



HAL
open science

Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique

Rania Mkahl

► **To cite this version:**

Rania Mkahl. Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique. Energie électrique. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2015. Français. NNT : 2015BELF0264 . tel-01874805

HAL Id: tel-01874805

<https://theses.hal.science/tel-01874805>

Submitted on 14 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

École Doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Spécialité : **Automatique**

par

Rania MKAHL

Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique

Thèse soutenue publiquement le **01 décembre 2015** devant le jury composé de :

Pr. A. EL HAJJAJI	Rapporteur	Université de Picardie Jules Verne
Pr. R. OUTBIB	Rapporteur	Université Aix-Marseille
Pr. T. AHMED-ALI	Examinateur	École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen
Dr. J. GABER	Examinateur	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Dr. M. WACK (HDR)	Directeur de thèse	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Dr. A. NAIT-SIDI-MOH	Encadrant de thèse	Université de Picardie Jules Verne

*À mes parents,
À mes frères et à mes sœurs,
À mes amis et mes connaissances,*

Table des matières

Remerciements	2
Introduction générale	4
1 Préliminaires	9
1.1 Généralités sur les véhicules électriques	9
1.1.1 Définition du véhicule électrique	9
1.1.2 Histoire du véhicule électrique	10
1.1.3 Véhicules électriques : avantages et inconvénients	11
1.1.4 Principaux éléments des véhicules électriques VEB	12
1.1.4.1 Moteurs électriques	13
1.1.4.2 Batteries	15
1.1.4.3 Convertisseurs de puissance	19
1.1.5 Principales architectures des véhicules électriques	19
1.2 Recharge de véhicules électriques	20
1.2.1 Sources d'énergie	21
1.2.1.1 Sources d'énergies non renouvelables	21
1.2.1.2 Sources d'énergies renouvelables	21
1.2.2 Stockage d'énergie électrique	24
1.2.3 Topologies de recharge	29
1.2.4 Les moyens de recharge	32
1.3 Flux énergétique	34
1.4 Conclusion	35
2 Dimensionnement d'un système de recharge de VEs	37
2.1 Introduction	37
2.2 Structure d'un système de recharge	38
2.3 Motorisation du véhicule électrique	40
2.3.1 Puissance et énergie nécessaires pour la propulsion d'un VE	41
2.3.2 Motorisation à vitesse constante	43
2.3.3 Motorisation à vitesse variable	44
2.4 Choix des batteries du système de recharge	46
2.5 Dimensionnement des batteries Li-Ion	48
2.5.1 Méthode de dimensionnement des batteries Li-Ion	48
2.5.2 Choix de la batterie de traction Li-Ion	49

2.5.3	Constitution du pack de batteries	50
2.6	Dimensionnement des panneaux solaires	51
2.6.1	Les panneaux photovoltaïques	51
2.6.2	Méthode de dimensionnement des panneaux	52
2.7	Dimensionnement des batteries au plomb	55
2.7.1	La batterie au plomb (batterie stationnaire)	55
2.7.2	Méthode de dimensionnement des batteries au plomb	55
2.8	Mise en application	56
2.9	Les convertisseurs de puissance DC/DC	59
2.10	Dimensionnement d'un hacheur non réversible en courant (survolteur)	60
2.11	Choix du régulateur	61
2.12	Dimensionnement d'un hacheur réversible en courant	61
2.13	Conclusion	62
3	Modélisation du système de recharge de VEs	65
3.1	Introduction	65
3.2	Modélisation des batteries : état de l'art	66
3.3	Modélisation de la batterie Li-Ion	69
3.3.1	Recharge et décharge de la batterie Li-Ion : Tension vs Énergie	71
3.3.2	Hypothèses du modèle	73
3.3.3	Identification des paramètres de la batterie Li-Ion	73
3.3.4	Validation du modèle	75
3.4	Modélisation de la batterie au plomb	75
3.4.1	Représentation de la tension de la batterie	75
3.4.2	Estimation de l'état de charge d'une batterie :	76
3.4.3	Approche de modélisation	78
3.4.4	Le banc d'essai de la batterie au plomb	81
3.4.5	Résultats expérimentaux du modèle de la batterie au plomb	83
3.4.6	Résultats de simulation du modèle de la batterie au plomb	85
3.5	Modélisation des panneaux photovoltaïques	86
3.5.1	Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque	87
3.5.2	Identification des paramètres du module photovoltaïque	89
3.5.3	Le banc d'essai du panneau photovoltaïque	90
3.5.4	Implantation sur Matlab	91
3.5.5	Validation du modèle	92
3.6	Algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking)	95
3.7	Modélisation des convertisseurs de puissance	100
3.8	Résultats de simulation	103
3.9	Conclusion	105
4	Optimisation et planification des opérations de recharge de véhicules électriques	107
4.1	Introduction	107
4.2	État de l'art	108
4.3	Problème d'affectation	109
4.4	Formulation du problème	112

4.4.1	Hypothèses	112
4.4.2	Notations	113
4.4.3	Fonction objectif	113
4.4.4	Formalisation des contraintes du problème	115
4.5	Résolution et discussions	116
4.5.1	Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions normales	116
4.5.2	Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions perturbées	120
4.5.3	Comparaison des résultats obtenus	129
4.6	Passage à l'échelle avec un système à composantes hétérogènes	129
4.6.1	Formalisation des contraintes du problème dans le cas étendu	131
4.6.2	Calcul de SOC_f et E_{cp} pour l'ensemble des véhicules	132
4.6.3	Résultats d'affectations optimales retenues	135
4.7	Conclusion	138
	Conclusions et perspectives	140
	Bibliographie	142
	Annexes	161
	Annexe A	163
	Annexe B	169

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Ahmed NAIT SIDI MOH, mon co-directeur de thèse et Maître de Conférences à l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV), pour m'avoir encouragé et appris à être « bonne élève » et plus autonome tout au long de mon travail de recherche à l'Institut Supérieur des Sciences et Techniques (INSSET-UPJV). Je le remercie pour sa patience et son soutien constant même dans les moments les plus difficiles. Enfin, je le remercie pour ses qualités humaines et pédagogiques.

J'aimerais bien remercier mon directeur de thèse, Monsieur Maxime WACK, Maître de Conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) pour avoir dirigé mes travaux de recherche, et pour m'avoir donné la chance de continuer ma thèse sous sa direction, ainsi pour la confiance qu'il m'a accordé pour finir cette thèse.

