie solaire, caractérisée par l'ensoleillement qui donne l'énergie fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée, en J/m^2 , et par l'irradiation solaire qui correspond à la puissance à un instant donné, en W/m^2 . [9]

I.2.2 Historique [10]

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- • **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide, c'est l'effet photovoltaïque.
- • **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- • **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- • **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- • **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'Université de Delaware.
- • **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

I.2.3 L'énergie solaire photovoltaïque

Désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire(ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [10]

I.2.4 La cellule photovoltaïque :[10-11]

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ».

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette Zone est donc dopée positivement (zone P),
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

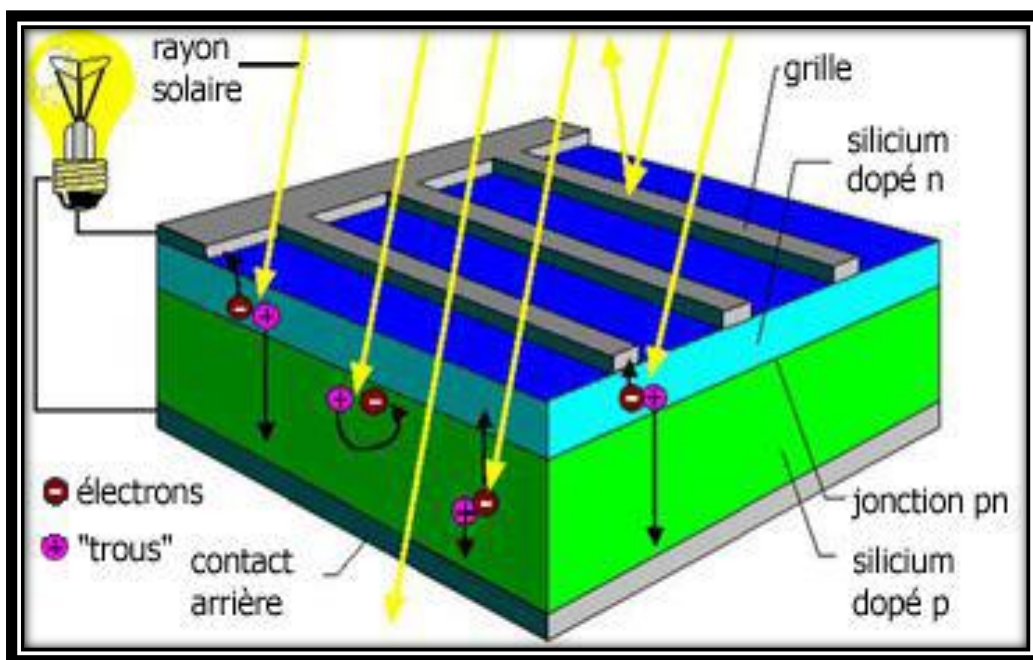


Fig. I.3 : Représentation d'une cellule photovoltaïque.

I.2.5 L'effet photovoltaïque

Utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du Transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type *n* et dopée de type *p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement

dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée. [12]

I.2.6 Principe de fonctionnement

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont « bombardés » par les photons constituant la Lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. [Voir la **fig. I.4**]

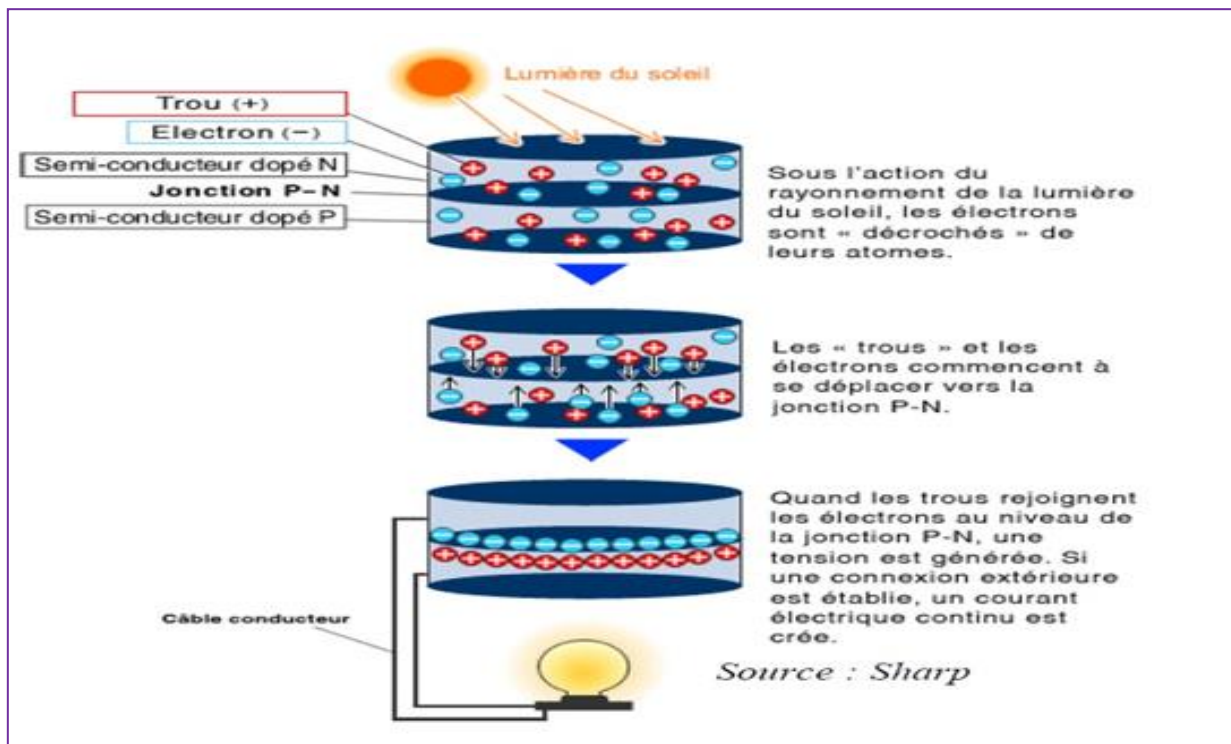
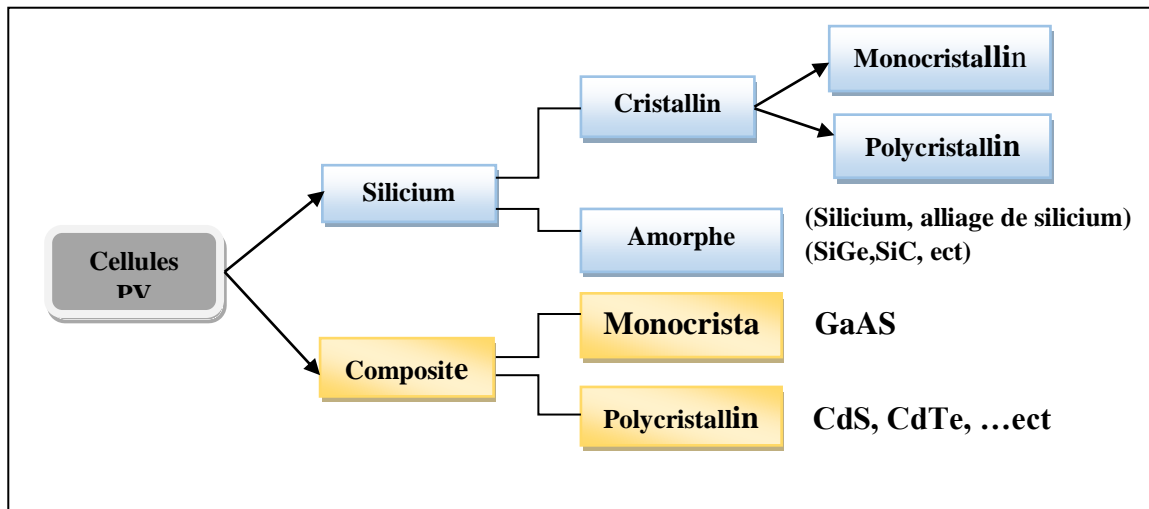


Fig. I.4 : l'effet photovoltaïque.

Lorsqu'une jonction P-N réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie.

I.2.7 Les différentes technologies


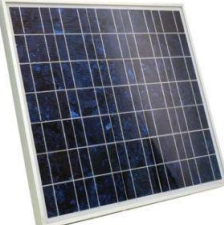
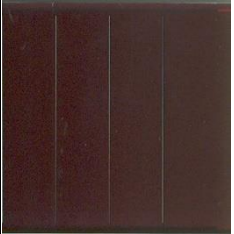
Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).



I.2.8 Comparatif des différentes technologies[10]

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly Cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...

Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<p>Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.</p> <p>* Fonctionnement si faible luminosité.</p> <p>* Fonctionnement par temps couvert.</p> <p>* Fonctionnement si ombrage partiel</p> <p>* La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</p>	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

<p>Les panneaux PV avec des cellules Monocristallines</p>		<p>sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.</p>
<p>Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines</p>		<p>sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.</p>
<p>Les modules photovoltaïques amorphes</p>		<p>ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première.</p>

I.2.9 Générateur photovoltaïque [13]

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

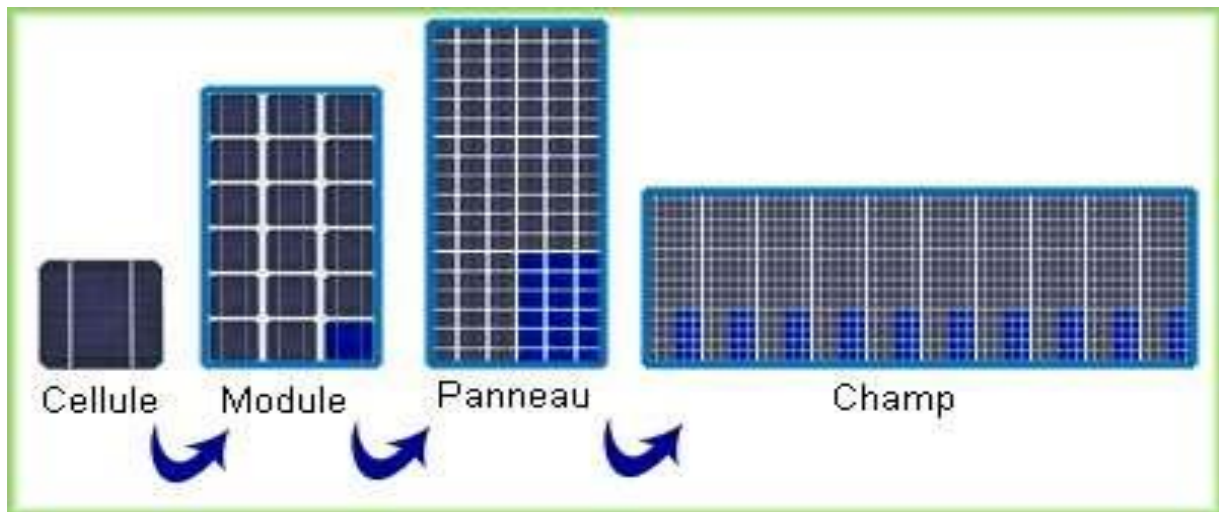


Fig. I.5 : cellule, module, panneau et champ PV.

I.2.10 Caractérisation des panneaux photovoltaïques

Le comportement d'un panneau photovoltaïque peut être décrit à travers ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension un exemple de courbe est présenté ci-dessous.

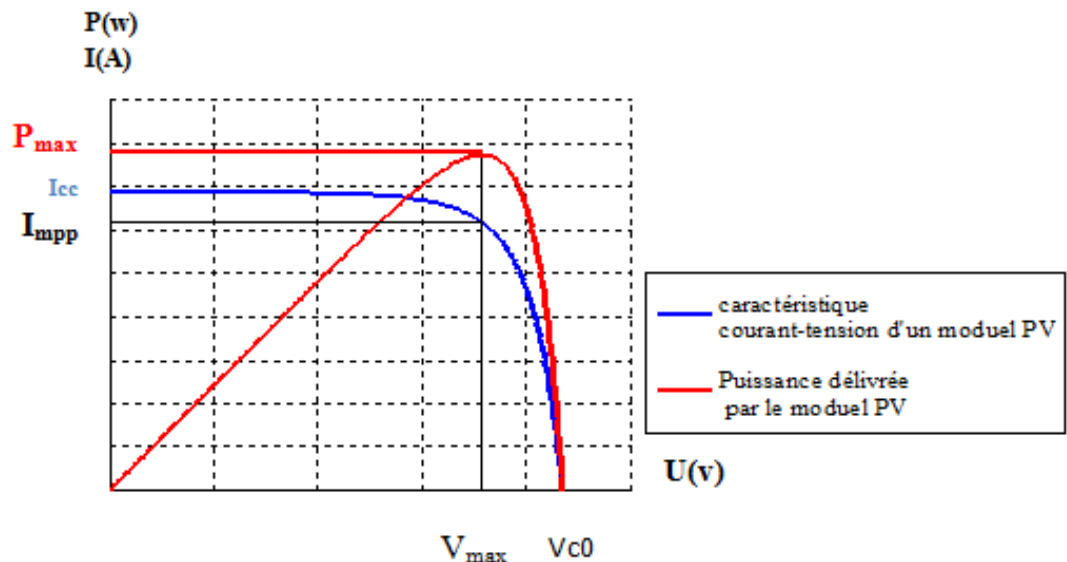


Fig. I.6 : caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

I.2.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV

➤ Avantages:

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ l'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

➤ Inconvénients

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ✓ Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- ✓ Pollution à la fabrication.

I.3 Pile à combustible

L'ensemble des technologies d'hydrogène, de la production à l'utilisation en passant par les technologies de stockage, de transport et de distribution de ce vecteur énergétique de futur, est appelé à jouer un rôle essentiel dans l'émergence d'une filière hydrogène majeure. Essentiellement utilisé en tant que gaz dans des procédés de chimie industrielle, l'hydrogène est aujourd'hui envisagé comme vecteur énergétique de grande échelle ; on parle <<d'hydrogène énergie>>. Du côté de l'utilisation finale, il pourra être associé aux piles à combustible.[14]

I.3.1 La pile à combustible : Historique et applications

La possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, appelée principe de l'électrolyse inverse, fut énoncée pour la première fois en 1802 par Sir Henry David. Partant de ce procédé, Sir William Grove expérimente en 1839 la première pile à combustible avec des électrodes en platine dans un milieu acide sulfurique dilué.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux : des PAC furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964. L'intérêt pour l'utilisation de cette technologie dans le domaine des transports remonte à 1973, date de la première crise pétrolière. En 1993 un bus à PAC est réalisé par l'entreprise Ballard en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz.[15]

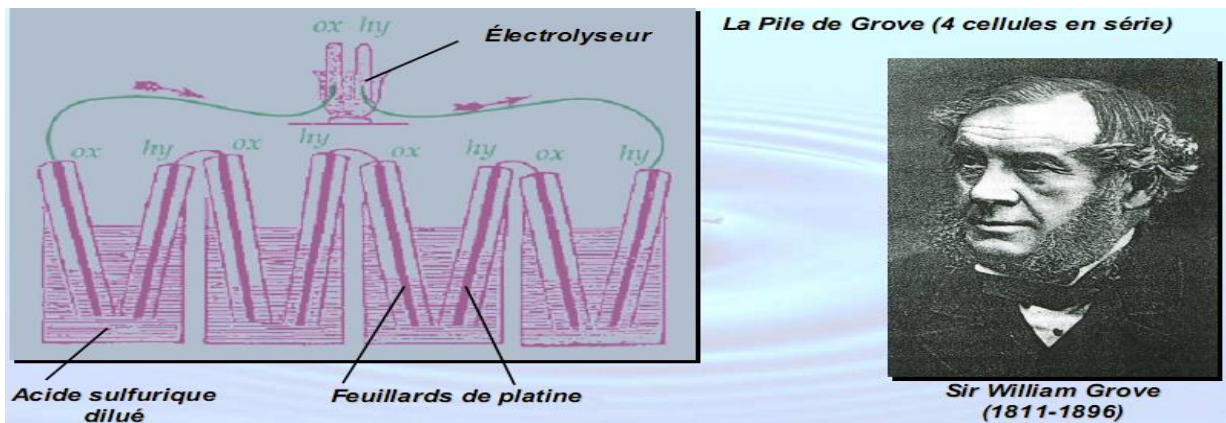


Fig. I.7 : Expérience de sir W. Grove en 1839.

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. [16] Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Solution alcaline KOH	membrane échangeuse de protons (MEP)	Acide phosphorique H_3PO_4	Mélange de Li_2CO_3 K_2CO_3 dans une matrice $LiAlO_2$	Oxyde de zircon ZrO_2 et yttrium Y_2O_3 (céramique)	MEP ou H_2SO_4
catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et oxyde de nickel	Cemet nickel zircone	platine
Charge mobile	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}	H^+
Température fonctionnement ($^{\circ}C$)	60-200	40-90	180-210	630-650	900-1000	70-100
Combustible	H_2	H_2 produit à partir d'hydrocarbures ou du méthanol	H_2 produit à partir d'hydrocarbures	H_2 produit à partir d'hydrocarbures CO_2	H_2 et CO produit à partir d'hydrocarbures	méthanol
Oxydants	O_2	air/ O_2	air/ O_2	air/ O_2	air/ O_2	air/ O_2
Rendement %	60 – 70	35-40	40	60	50-70	20-45
Applications	NASA	Véhicules	Install. Stationnaires (cogénération)	Install. Stationnaires (cogénération)	Install. Stationnaires (cogénération)	véhicules

Tab. I.2 : Caractéristiques des différents types de PAC

Parmi ces différents types de piles à combustible couramment développées, c'est la filière dite «à membrane échangeuse de protons » qui a été retenue par presque tous les acteurs de programmes automobiles dans le monde.[17]Généralement appelée PEMFC (pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell), elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (jusqu'au mégawatt), portables (jusqu'à 100 W) et transport (jusqu'à quelques centaines de kW). Est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Pour Plusieurs raisons expliquent ce choix : [18]

❖ 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.

❖ 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.

I.3.2 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

I.3.2.1 Principe de fonctionnement :

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. L'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation a lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux Réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte.[14] La cathode est alimentée en oxygène gazeux (ou plus généralement en air) et l'anode est alimentée en hydrogène gazeux. Les équations chimiques d'oxydoréductions sont les suivantes :

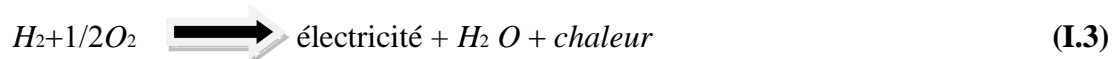
- Oxydation à l'anode :



- Réduction à la cathode:



- En combinant (1.1) et (1.2), la réaction globale est :



L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène (1.1). Les Protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinaient à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls

Produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur, faisant de la pile un tri-générateur.

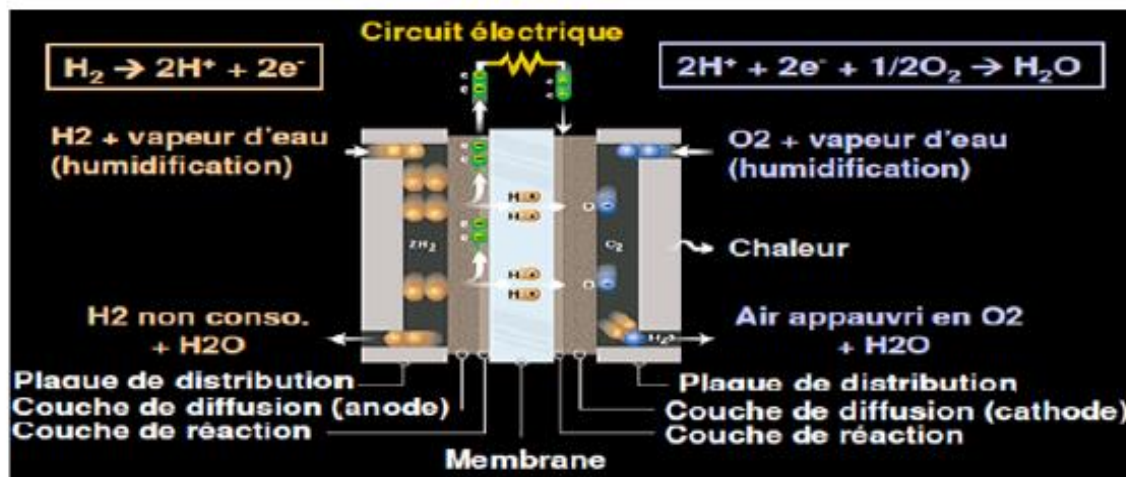


Fig. I.8 : Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC.[19]

I.3.2.2 La cellule

Les Piles à Combustible à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sont un type particulier de PAC dotée d'une membrane électrolyte solide acide en polymère (souvent du Nafion, polymère perfluoré sulfoné) permettant le transfert de protons de l'anode vers la cathode.[22] La cellule d'une PEMFC est constituée, de deux plaques bipolaires entourant un Assemblage Membrane Électrode (AME ou MEA pour Membrane Electrode Assembly).

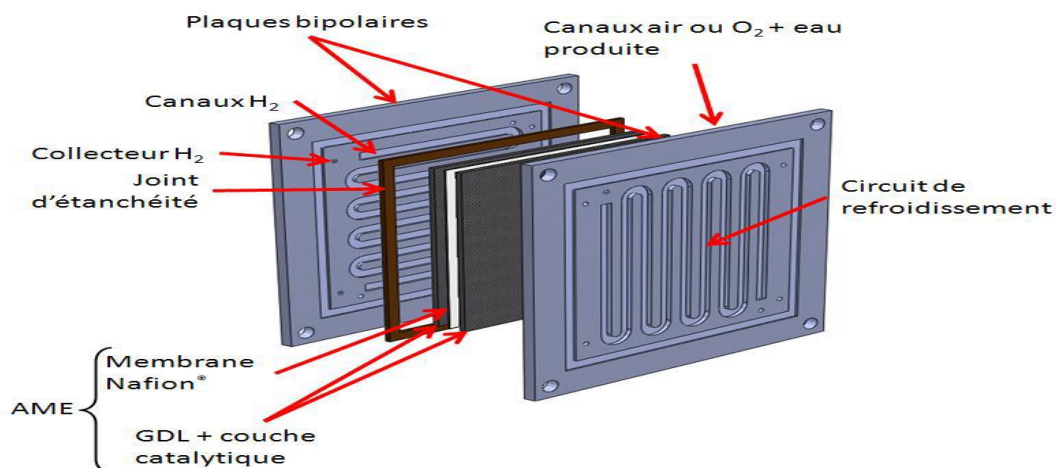


Fig. I.9 : Schéma d'une cellule de PEMFC.

I.3.2.3 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires remplissent 2 rôles. D'une part elles distribuent les gaz de manière uniforme à l'assemblage EME par le biais de fins canaux (**fig. I.9**). D'autre part, elles permettent la circulation d'un fluide de refroidissement pour refroidir la cellule élémentaire. [20] Les plaques bipolaires doivent être conductrices et résister à un environnement corrosif (par exemple, le graphite ou l'acier inoxydable sont utilisés).