Je remercie Monsieur Ahmed El HAJJAJI Professeur des universités à l'Université de Picardie Jules Verne et Monsieur Rachid OUTBIB Professeur des universités à l'Université Aix-Marseille pour avoir accepté d'évaluer et rapporter cette thèse. Je les remercie vivement pour leurs conseils et leurs remarques pertinentes pour améliorer ce travail de recherche. Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur Tarek AHMED-ALI Professeur des universités à l'Université de Caen, et Monsieur Jaafar GABER, Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard pour avoir accepté d'examiner ce travail et participer à mon jury de thèse. Merci à vous tous.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Emmanuel DELALEAU, Professeur des universités à l'Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN) de Brest, qui m'a encouragée pendant les moments difficiles que j'ai rencontré pour continuer cette thèse, grâce à ses grands conseils et son grand soutien je me suis rendue pleine de confiance et pleine de capacité et de volonté pour continuer mes travaux de recherche.

Je remercie vivement Monsieur Philippe LUTZ, Professeur des universités à l'Université de Franche-Comte, et directeur de l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Micro techniques (SPIM), pour m'avoir donné la chance de continuer cette thèse.

Je témoigne ma reconnaissance à Monsieur Daniel HISSEL, Professeur des universités à l'Université de Franche-Comté et Directeur de la Fédération de Recherche FCLAB, et Monsieur Mohamed BECHERIF, Maître de conférences HDR à l'UTBM, pour m'avoir accueilli à FEMTO/FCLAB pendant 2 ans.

Tous mes remerciements à tous les membres du laboratoire FEMTO/FCLAB, et en particulier à Mme. Laurance MARY, Monsieur Youcef AIT-AMIRAT, Maître de Conférences à l'UFC, Monsieur Abdesslem DJERDIR, Maître de Conférences HDR à l'UTBM, et Monsieur Maurizio CIRINCIONE, Professeur des Universités à l'UTBM.

Que soient également remerciés ici tous mes collègues, les doctorants du FCLAB pour m'avoir soutenu et encouragé notamment Destiny LOUKAKOU, Aicha SAADI, Serge AGBLI KREHI, Modobozi AMAH, Javier SOLANO MARTÍNEZ, Rosa-Elvira SILVA-SANCHEZ, Zhixue ZHENG, Soichi FUKUHARA, Damien GUILBERT, et Mona IBRAHIM.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide financière de l'état Syrien. Tous mes remerciements au ministère de l'enseignement supérieur Syrien pour m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse et enrichir mes compétences et mes connaissances scientifiques.

Mes grands remerciements vont aussi à mes amis Saida OULGHAZI, Raff Al FAISAL, et Talel ZOUARI.

Je remercie également mes frères et mes sœurs, particulièrement mon grand frère Mostafa et ma sœur Suha, qui m'ont encouragée et soutenu pendant toute la période de préparation de ma thèse.

Enfin, je suis tout particulièrement très reconnaissante à mes parents, mon père Amin, ma mère Halmeh, qui sont toujours la meilleur source d'encouragement et d'inspiration pour atteindre mes objectifs. Un très grand merci pour ces deux personnes lumineuses, qui allument mon chemin et qui sont toujours très proches à mon cœur malgré la distance.

Introduction générale

Déroulement de la thèse

Ce travail de recherche a été effectué dans le cadre d'une thèse de doctorat, débutée pendant deux ans au Laboratoire FEMTO-ST/FCLAB de l'Université de Franche Comté (UFC), Belfort, France. Il s'est ensuite poursuivi à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), Belfort, au sein de l'équipe OPTimisation Et RéseAux (OPERA) en collaboration avec l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV), à l'Institut Supérieur des Sciences et Techniques (INSSET) au sien du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) à Saint-Quentin.

Cette thèse est réalisée sous la direction de Monsieur Maxime WACK, Maître de Conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, et Monsieur Ahmed NAIT-SIDI-MOH, Maître de Conférences à l'Université de Picardie Jules Verne, avec le soutien de l'Université Tishreen à Lattaquié, Syrie, et du gouvernement Syrien.

Contexte

Dans le contexte actuel, l'automobile est indispensable et occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores et les gazs à effet de serre ainsi qu'une dépendance en constante augmentation vis à vis du carburant conduisent à un nouvel intérêt pour les énergies renouvelables et leurs utilisations notamment comme solution alternative aux véhicules thermiques. Le véhicule électrique (VE) est une solution avancée par les constructeurs automobiles pour remplacer peu à peu les véhicules classiques. Cette solution de transport est dédiée notamment aux déplacements dans les zones urbaines ainsi qu'à la distribution de marchandises dans les derniers kilomètres (zones urbaines).

Le VE est une des solutions de transport les plus propres et écologiques. Il présente effectivement une alternative à la pollution des autres moyens de transport, d'autant plus que le secteur du transport routier émet, dans l'atmosphère, plus de matières polluantes que l'industrie.

Afin de donner l'impulsion nécessaire à l'arrivée du VE, des infrastructures de recharge publiques et privées doivent être déployées en assurant une couverture suffisante. Ces infrastructures de recharge peuvent être alimentées soit par le réseau électrique, soit par des énergies renouvelables.

En utilisant ces différentes sources d'énergie, les modes de recharges peuvent être variés (rapide ou lent) et nécessitent par conséquent un dimensionnement des systèmes de recharge et une adaptation des installations. La résolution des problèmes de gestion de flux énergétiques s'imposent et nécessitent une étude approfondie et une recherche de solutions pertinente au regard des critères d'optimalités à définir.

Dans le but d'assurer une efficacité des systèmes de recharge des VEs, et en particulier des systèmes de recharge unidirectionnel réseau à véhicules appelé G2V (pour Grid to Vehicle) ou H2V (pour Home to Vehicle), et d'augmenter leurs performances énergétiques, la modélisation et le dimensionnement de ces systèmes s'avèrent indispensables. Plus précisément, il s'agit de dimensionner les installations électriques, et de modéliser les différents composants des systèmes de recharge afin d'étudier et d'analyser leurs comportements.

D'autre part, afin de mieux servir les VEs et d'assurer des recharges convenables en fonction de la position des véhicules, et des stations de recharge, il est nécessaire de développer une approche d'optimisation permettant d'affecter de manière optimale et adéquate les VEs aux stations de recharge.

Pour atteindre ces objectifs, dans une première phase, nous étudions et dimensionnons un système de recharge H2V (panneaux photovoltaïques, batteries stationnaires, batteries de traction et convertisseurs de puissance), puis nous simulons son comportement. Il est important de noter que le système de recharge considéré dans ce travail peut être alimenté par deux sources différentes d'énergie à savoir :

1. des panneaux solaires photovoltaïques directement ;
2. des batteries de stockage d'énergie alimentés par des panneaux solaires.

Il conviendra, bien entendu, d'étudier l'hybridation entre ces sources potentielles.

La deuxième étape de ce travail de recherche consiste à modéliser les composants du système considéré, à savoir : la batterie de traction embarquée dans le VE, la batterie au plomb installée dans la maison, le panneau photovoltaïque et les convertisseurs de puissance.

Enfin, nous développons un algorithme d'optimisation basé sur la programmation mathématique afin de gérer d'une façon optimale l'affectation des véhicules électriques aux stations de recharge. Cette approche donne une solution permettant de guider le véhicule vers une station de recharge en consommant moins d'énergie. Il s'agit en conséquence de garder l'état de charge de la batterie du VE à son plus haut niveau au moment d'arrivée à la station de recharge. Ceci permet de réduire le temps de recharge et par conséquent réduire le temps d'occupation de la station de recharge.

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse de doctorat permettront d'envisager sereinement l'intégration, à grande échelle, des véhicules électriques dans le marché en exploitant les sources naturelles (rayons solaires, vents). A travers ce travail, nous apportons également des réflexions et quelques éléments de réponse quant à la possible utilisation des batteries des VEs comme éléments de stockage d'énergie électrique au profit des réseaux électriques du futur.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire est composé de quatre chapitres et deux annexes.

Chapitre 1 :

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques préliminaires sur les véhicules électriques, les principaux éléments les constituant ainsi que leurs installations de recharge. Dans un premier temps, nous abordons quelques généralités sur les VEs (définitions, catégories, histoire des VEs, avantages et inconvénients, principaux éléments et architectures). Dans un deuxième temps, nous abordons la recharge des VEs, les différentes sources d'énergie de recharge, ainsi que les différentes topologies et les moyens de recharge. Finalement, nous présentons les flux d'énergie du réseau vers le véhicule (G2V) et du véhicule vers le réseau (V2G).

Chapitre 2 :

Ce chapitre a pour but de dimensionner tous les éléments d'un système de recharge de VE. Cette étude n'est pas basée sur un cahier des charges précis pour chacun des éléments à dimensionner, seuls les caractéristiques du VE sont connues. De ce fait, il convient de définir la consommation énergétique du véhicule selon un profil de référence, de déterminer la quantité de panneaux photovoltaïques et les capacités des batteries nécessaires pour satisfaire ce besoin. Dans ce chapitre, nous expliquons la démarche adoptée pour le dimensionnement du pack de batteries Li-Ion (batteries de traction embarquée dans le VE), du pack de batteries au plomb (batteries installées dans la station de recharge), et du pack des panneaux photovoltaïques. Pour effectuer cette étude de dimensionnement nous nous focalisons sur les caractéristiques des fiches techniques des différents composants du système. Enfin, nous présentons et analysons les résultats obtenus.

Chapitre 3 :

Le troisième chapitre a pour but de modéliser tous les éléments du système de recharge. Cette étude a pour objectif de définir les modèles mathématiques qui régissent le système afin d'en prédire et d'en évaluer le comportement.

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de batterie au plomb permettant d'exprimer la tension de la batterie en fonction du temps, à partir des paramètres électriques, en utilisant les données du constructeur (en cas de décharge) et les données expérimentales (en cas de recharge). Le modèle proposé est simulé et les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux et aux données théoriques.

À partir des résultats expérimentaux que nous avons pu obtenir, et en utilisant la méthode des moindres carrés, nous avons obtenu les valeurs des paramètres du modèle théorique décrivant le comportement du panneau photovoltaïque (PV). La comparaison des résultats de simulation du modèle théorique avec les résultats expérimentaux et les données théoriques est effectuée. Les différents tests effectués sont réalisés sur un PV et une batterie au plomb au laboratoire FEMTO-ST/FCLAB de l'université de Franche Comté. De même, nous abordons un modèle de la batterie Li-Ion décrivant l'évolution de la tension de la batterie en fonction de l'énergie. Ce modèle utilise quelques paramètres déduits de la courbe de décharge de la batterie. Cette courbe est obtenue à partir des données du fabricant. Le modèle est validé par la comparaison des résultats de simulation et les données théoriques. De même, nous présentons les modèles des convertisseurs de puissances utilisés et nous expliquons l'algorithme MPPT utilisé pour obtenir le point de puissance maximale à la sortie du PV.

Chapitre 4 :

Dans ce chapitre, nous proposons une étude d'optimisation de gestion de recharge des véhicules électriques. Il s'agit d'un problème d'affectation des VE aux stations de recharge compte tenu du contexte et des caractéristiques des VE, des caractéristiques de stations de recharge, et la nature des itinéraires empruntés par les VE pour atteindre les stations de recharges. Le problème est formalisé par un programme mathématique linéaire, et résolu à l'aide de la théorie de la programmation linéaire. Dans un premier temps, nous affectons des VE (de même caractéristiques) aux stations de recharges (de même caractéristiques). Deux cas de figures sont considérés :

1. Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions normales (trafic fluide, itinéraires avec pentes faibles, profil de vitesse constant, etc) ;
2. Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions perturbées (circulation non fluide, itinéraires avec fortes pentes, profil de vitesse variable, utilisation excessive des accessoires électriques, etc).

Dans un deuxième temps, nous étendons cette étude en affectant des VEs avec différents modèles et différentes caractéristiques aux stations de recharges avec différentes puissances de recharge (lente, rapide). Une autre contrainte majeure dans cette étude consiste à veiller à ce que l'état de charge des batteries au moment d'arrivée des VEs aux stations de recharge ne dépasse pas le seuil minimal défini par le constructeur. Dans ce cas, nous cherchons à affecter les VEs aux stations de recharge d'une façon optimale en respectant toutes les contraintes du système.

Conclusion générale :

Nous récapitulons dans la conclusion générale les principaux résultats de ce travail de recherche et nous proposons quelques directions et perspectives.

Annexe A :

Dans cette annexe, nous proposons quelques exemples de véhicules électriques ainsi que leurs caractéristiques.

Annexe B :

Dans cette annexe, nous présentons les résultats de calcul des différentes estimations de consommation d'énergie pour chaque véhicule, ainsi que l'état de charge de la batterie de chaque VE à son arrivée à la station de recharge. Ces calculs sont effectués pour les deux cas de fonctionnement du système (sous des conditions normales et des conditions perturbées).

Chapitre 1

Préliminaires

1.1 Généralités sur les véhicules électriques

Ce chapitre a pour but de présenter quelques préliminaires sur les véhicules électriques et présenter leurs principaux éléments, ainsi que leurs infrastructures de recharge. Dans un premier temps nous allons présenter quelques généralités sur les véhicules électriques (définitions, catégories, histoire des VEs, avantages et inconvénients, architectures et principaux éléments). Ensuite, nous allons aborder leur recharge, les différentes sources d'énergie, ainsi que les différentes topologies et moyens de recharge. Enfin, nous abordons les flux d'énergie dans un système de recharge, à savoir les flux du réseau vers le véhicule (G2V) et du véhicule vers le réseau (V2G).