I.3.2.4 Membranes polymères ioniques :

Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC. Leur importance est évidente, puisque ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction. Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique.

I.3.2.5 Electrodes

Les électrodes ont une triple fonction :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur

Les sites catalytiques cathodiques.

L'épaisseur des électrodes d'une PEMFC est de 10 à 30 μm . Elles se caractérisent par la présence de 3 constituants fondamentaux formant une zone de contact triple entre les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Le platine, compatible avec l'électrolyte acide et permettant d'obtenir des densités de courant importantes est le catalyseur de chaque demi-réaction. La

teneur en platine varie entre 0,01 et 1 mg/cm² d'électrode. Les particules de platine de 2 à 4 nm de diamètre, sont déposées sur un support carboné finement divisé assurant l'évacuation des électrons à l'anode et leur redistribution à la cathode. L'ensemble est imprégné du matériau utilisé comme électrolyte pour assurer la continuité ionique depuis les sites catalytiques anodiques vers les sites cathodiques. Les développements actuels concernant les électrodes ont pour objectifs principaux :

- la diminution de la quantité de platine nécessaire au bon fonctionnement de l'électrode (actuellement 0,2 g.cm⁻²),
- la réduction de leur sensibilité à l'empoisonnement au monoxyde de carbone (CO),
- l'élaboration de nouveaux matériaux catalytiques moins onéreux.

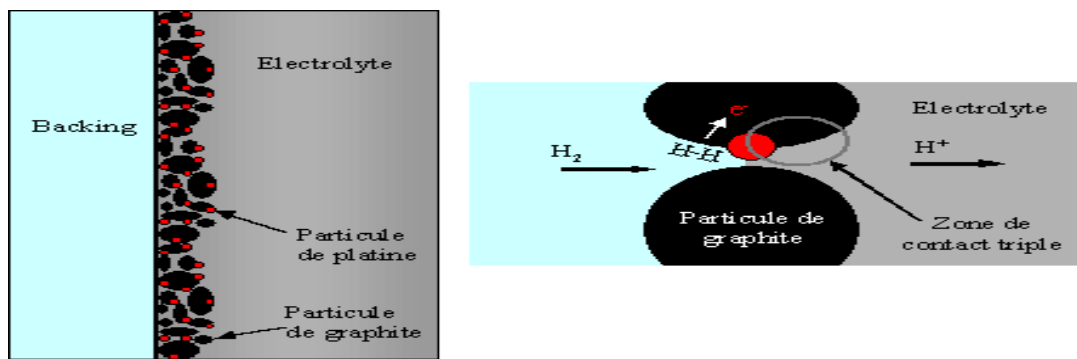


Fig. I.10 : Zones de triple contact à l'anode.

I.3.3 Caractéristique électrique de la pile à combustible :

La tension à vide de la cellule est en fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1.23 v (potentiel standard) pour des conditions standard de température et de pression (1atm, 25°C).en pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1v. La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible .elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane .La densité de courant i_{PAC} (A/cm²) est défini par :

$$I_{PAC} = \frac{i_{pac}}{a_{cell}} \quad (I.4)$$

Avec I_{PAC} le courant de la pile à combustible et A_{cell} la surface active d'une membrane.

I.3.4 Avantages et inconvénients de la PAC [21]

Avantage

➤ **Rendement**

Le haut rendement énergétique même à charge partielle. Le rendement électrique dépend du type de pile. Il varie entre 40 % et 70 % sans tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur, humidificateur et convertisseur) qui font baisser ces valeurs. Dans les applications de transport, le rendement d'une pile PEM est compris entre 38 % (reformage du méthanol) et 50 % (hydrogène pur). Cependant, dans les applications stationnaires, le rendement énergétique global est bien plus élevé car l'énergie non convertie sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. On peut atteindre des rendements globaux de 85 % à 90 %.

➤ **Silencieuses**

Les faibles émissions sonores car lors de leur fonctionnement,

➤ **Pollution**

Les faibles émissions gazeuses (selon le carburant utilisé et son origine). Les piles fonctionnant à l'hydrogène pur ne produisent rien tandis que celles utilisant du méthanol ou de l'éthanol produisent de faibles quantités de CO₂, de CH₄ et de CO.

➤ **Modularité**

Les piles sont constituées de cellules élémentaire mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible d'adapter le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 KW et plusieurs MW.

➤ **Température de fonctionnement**

Les diverses températures de fonctionnement. Les PAC possèdent une large plage de températures de fonctionnement selon leurs types. Ceci permet de couvrir plusieurs domaines d'application. Par exemple, les piles de faible température sont utilisées pour les applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite. En revanche, les piles à haute température sont plus adéquates aux applications domestiques où la chaleur dégagée est utilisée pour l'eau chaude et le chauffage. Elles conviennent aussi aux applications industrielles où la chaleur produite est exploitée pour un couplage avec une turbine.

➤ **L'absence de parties rotatives**

Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible et aucun mouvement donc, pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile.

Inconvénients

En effet, parmi les problèmes principaux faisant obstacle au développement des piles à combustibles.

➤ Le coût

Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.

➤ Duré de vie

La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :

-Automobile : quelque millier d'heures

-Stationnaire : au moins 40 000 heures (environ 4.6 ans).

➤ Gestion thermique

Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose donc un système de refroidissement.

I.4 Etat de l'Art des éléments de Stockage

I.4.1 Les différents types de stockage

I.4.1.1 Stockage à long terme

a. Les Batteries [8]

Une batterie est un accumulateur électrochimique qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques aux électrodes. Ces dernières assurent la conversion de l'énergie Électrique en un processus chimique réversible. L'accumulateur électrochimique a la caractéristique intéressante de fournir une tension à ses bornes peu dépendante de sa charge. Cette tension est de l'ordre de quelques volts pour un élément. Comme en pratique des tensions plus élevées, notamment 12V, 24V voire même 48 V et plus, il suffit, pour augmenter la tension, de raccorder des éléments du même type en série au sein d'une batterie d'accumulateurs. Son principe de fonctionnement est basé sur la conversion et la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique par une réaction électrochimique. Elle est constituée d'une ou de plusieurs cellules montées en série, contenant chacune une électrode positive, une électrode négative, un séparateur et un électrolyte. [15],(Fig. I.11).

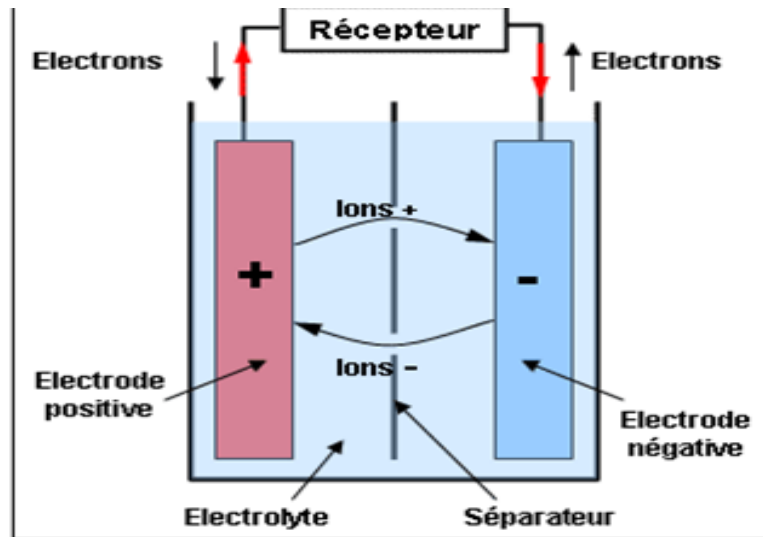


Fig. I.11 : Fonctionnement d'une batterie.

a.1 Caractérisation des accumulateurs électriques

Un accumulateur électrique est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Nous citons ci-dessous ses grandeurs caractéristiques :

- La tension aux bornes est la tension fournie au cours de la décharge. Elle dépend de l'enthalpie libre de la réaction totale, de la cinétique des réactions à chaque électrode et de la résistance de l'électrolyte.
- La capacité de charge électrique, souvent appelée capacité de l'accumulateur est la charge électrique que peut fournir l'accumulateur complètement chargé pendant un cycle complet de décharge.
- L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est délivrée.
- La densité d'énergie, exprimé en Wh/kg, est une des caractéristiques importantes d'un accumulateur, elle correspond à la quantité d'énergie qu'il peut restituer par rapport à sa masse.
- La densité de puissance est la puissance que fournit la pile par unité de masse. La puissance fournie dépend du régime de décharge.[15]

a.2 Différent type d'accumulateurs [23]

Caractéristique	Type d'accumulateur			
	Plomb-acide	Nickel-cadmium	Lithium-ion	Lithium-polymère
Densité d'énergie massique (Wh/kg)	30-50	45-80	150-190	150-190
densité d'énergie (Wh/l)	75-120	80-150	220-330	220-330
Puissance en pente (Wh/kg)	Jusqu'à 700	■	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Température de fonctionnement (c)	De -20 à 60	De -40 à 60	De -20 à 60	De 0 à 60
tension nominal d'un élément (v)	2	1.2	3.6	3.7
Auto décharge par mois(%)	5	20	10	10
Nombre de cycle (charge/décharge)	De 400 à 600 (pour les étanche) 1200(pour les tubulaires)	2000	De 500 à 1000	De 200 à 300
Domaine d'application	Stationnaire (secoure, télécom.)	Transport (démarrage traction)	Portable (téléphone ordinateur...)	■
Avantages	Faible cout	Fiabilité performantes à froid	Excellente énergie et puissance	Très mince
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Relativement basse énergie toxicité	Sécurité des gros éléments et le cout	Performance à froid et le cout
Cout (euro/h)	De 200 à 250(pour les étanches) 200(pour les tubulaires)	600	2000	De 1500 à 2000

Tab. I.3 : Caractéristiques techniques des principaux accumulateurs [12]

I.4.1.2 Stockage à court terme

b. Les super condensateurs

b.1 Généralités sur les super condensateurs [15]

Un super-condensateur appelé aussi super-capacité ou condensateur à double couche, stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique.

L'histoire de ce composant débute avec la découverte du phénomène capacitif par Hermann Von Helmholtz en 1853. Les premiers super-condensateurs étaient commercialisés par NEC dans les années 70, sous la dénomination de super-capacitor.[24]

Avec les super-condensateurs, il est possible d'obtenir des capacités surfaciques élevées et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacité. Ceci fait des super-condensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, ces dernières peuvent atteindre des tensions et des courants de sortie élevés en fonction de leurs structures série-parallèle de plusieurs cellules et en fonction de leurs matériaux. Le (Tab I.4) donne une classification des super-condensateurs, ils se différencient par leurs matériaux d'électrodes et leurs électrolytes.

Electrode	Charbon actif		Matériau métallique	Polymère conducteur
Electrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Moyen de stockage de l'énergie	Condensateur de double couche		Double couche + processus faradiques réversibles	
Energie massique (Wh/kg)	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique (kW/kg)	1 à 10	0.1 à 2	10 à 100	100
Capacité massique (F/g)	120 à 180	60 à 100	≈ 600	200 à 400
Tension (V)	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5
Cyclabilité	> 100000	> 100000	> 100000	10000 à 100000

Tab. I.4 : Les différents types de super condensateurs [24]

b.2 Structure et fonctionnement des super condensateurs [25]

La structure élémentaire d'un super condensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un zéro électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (**Fig. I.12**). L'assemblage de l'ensemble est réalisé comme pour les condensateurs classiques.

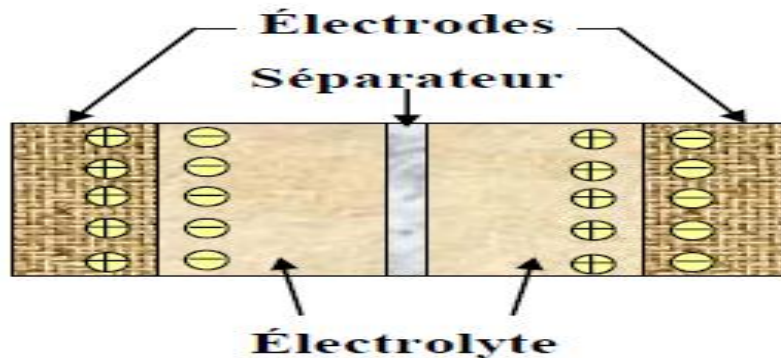


Fig. I.12 : Structure d'un super condensateur.

Un super condensateur peuvent être schématisés par deux capacités représentatives des Charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (**Fig. I.13**).[26]

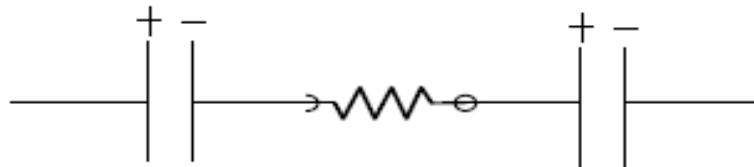


Fig. I.13 : Schéma représentatif d'un super condensateur.

b.3 Principe de fonctionnement des super condensateurs [18]

Le principe général de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte.

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge) :

➤ Etat déchargé

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q_{el}) que du côté de l'électrolyte (q_{ion}). Q_{el} et q_{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électro neutralité impose $q_{el} = -q_{ion}$.

Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres). (Fig. I.14)

➤ Etat en charge

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du super condensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée.

L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel. (Fig. I.15)

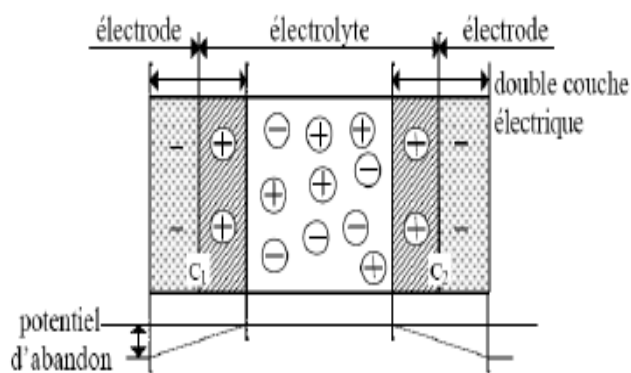


Fig. I.14 : état déchargé.

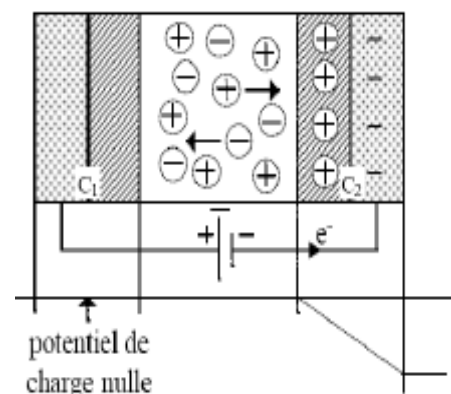


Fig. I.15 : état en charge.

I.4.1.3 Comparaison entre les batteries et le super condensateur

Les batteries et les super-condensateurs ont des caractéristiques électriques Extrêmement différentes.

	Super-condensateur	Batterie
Temps de charge t	$1s < t < 30s$	$1 \text{ heure} < t < 5 \text{ heures}$
Temps de décharge	$1s < t < 30s$	$0.3 \text{ heure} < t < 3 \text{ heures}$

Rendement charge/décharge	entre 85% et 98%	entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/kg)	10^4	$<10^3$
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 1 et 10	entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^6	10^3

Tab. I.5 : Résume les performances du super-condensateur et de la batterie

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le super-condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Le super-condensateur a déjà pris place dans la voiture pour la récupération d'énergie et pas seulement dans les véhicules électriques. En effet, les super-condensateurs sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se charger et se décharger très rapidement, le super-condensateur se présente comme une batterie ultra-rapide et fiable. [15]

Conclusion

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter l'historique et les différents types de source d'énergie à utiliser dans notre étude (énergie solaire et pile à combustible type PEMFC), leur domaine d'application, les avantages de celles-ci par rapport à d'autres sources d'énergies, le principe de fonctionnement et les caractéristiques électriques de chacune de ces sources. Aussi des généralités sur les systèmes électriques hybrides et les éléments de stockages (batteries et super condensateurs) ont été exposées. Les sources d'énergie étant choisies, elles seront modéliser et dimensionner dans les chapitres suivant pour qu'elles puissent satisfaire les demandes de puissance du véhicule.



Chapitre II

Modélisation de la chaîne de traction



Introduction

A travers ce chapitre, nous présenterons la modélisation des éléments formant la chaîne de traction, à savoir : la source hybride ; qui comprend la pile à combustible, le système photovoltaïque adapté par une commande de Maximisation de Point de « Perturbation et Observation » ; les éléments de stockage (batterie et super condensateur), les convertisseurs statiques adéquat, ainsi que l'ensemble convertisseur-machine constitué d'un onduleur triphasé et d'une machine synchrone à aimant permanent.

La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

II.1 Modélisation de la source hybride

II.1.1 Modélisation de la pile à combustible [27-28]

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Deux approches principales de modélisation se présentent dans la littérature. La première approche inclut les modèles structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. La deuxième, cherche à prédire le comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement, et de celles de la charge. La modélisation en statique est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité partant de la tension idéale issue de l'équation de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz.

II.1.1.1 Caractéristique électrique de la pile à combustible

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2/O_2 à 25°C et à 1atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (E_{PAC}) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations V (surtensions), par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit :

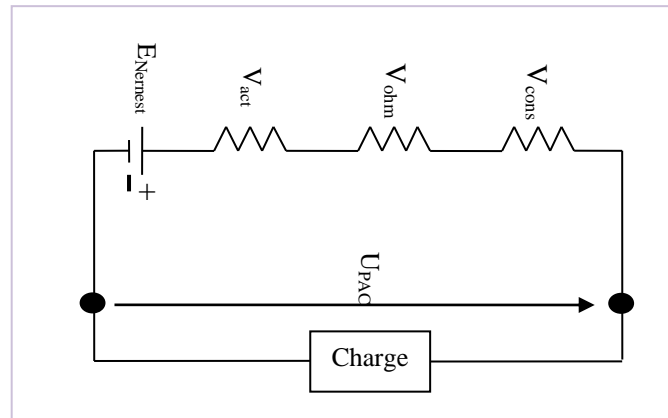


Fig. II.1 : schéma équivalent d'une PEMFC

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \dots \dots \dots (II.1)$$

V_{act} : Polarisation d'activation.

V_{ohm} : Polarisation ohmique.

V_{conc} : Polarisation de concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \dots \dots (II.2)$$

T : Température opératoire absolue de la pile (K).

$P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

a) Polarisation d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \dots \dots \dots (II.3)$$

I_{PAC} : courant de fonctionnement de la pile (A)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$: sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC,

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{\left(5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}\right)} \dots \dots \dots (II.4)$$

$C_{O_2}^*$: représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry. [29]

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur, donc :

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \times (1 - \chi_{H_2O}^{\text{Sat}}) \dots \dots \dots (\text{II.5})$$

P_{cath} : La pression de l'oxygène à la cathode,

$\chi_{H_2O}^{\text{Sat}}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée \approx à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \times \left(\frac{1}{2}\right) \dots \dots \dots (\text{II.6})$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone [29],

$$P_{H_2}^* = P_{\text{anode}} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \chi_{H_2O}^{\text{Sat}}\right) \dots \dots \dots (\text{II.7})$$

P_{anode} : Est la pression de l'hydrogène à l'anode,

$$P_{H_2}^* = P_{\text{anode}} \times \left(\frac{3}{4}\right) \dots \dots \dots (\text{II.8})$$

b) Polarisation ohmique

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{\text{ohm}} = I_{\text{PAC}} \times (R_M + R_C) \dots \dots \dots (\text{II.9})$$

R_C : Est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons, R_M : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \dots \dots \dots (\text{II.10})$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (μm), r_M est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{\text{PAC}}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \dots \dots \dots (\text{II.11})$$

Le terme $\frac{181.6}{(\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634)}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot cm$) à $I_{PAC}=0$ et à une température de 30 °C ($T = 303$ K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

δ_{H_2O}/SO_3^- Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22. Est A la surface active de la pile (cm^2).

En remplaçant les relations, l'expression de la polarisation ohmique devient :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{1816 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O}/SO_3^- - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \times l + A \times R_c \right] \dots\dots\dots (II.12)$$

c) Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \dots\dots\dots (II.13)$$

Où B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement, J est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm^2), J_{max} est la densité de Courant maximale.

Par conséquent, la tension (E_s) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage :

$$E_s = n \times E_{pac}$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (II.1), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} U_{PAC} = & 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] \\ & + \left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.75 P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left(\frac{77}{T} \right)} \right) \right] T + \\ & 7.6 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.5 P_{cath}}{5.08 \times 10^6 \times \exp \left(-\frac{498}{T} \right)} \right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) - \\ & I_{PAC} \left[\frac{1.816 \left[1 + 0.03(I_{PAC}) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} l + R_c \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{max}} \right) \dots\dots (II.14) \end{aligned}$$

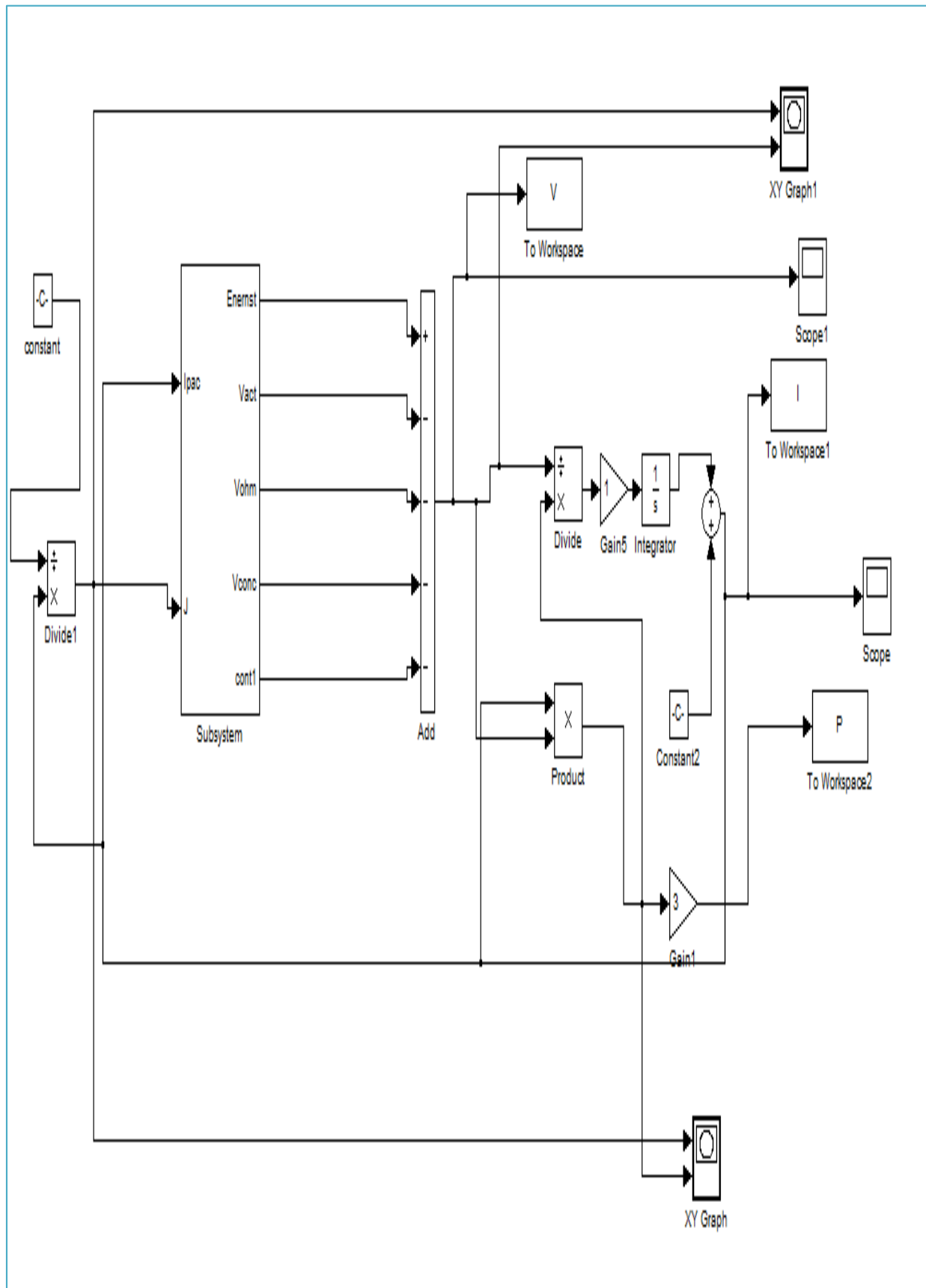


Fig.II.2 : schéma bloc de la pile à combustible

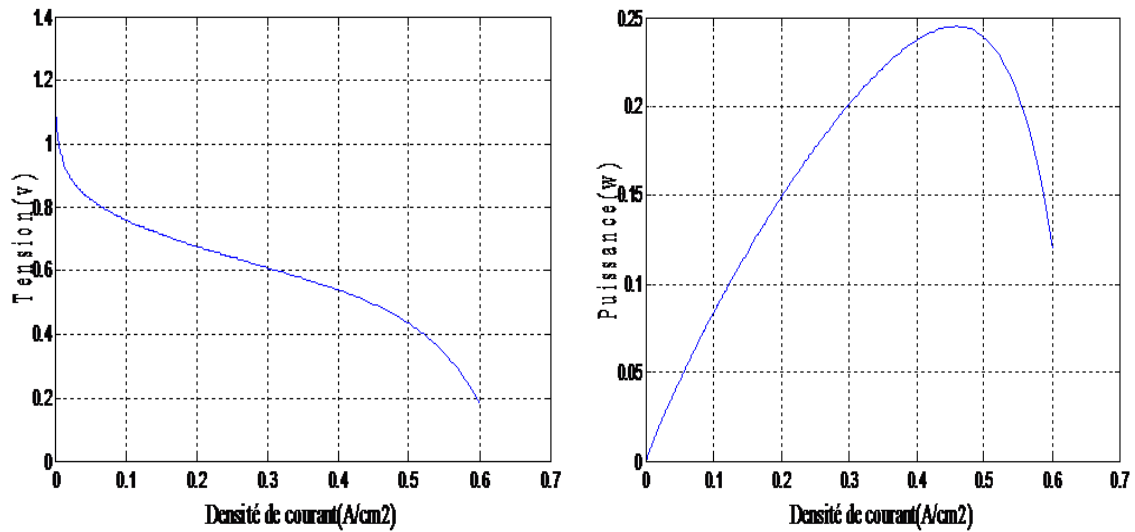


Fig.II.3 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEMFC.

II.1.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

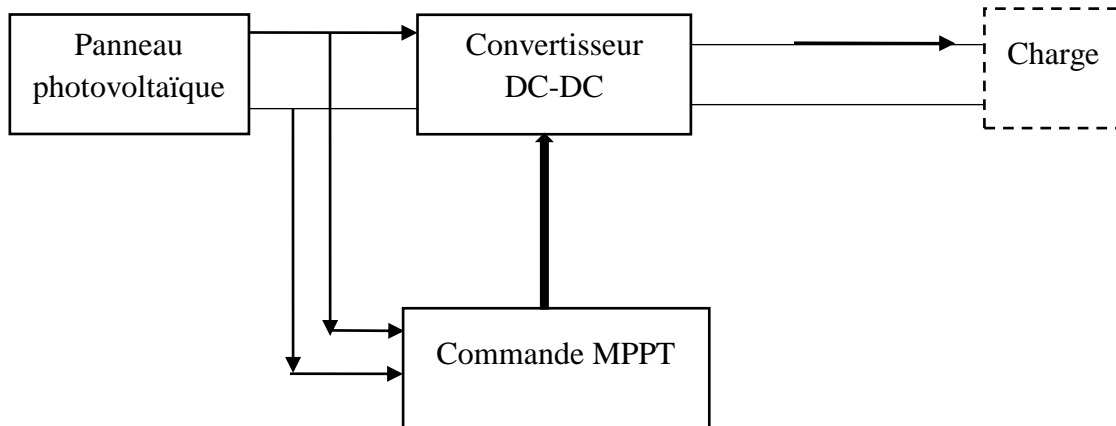


Fig.II.4 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT.

II.1.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque [30]

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire I-V du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

a. Modèle de la cellule solaire

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle.

b. Les Modèles mathématiques

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque, parmi ces modèles nous avons utilisé le modèle le plus simple et les plus utilisé qui est le suivant :

c. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant.

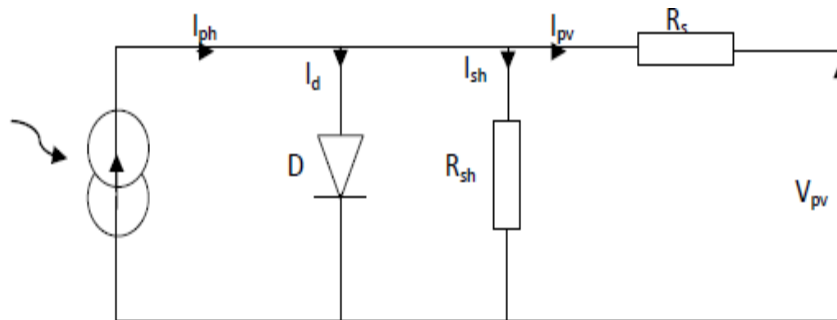


Fig.II.5 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

A partir du schéma (**fig.II.5**) le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné Par la loi de KIRCHHOFF :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \dots \dots \dots (II.15)$$

$$I_{ph} = P_1 * E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \dots \dots \dots (II.16)$$

- E_{sref} , T_{jref} : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- T_j : température de jonction.
- P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q}{k.A.n_s.T_j} (V + r_s I) \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (II.17)$$

Avec :

- I_{sat} : courant inverse de saturation de la diode.
- q : Charge élémentaire ($1.6.10^{-19}$ C).
- K : constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ j/k).
- A : coefficient d'idéalité de la cellule.
- n_s : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{sat} = P_4 . T_j^3 . \exp \left(\frac{E_g}{k.T_j} \right) \dots \dots \dots (II.18)$$

- E_g : énergie de gap.
- P_4 : paramètre constant.

$$I_{rsh} = \frac{V}{r_{sh}} \dots \dots \dots (II.19)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I = P_1 . E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{ref}) \right) - P_4 . T_j^3 . \exp \left(\frac{E_g}{k.T_j} \right) . \left[\exp \left(\frac{q}{k.A.n_s.T_j} (V - r_s I) \right) - 1 \right] \frac{V}{r_{sh}} \dots \dots \dots (II.20)$$

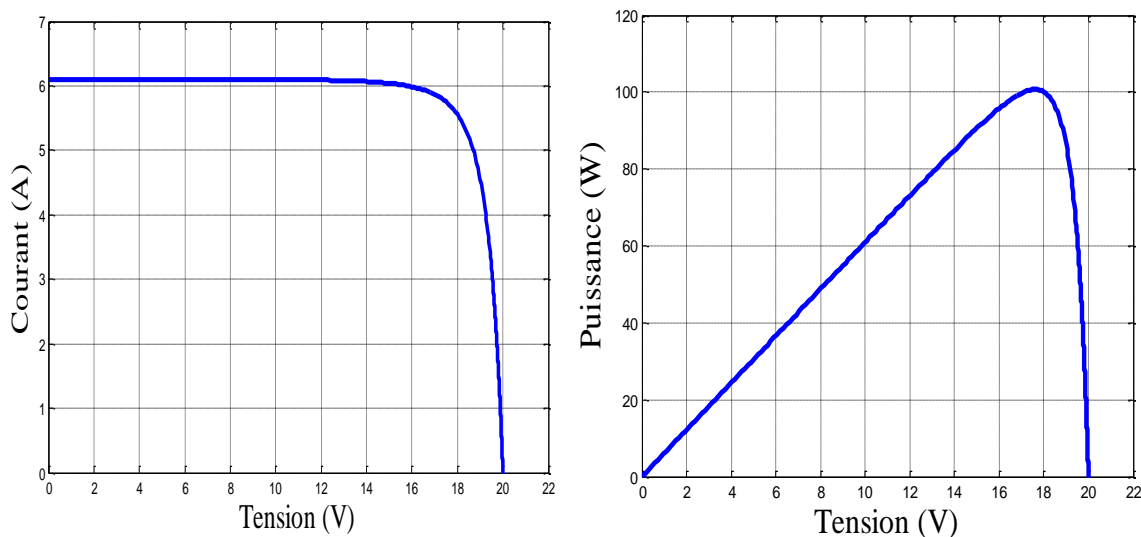


Fig.II.6 : caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) dans les conditions standards

II.1.2.2 Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale

Dans cette partie, nous présentons un algorithme de commande P&O de poursuite de la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque.

a. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) [31]

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

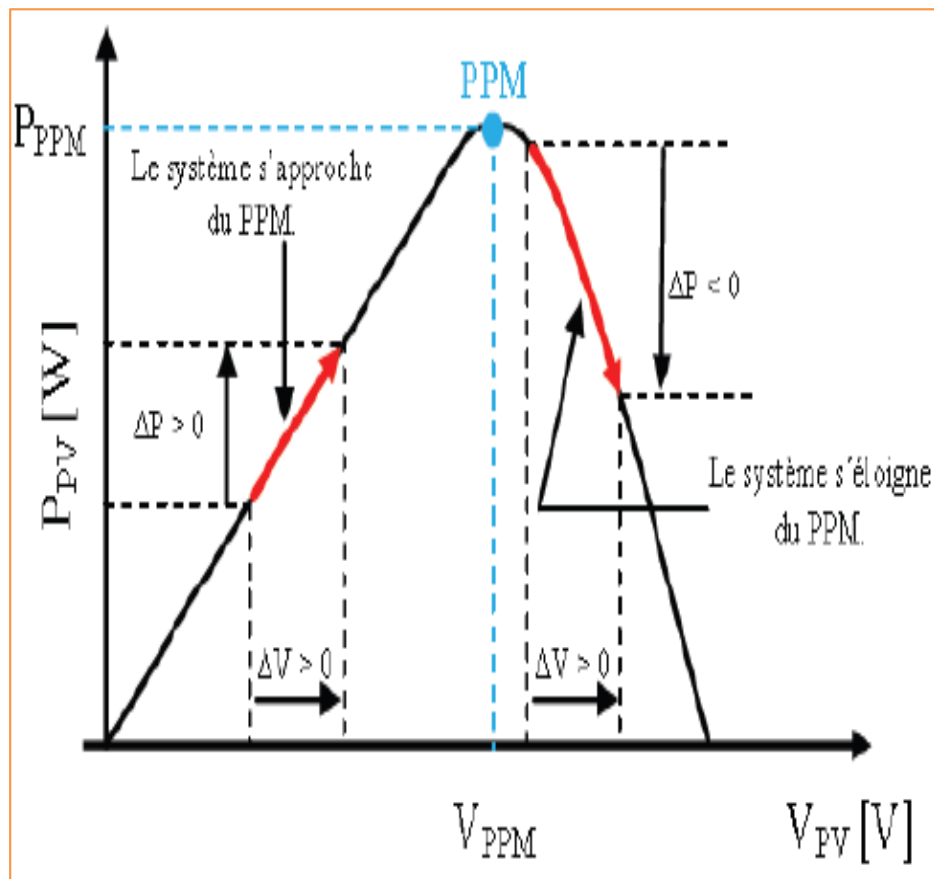


Fig.II.7 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation

L'algorithme général de cette commande est donné par la figure suivante :

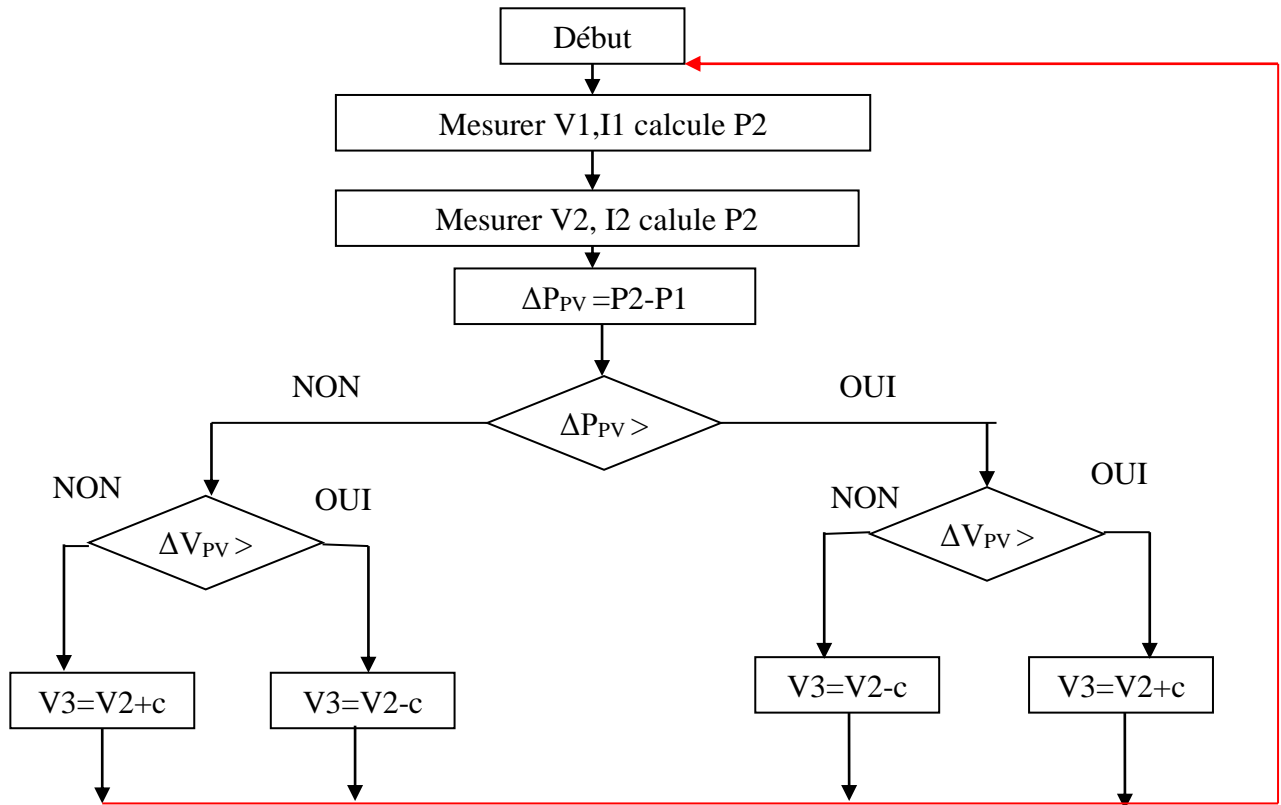


Fig.II.8 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la (figII.8). Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit ; la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

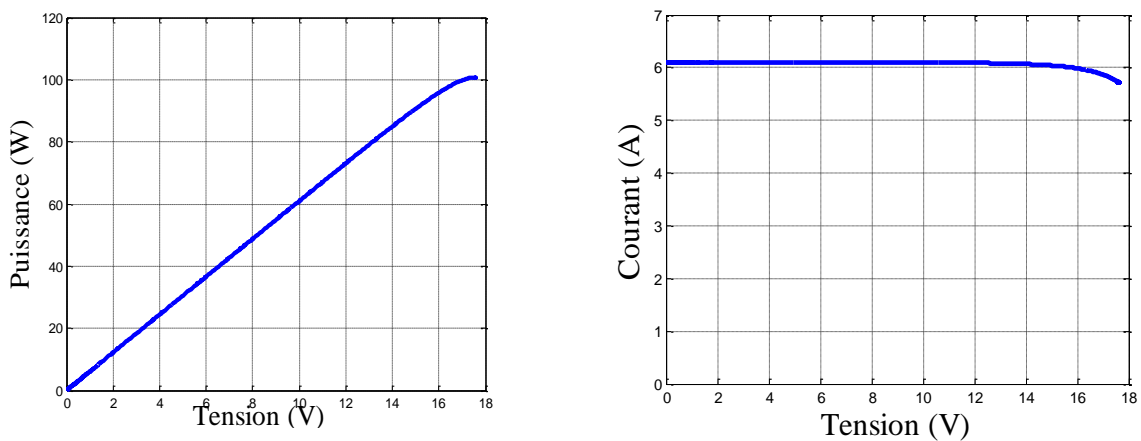


Fig.II.9 : caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P_{pv} (V_{pv}) avec commande MPPT

II.1.2.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) [32]

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

a. Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (fig.II.10). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

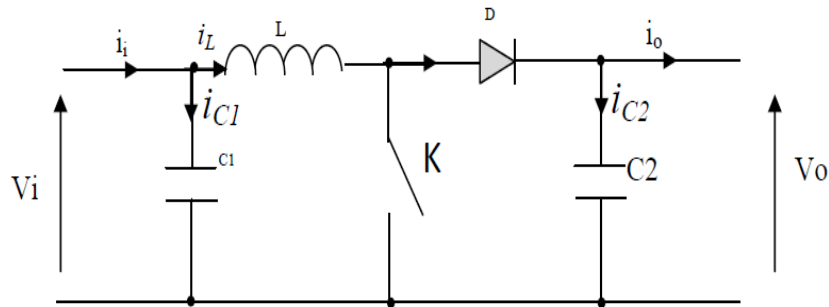


Fig.II.10 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir fig.II.11) des deux phases de fonctionnement donne :

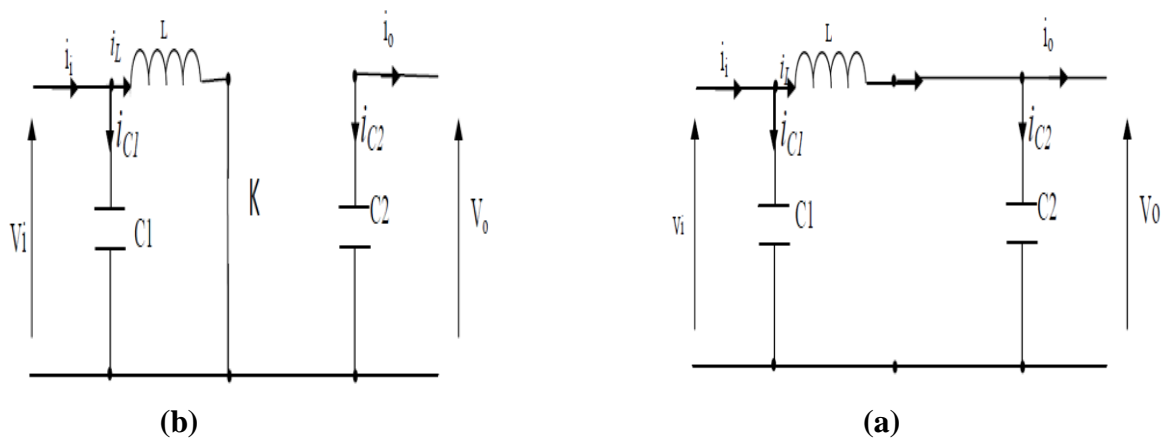


Fig.II.11 : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période d.Ts

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.21)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{dL_i}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.22)$$

En appliquant ces relations sur les systèmes d'équations, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-\alpha)V_0 \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.23)$$

II.1.3 Modélisation des dispositifs de stockage

II.1.3.1 Batterie [33] et [20]

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur le

modèle dit «CIEMAT» relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, ce modèle est basé sur le schéma suivant (**Fig.II.12**) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

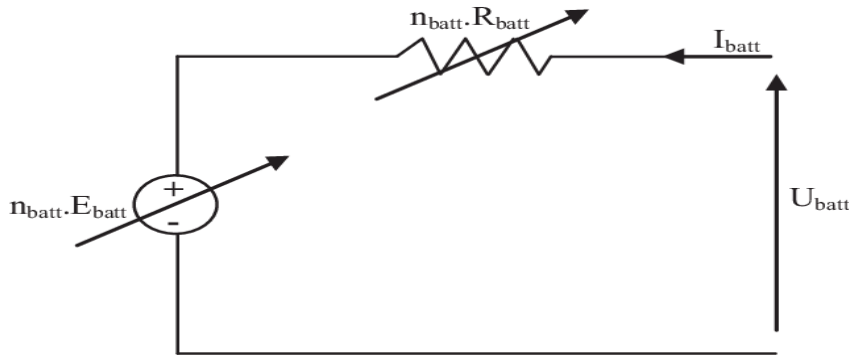


Fig. II.12 : schéma équivalent de la batterie CIEMAT

Dans ce modèle, pour n_b cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_{bat} I_{bat} \dots \dots \dots (II.24)$$

Ou V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.e.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{bat} sa résistance interne.

a. Modélisation de la capacité C_{bat}

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat,moy}$. Cette capacité est donnée par l'eq (II.25).

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat,moy}}{I_{10}} \right)^{0.9}} (1 + 0.005 \Delta T) \dots \dots \dots (II.25)$$

Avec :

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donne par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 \times I_{10} \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par (II.27) :

$$Q_m = I_{\text{bat}} \times t \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

Ou t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par (II.28) :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_m}{C_{\text{bat}}} \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

a.1 Equations de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.29) et (II.30) :

$$E_{b_déch} = 1.965 + 0.12 \text{ EDC} \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

$$R_{b_dech} = R_{\text{bat}} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} \right) \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{\text{bat_déch}} = n_b E_{b_déch} - n_b R_{b_dech} |I_{\text{bat}}| \dots\dots\dots(\text{II.31})$$

$$V_{\text{bat_déch}} = n[1.965 + 0.12 \text{ EDC}] - n \frac{|I_{\text{bat}}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \Delta T) \dots\dots\dots(\text{II.32})$$

a.2 Equations de la tension de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par (II.33) et (II.34)

$$E_{b_char} = 2 + 0.16 EDC \dots (II.33)$$

$$R_{b_char} = R_b = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + (I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \Delta T) \dots (II.34)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge

$$V_{bat_char} = n_b E_{b_char} + n_b R_{b_char} I_{bat} \dots (II.35)$$

$$V_{b_char} = n[2 + 0.16 EDC] + n \frac{I_{bat}}{I_{10}} \left(\frac{6}{1 + (I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \Delta T)$$

II.1.3.2 Super condensateur [34-35]

Le modèle des Super condensateurs se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (**Fig.II.13**). Les valeurs de la capacité du condensateur C_{SC} et de la résistance R_{SC} interne sont supposées constantes. La tension à vide V_C du Super Condensateur est l'image de son état de charge (SOC : state of charge). Des modèles avec plusieurs « branches RC » et des valeurs de capacité fonction de la tension du SC sont aussi proposés dans la littérature.