1.1.1 Définition du véhicule électrique

Le véhicule électrique est l'élément clé d'un transport vert et écologique. Il permet de résoudre en partie des problèmes liés à l'énergie et à l'environnement [1]. Un véhicule électrique est un véhicule propulsé par un moteur électrique. Ce moteur est alimenté par une batterie rechargeable ou par une pile à combustible, ou encore par un moteur thermique générateur. Nous distinguons trois types de véhicules électriques :

- 1 – Véhicules hybrides rechargeables (Plug-in Hybrid Electric Vehicle ou PHEV). Ces véhicules sont propulsés par un moteur thermique, auquel se substitue un moteur électrique pour la circulation en ville. Ce dernier est alimenté par une batterie rechargeable couplée avec un moteur thermique par un alternateur ;
- 2 – Véhicules à prolongateur d'autonomie (Extended Range Electric Vehicle ou EREV). La propulsion de ce type de véhicules se fait par un moteur électrique alimenté par des batteries de grande capacité maintenues en charge par un petit bloc alternateur couplé avec un moteur thermique. L'EREV

possède, grâce à un régime stabilisé autour de sa vitesse de rotation optimale (1500 t/mn), une grande autonomie et une faible consommation avoisinante les 2 litres de carburant au 100 km ;

- 3 – Véhicules entièrement électriques (Battery Electric Vehicle ou BEV). Les sources d'énergie pour ce type de véhicules sont des batteries rechargeables par le réseau électrique ou par d'autres énergies renouvelables (solaire, éoliens, ...). La recharge des batteries de ces véhicules se fait à l'arrêt des véhicules par prises électriques fixes ou par échange de batteries. L'autonomie encore limitée de ces batteries limitent l'usage des VEs aux zones urbaines.

1.1.2 Histoire du véhicule électrique

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir les véhicules n'est pas nouvelle. Les premières voitures sans chevaux ont été propulsées en grande partie par des moteurs électriques. En effet, c'est en 1880 que les ingénieurs Charles Jeantaud, Camille Faure, Gustave Trouvé et Nicolas Raffard réalisent les premiers véhicules électriques. Cette prouesse technologique est rendue possible grâce à l'invention, vingt-et-un ans plus tôt, de la batterie au plomb par Gaston Planté et Camille Faure. En 1896, Louis Krieger, un autre ingénieur français, crée un « fiacre » électrique qui participe avec succès au premier concours de parcours en ville : 50 km par jour pendant 12 jours. Mais c'est en mai 1899 que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux du monde entier. En effet, la *Jamais Contente* (voir figure 1.1), pilotée par le belge Camille Jenatzy, dépassa les 105 km/h [2], [3], [4].



FIGURE 1.1– Véhicule électrique Jamais Contente

Comme détaillé dans [5], quelques années plus tard, en 1901, Krieger porte le rayon d'action à 307 km avec une voiture électrique emportant trois voyageurs, en reliant Paris à Châtellerault, et cela sans recharge avec une vitesse moyenne de 40 km/h. En 1903, cette même voiture munie d'une remorque de batteries disposait d'une autonomie de 375 km. Les recharges de ces batteries devaient se faire normalement tous les 100 à 150 km. En outre, le rapport poids/puissance, qui détermine en partie la valeur des accélérations,

était trop élevé. Actuellement, le record de vitesse de la voiture électrique appartient à Oscar de Vita (début 1995) qui, sur le prototype ZER (Zero Emission Record) dessiné par Bertone a atteint 303,977 km/h (figure 1.2) [6], tandis que la distance maximale parcourue avec une moyenne de 60 km/h est de 540 km pour un « concept car », de Fisher Electric Motor Technology, muni d'une remorque spécifique (Range Alternator Trailer) de 175 kg.



FIGURE 1.2– Véhicule électrique dessiné par Bertone

Les développements les plus significatifs sont la Honda Insight commercialisée en 1996, et le Citroën Berlingo électrique qui représente la première génération de ce type de véhicule en 1997. D'autres exemples de véhicules électriques ainsi que leurs caractéristiques sont donnés dans l'annexe A.

1.1.3 Véhicules électriques : avantages et inconvénients

Au XXI^e siècle, le secteur automobile, qui a déjà été confronté aux différents obstacles pétroliers, doit faire face désormais à la raréfaction inéluctable du pétrole, au réchauffement climatique et aux restrictions d'émissions polluantes imposées à l'industrie dans son ensemble. Afin de pallier à ces problèmes, l'industrie automobile s'active pour proposer d'autres solutions alternatives plus écologiques et environnementales et surtout indépendantes des énergies fossiles. La conception de nouvelles voitures qui n'utilisent pas le pétrole comme source d'énergie est une des solutions adoptées et en constante expansion. Parmi les solutions avancées par les constructeurs automobiles, on trouve les voitures fonctionnant aux carburants biologiques tels que l'essence à l'éthanol, et celles utilisant d'autres types d'énergies telle que l'énergie solaire. Il s'agit des voitures électriques.

Les VEs ont les meilleures performances en termes d'émission de CO_2 et de consommation comparés aux véhicules classiques [7] comme illustré dans le tableau 1.1.

Performances	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	VHE rechargeable
2010 : Consommation	4.8L/100km	4.2L/100km	0.2kWh/100km	5.8L/100km	mix
2010/Émission de CO_2 en circulation ($g\ CO_2/km$)	115	110	0	155	78
2020 : Consommation	3.7L/100km	3.1L/100km	0.2kWh/100km	4.7L/100km	mix
2020/Émission de CO_2 en circulation ($g\ CO_2/km$)	90	85	0	125	63

TABLE 1.1– Comparaison de performances de différents types de véhicules entre 2010 et 2020 [7]

L'autonomie du VE (c'est à dire la distance parcourue par le véhicule avec une charge complète de la batterie) dépend directement de la capacité de la batterie, du type de trajet (trajet avec/sans pentes, circulation urbaine), du mode de conduite et des accessoires électriques utilisés (feux, chauffage, climatisation, essuies glace, autres accessoires...). Le coût de la batterie, généralement plus élevé que celui d'un simple réservoir d'essence, représente une partie significative du coût du véhicule.

Le VE réduit considérablement la dépendance du pétrole. Son utilisation permet de réduire l'émission des gaz et le rejet des particules dans l'air. C'est un moyen de transport silencieux avec peu de vibrations et de maintenance [2] et [8]. Le VE peut être vu comme une solution efficace et concrète pour diminuer l'empreinte environnementale des transports.

Quant aux inconvénients des VEs, ils sont multiples et vont des conditions de production de l'énergie électrique, aux coûts élevés des différents composants du véhicule. Un VE n'est réellement écologique que si l'énergie électrique qu'il consomme est produite à partir des énergies renouvelables (centrales solaires, hydrauliques ou éoliennes). Il ne permet pas non plus d'effectuer de longs trajets à cause de sa faible autonomie et sa vitesse limitée.