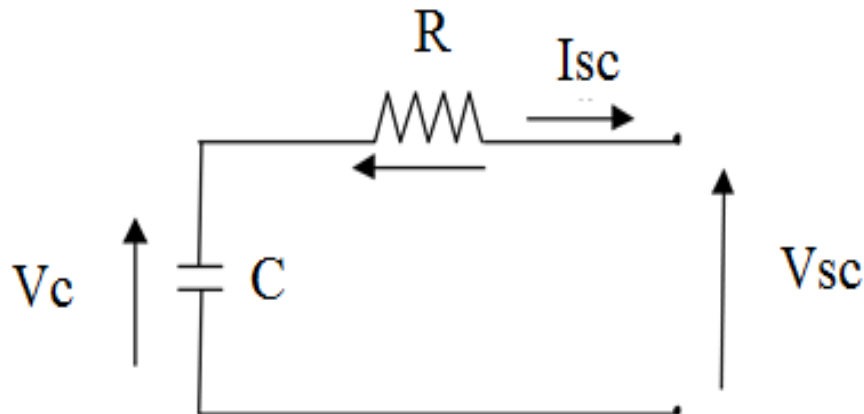


Fig.II.13 : Schéma électrique équivalent d'un super condensateur.

La tension aux bornes d'un super condensateur est donnée par :

$$V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = E_{sc} - R_{sc} \cdot I_{sc} \dots \dots \dots (II.36)$$

La puissance est définie par :

$$P_{sc} = V_{sc} \times I_{sc} \dots \dots \dots (II.37)$$

La convention utilisée est :

$$P_{sc} > 0 \text{ en traction (décharge du super condensateur).}$$

$$P_{sc} > 0 \text{ en freinage (charge du super condensateur).}$$

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide V_c est calculée de la manière suivante :

$$V_c = V_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{sc}(u) du \dots \dots \dots (II.38)$$

L'énergie contenue dans le SC E_{sc} est en fonction de sa tension à vide V_c . De ce fait, l'énergie maximale E_{scmax} est obtenue pour la tension à vide maximale V_{cmax} .

$$E_{sc}(V_c) = \frac{1}{2} \times C \times V_c^2 \dots \dots \dots (II.39)$$

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le Super condensateur et l'énergie maximale admissible :

$$SOC = \frac{E_{sc}(t)}{E_{scmax}} \dots \dots \dots (II.40)$$

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs super-condensateurs est utilisé. Lorsque N_{sc} super-condensateurs sont connectés en série, la tension du pack U_{sc} et la capacité équivalente C_{sc}^{eq} sont données par :

$$U_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) \cdot N_{sc} \dots \dots \dots (II.41)$$

$$C_{sc}^{eq} = \frac{C_{sc}}{N} \dots \dots \dots (II.42)$$

II.1.3.3 Hacheur parallèle réversible en courant [36]

Le convertisseur de puissance est nécessaire comme interface entre les sources secondaire d'énergie électrique et le bus continu. L'intérêt d'utiliser ce type d'interface est d'adapter les niveaux de tension des sources au bus continu. En outre, celui-ci contrôle l'énergie fournie ou

absorbée par les sources en fonction de la stratégie de gestion d'énergie choisie. Le convertisseur doit être donc réversible en courant

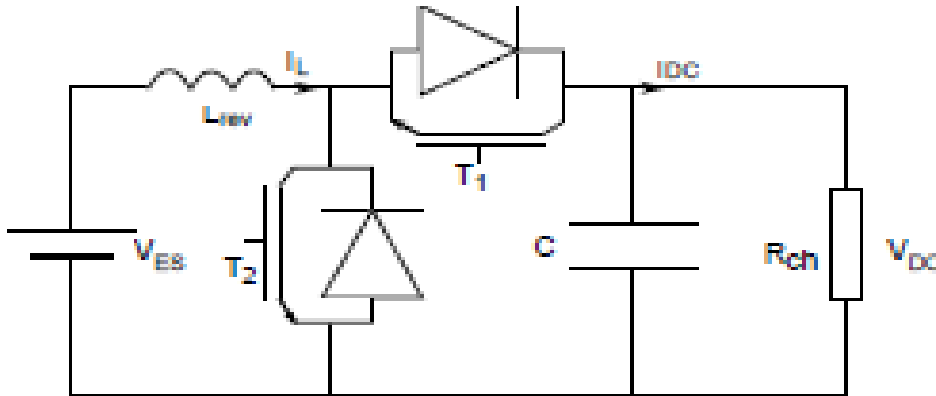


Fig. II.14 : Hacheur parallèle réversible en courant

Le comportement du hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par les équations suivantes :

$$L_{rev} \frac{di_L}{dt} = V_{ES} - u_{rev} \cdot V_{DC} \dots \dots \dots (II.43)$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_L \cdot u_{rev} - \frac{V_{DC}}{r} - i_{DC} \dots \dots \dots (II.44)$$

Où : L_{rev} est l'inductance du hacheur réversible est, i_L et V_{EC} sont le courant et la tension de l'élément de stockage (la batterie). r une résistance connecte en parallèle au bus DC qui représente des divers pertes. Notons aussi que la commutation des transistors est complémentaire : u_{rev} est l'ordre de commande du transistor T_1 $\overline{u_{rev}}$ celle du transistor T_2 .

On obtient le modèle moyen en substituant u_{rev} avec α_{rev} .

II.1.3.4 Modélisation de la MSAP [37]

La MSAP est régi par 3 types d'équations : équation magnétique (relation entre flux et courants) ; équation électrique (relation entre courants et tensions) et équation mécanique (conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique). Nous présentons ces équations d'abord dans le repère triphasé lié au stator et ensuite dans le repère diphasé de Park dans le but de simplifier leur formulation.

a. Modélisation dans le repère triphasé

a.1 Equations Magnétiques

Le flux total produit au stator Φ_s est la somme du flux propre créé au stator par les courants i traversant les enroulements statoriques et du flux produit par le rotor :

$[\Phi_{ss}] = [\Phi_{ss}] + [\Phi_{sf}]$. Le flux propre produit dans les enroulements statoriques s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[\Phi_{ss}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Où $[\Phi_{is}]$ est le flux totalisé induit dans l'enroulement statorique i , L_{ii} est l'inductance propre de la phase statorique i , et M_{ij} est l'inductance mutuelle entre les phases statoriques i et j .

Dans les machines à pôles saillants, la matrice des inductances est fonction de l'angle électrique $P\theta$ où p est le nombre de paires de pôles et est θ la position mécanique du rotor.

Ces inductances s'écrivent au sens de la théorie du premier harmonique :

$$\begin{cases} L_{aa} = L_0 + L_2 \cos(2p\theta) & M_{ab} = M_{ba} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{bb} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bc} = M_{cb} = M_0 + L_2 \cos(2p\theta) \dots\dots\dots (II.45) \\ L_{cc} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{ac} = M_{ca} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Dans le cas où la machine est sans saillance, nous remplaçons l'inductance L_2 par zéro et, compte tenu que la somme des courants statorique est nulle à tout instant, nous aurons :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Où $L = L_0 - M_0$: l'inductance cyclique des enroulements statoriques. Si nous notons Φ_f le flux maximal produit par le rotor dans un enroulement du stator, le flux créé au stator par le rotor s'écrit comme suit :

$$[\phi_{sf}] = \begin{bmatrix} \phi_{af} \\ \phi_{bf} \\ \phi_{cf} \end{bmatrix} = \phi_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

a.2 Équations électriques

Les enroulements des trois phases étant fixes, la rotation de l'aimant (inducteur) plonge les enroulements dans un champ d'induction variable et provoque l'apparition d'une tension induite de mouvement (fem.) aux bornes de chaque phase, à laquelle se superposent les tensions induites de transformation par les inductances des phases. La tension induite e_i dans la phase i est donnée par la variation du flux totalisé correspondant. Dans le cas où le moteur est sans saillance les tensions aux bornes des trois phases statoriques s'écrivent selon la loi d'Ohm :

$$\begin{cases} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a e_a = \Omega p \Phi_f \sin(p\theta) \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b e_a = \Omega p \Phi_f + \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \dots \dots \dots (II.46) \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c e_a = \Omega p \Phi_f + \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Où v_i , i_i , et e_i sont la tension, le courant et la f.é.m. dans la phase i . R et L sont la résistance et L'inductance cyclique par phase, p est le nombre de paires de pôles. Ω et θ sont respectivement la vitesse et la position mécaniques.

a.3 Equation Mécanique

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est régie par la relation suivante déduite du théorème des moments :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega \dots \dots \dots (II.47)$$

Où J est l'inertie du rotor, la vitesse mécanique de rotation du rotor, C_m le couple moteur fourni par le stator, C_r le couple résistant de la charge et f_v le coefficient de frottement visqueux.

L'expression de C_m est obtenue à partir d'un bilan énergétique faisant apparaître la puissance électromagnétique $P_m = \sum_{i=a,b,c} e_i i_i$ transformée en puissance mécanique C_m . Ainsi :

$$C_m = \frac{1}{\Omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \dots \dots \dots (II.48)$$

Dans le cas où la machine est sans saillance l'expression du couple se simplifie et sera :

$$C_m = -p\Phi_f \left[i_a \sin(p\theta) + i_b \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \dots \dots \dots (II.49)$$

Le modèle des machines électriques dans un repère conventionnel (a, b, c) s'écrit en fonction des paramètres qui sont variables dans le temps.

Cette circonstance compliquerait considérablement l'étude des régimes transitoires des machines ainsi que l'élaboration des lois de commande. Pour remédier à ce problème, nous opérons un changement de variables sur l'ensemble des grandeurs. Ce changement consiste à rapporter les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires notés d et q (repère diphasé de Park). Ceci conduit à la simplification du modèle.

b. Mise en équation de la MSAP en diphasé

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu la non linéarité des systèmes d'équations. On utilise alors une transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants qui s'appelle transformation de Park.

b.1 Modélisation dans le repère diphasé (d,q)

Le repère de Park est un repère tournant avec le rotor. Il est composé de deux axes perpendiculaires : axe direct « d » et axe en quadrature « q ». La transformation du repère (a,b,c) au repère de Park est possible grâce à une matrice de passage $P(\theta)$ où θ est l'angle entre les deux axes a et d :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Equations Magnétiques

$$\Phi_d = L_d i_d + \Phi_f$$

$$\Phi_q = L_q i_q$$

Equations Electriques

$$V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega L_q$$

$$V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p \Omega L_d i_d + p \Omega \Phi_f$$

Equations Mécaniques

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega$$

$$C_m = \frac{3}{2} p i_q (\Phi_f - (L_d - L_q) i_d)$$

Où $L_d = L + \frac{3}{2} L_2$; $L_q = L - \frac{3}{2} L_2$. Ainsi, pour les moteurs sans saillance on a $L_d = L_q = L$.

II.1.3.5 Stratégie de commande du MSAP [37]**a. Commande Vectorielle**

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans le repère de Park (d,q). La composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple.

La stratégie consiste ainsi à imposer le courant i_q à une valeur correspondant au couple C_m souhaité tout en maintenant nul le courant i_d et ceci pour travailler à couple maximal. La régulation de la vitesse se fait en cascade en imposant la valeur souhaitée de la vitesse sur la voie q. Dans la suite on considèrera que $L_d = L_q = L$.

a.1 Contrôle du courant

En faisant appel aux équations électriques du MSAP établies dans le repère de Park, on remarque que les équations de v_d et v_q sont couplées, on est donc amené à implanter un découplage qui consiste à l'introduction des termes de compensation e_d et e_q . On aura alors de nouvelles variables de commande v_d^* et v_q^* telles que chaque variable n'agisse que sur une seule des deux composantes du courant statorique (i_d ou i_q). Dans ce cas, le système devient linéaire et simple à commander.

$$V_d^* = V_d + e_q = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \dots \dots \dots (II.50)$$

$$V_q^* = V_q + e_d = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \dots \dots \dots (II.51)$$

Puisque la dynamique du courant, selon les axes d et q, est un premier ordre, il est judicieux de choisir un correcteur de type proportionnel intégral de fonction de transfert :

$$G_{pi}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \dots \dots \dots (II.52)$$

De plus, si $L_d = L_q$ nous pouvons imposer les mêmes paramètres des régulateurs. Ainsi, les schémas bloc de la régulation des courants i_d et i_q seront les suivants :

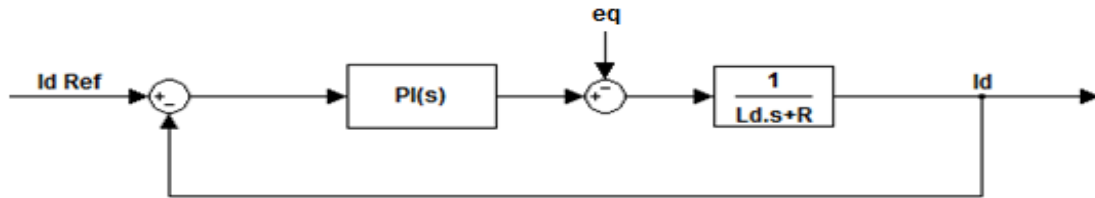


Fig.II.15 : Schéma bloc de la régulation de I_d

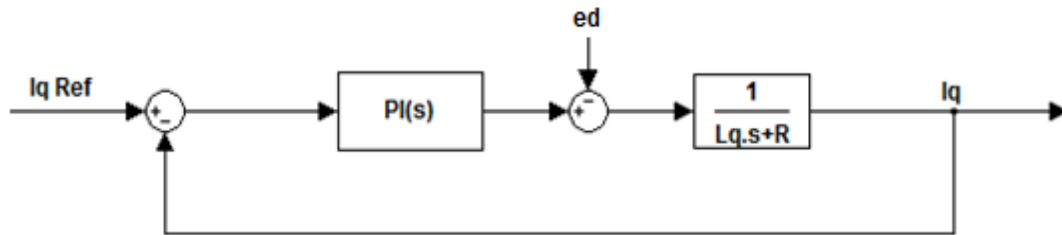


Fig.II.16 : Schéma bloc de la régulation de I_q .

Ainsi, la fonction de transfert en boucle fermée de courant s'écrit pour les deux voies

$$GBF_{i(p)} = \frac{\frac{K_p}{K_i}p+1}{\frac{L}{K_i}p^2 + \frac{R+K_p}{K_i}p+1} = \frac{\frac{K_p}{K_i}p+1}{\frac{1}{\omega_{bp_i}^2}p^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_{bp_i}}p+1} \dots\dots\dots (II.53)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2nd ordre caractérisée par ξ, ω_{bp_i} . Les gains des régulateurs s'expriment en fonction de ξ, ω_{bp_v} et des paramètres électriques :

$$K_p = 2L\varepsilon\omega_{bp_i} - R \text{ et } K_i = L\omega_{bp_i}^2 \dots\dots\dots (II.54)$$

Par un placement judicieux des pôles de cette fonction de transfert nous pouvons obtenir la dynamique de courant souhaitée (ω_{bp_i} pour déterminer la bande passante souhaitée et ξ pour le dépassement).

a.2 Contrôle de la vitesse

Une fois la régulation de la boucle de courant validée, il est alors possible de mettre en place, en cascade, la boucle de vitesse souhaitée. La possibilité de mise en cascade se justifie par le fait que les constantes de temps électriques et mécaniques ont un rapport supérieur à 10 (cas de la majorité des moteurs électriques).

Le modèle mécanique s'écrit en faisant appel à l'équation mécanique :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega, \text{ avec } C_m = \frac{3}{2} P \Phi_f i_q = \frac{3}{2} K_e i_q \dots \dots \dots (II.55)$$

Ainsi, un correcteur de type PI suffit pour établir la boucle de vitesse avec la dynamique souhaitée.

En considérant le courant parfaitement régulé, la boucle de courant sera équivalente à un gain unitaire et la fonction de transfert de la boucle de vitesse s'écrit :

$$GBF_{v(p)} = \frac{\frac{K_p}{K_i} P + 1}{\frac{J}{\frac{3}{2} K_e K_i} P^2 + \frac{f_v + K_p}{\frac{3}{2} K_e K_i} P + 1} = \frac{\frac{K_p}{K_i} P + 1}{\frac{1}{\omega_{bp_v}^2} P^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_{bp_v}} P + 1} \dots \dots \dots (II.56)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2nd ordre caractérisée par ξ, ω_{bp_v} et les gains du régulateur de vitesse s'écrivent en fonction de ξ, ω_{bp_v} et les paramètres mécaniques :

$$K_p = \frac{2}{3K_e} (2J\varepsilon\omega_{bp_v} - f_v) \text{ et } K_i = \frac{2}{3K_e} J\Omega\omega_{bp_v}^2 \dots \dots \dots (II.57)$$

On choisit une bande passante ω_{bp_v} pour la boucle de vitesse au moins 10 fois inférieure à celle de la boucle de courant pour que la mise en cascade soit toujours valide.

II.1.3.6 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur de nos jours très largement utilisé dans les systèmes d'entraînement industriels, en premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation des convertisseurs statique de plus en plus performants .En second lieu, l'évolution des techniques numériques et de commandes ,On distingue plusieurs types d'onduleur :

- a) Selon la source :
 - Onduleur de tension.

- Onduleur de courant.
- b) Selon le nombre de phase (monophasé, triphasé, etc...).

a. L'onduleur de tension

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tension d'amplitudes et de fréquences variables.

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la (Fig.II.17), où K_i et K_i' ($i=a, b, c$) sont des transistors IGBT, S_i et S_i' sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

- si $S_i = 1$, l'interrupteur K_i est passant et K_i' est ouvert,
- si $S_i' = 0$, l'interrupteur K_i est ouvert et K_i' est passant.

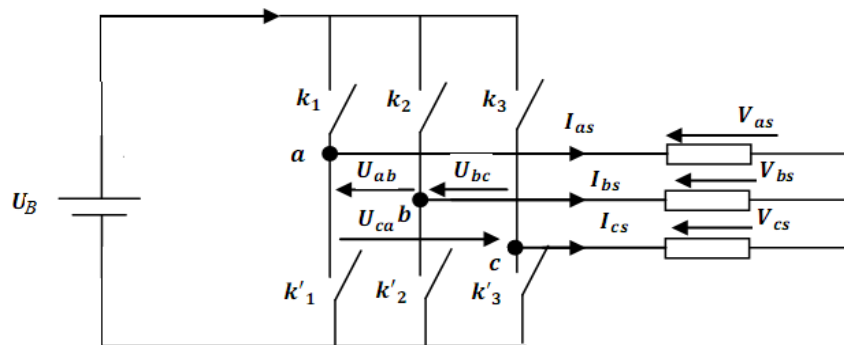


Fig. II.17. : Schéma d'un onduleur de tension

L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération.

Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la (fig.II.17). La machine synchrone à aimant permanent est connectée en étoile, V_{bus} est la tension continue alimentant l'onduleur de tension.

Les tensions de ligne délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_B \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_B \cdot (S_b - S_c) \dots\dots\dots (II.58) \\ U_{ac} = V_{cs} - V_{as} = U_B \cdot (S_c - S_a) \end{cases}$$

Les tensions $V_{as}V_{bs}V_{cs}$ forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

On trouve

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_b - S_a - S_c) \dots\dots\dots (II.59) \\ V_{cs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_c - S_b - S_b) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_B \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

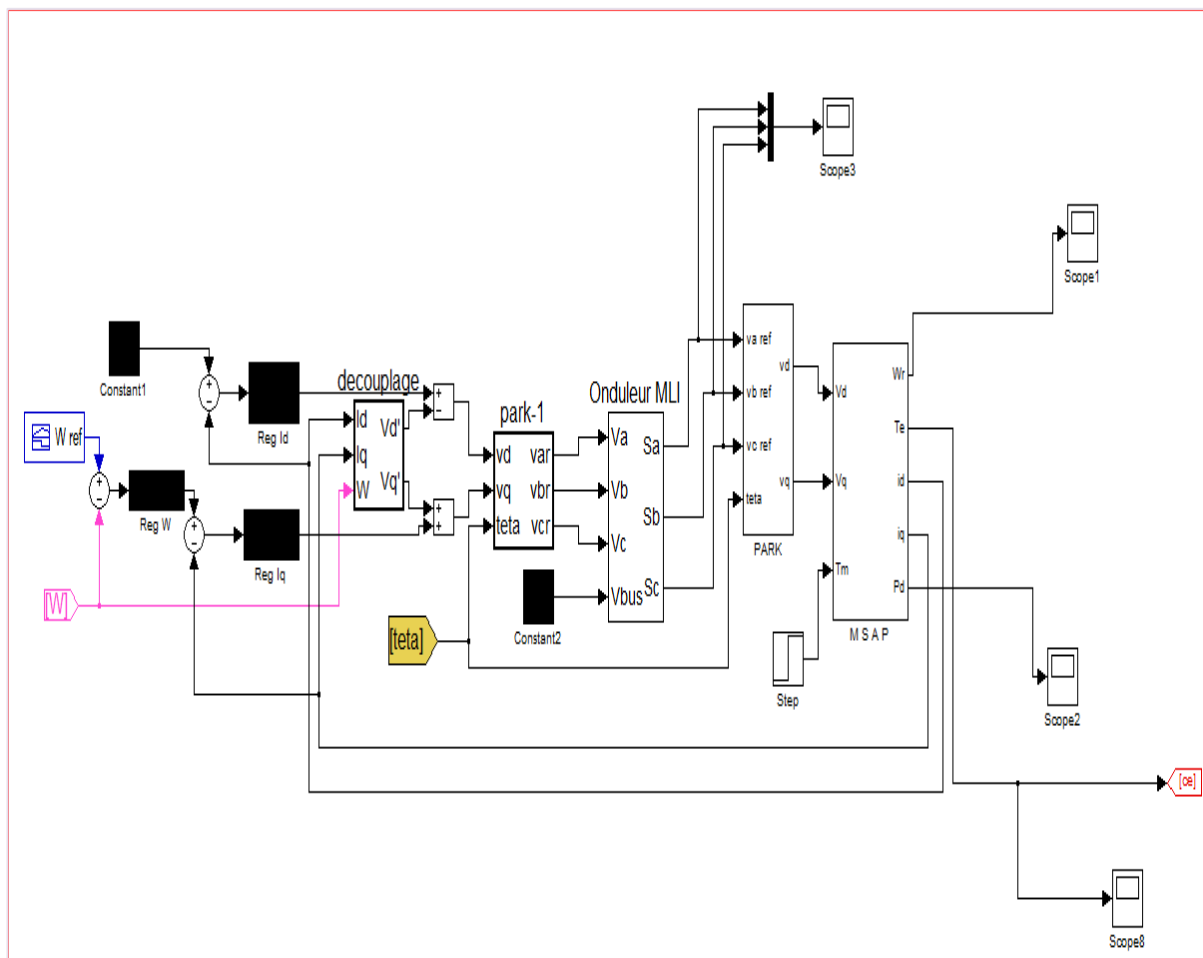


Fig.II.18 : Schéma bloc de la MSAP avec commande vectorielle

II.1.3.7 Modélisation du véhicule électrique

Le véhicule électrique est un système complexe, constitué de composants très variés et de nature différente (mécanique, électrique, électrochimique...). Afin de pouvoir modéliser le véhicule électrique, il faut déterminer le bilan des efforts appliqués au véhicule. Les équations utilisées sont directement issues des théories de la mécanique et de l'aérodynamique. Elles sont applicables à des véhicules routiers à quatre roues à traction.

Dans notre travail, nous examinons un modèle de véhicule électrique-hybride de type sous Matlab/Simulink, en utilisant les positions de la pédale (accélération /décélération) déduites du cycle de conduite, comme signal d'entrée principale. La simulation illustre le flux d'énergie et sa distribution en vertu des différents modes de fonctionnement du véhicule hybride.

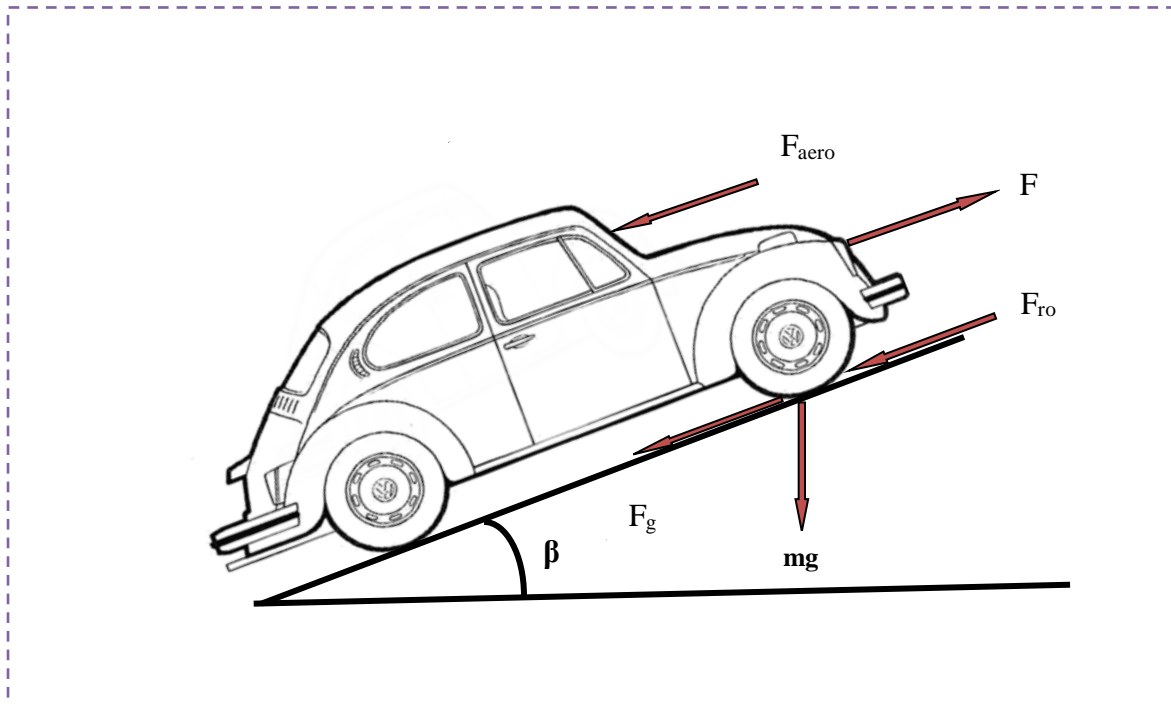


Fig.II.19 : Représentation des forces agissant sur le véhicule.

Nous avons trois principales forces : [38-39]

➤ Force de résistance au roulement (F_{ro}) due principalement à la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Elle est donnée par la relation :

$$F_{ro} = mg f_{ro} \cos(\beta) \dots \dots \dots (II.60)$$

➤ Force résistante à la pénétration dans l'air (F_{aero}) engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carcasse du véhicule en se déplaçant. Son expression est :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_f C_d V_e^2 \dots \dots \dots (II.61)$$

➤ Force résistante due à la pente à gravir (F_g) qui est proportionnelle à la masse m du véhicule et dépend de la pente de la route. Son expression est donnée par la relation qui suit :

$$F_g = mg \sin(\beta) \dots \dots \dots (II.62)$$

Avec :

m : la masse totale du véhicule en [kg] ;

g: la gravité en [m/s²] ;

f_{ro} : la constante de la force de résistance due au déplacement ;

ρ_{air} : la densité de l'air en [kg/m²] ;

A_f : la surface frontale du véhicule [m²] ;

C_d : le coefficient de trainée aérodynamique ;

V_e : la vitesse du véhicule en [m/s²] ;

β : l'angle de pente de la route en [rad].

La force résistive totale est donnée par la formule suivante :

$$F_r = F_g + F_{aero} + F_{ro} \dots \dots \dots (II.63)$$

Le moteur électrique assure la force de traction du véhicule F électrique. L'équation du mouvement est alors donné par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r \dots \dots \dots (II.64)$$

La force ($F - F_r$) accélère (respectivement décélère) le véhicule si la différence est positive (respectivement négative).

La puissance mécanique du véhicule électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P_v = F_r \cdot V_e \dots \dots \dots (II.65)$$

En fin, le couple du moteur est donné par l'expression suivante :

$$T_r = F_r \frac{r}{Gr} \dots \dots \dots (II.66)$$

Où r est le rayon de la roue et G_r représente le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe.

Ce modèle représente l'aérodynamique du véhicule. Il illustre les principales forces dynamiques exercées sur le véhicule. Le couple de charge résultant sera appliqué à la machine synchrone à aimant permanent.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties d'un système de traction électrique hybride, à savoir les sources d'énergie électrique notamment la PAC de type (PEMFC) et le générateur photovoltaïque avec un système d'appoint (batterie, super condensateur), les différents convertisseurs d'électronique de puissance ainsi que le modèle du véhicule électrique avec son moteur (MSAP). Nous avons présenté aussi la commande vectorielle et l'onduleur utilisés.

Dans le chapitre suivant nous étudierons la gestion d'énergie dans tout le système avec ses trois scénarios possibles à savoir la traction, la décélération, et l'arrêt du véhicule. La simulation et l'étude de tout le système sera présentée.



Chapitre III

Dimensionnement et stratégie de gestion en puissance du système étudié



Introduction

Nous avons édifié dans le chapitre précédent la modélisation de chaque élément du système complet qui est constitué des panneaux photovoltaïques, pile à combustible des batteries et super condensateurs connectés via des convertisseurs de puissance, ainsi que la machine synchrone à aimants permanents pour l'entraînement du véhicule électrique considéré. Nous souhaitons satisfaire la demande du système, pour cela le dimensionnement des éléments du système est capital sur les performances dynamique du véhicule.

Dans ce chapitre nous allons aussi proposer un organigramme de gestion d'énergie du système étudié avec les trois modes possibles à savoir la traction, l'arrêt, et le freinage après avoir établi un cahier de charge. L'organigramme sera modélisés sur matlab-simulink et il sera introduit dans le système global de simulation, les résultats de simulation seront aussi présentés et discutés dans le chapitre suivant.

III. Dimensionnement

III.1 Démarche globale de dimensionnement

Lors de la conception d'un véhicule, ses performances dynamiques doivent être spécifiées par un cahier des charges. Ses caractéristiques dynamiques permettent de calculer les contraintes extrêmes appliquées à la source, à savoir les extrêmes de puissance et l'énergie nécessaire pour son autonomie. [40]

L'objectif de cette démarche est de proposer un outil permettant de déterminer les dimensionnements admissibles vis-à-vis du cahier des charges. En plus cet outil permet d'évaluer l'influence des méthodes de gestion d'énergie sur le dimensionnement de la source hybride. Afin de répondre aux exigences du cahier des charges, nos algorithmes de dimensionnement respectent les trois critères imposés suivants :

- La source du véhicule doit être capable de fournir la totalité de la puissance nécessaire à la propulsion du véhicule.
- Le système de stockage d'énergie (SSE) du véhicule doit être capable de récupérer la quasi-totalité de la puissance de freinage.
- Enfin, la source doit embarquer l'énergie nécessaire pour assurer l'autonomie du véhicule préconisée par le cahier des charges.

III.2 Dimensionnement d'un véhicule électrique hybride

L'un des enjeux dans le dimensionnement d'un véhicule électrique hybride est de déterminer une combinaison idéale entre le système pile à combustible et panneau photovoltaïque et la source secondaire d'énergie pour satisfaire les performances dynamiques du véhicule tout en lui assurant une autonomie suffisante.

Le dimensionnement de la source de puissance (PAC, GPV et SSE) a un impact essentiel à la fois sur les performances dynamiques du véhicule et sur la consommation d'hydrogène (autonomie du véhicule). Il est évidemment en fonction d'un cahier des charges lié à l'application. Les solutions obtenues pour un cahier des charges peuvent être nombreuses et variées (choix de la source secondaire par exemple).

Dans ce cas, pour effectuer un choix, il faut être sûr de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques. Le choix des composants et la stratégie de commande sont donc intimement liés pour le dimensionnement.[41]

Le dimensionnement de la source d'énergie doit tenir compte de plusieurs aspects :

a. Situations de conduite

Il n'est pas envisageable de prendre en compte toutes les situations de conduite possibles. Le cahier des charges impose donc des performances minimales pour des conditions de Conduites :

➤ Cas de la vitesse constante du véhicule :

Le véhicule doit pouvoir rouler à une vitesse constante pendant une durée prolongée (cas du véhicule sur autoroute), ce qui est équivalent à une demande de puissance constante de la motorisation.

La source de puissance secondaire ayant une quantité d'énergie limitée, elle ne peut assurer une assistance en puissance prolongée au système pile à combustible.

Le système PAC doit donc avoir une puissance maximale suffisante à fin d'assurer le maintien de la vitesse du véhicule.

➤ Cas des accélérations du véhicule :

Les accélérations du véhicule se caractérisent par des pointes de puissance de durée limitée de la motorisation (quelques secondes). Le système PAC n'est pas toujours en mesure d'assurer seul les accélérations du véhicule soit parce que sa dynamique est limitée, soit parce que sa puissance maximale est limitée.

La puissance manquante est alors fournie par la SSE.[41]

b. Critères énergétiques

Une part importante d'économie d'hydrogène est obtenue par récupération de l'énergie cinétique. Le dimensionnement de la source secondaire doit donc permettre de récupérer au maximum l'énergie de freinage. Cependant, l'énergie cinétique récupérable et la demande de puissance de la motorisation dépendent de l'utilisation envisagée du véhicule et de ce fait, le dimensionnement de la source de puissance ($SYS_{PAC+SSE}$) est spécifique à une application particulière.[41]

c. Problème de la masse du véhicule

La consommation d'hydrogène est influencée par la masse du véhicule. La masse de la source de puissance (système PAC +GPV+ SSE) est donc un facteur important dans le processus de dimensionnement.[41]

III.3. Problème de choix entre la batterie et le super condensateur

Il est difficile de préconiser l'emploi de batterie ou de super condensateur, les deux technologies ayant des caractéristiques très différentes. L'emploi des super condensateurs est généralement privilégié en raison de leur efficacité énergétique et de leur puissance spécifique, mais leur faible capacité peut être un handicap.

A l'inverse, les batteries sont capables de stocker une grande quantité d'énergie mais sont pénalisées par leur puissance spécifique.

Une solution consiste à coupler batteries et super condensateurs pour cumuler leurs avantages (puissance et énergie), mais ceci augmente inévitablement la complexité et le cout de la source secondaire d'énergie (SSE).[41]

III.4. Composition du véhicule et dimensionnement

Le véhicule se compose en partie de :

D'une pile à combustible de type PEM d'une puissance de 18 kW avec environ 20% de la puissance de la pile sera consommé par ses accessoires. L'alimentation en hydrogène est assurée par un réservoir d'hydrogène comprimé à 700bars.

Un générateur photovoltaïque de puissance de 600W qui s'étend sur une superficie de $A_{pv} \approx 2.6m^2$ ainsi que d'un système d'appoint (banc de Batterie de capacité de 1200Ah \times 4 et de super condensateurs de puissance de 2.3kW).

Des convertisseurs intermédiaires : un convertisseur Boost connecte à la pile, un convertisseur réversible en courant connecté aux régulateur et un onduleur connecte au bus continu dont la tension doit être régulée à 400V ; les interrupteurs utilisés sont des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 600V.

Un moteur synchrone à aimant permanent qui permet d'entraîner les roues du véhicule dont la puissance nominale est de l'ordre de 30kW, les pics de puissance sont de 35kW et le couple maximum est de 210Nm. Dans la suite de cette étude on se base sur ce cahier des charges pour dimensionner la source d'énergie principale et les éléments de stockage tampon de puissance ainsi que pour la commande et la gestion de l'énergie électrique.

La masse du véhicule étudié avoisine une tonne (la masse du corps du véhicule est de 1300kg). Elle possède une surface frontale d'environ 2.6m², un coefficient de pénétration dans l'air de l'ordre de 1.2kg/m² et un coefficient de roulement d'environ 0.01.

III.4.1 Dimensionnement de la pile à combustible [42]

Comme on l'a expliqué précédemment, nous avons choisi une tension du bus DC égale à 400V. Pour déterminer le nombre de cellules de la PAC à mettre en série on constate qu'une élévation d'un facteur 2 via le convertisseur boost donne un bon rendement. Le stack doit alors fournir une tension de $\frac{400}{2} = 200V$ au point de puissance nominale. Afin de maintenir un bon rendement de la PAC il ne faut pas descendre en dessous de 0.64 V par cellule et 0.6 A/cm². On trouve alors le nombre de cellules :

$$\frac{200}{0.64} = 312.5 \approx 313 \text{ cellules}$$

Pour déterminer la surface active de la PAC, on part sur la base d'une puissance égale à 120% de la puissance nominale, soit environ une centaine de kW.

$$(1 + 0.2) \times P_{\text{nom}} = 18 \text{ kW}$$

Les 20% supplémentaires correspondent à la consommation des auxiliaires. Le courant vaut alors :

$$\frac{18000W}{200V} = 90A$$

Et on déduit la surface active :

$$90 \frac{A}{0.65} = 138.4615 \approx 140 \text{ cm}^2.$$

III.4.2 Dimensionnement du GPV

Le générateur PV utilisé est constitué de 6 panneaux de 100W, dont les caractéristiques sont :

- Une puissance typique : 600 W
- Tension à la puissance typique : 108V
- Intensité à la puissance typique : 5.56 A
- Surface d'un Panneau : 0.55 Cm²

SEMI-FLEXIBLE SOLAR PANEL

Capture rectangulaire



Description:

- Water-proof, perfect to use on yacht, car, boat, snow mobile, golf-cart.... etc
- Light weight for easy carrying
- High efficiency crystalline solar cell

Semi Flexible

- bending angle up to 30 degrees
- Water-proof, perfect to use on yacht, car, boat, snow mobile, golf-cart.... etc
- Light weight for easy carrying

E-mail us for details

- Please email us and give us your ideas ,our team will track carefully

Standard test condition

- est each module at
- 1000W/m² , AM1.5,25°C
- before packing .



Certification

- Rigorous quality control meeting
- The high international standards: CE,TUV,IEC,CQC and ISO9001:2008

Spécification technique

puissance maximale tension	18.0 ± 3 V
courant puissance maximale	5.56A
circuit ouvert voltag V	20 V
court-circuit actuel Un	6.1A
taille de module (large et haute)	1050mm * 540mm * 2mm
nombre de cellules	32 PCS
taille de cellules (large et haute)	125mm * 125mm, monocristallin
poids par pièce kg	1.5KG5
coefficient de température de Isc	± 05% °C
coefficient de température de Voc	-0.33% °C
température coefficient de puissance)	-0.23% °C
NOCT (nominale température de fonctionnement cellulaire)	45 °C (±°C)

Tab.III.1 : caractéristiques du panneau utilisé

III.4.3. Détermination des paramètres du modèle photovoltaïque

Les paramètres suivants ont été obtenus par résolution numérique sous Matlabsimulink :

P1	P2	P3	P4	A	R _{sh}	R _s
0.00345	$0.58 \cdot 10^{-5}$	$-0.336 \cdot 10^{-4}$	31.2367	1	0.614	151.16

Tab.III.2 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV utilisé.

III.4.4. Détermination des paramètres du modèle de la pile à combustible

Paramètre physique	Description	Valeurs
A	Surface active de la pile	16cm ²
l	Epaisseur de la membrane	280μm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15K
P _{anode}	Pression partielle de l'hydrogène	0.01atm
P _{cath}	Pression partielle de l'oxygène	0.02atm
R _C	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003ohm
B	Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement	0.016V
ε ₁	Coefficients paramétrique pour chaque modèle de pile	0.9514
ε ₂	//	$3.12 \cdot 10^{-3}$
ε ₃	//	$1.96 \cdot 10^{-4}$
ε ₄	//	$1.87 \cdot 10^{-4}$
δ _{H₂O} /SO ₃ ⁻	Teneur de l'eau dans la membrane	14molH ₂ O/molSO ₃
J _{max}	Densité de courant maximal	0.04934375A/cm ²

Tab.III.3 : principales caractéristiques de la PAC

III.4.5. Caractéristiques du véhicule

$m = 1300kg$
$A_f = 2.6m^2$
$f_{ro} = 0.01$
$C_d = 0.25$
$\rho_{air} = 1.2kg/m^3$

Tab.III.4 : principales caractéristiques du VEH

III.4.6. Dimensionnement des super condensateurs

Les super condensateurs constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule. On utilise un super condensateur de 16V d'une capacité de 58F. La puissance nominale et la puissance maximale des super condensateurs sont calculés comme suivant :[43]

$$P_n = \frac{0.12 \times V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}} = \frac{0.12 \times 16^2}{0.022 \times 0.63} = 2.2 \text{ kW}$$

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}} = \frac{17^2}{4 \times 0.022 \times 0.63} = 5.2 \text{ kW}$$


DATASHEET 16V SMALL CELL MODULE	
FEATURES AND BENEFITS <ul style="list-style-type: none"> ➤ 16 V DC working voltage ➤ Individually balanced cells ➤ Compact, lightweight system ➤ Screw terminals 	TYPICAL APPLICATIONS <ul style="list-style-type: none"> ➤ Automotive subsystems ➤ Consumer electronics ➤ Portable power tools ➤ Renewable energy systems ➤ Short term UPS & telecom ➤ Wind pitch control
	
PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	BMOD0058 E016 B02
Rated Capacitance ¹	58 F
Minimum Capacitance, initial ¹	58 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	22 mΩ
Rated Voltage	16V
Absolute Maximum Voltage ¹⁴	17V
Maximum Continuous Current (ΔT = 15°C) ²	12.0 A _{RMS}
Maximum Continuous Current (ΔT = 40°C) ²	19 A _{RMS}
Maximum Peak Current, 1 second (non repetitive) ³	200 A
Leakage Current, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) ⁴	25 mA
Maximum Series Voltage	750 V

Fig.III.1 : Caractéristiques du super condensateur utilisé

III.4.7. Caractéristiques des batteries

Tension nominale	26V
Capacité nominale	1200Ah
Courant Max	100A
Puissance spécifique	1.3 kW/kg

Tab.III.5 : Caractéristiques de la batterie utilisée

III.5. Stratégie de commande

III.5.1. Description du gestionnaire d'énergie

Le gestionnaire d'énergie détermine la puissance de réglage fournie par les différents sources à partir de la puissance demandée par la charge nous souhaitons satisfaire la demande du véhicule, pour cela un ensemble d'algorithmes permettant de commander le système de gestion hybride seront présentés. [2]

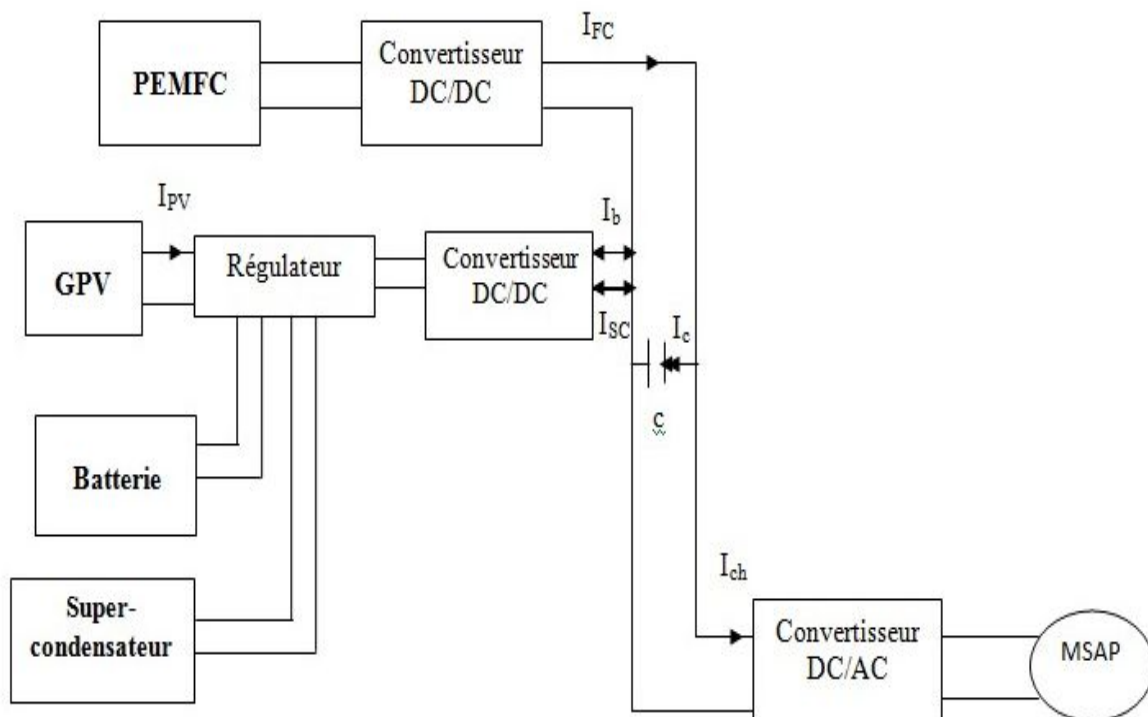


Fig.III.2 : Structure du système hybride avec stockage hybride étudié

Le comportement du bus DC peut être modélisé par l'équation suivante :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{scdc} + i_{batdc} + i_{pvdc} + i_{FCdc} - i_{ch} \dots \dots \dots (III.1)$$

Où le courant du condensateur se détermine par :

$$i_c = i_{scdc} + i_{batdc} + i_{pvdc} + i_{FCdc} - I_{ch} \dots \dots \dots (III.2)$$

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge, le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant.