L'intégration du VE impose, enfin, la mise en place des infrastructures dédiées dont les bornes de recharge représentent l'élément clé [2].

1.1.4 Principaux éléments des véhicules électriques VEB

Comme nous l'avons mentionné auparavant, un VE est propulsé par un moteur électrique alimenté par une source d'énergie (pile à combustible, batterie ou moteur thermique générateur). Un véhicule tout électrique, que nous appelons désormais VEB pour véhicule électrique à batterie, possède deux sources d'énergie embarquées : moteur électrique, et batteries [9], [10].

La figure 1.3 montre les principaux éléments d'un VEB : un moteur électrique, une batterie de traction, des convertisseurs de puissance (onduleur et chargeur embarqué).



FIGURE 1.3– Principaux éléments du véhicule électrique VEB

Dans ce qui suit, nous détaillons chacun de ces éléments en donnant leurs caractéristiques et propriétés.

1.1.4.1 Moteurs électriques

Pour la traction des véhicules électriques, différents types de moteurs peuvent être utilisés. Moteurs avec balais (moteur à courant continu par exemple), ou moteur sans balais (moteur synchrone ou asynchrone par exemple) [2], [11], [12].

La figure 1.4 présente une classification de motorisation des véhicules électriques ou électriques hybrides. Dans cette figure, MCC : Machine à Courant Continu ; MAP : Machine à Aimant Permanent ; MRV : Machine à Réductance Variable.

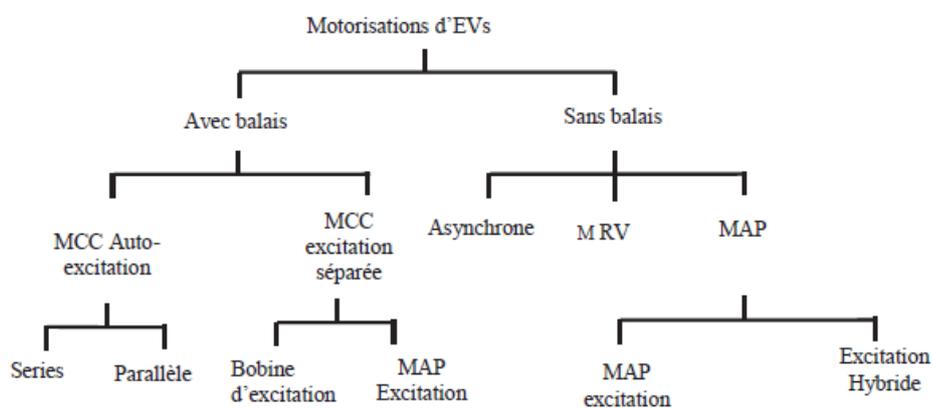


FIGURE 1.4– Classification des motorisations des VE [11]

Comme évoqué dans [13], [14] et [15], les caractéristiques principales d'une machine électrique pour l'application de traction sont :

- 1 – Densités de couple et de puissance élevées,

- 2 – Couple élevé au démarrage, à basses vitesses et au freinage, à grande puissance et à grandes vitesses,
- 3 – Large bande de vitesse, avec une région de puissance constante atteignant 3 à 4 fois la vitesse de base,
- 4 – Rendement élevé sur les larges bandes de vitesse et de couple, y compris le fonctionnement à faible couple,
- 5 – Capacité de surcharge, généralement deux fois le couple de base pendant un temps court,
- 6 – Fiabilité et robustesse appropriées à l'environnement du véhicule,
- 7 – Coût acceptable.

Les moteurs sont testés pour déterminer ceux qui offrent les meilleures performances (rendement, poids, couple, ...) pour le VE [12]. Chaque type de moteur a des avantages et des inconvénients. Le tableau 1.2 présente le résultat d'une étude comparative de fiabilité de quelques moteurs des VEs.

	MCC	MSAP	MAS
Rendement maximal	Bon	Très bon	Passable
Rendement moyen	Moyen	Très bon	Bon
Vitesse maximale	Passable	Bon	Bon
Coût de l'électronique de puissance	Très bon	Moyen	Passable
Coût du moteur	Passable	Moyen	Bon
Espace couple-vitesse	Moyen	Très bon	Moyen

TABLE 1.2– Étude comparative de fiabilité des moteurs des véhicules électriques [2]

Avec MSAP signifie Machine Synchrone à Aimant Permanent.

Les moteurs à courant continu (MCC) sont les moteurs les plus utilisés, mais le développement de l'électronique de puissance associé aux aimants permanents provoque une montée en puissance des moteurs synchrones et asynchrones (MSAP) [2]. Le tableau 1.3 montre quelques modèles de VEs avec les motorisations associées.

Modèles <i>VEs</i>	Type de motorisation
Fiat Panda Elettra	MCC séries
Mazda Bongo	MCC séparé
Conceptor G-Van	MCC à excitation séparée
Suzuki Senior Tricycle	AM MCC
GM EV1	Moteur asynchrone
Toyota Prius	MSAP
Chloride Lucas	Moteur à RV

TABLE 1.3– Quelques modèles de VEs [11]

1.1.4.2 Batteries

La première batterie a été inventée par Alessandro Volta sous la forme d'une pile voltaïque dans les années 1800 [16]. Les batteries peuvent être classées comme des batteries primaires qui, une fois utilisées, ne peuvent être rechargées et des batteries secondaires qui peuvent être soumises à une utilisation répétée grâce à leur capacité de recharge en fournissant un courant électrique externe. Un VE a besoin de pouvoir stocker de l'énergie électrique produite par la transformation des énergies cinétiques et potentielles lors des phases de récupération. Le VE se distingue du véhicule hybride par le fait qu'il doit en plus stocker l'énergie nécessaire afin d'assurer une bonne autonomie et des performances acceptables. Les besoins de stockage ne sont donc pas les mêmes pour les deux types de véhicules. En effet, pour un VE, une forte capacité de stockage est nécessaire. L'énergie produite lors des récupérations est infime par rapport aux besoins de fonctionnement et ne provoque que de faibles fluctuations d'énergie. Ce type de véhicule nécessite donc l'utilisation d'autres moyens de stockage tels que des batteries de traction et d'autres types de recharge.

1 – Définition :

Les batteries sont des générateurs "réversibles". Elles peuvent stocker de l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment grâce à la réversibilité de la transformation [17].

2 – Principe de fonctionnement :

Toute batterie se compose de trois éléments [18] :

- a- une anode (pôle négatif),
- b- une cathode (pôle positif),
- c- un électrolyte (un élément, liquide ou solide, conducteur permettant le passage du courant entre les deux pôles).