III.5.2. La source secondaire d'énergie (SSE)

III.5.2.1. Principe d'hybridation des sources secondaire d'énergie

La source secondaire d'énergie assure la fluence d'énergie vers la machine électrique dans le cas où le système PAC ne peut seul assurer la traction de VH. Les batteries possèdent une grande densité d'énergie mais une faible densité de puissance, contrairement aux super condensateurs. Dans le domaine du transport, l'hybridation des batteries avec des super condensateurs offre de bonnes performances en termes d'autonomie, de puissance disponible, de continuité de service. Cette hybridation permet d'obtenir un système de stockage électrique ayant une forte densité de puissance et une forte densité d'énergie. De ce fait, on aboutit à de meilleures performances, notamment en termes de dimensionnement ou de durée de vie, qu'un système composé de batteries seules, d'où nous pouvons dire que l'un des enjeux dans le dimensionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible est de déterminer une combinaison idéale entre le système PAC et la SSE afin de satisfaire les performances dynamiques du véhicule tout en lui assurant une autonomie suffisante.[40]

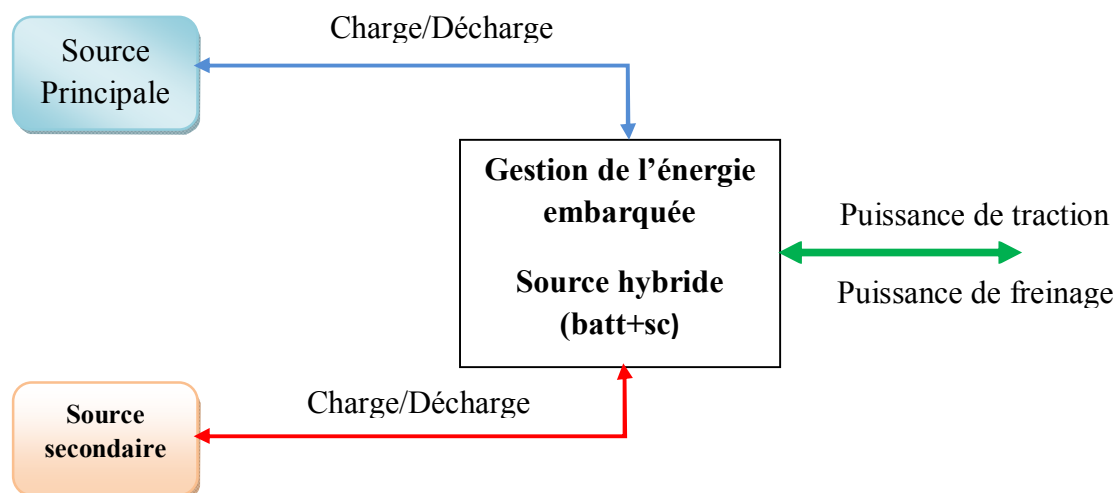


Fig.III.3 : Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides

III.5.3. Présentation de la méthode de gestion

La figure.III.2 de ce chapitre présente le système retenu dans cette étude. Ce système comporte deux sources d'énergie : la pile à combustible et un panneau PV et une source secondaire. Afin de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie du système et de maintenir borné l'état de charge de la source secondaire, la méthode à base de règles. Son principal rôle est d'assumer la distribution de puissance entre les sources pendant le fonctionnement du véhicule Elle permet de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie et de maintenir l'état de charge de la batterie borné.

En résumé, les deux objectifs visés dans cette approche sont la minimisation de la consommation en hydrogène de la pile à combustible et le maintien de l'état de charge de la source secondaire.[44]

III.5.3.1. Différents modes d'opérations du groupe motopropulseur dans un VH [41]

Durant le fonctionnement du groupe motopropulseur d'un véhicule hybride à PAC équipé d'une source secondaire d'énergie (SSE) plusieurs modes de fonctionnement peuvent être identifiés. Ces modes (traction, freinage, arrêt) induisent des différentes fluences d'énergie.

P_{ME} : Puissance de la machine électrique.

Soit : P_{SYSPAC} : Puissance du système PAC.

P_{SSE} : Puissance de source secondaire d'énergie.

Le choix des limites sur l'élément de stockage de la SSE ($P_{SSE}^{MIN} < P_{SSE} < P_{SSE}^{MAX}$) permet de maintenir son état de charge dans une fourchette acceptable. D'autre part, les limites sur la puissance de la PAC ($P_{SYSPAC}^{MIN} < P_{SYSPAC} < P_{SYSPAC}^{MAX}$) offrent un degré de liberté supplémentaire aidant à optimiser le fonctionnement de la pile

a. Modes de traction

C'est ce mode qui va permettre au véhicule de se déplacer, le principe est d'avoir une puissance demandée à un instant « t » supérieure ou égale à celle à l'instant précédente on distingue 04 cas :

b. Modes de freinage

Le véhicule est en mode freinage si la puissance demandée est négative tenant compte de la convention de signe utilisée pour différencier la traction du freinage. Dans ce cas, la puissance fournie par la pile à combustible est nulle et l'élément de stockage absorbe la puissance de freinage tout en respectant les contraintes sur la puissance maximale pouvant être absorbée ainsi que l'énergie maximale pouvant être stockée on trouve deux cas

c. Modes d'arrêt

Le véhicule est considéré en mode d'arrêt dans notre cas si la puissance demandée par la machine électrique de traction ($P_{DEM} = P_{ME}$) est nulle. Dans ce cas, les puissances fournies par la pile à Combustible (PAC), et l'élément de stockage (SSE), sont considérées nulles. A noter que nous ne tenons compte que de la puissance nécessaire à la traction vu que pratiquement la pile à combustible fournit toujours une puissance non nulle servant à alimenter, entre autres, ses auxiliaires. On trouve donc deux cas :

III.5.3.2. L'organigramme de gestion d'énergie

Le système de gestion d'énergie présenté est faite par rapport à la dynamique de véhicule il utilise un algorithme simple basé sur une logique de seuil, son objectif est de développer selon la position de la pédale d'accélérateur et la vitesse du véhicule, la commande de l'ensemble motopropulseur dont le rôle est de choisir à chaque instant la meilleure répartition de puissance entre les différentes sources d'énergie d'une manière à minimiser la consommation du combustible et répondre aux besoins de la charge, Dans cette stratégie, nous distinguons les trois modes de fonctionnement possibles du véhicule, à savoir le mode arrêt, le mode traction et le mode freinage.

- Voici comment fonctionne l'organigramme de gestion d'énergie :

+Alimentation de la charge par le SEH si l'énergie provenant de ce dernier est égale à la demande du moteur. Lorsque le SEH produit assez d'énergie pour satisfaire aux besoins de la charge, le surplus sert à recharger les batteries en priorité puis le super-condensateur.

+La recharge des batteries et des super-condensateurs s'arrête lorsqu'elles sont à plein charge (90%).

+Arrêt du véhicule si la puissance est insuffisante

$$(P_{hyb} < P_{ch}, EDC_{SC} < EDC_{sc,min} \text{ et } EDC_{batt} < EDC_{batt,min}).$$

La batterie débite sur la charge lorsque l'énergie de SEH est insuffisante ($P_{hyb} < P_{ch}$).

Lorsque la puissance demandée est supérieure à un certain seuil (P_{ref}) lors des pics de puissance les super-condensateurs prennent le relais.

La puissance disponible (P_{dis}) est calculée en faisant la différence entre la puissance fournie par le SEH (P_{hyb}) et la puissance demandée par la charge (P_{ch}). Si la puissance disponible est positive, alors les batteries et les super-condensateurs sont mis en charge. Si P_{dis} est négative, alors l'état de charge EDC des batteries est vérifiée, si cette dernière est inférieure à EDC_{min} , alors les batteries sont déconnectées, les super-condensateurs prennent alors le relais jusqu'à ce que leur état de charge soit aussi inférieur à EDC_{min} et si P_{dis} est supérieur à P_{ref} , alors les batteries fournissent la puissance demandée, dans le cas contraire, les batteries fournissent P_{ref} et les super-condensateurs le restant de la puissance demandée à savoir $P_{dis} - P_{ref}$.

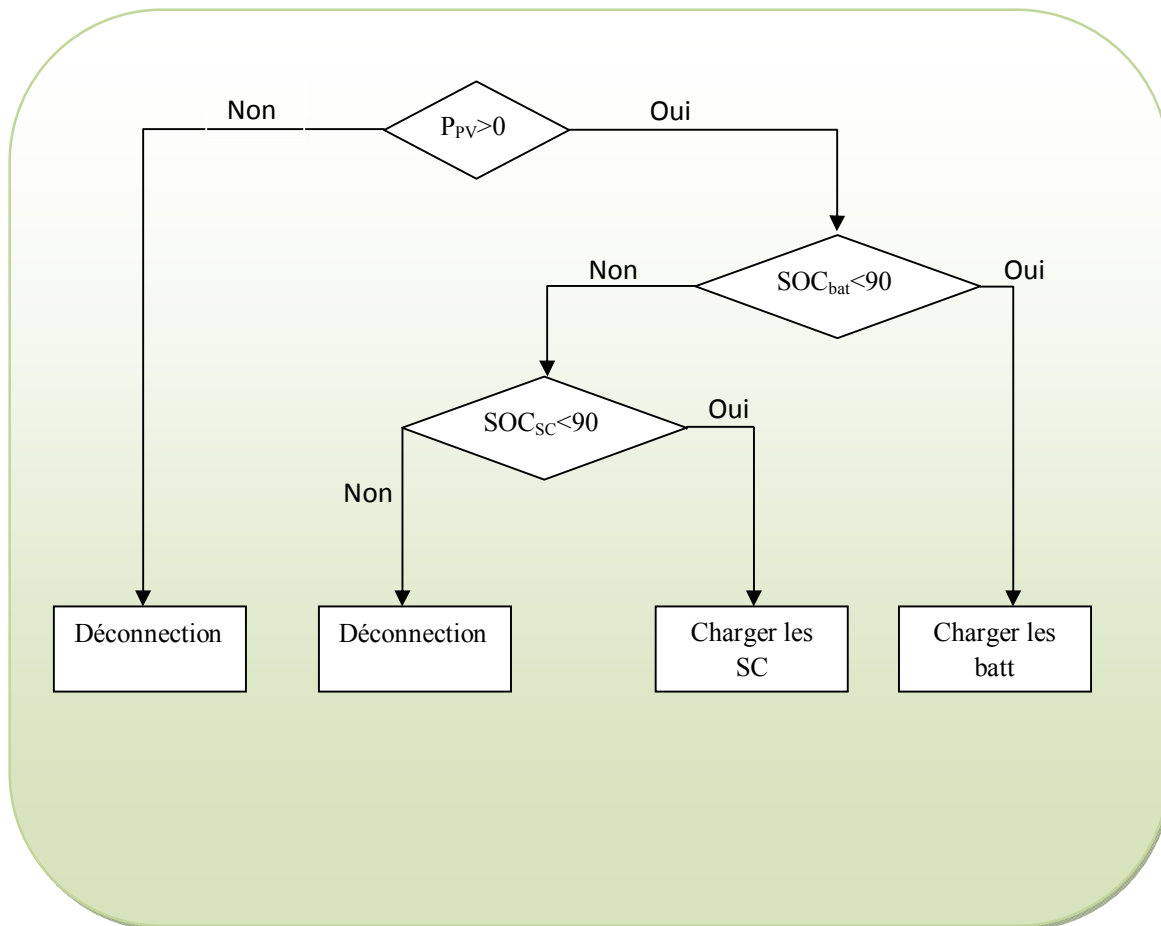


Fig. III.4 : Organigramme de la mise en charge des éléments de stockage par le PV

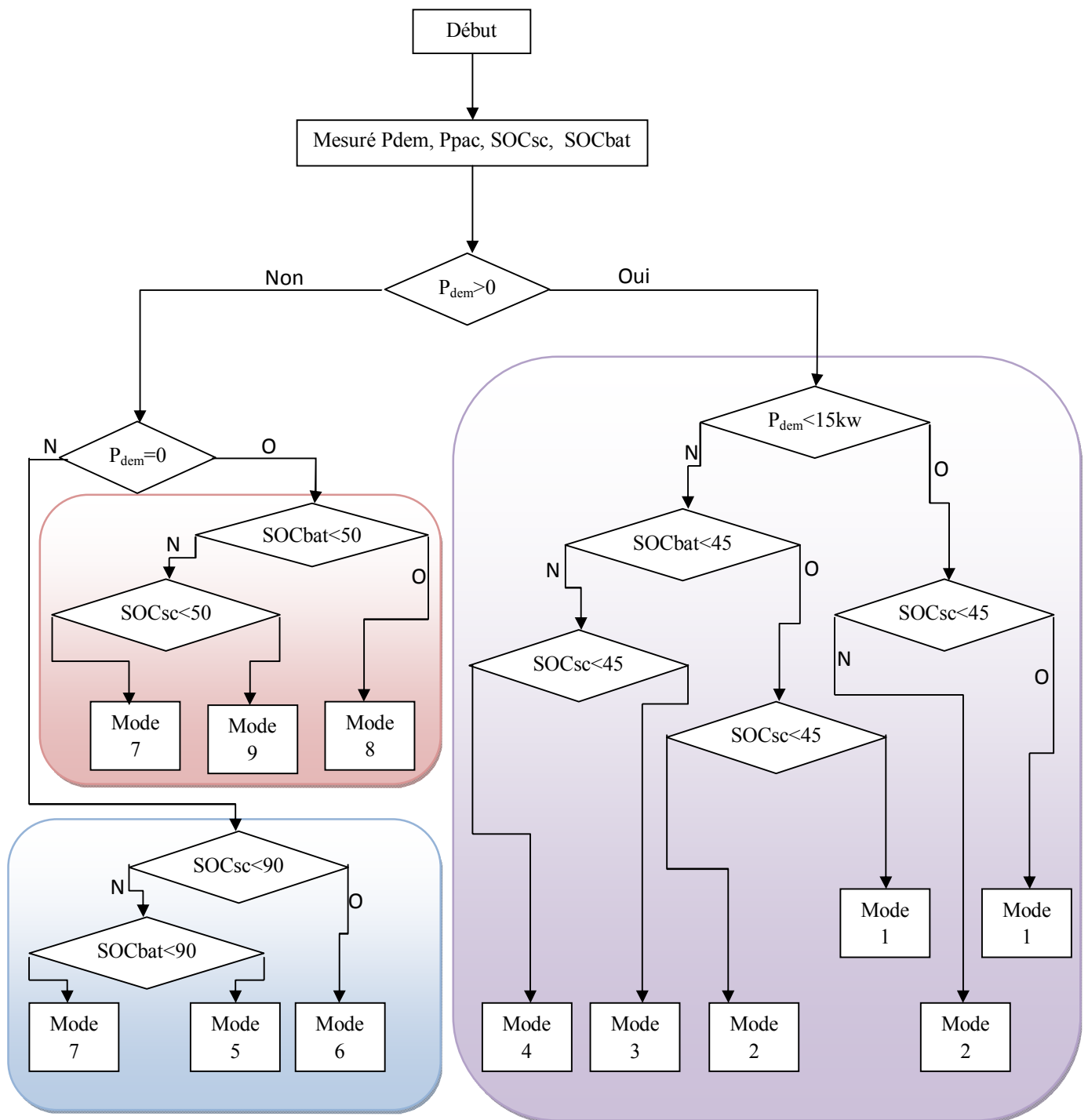
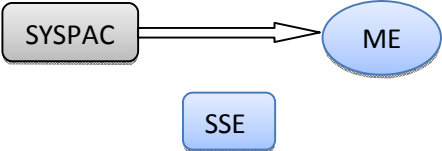
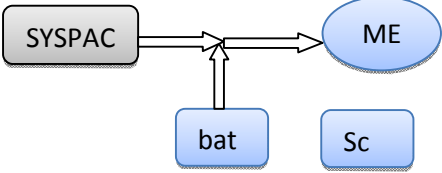
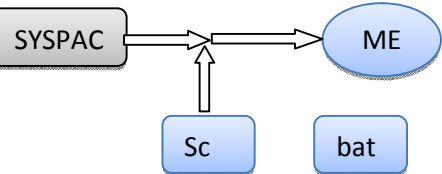
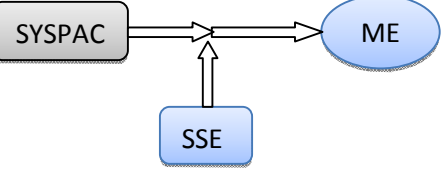
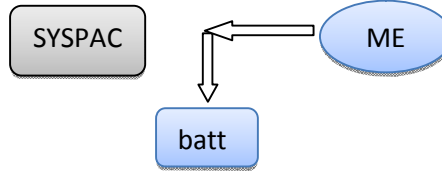
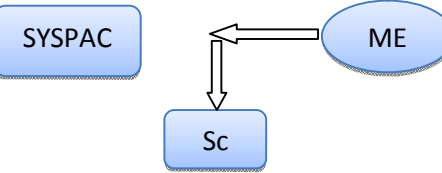

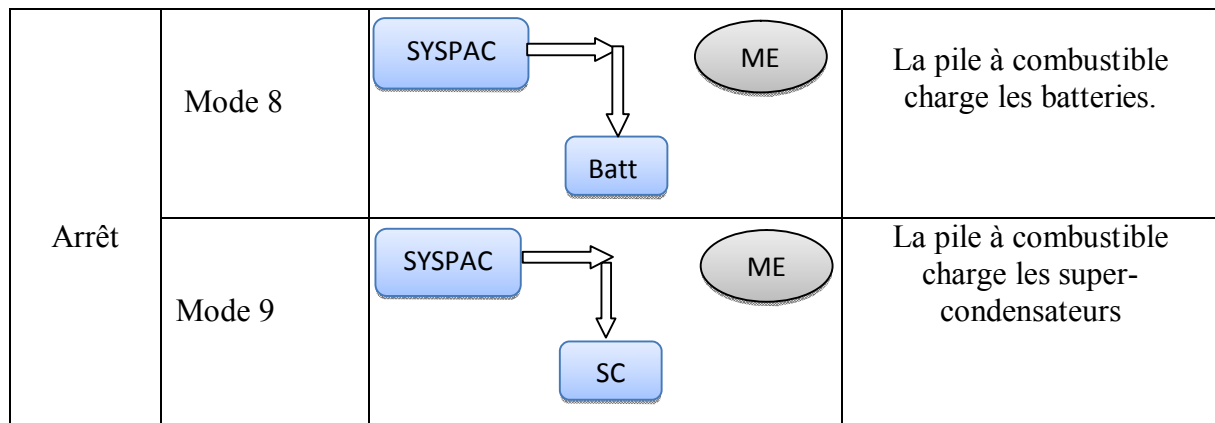


Fig. III.5 : L'organigramme de gestion d'énergie

III.5.3.3. Mode fonctionnement du système

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride, plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents (Tab.III.6).

	Modes	Schéma des flux énergétique	Description
Traction	Mode1		La PAC alimente seul la machine électrique.
	Mode 2		La PAC et la batterie alimentent ensemble la machine électrique.
	Mode 3		Le super-condensateur épaula la PAC pour alimenter la machine électrique
	Mode 4		La PAC et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique
Freinage	Mode 5		Charger la batterie avec l'énergie cinétique de freinage
	Mode 6		Le super-condensateur récupère l'énergie cinétique de freinage.
	Mode 7		Aucun flux énergétique.



Tab. III.6 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur

III.5.3.4. Description du modèle de simulation

La figure montre une représentation schématique de l'algorithme à base de règles. Cet algorithme est implémenté dans l'environnement Simulink. Les entrées de ce modèle sont la tension, le courant mesuré aux bornes de la source secondaire ainsi que son état de charge, la tension et le courant mesurés aux bornes de la pile à combustible, la puissance demandée par le groupe motopropulseur.

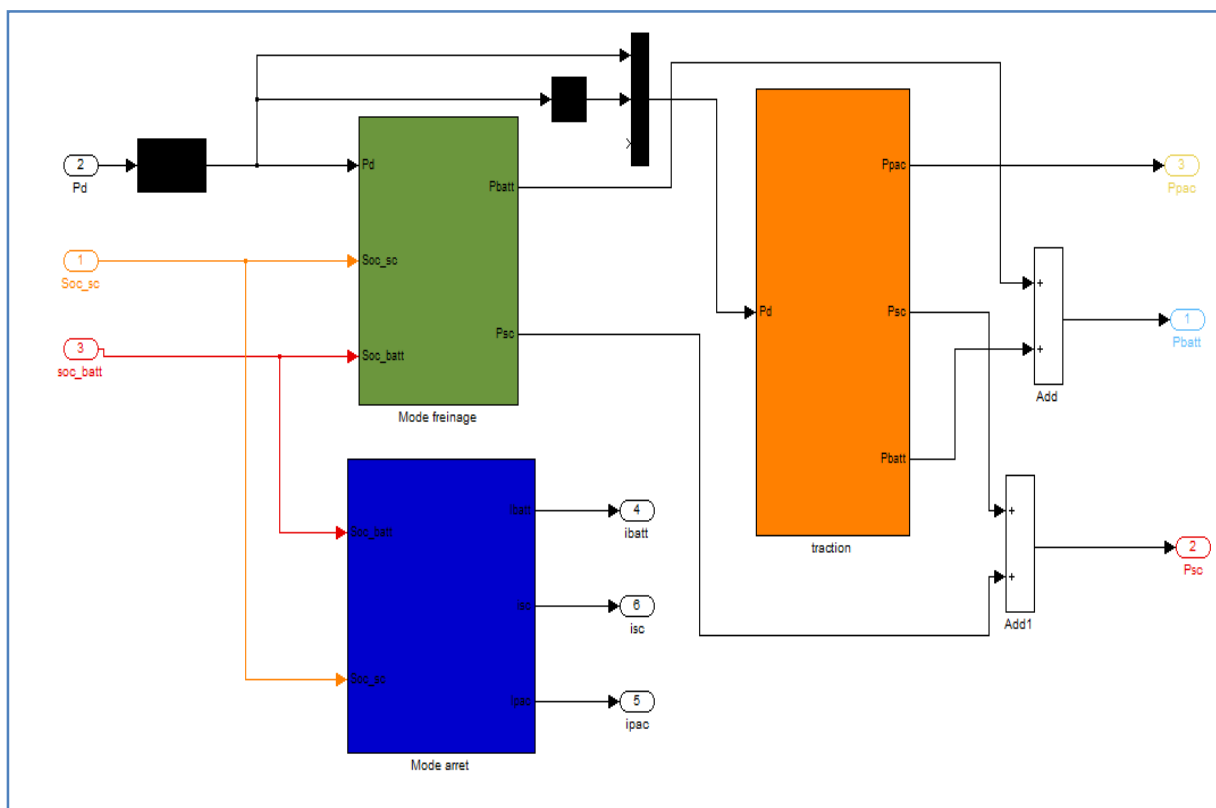


Fig.III.7 : Schéma bloc global de la gestion en puissance du système étudié

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons dimensionné les différentes parties du système véhicule électrique, à savoir la source d'énergie électrique (la PAC, le panneau photovoltaïque, les batteries et les super condensateurs).

Nous avons établi également dans ce chapitre, une stratégie permettant de gérer les flots d'énergie dans un système hybride et étudier la gestion d'énergie dans tout le système avec ses trois scripts possibles à savoir la traction, la décélération, et l'arrêt du véhicule, la simulation et l'étude de tout le système seront présentés dans le prochain chapitre.



Chapitre IV

Résultats de simulation



Introduction

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments composant le système étudié, nous allons tracer les résultats de simulation de la gestion d'énergie dans tout le système obtenus au cours de cette étude. L'organigramme de gestion sera modélisé sur matlab-simulink et il sera introduit dans le système global de simulation. Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation. Elle va être appliquée à un profil de mission c'est à dire un cycle de vitesse afin d'illustrer les différents modes de fonctionnement.

IV.1 Simulation générale appliqué au système global de véhicule à pile à combustible

La (Fig. IV.1) présente le système globale étudié sous Matlab/simulink, il regroupe le système d'un véhicule électrique : Pile à combustible, batteries, super-condensateurs, moteur électrique et les différents convertisseurs d'électronique de puissance. En présentera dans se qui suit les résultats de simulation du système globale.

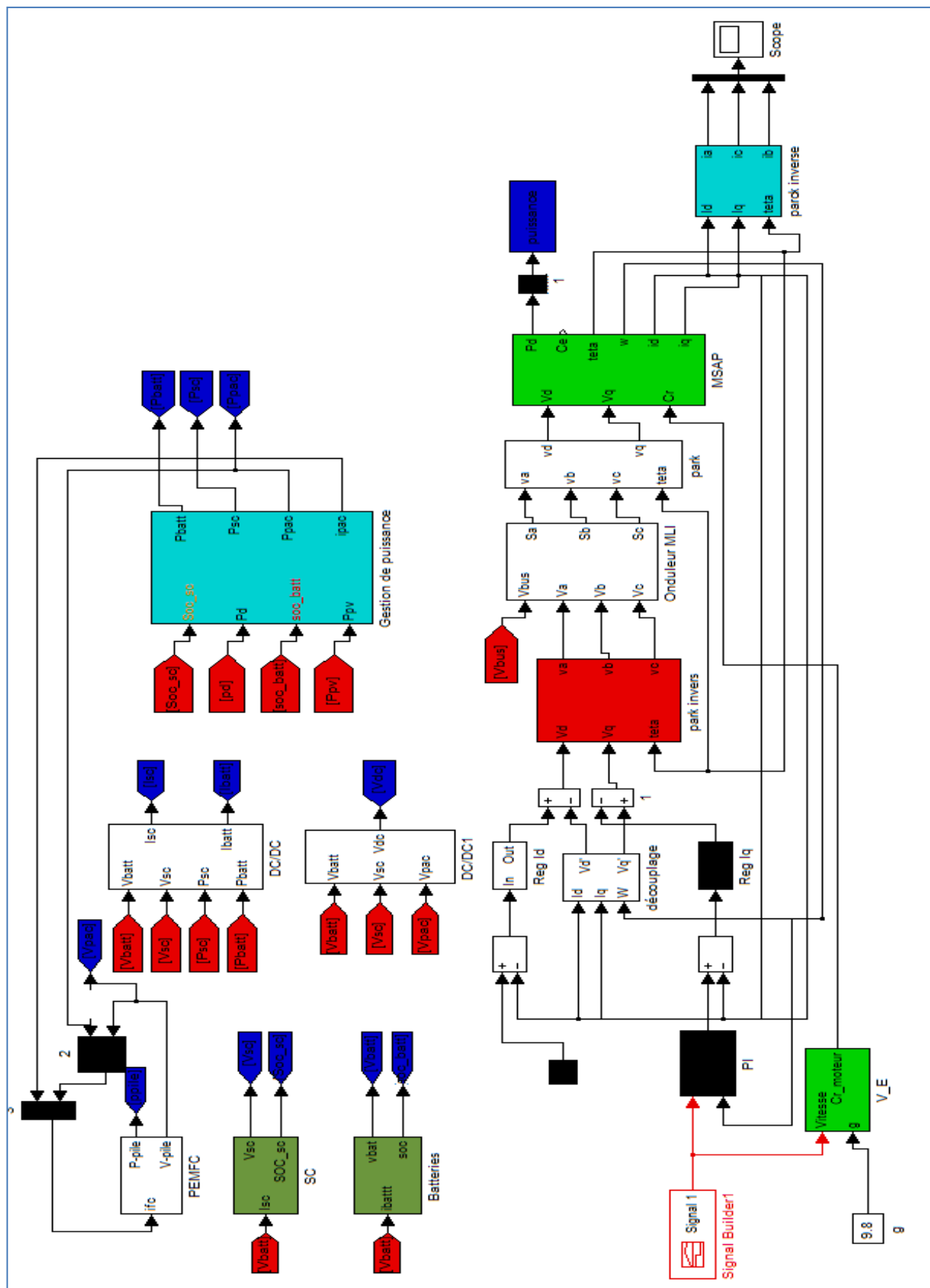


Fig. IV.1 : Schéma globale de simulation

IV.2 Résultats de simulation

Le modèle est testé sur un cycle de 10 secondes pendant le fonctionnement à des vitesses différentes selon un profile, la stratégie de gestion d'énergie proposée a été simulée en utilisant le modèle dynamique du véhicule développé dans l'environnement MATLAB/Simulink, On appliquant un profil de vitesse sur le système global on récupère les différentes allures qu'on a obtenu pour l'analyse :

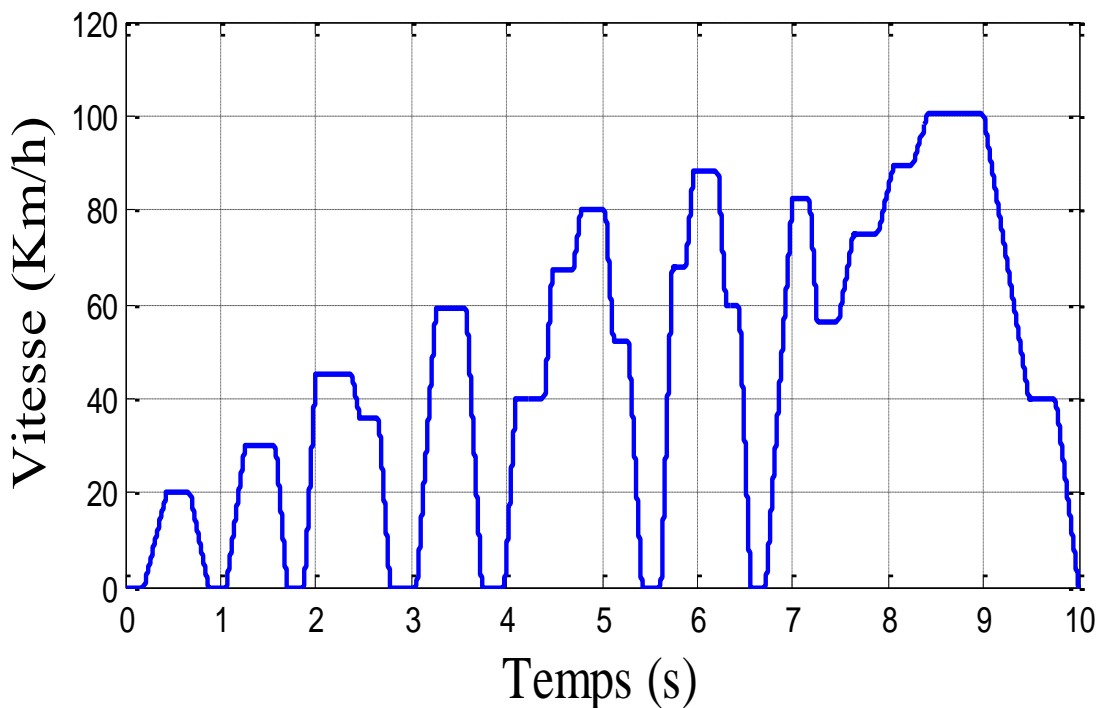


Fig. IV.2 : Vitesse de référence en km/h

La (**Fig. IV.2**) montre l'allure de la vitesse du véhicule en km/h, on a choisi un profil de vitesse qui va nous permettre de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule à savoir la traction, le freinage, et l'arrêt. Ce profile aussi va imposer l'allure du couple et de la vitesse du moteur car le modèle mécanique du véhicule est basé sur sa vitesse V et sur l'accélération g .

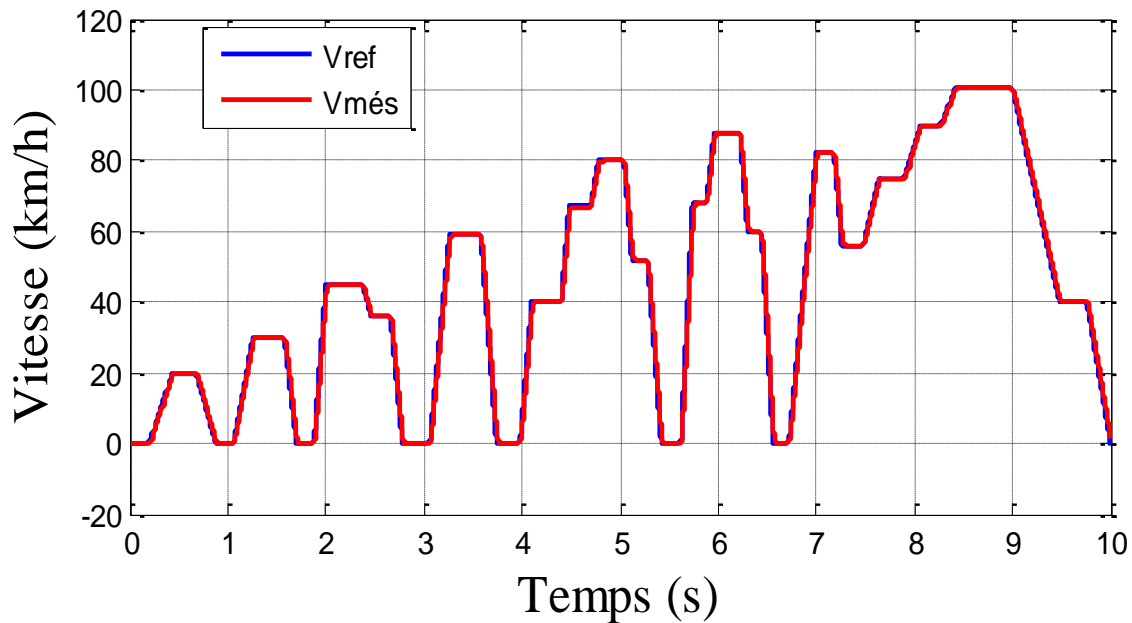


Fig. IV.3 : Vitesse du moteur électrique en km/h

En comparant les deux allures on remarque que la vitesse du moteur suit parfaitement la vitesse de référence imposée par la commande vectorielle et elles ont le même profil que la vitesse de véhicule.

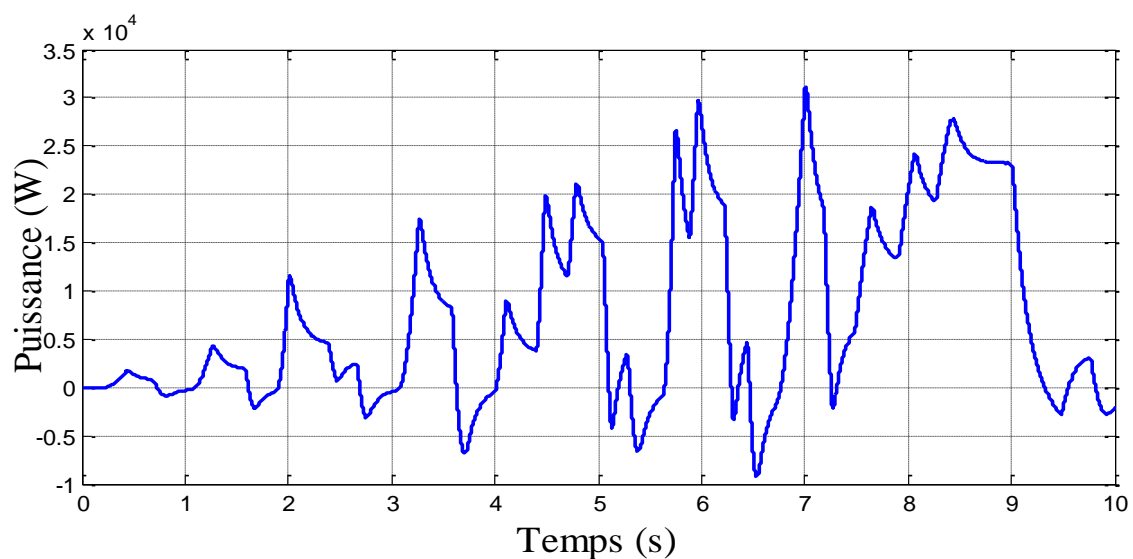


Fig. IV.4 : Profil de la puissance demandé

La (Fig. IV.4) montre l'allure de la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé qui comporte les trois de mode de fonctionnement à savoir, accélération, décélération et l'arrêt.

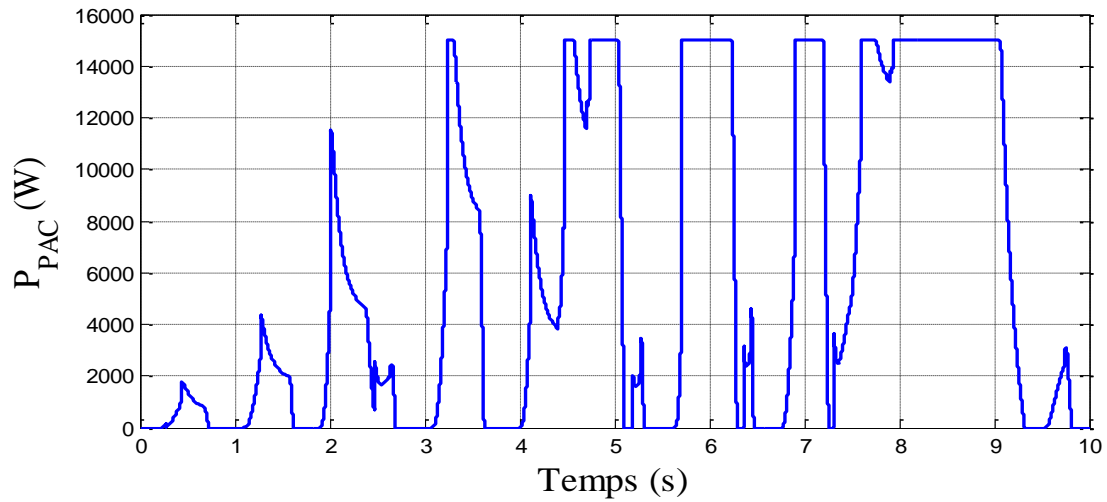


Fig. IV.5 : Puissance délivre par la pile a combustible (a)

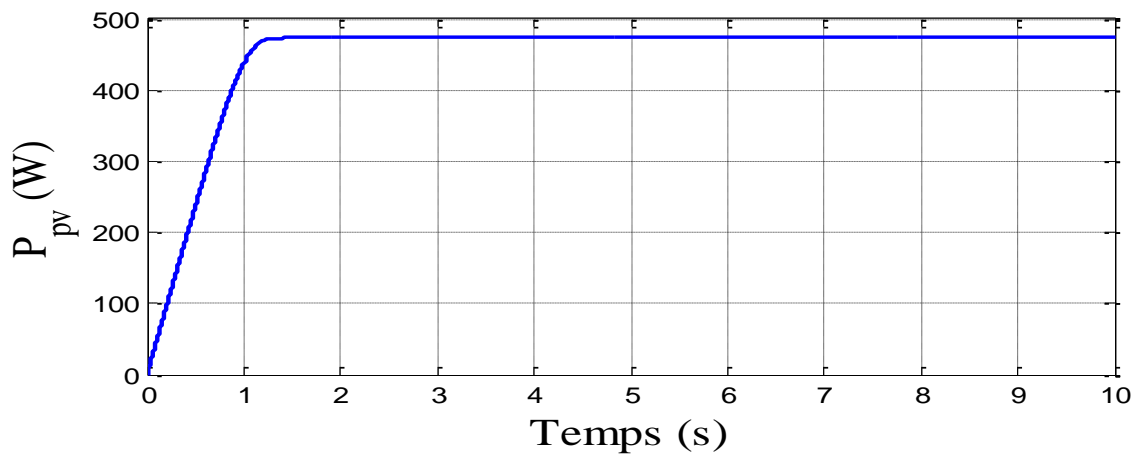


Fig. IV.6 : Puissance délivrée par les panneaux PV (b)

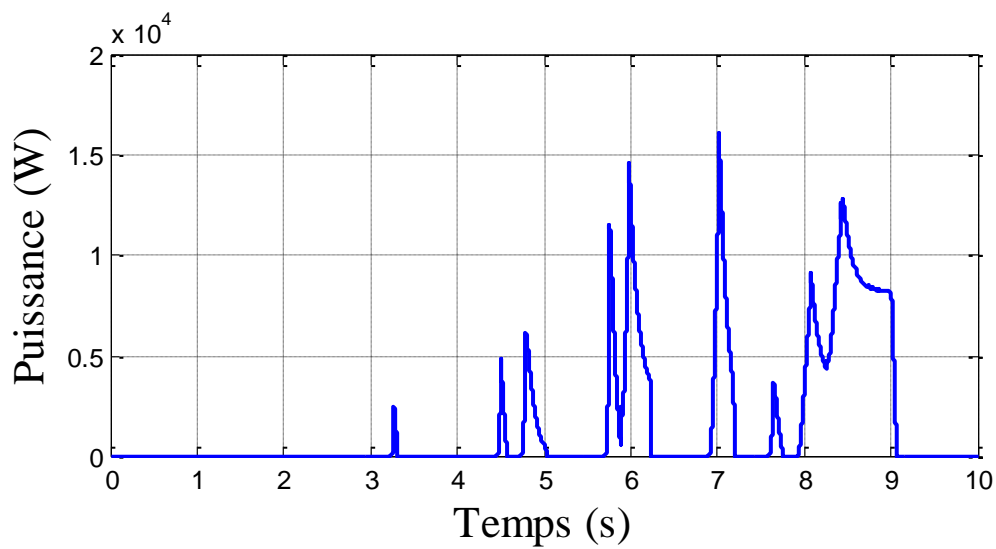


Fig. IV.7 : Puissance délivrée par la batterie (c)

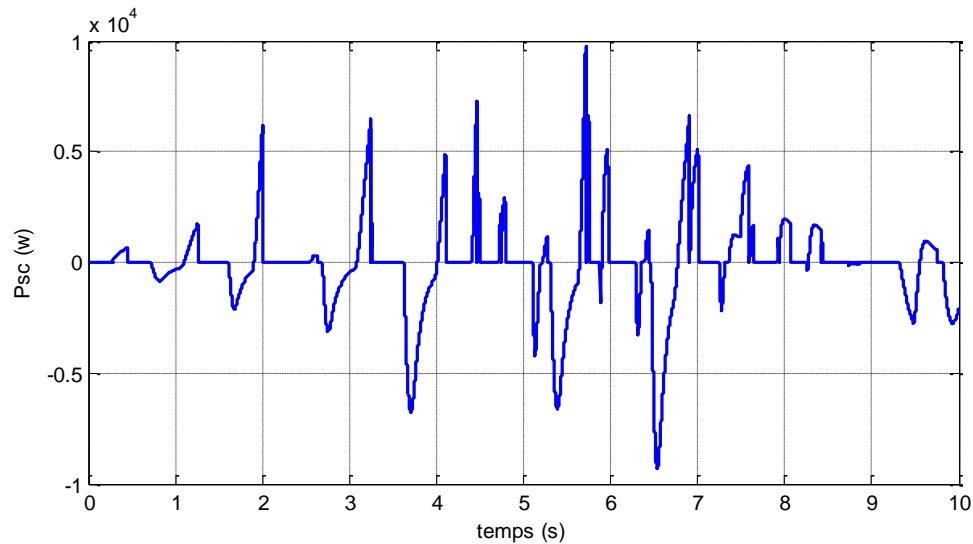


Fig. IV.8 : Puissance du super-condensateur (d)

- a) La figure (a) montre le comportement de la puissance de la pile à combustible on remarque que les super-condensateurs interviennent pour compenser la demande en puissance, jusqu'à elle atteint sa limite 15kW.
- b) La figure (b) montre le comportement de la puissance du panneau photovoltaïque, on remarque que la puissance est stable après 1.15 s qui est le temps de réponse, sous les conditions de température (25°) et d'ensoleillement (800 w/m^2).
- c) La figure (c) montre l'allure de la puissance délivrée par les batteries, en remarque elle peut atteindre les 15kW lors de la forte demande en puissance, et les super-condensateurs interviennent pour compenser toujours la demande en puissance.
- d) La figure (d) montre le comportement de la puissance des super condensateurs, la puissance positive signifiée celle dissipée au moteur électrique, et la puissance négative signifiée celle récupérée aux moments de freinage.

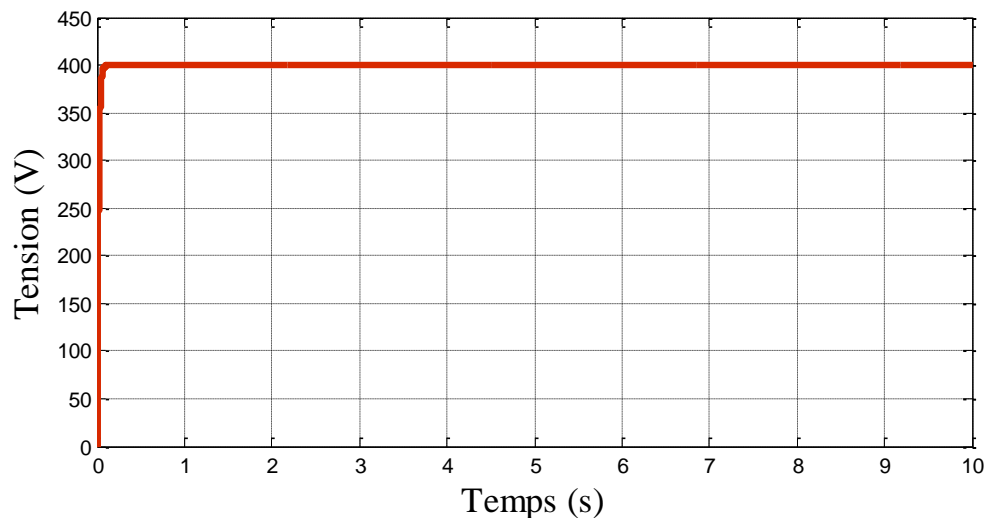


Fig. IV.9 : tension au niveau du bus continu

La (Fig. IV.9) montre le comportement de la tension au niveau du bus continu on remarque que la tension est stable après 0.15 ms qui est le temps de réponse, elle atteint de près la valeur maximale qui est de 400V durant toutes les phases de fonctionnement.