Le fonctionnement de la batterie repose sur une double réaction chimique à chaque pôle de la batterie qui va opérer un transfert d'électrons entre l'anode et la cathode de la façon suivante :

- a- l'anode cède des électrons : cette demi-réaction est une oxydation,
- b- la cathode les récupère : cette demi-réaction est une réduction.

Une cellule est composée de deux électrodes plongées dans l'électrolyte. L'association de plusieurs cellules en série forme une batterie. Durant la réaction d'oxydo-réduction les électrons passent d'un pôle à l'autre de la batterie grâce aux ions. Un ion est un élément chimique (un atome ou une molécule) qui est électriquement chargé. Si un ion manque (respectivement possède trop) d'électrons il est chargé positivement (respec. négativement). Dans une batterie, c'est la réaction chimique qui produit des ions grâce aux métaux qui constituent l'anode ou la cathode et grâce aux éléments chimiques présents dans l'électrolyte. Ainsi, le fonctionnement de la batterie repose sur l'utilisation de couples de métaux capables d'échanger des électrons.

3 – Principaux paramètres d'une batterie :

Une batterie est caractérisée par les trois paramètres suivants :

a – La puissance utilisable ($P = V.I$) en kW :

Il s'agit du produit de la tension de la batterie (V) par l'intensité maximale qu'elle peut débiter (I). La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.

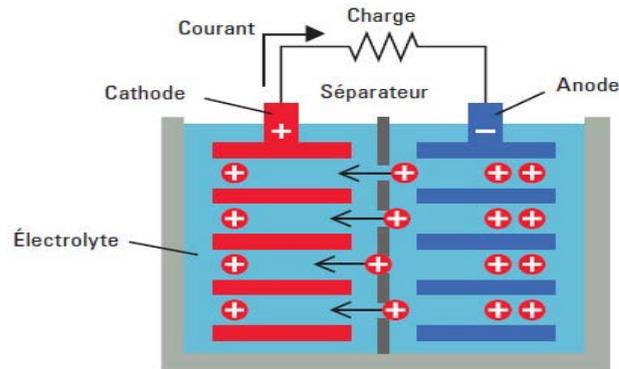


FIGURE 1.5– Schéma fonctionnel de la batterie

b – Énergie stockée en kWh :

Cette énergie peut être comparable au volume d'un réservoir de carburant d'un véhicule thermique. C'est l'énergie stockée qui va déterminer l'autonomie d'un VE et les possibilités de récupération pour un véhicule hybride. L'énergie d'une batterie électrique s'exprime en fonction de sa capacité en Ampère heure (Ah) et sa tension.

c – État de charge de la batterie (SOC).

Le SOC, en Anglais "*State of Charge*" est l'état de charge de la batterie à un moment donné. Ce paramètre s'exprime souvent en pourcentage %. Lorsque une batterie est complètement chargée, son état de charge est $SOC = 100\%$.

4 – Technologies des batteries de traction.

Les performances des VEs dépendent principalement des batteries de traction utilisées et de leurs performances. Le poids et le volume des batteries sont habituellement des facteurs décisifs [8]. Une batterie intégrée dans un VE doit satisfaire certaines conditions [2], [19], [20] et [21] :

- a – Une bonne énergie massique [Wh/kg] qui correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse de la batterie, et permet de définir l'autonomie de la batterie,
- b – Une bonne puissance massique [W/kg] qui représente la puissance que peut délivrer une unité de masse de la batterie,
- c – Une tension stable engendrant des performances régulières,
- d – Une bonne autonomie,
- e – Une durée de vie maximale, calculée en nombre de cycles recharge/décharge. La durée de vie d'une batterie est le nombre de fois de restitution d'un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale.
- f – Moins d'entretien,
- g – Plus de disponibilité.

Avec le développement des VEs, plusieurs technologies de batteries de traction ont vu le jour. Parmi ces technologies nous citons la batterie au Plomb (utilisée sur la C15 électrique) [19], la batterie Nickel-Cadmium (Ni-Cd)(utilisée sur Saxo électrique [19] et sur Clio électrique [2]), la

batterie Lithium Ion (utilisée sur Peugeot iOn) [22], la batterie Lithium phosphate de fer utilisée sur MIA électrique) [22], la batterie Lithium polymère (utilisée sur Bluecar développé par Bolloré [23]), la batterie Nickel-Hydrure Métallique(Ni-MH) [24](utilisée sur les véhicules japonais) [19], la batterie Zebra [19](utilisée sur Twingo Renault [23]), et la batterie Zinc-air [8]. Le tableau 1.4 présente les résultats d'une étude comparative des caractéristiques et propriétés de ces différentes technologies. Cette étude montre que la batterie au plomb reste la moins coûteuse avec des caractéristiques plus ou moins équivalentes aux autres technologies. Ceci justifie sa dominance sur d'autres technologies du marché [25]. Néanmoins, cette batterie possède une densité d'énergie faible et sa performance dépend de la température [26].

Les batteries Li-Ion et Ni-MH ont une énergie massique et une densité d'énergie plus élevée que les autres batteries. La batterie Li-Ion détient une tension par élément plus élevée par rapport aux autres batteries (3.6 V/élément). Elle fournit également une bonne performance volumique et massique, et une énergie massique très élevée comparée aux autres batteries.

Un autre paramètre décisif dans le choix de technologies de batterie à intégrer dans les VEs est l'autonomie. Pour se faire une idée de ce paramètre, nous avons complété l'étude comparative présentée dans le tableau 1.4 en ajoutant l'autonomie (en km) pour chaque type de batterie. Nous constatons à travers cette analyse que l'autonomie de la technologie Li-Ion est une des meilleures du marché. En conséquence, la batterie Li-Ion représente la solution la plus adaptée en terme de performances pour les VEs [2], [20], [25], [27]. Malgré ses performances et ses avantages, la batterie Li-Ion reste limitée en terme de sécurité des éléments la constituant. Des recherches conséquentes restent donc à développer davantage sur cette technologie.