IV.2.1 Mode traction

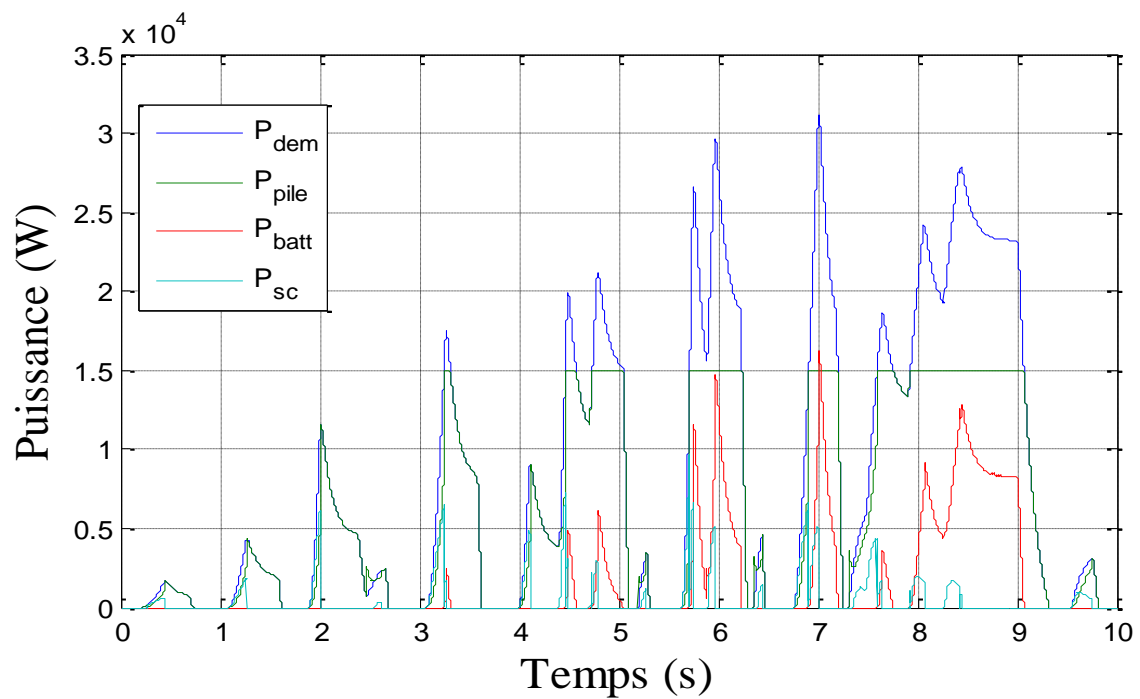


Fig. IV.10 : Profil des puissances durant le mode de traction

La figure IV.10 montre les allures des différentes puissances des sources d'énergie de système étudié lors de traction, en remarque bien que notre système reprend au besoin de la charge durant le profil de vitesse testé.

Et pour une puissance demandée inférieure à 15kW la pile à combustible et les super-condensateurs assurent la traction, et pour des fortes demandes en puissance ($P_{dem} > 15kW$) en fait appel aux batteries pour satisfaire la demande de la charge.

IV.2.2 Mode freinage

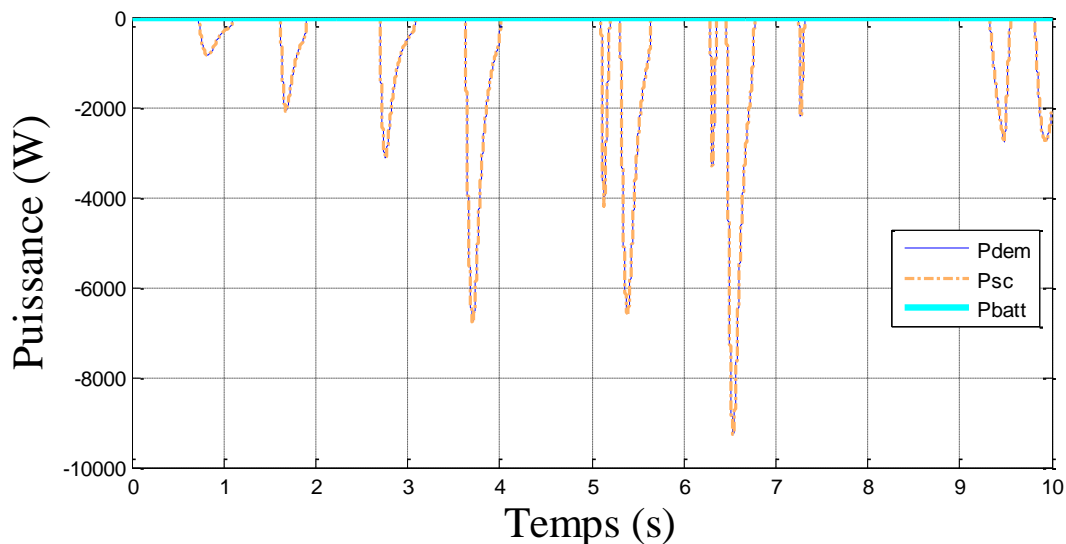


Fig. IV.11 : Profil des puissances durant le mode de freinage

D'après les résultats de cette figure en remarque bien que les super condensateurs récupèrent l'énergie de freinage, et la puissance fournie au niveau des batteries est nulle, qui indique que les super condensateurs ne sont pas chargés à 90%.

IV.2.3 Mode arrêt

Durant cette période et d'après l'organigramme de la gestion aucun flux énergétique transférer sauf les panneaux photovoltaïques qui récupèrent l'énergie solaire et charger les batteries ou les super condensateurs à savoir l'état de charge des deux sources.

IV.2.4. Autres résultats

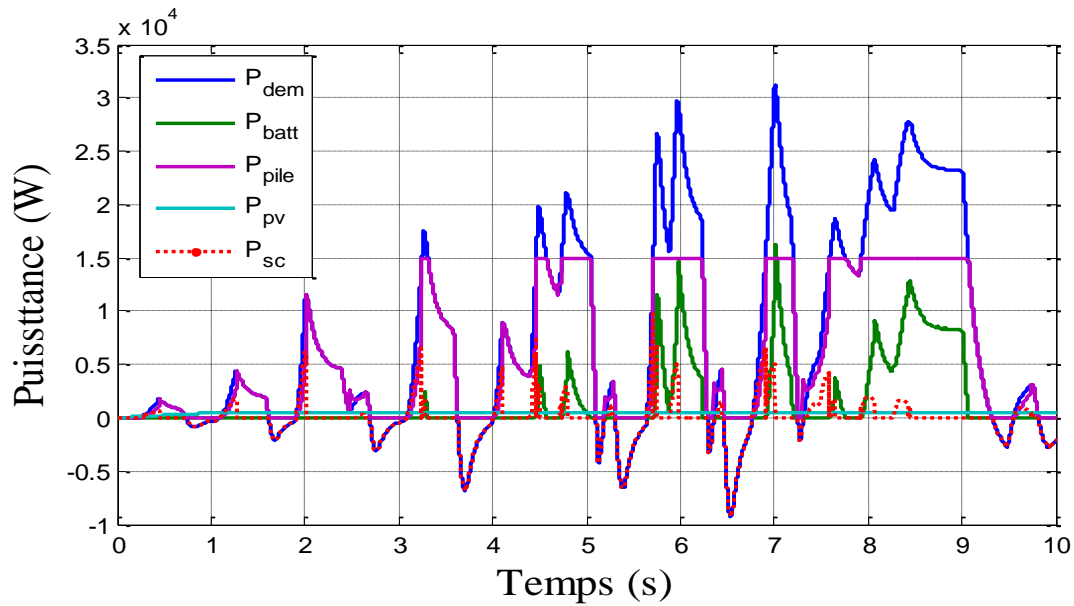


Fig. IV.12 : profile de toutes les puissances

Nous remarquons de ces résultats de simulation que les super-condensateurs sollicitent la demande en puissance durant tout le parcours routier. Pour les différentes vitesses. L'ajout des super condensateurs dans cette configuration a pour rôle de reprendre aux fortes demandes en puissance et d'améliorer la durée de vie de la batterie en respectant le soc_{\min} et le soc_{\max} .

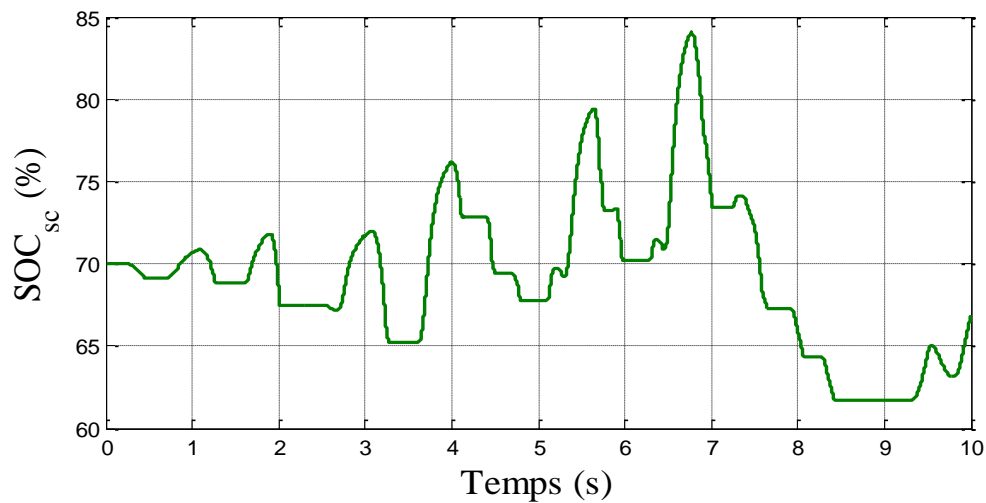


Fig. IV.13 : Etat de charge des super-condensateurs

La figure ci-dessus représente l'état de charge des super condensateurs (SOC Stat Of Charge), en remarque qu'elle est protégée entre les deux niveaux de charges, décharge pendant le fonctionnement moteur correspondant à une diminution du soc (state of charge), pour alimenter le moteur électrique, et recharge pendant le fonctionnement générateur correspondant à une augmentation du soc, et récupération de l'énergie cinétique des roues.

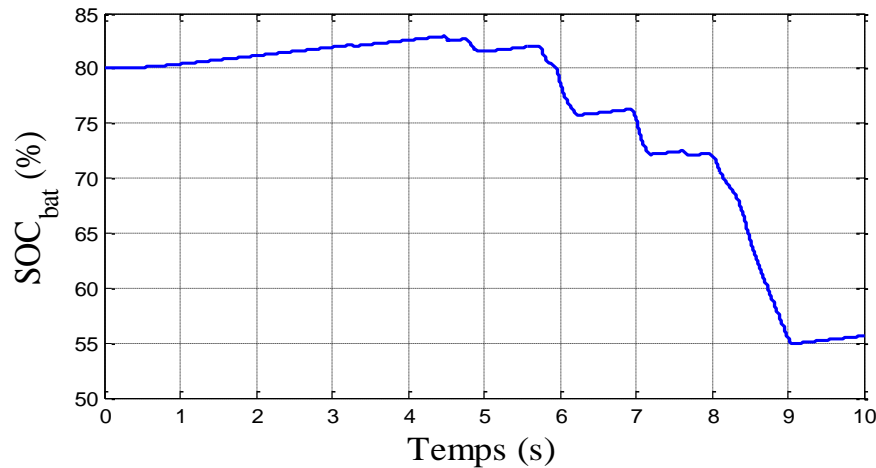


Fig. IV.14 : état de charge des batteries

La figure IV.14 montre l'état de charge des batteries durant le cycle de vitesse imposé, au premier temps elles chargent par les panneaux photovoltaïques, lorsque la pile à combustible reprend aux besoins de la charge, et déchargent lorsque la demande en puissance dépasse la puissance nominale de la pile à combustible.

IV.3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation du système globale étudié, et de valider la gestion proposée de ce dernier.

On constate l'intérêt de la gestion de puissance dans un système hybride qui permet de gérer les sources d'énergies et charger le système de stockage, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption.

L'importance de système de stockage (les batteries et les super condensateurs) récupère l'énergie cinétique des roues.



Conclusion générale et perspectives



Conclusion générale

Le principal objectif de ce mémoire était la gestion de puissance dans un étage hybride d'alimentation purement électrique constitué de deux sources : la principale qui est la pile combustible ; la secondaire formée d'un pack de super condensateurs et de batteries alimentant la machine synchrone à aimant permanent.

Pour une alimentation sans interruption et fiable, un sous-système constitué d'un panneau photovoltaïque destiné à la recharge des éléments de stockage lors de l'arrêt a été introduit.

Ces sources sont connectées au bus continu par le moyen de deux convertisseurs de puissance à courant continu, l'un est un élévateur et l'autre un convertisseur réversible en courant.

La gestion d'énergie est élaborée par rapport à la puissance demandée par le véhicule et celle qui est disponible dans les deux sources d'énergie ; à savoir la pile à combustible et le système de stockage d'énergie (SSE).

La puissance électrique demandée est correctement distribuée à travers les éléments de cet étage d'alimentation, et cela afin d'assurer la demande en puissance nécessaire à la machine synchrone à aimants permanents pour l'entraînement du véhicule.

Les éléments constituant l'étage d'alimentation électrique (PAC+GPV+SSE) ont été modélisés et dimensionnés dans le but de constituer une étude homogène basée sur un exemple d'un cas réel de prototypes de véhicules hybrides légers. Un dimensionnement convenable est nécessaire pour fixer des contraintes réalistes devant être gérées par les algorithmes de gestion. Les quatre points essentiels présentés dans ce travail sont :

- Un état d'art sur les éléments constituant le système étudié ;
- Dimensionnement et modélisation de tous les constituants de la chaîne de traction ;
- Elaboration de la commande de la machine électrique dédiée à la traction du véhicule électrique ;
- Une gestion des flux énergétiques dans le système du véhicule électrique, dans notre cas la gestion est faite par rapport à toutes les sources d'énergie telle qu'on aura lors des trois modes traction, freinage et arrêt, la puissance demandée.

Perspectives

En perspectives, nous envisageons d'élargir ces travaux, dans le but d'améliorer davantage le fonctionnement du véhicule électrique, nous proposons de :

- Réaliser un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour valider le travail et pourquoi pas le concrétiser ;
- Travailler sur un modèle dynamique du système PAC, c'est à dire avoir un modèle d'une pile à combustible qui prend en considération la consommation d'hydrogène, un modèle de la batterie, du véhicule, et du moteur qui auront le même comportement qu'un système réel quelque soit les conditions de fonctionnement ;
- Optimiser au mieux le système en présentant d'autres stratégies de commande qui sont plus compliquées mais qui donnent des résultats plus performantes ;
- Indiquer les différentes contraintes, la consommation en hydrogène, le coût de fabrication, pour mieux dimensionner le système.



Références Bibliographiques



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Damien Paire, «Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides ».Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort 12/2010.
- [2] : M.MADIHA mémoire de magister « gestion d'énergie d'un système d'entrainement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents » univ Biskra 2014.
- [3] : F. Brihmat, «L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement De puissance pour une centrale hybride PV/Eolien», Mémoire de Magister de l'Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [4] : L.Stoyaov<<Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelable>>thèse de doctorat en génie électrique de l'université Technique de sofia, 2011
- [5] I. VECHIU thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université du havre “modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome“ année 2005
- [6] : S. AOUIMEUR “Optimisation et gestion de puissance d'un système hybride (PV éolien) “ Université Abderrahmane Mira De Bejaia JUIN 2015
- [7] : A. Neffati, « Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision .floue optimisée pour véhicule électrique hybride » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier, pp. 12 / 2013.
- [8] : Y.GAOUA « modèles mathématiques et techniques d'optimisation non linéaire et combinatoire pour la gestion d'énergie d'un système multi-source: vers une implantation temps réel pour différentes structures électriques de véhicules hybrides. » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 12 / 2014
- [9] : L. Croci. « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries /super condensateurs. Automatique ». Université de Poitiers, 2013.
- [10] :Approche générale Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes /juin 07

- [11] : C.ZIDALI, F. BENYAROU, B. BENYOUCEF « simulation de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) » , revues énergies renouvelable , 2003.
- [12] : R. MAOUEDJ « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, université de Tlemcen, 2005
- [13] : Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483
- [14] : T.AZIB THÈSE DE DOCTORAT « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible Conceptions d'Architectures et de Leurs Commandes » décembre 2010
- [15] : A. NEFFATI THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par : Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride" avril 2013
- [16] R. Mosdale, "Véhicules électriques à pile à combustible," Techniques de l'Ingénieur, no. D 5570, 2003
- [17] : Pierre CERRE_COMBE, " les Piles Basse Température PEMFC," CLEFS CEA-N°44, 2000-2001.
- [18] 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, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004
- [19] : D. Candusso, Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport, HDR, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, pp. 47, 2013.

[20] : J. Bernard, “Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande,” Thèse de doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, “ 3 décembre 2007

[21] : J. Ramouse, (transfert couple masse-charge-chaleur dans une cellule de pile a combustible a membrane polymère) thèse doctorat, 21 novembre 2005, l’institutie nationale polytechnique de lorraine/France

[22] : N. Romani, ‘Modélisation et commande du système d’Alimentation en Air pour le Module de puissance d’un véhicule à pile à combustible avec Reformage Embarqué, université Paris Sud-Paris XI,2007.

[23] : V. Schwarz et B. Gindroz, « Le stockage électrochimique », rapport de l’ADEME, dossier stockage de l’énergie, 2005

[24] : Lassègues, J. C. Super condensateurs. Ed. Techniques Ingénieur. (2001).

[25] : H.Gualous*, R.Gallay*, A. Berthon* Utilisation des super condensateurs pour les stockages de l’énergie embarquée : applications transport CH-1728 Rossens, Suisse

[26] : N.RIZOUG. « Modélisation électrique et énergétique des super condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d’un module de super condensateurs basse tension en grande puissance universite de lille 02/ 2006

[27] : F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa, ‘Modélisation d’une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale’, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°2, pp. 109 – 120, 2005.

[28] : M. Belatel *, F.Z. Aissous et F. Ferhat Contribution à l’étude d’une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d’énergie électrique verte Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 13 – 28 13

[29] : J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A. Rodrigues, 'Parametric Modelling of the Performance of a 5 kW Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Stack', Journal of Power Sources, Vol. 49, pp. 349 - 356, 1994.

[30] : Mr. MEZZALIM et Mr. MOULOUDJIS "« Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque » mémoire de fin d'étude université de Bejaia Juin 2014.

[31] : Dr. S.BELAID Maître de conférence classe B : "Cours Energie Solaire Photovoltaïque" Université de Béjaia 2014/2015

[32] : N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[33] : Safa Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden 'Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques'

[34] : Mamadou Bailo Camara, Super-condensateurs pour échange dynamique d'énergie a bord du véhicule électrique hybride. Modélisation, étude des convertisseurs et commande, These de l'Université de Franche-Comte, Dec. 2007.

[35] : Mohamed.N , Sid, H. Alloui, K. Marouani M.Becherif Gestion Optimale de l'Energie d'un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

[36] : Philip Tritschler 'Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système _a pile _a combustible embarquée dédiée a l'application agricole' 14/02/2011

[37] : Farah.S « Identification et Commande de Moteurs Brushless Pour Mini-Drones » mémoire de fin d'étude UNIVERSITÉ LIBANAISE FACULTÉ DE GÉNIE - BRANCHE III .04 octobre 2013.

[38] : A. Nouh "« Contribution au Développement d'un Simulateur pour les Véhicules Electriques Routiers", Thèse de doctorat en Science pour l'ingénieur- Génie électrique, Université de Belfort-Montbéliard et de Franche-Comté, 2008

[39] : A. Haddoun, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, K. Sraïro, ‘ ‘ A Loss-Minimization Scheme for EV Induction Motors ‘ ‘, IEEE Trans on Vehicular Technology, vol. 56, No. 1, pp. 81-88, 2007.

[40] : T. MESBAHI Influence des stratégies de gestion d’une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d’un modèle multi physique CENTRALE LILLE 25/03/2016

[41] : L.KHELLAFI Modélisation, Optimisation et Gestion Énergétique de l’étage d’alimentation dans les Véhicules Électriques Hybrides Thèse de doctorat UNIVERSITÉ DE BATNA 28/06/2012

[42] : Philip Tritschler « Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système a pile a combustible embarquée dédiée a l'application agricole thèse de doctorat l’INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

[43] : H.Maker ‘ Optimisation et gestion d’énergie pour un système hybride : association pile a combustible et super condensateurs’ thèse de doctorat de l’université de technologie Belfort Montbellard 4/11/2008

[44] : H.NEHEMI optimisation énergétique en temps réel d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs université du québec à trois-rivières août 2015

Gestion de puissance d'un système hybride

Résumé :

La gestion de la distribution de l'énergie électrique dans un système multi-source (véhicule électrique hybride) est importante. Elle permet de multiplier les performances du système en diminuant la consommation de combustible utilisée par la source principale, tout en respectant la demande et les différentes contraintes de fonctionnement de la chaîne énergétique et de sécurité du système. Ce modeste travail s'inscrit à un système électrique hybride, permettant de faire fonctionner un véhicule électrique hybride. Une pile à combustible, panneau photovoltaïque, des batteries, et des super condensateurs alimentent via des convertisseurs de puissance la machine synchrone à aimants permanents pour la mise en marche du véhicule. Le thème proposé consiste à concevoir un gestionnaire d'énergie permettant de commander efficacement l'énergie fournie par les différentes sources. Un ensemble des régulateurs ont été proposés pour le contrôle des différents sous-systèmes.

Mots-clés : véhicule électrique hybride, Pile à combustible, générateur PV, batteries, Super condensateurs, Machine synchrone à aimant permanent, Gestion de puissance.

Power management of an hybrid system

Abstract:

Managing the distribution of electrical energy in a multi-source system (hybrid electric vehicle) is paramount. It increases the system performance by minimizing the fuel used by the primary source, while respecting demand, the different operating constraints of the energy chain and system security. This humble work is a part of an hybrid electric system, to operate an hybrid electric vehicle. A fuel cell, photovoltaic panel, batteries, and super capacitors feed the synchronous permanent magnet machine via the power converters for moving the vehicle. The proposed theme is to design an energy manager to efficiently control the energy supplied by the different sources. A set of regulators have been proposed for the control of the various subsystems.

Keywords: Hybrid electric vehicle, a fuel cell, photovoltaic panel, batteries, super capacitors, synchronous permanent magnet machine, Power management.