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Zebra	Li-phosphate	Li-Ion	Li-polymère
Énergie massique [Wh/kg]	30-50	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
Densité d'énergie [Wh/litre]	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
Puissance massique [W/kg]	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycles	400-600	2000	1500	800	>2000	500-1000	200-300
Autodécharge par mois	5%	20%	30%	12% par jour	5%	10%	10%
Tension nominale d'un élément [V]	2	1.2	1.2	2.6	3.2	3.6	3.7
Gamme de température de fonctionnement	-20°C à 60°C	-40°C à 60°C	-20°C à 60°C	-20°C à 50°C	-0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performance à froid	Très bonne densité énergétique	Bonne densité énergétique bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie sécurité coût cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Relativement basse énergie, toxicité	Coût des matériaux de base, danger quant température élevée	Puissance limitée autoconsommation	Charge à température positive	Sécurité des gros éléments Coût	Performance à froid Coût
Coûts Indicatif Euros/kWh	200 à 250	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000
Autonomie [km]	70-120	70-120	150-200	100-140	80-120	150-200	120 - 200

TABLE 1.4– Comparaison de différentes technologies de batteries de traction [2], [19], [20]

1.1.4.3 Convertisseurs de puissance

Le troisième élément principal d'un véhicule VEB est le convertisseur de puissance. L'utilisation de plusieurs sources d'énergie, avec différentes caractéristiques, nécessite l'utilisation d'un convertisseur de puissance. Les convertisseurs de puissance pouvant être utilisés à bord d'un VE sont de type [2], [19] :

- 1 – Hacheur : un convertisseur de courant continu en courant continu de différentes tensions DC/DC,
- 2 – Onduleur : un convertisseur de courant continu en courant alternatif DC/AC,
- 3 – Redresseur : un convertisseur de courant alternatif en courant continu AC/DC.

1.1.5 Principales architectures des véhicules électriques

Comme évoqué précédemment, les principaux éléments d'un VEB sont les deux sources d'énergie embarquées (un moteur électrique et une batterie de traction) et des convertisseurs de puissances. La structure d'un VEB est présentée dans la figure 1.6.

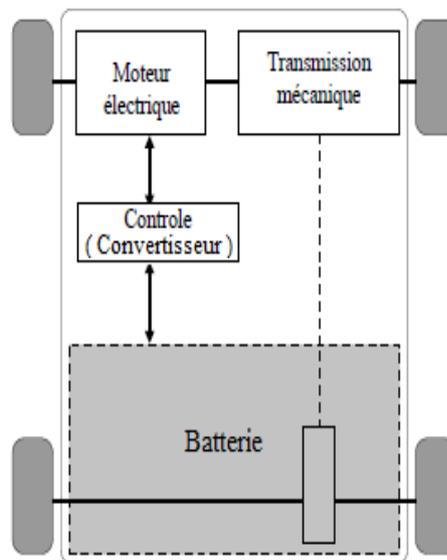


FIGURE 1.6– Structure d'un véhicule tout électrique VEB [2]

Les véhicules tout électriques actuels sont exclusivement des véhicules circulant dans des zones urbaines. Leurs autonomies varient entre 70 et 120 km pour les batteries au Plomb et Cadmium-Nickel, et entre 150 et 200 km pour les batteries Li-ion et Nickel-métal-hydrure comme indiqué dans le tableau 1.4.

Pour certains VE, il y a une hybridation entre la batterie et le super-condensateur (SC). Le super-condensateur est une source de puissance capable d'assurer les forts appels de puissance en

cas d'accélération et de récupérer de l'énergie en cas de décélération [19], [25], [28]. Tandis que les batteries fournissent de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement. De plus, les super-condensateurs sont adaptés pour récupérer de l'énergie lors des phases de freinage en raison de leur nombre de cycles élevé et de leur dynamique rapide. Par conséquent, l'hybridation de la batterie et du super-condensateur permet d'obtenir de meilleures performances en termes d'apport énergétique, de coût et de durée de vie du système. Les figures 1.7 et 1.8 présentent deux topologies possibles d'architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur [10]. La topologie 1 donne plus de degrés de liberté. Elle assure une tension stable du bus DC. Tandis que la topologie 2, avec un seul étage de conversion, assure une tension variable du bus DC avec moins de perte. Pour cette deuxième topologie, la variation de la tension du bus DC est due à une variation de charge en fonction du cycle de roulage.

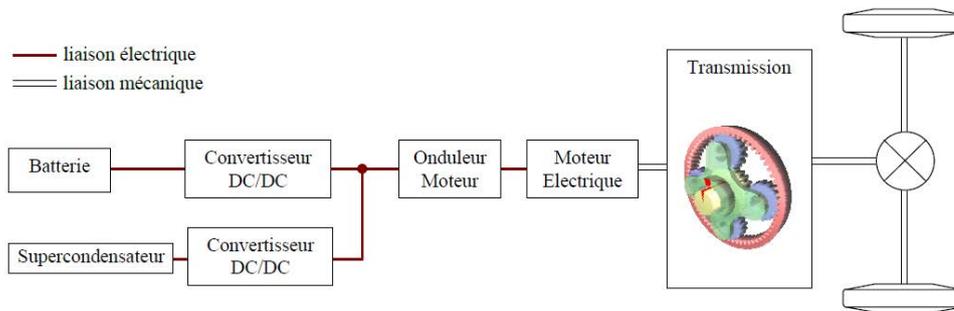


FIGURE 1.7– Architecture d'un véhicule électrique à supercondensateur : topologie 1.

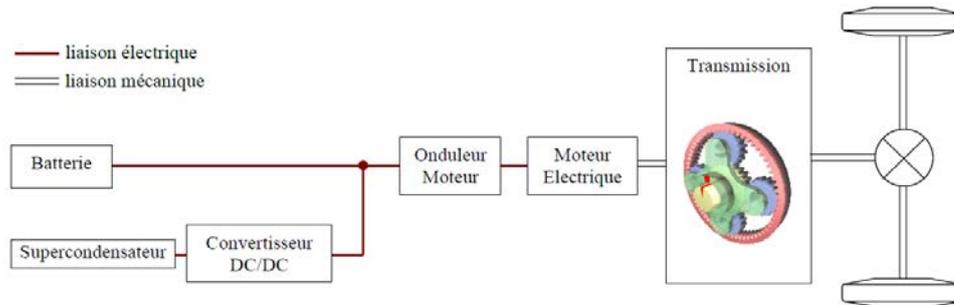


FIGURE 1.8– Architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur : topologie 2.

1.2 Recharge de véhicules électriques

Les travaux de recherche en cours au sujet des véhicules électriques ainsi que la préoccupation croissante, à l'échelle mondiale, d'assurer un environnement exempt de pollution vont certainement conduire à une augmentation importante du nombre de VEs dans un avenir proche. Cela déclenche la nécessité de développer davantage les infrastructures de recharge afin de satisfaire les demandes



FIGURE 1.9– Une station de recharge à l'aide de l'énergie solaire

en énergie électrique. Un exemple de ces infrastructures est illustré par la figure 1.9 [29].

1.2.1 Sources d'énergie

L'énergie électrique fournie par les stations de recharge est une énergie secondaire produite par des sources d'énergies primaires. Ces dernières peuvent être des sources d'énergies non renouvelables ou des sources d'énergies renouvelables que nous détaillons ci-après.

1.2.1.1 Sources d'énergies non renouvelables

Nous pouvons classer les sources d'énergies non renouvelables en deux familles :

1 – Les énergies fossiles :

Les énergies fossiles sont notamment extraites du charbon, du gaz naturel ou du pétrole. Pour ce type d'énergie, la vitesse de génération est extrêmement lente par rapport à l'échelle humaine et la consommation est intensive d'où les risques d'épuisement rapide.

2 – L'énergie nucléaire :

Cette énergie est issue de la fission nucléaire. Seule le traitement nucléaire pourrait, à condition d'être industriellement maîtrisée, produire de l'énergie nucléaire sur le très long terme.

Il est important de noter que presque 80 % de l'énergie totale consommée dans le monde provient encore des énergies non renouvelables.

1.2.1.2 Sources d'énergies renouvelables

Dans ce travail, nous mettons l'accent sur l'exploitation des énergies renouvelables pour la recharge des VEs. Parmi les avantages d'utilisation de ces énergies, en plus de la recharge des VEs, nous citons la réduction des dépendances à l'égard des combustibles fossiles ainsi que l'élimination des émissions des gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables sont essentiellement générées grâce

aux éoliens et aux panneaux photovoltaïques. Ces générateurs d'énergie sont en très forte croissance en Europe. En effet, la quantité d'énergie produite par les parcs d'éoliens en Europe est de 48 GW en 2007, dont 22 GW uniquement en Allemagne.

Du à la discontinuité de la production d'énergie, le niveau de charge du réseau électrique n'est que de 25%, et cela ne représente que 6% de la production d'électricité allemande [30]. La production photovoltaïque dont la disponibilité est encore plus faible que celle de l'éolien devrait cependant atteindre des niveaux significatifs dans les années à venir. Les prévisions pour 2030 laissent entrevoir des capacités éoliennes et photovoltaïques respectivement de 2700 GW et 1000 GW avec un impact fort sur le réseau électrique. L'énergie renouvelable produite fluctue suivant les jours et les saisons [30] et [31]. Les sources d'énergies renouvelables ont l'inconvénient de ne produire que par intermittence ce qui pose de sérieux problèmes. D'où la nécessité de réfléchir aux moyens de stockage pour satisfaire la demande en cas de faible production [28].

Des exemples de sources d'énergie renouvelable sont illustrés dans la figure 1.10. Il s'agit d'une



FIGURE 1.10– Station de recharge éolienne et station de recharge solaire

station de recharge avec une éolienne et une station de recharge à l'aide des panneaux photovoltaïques. Cette dernière source sera développée davantage dans ce qui suit étant donnée que c'est la technologie que nous développons dans ce travail de recherche.

Énergie solaire

Dans un premier temps, l'énergie solaire photovoltaïque était utilisée essentiellement pour alimenter des satellites en orbite, puis des équipements électriques dans des sites isolés. Le champ d'application de l'énergie solaire photovoltaïque s'est par la suite agrandi grâce à la baisse des coûts de production, et en raison de ses avantages en tant qu'énergie renouvelable propre. L'énergie solaire photovoltaïque est une solution techniquement et économiquement adaptée pour l'électrification de sites isolés, notamment dans les pays en voie de développement où le coût d'installation d'un réseau de distribution serait trop élevé [32].

L'énergie solaire photovoltaïque présente l'avantage de pouvoir être installée n'importe où, sur les toits des édifices, en verrière, et même sur les façades des immeubles en remplacement des matériaux de revêtement. C'est pourquoi de nombreux pays mettent en œuvre de vastes programmes d'équipement des bâtiments en capteurs d'énergie solaire photovoltaïque, avec pour objectif la baisse des coûts de fabrication. L'utilisation de l'énergie solaire pour recharger les véhicules électriques est l'une des options les plus intéressantes pour éliminer toutes les émissions de CO_2 [33]. C'est

pour toutes ces raisons que nous nous intéressons à cette source d'énergie, et nous proposons de modéliser et d'étudier le comportement d'un système de recharge de VEs à l'aide de panneaux photovoltaïques dans ce travail de recherche.

1 – Définition

Une cellule solaire est un composant semi conducteur qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Cet effet est un des effets photoélectriques mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir de rayons solaires.

2 – Jonction P-N

Un panneau photovoltaïque est constitué d'une série de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, principalement à base de silicium, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N). Il s'agit donc d'une jonction PN. La figure 1.11 illustre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [34], [35]. Lorsqu'un électron est arraché, un "trou" se forme à l'endroit où l'électron est arraché et se

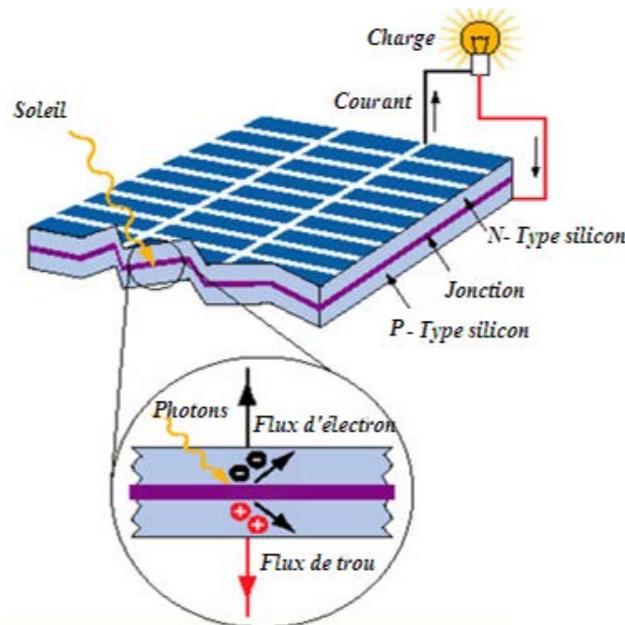


FIGURE 1.11– Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

comporte comme une charge positive. L'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction PN (les électrons vers N et les trous vers P), créant une différence de potentiel. C'est ainsi qu'une cellule photovoltaïque produit du courant électrique continu proportionnel à l'éclairage.

3 – Différents types de cellules PV

Il existe différents types de cellules photovoltaïques en fonction des matériaux de fabrication utilisés. Nous citons, à titre d'exemple, silicium monocristallin, silicium polycristallines, et silicium amorphes. Ces différents types sont illustrés par la figure 1.12 présente [35].



1-Panneau Solaire Monocristallin 2-Panneau Solaire Polycristallin 3-Panneau Solaire Amorphe

FIGURE 1.12– Types des cellules solaires.

Dans le tableau 1.5, nous comparons ces trois types de cellules en présentant les avantages et les inconvénients de chacun.

	Avantages	Inconvénients
Silicium amorphe	<ul style="list-style-type: none"> - fonctionne avec un éclairage faible - un peu moins chère que les autres techniques - intégration sur supports souples ou rigides 	<ul style="list-style-type: none"> - rendement faible en plein soleil, de 5% à 7% - surfaces importantes - performance diminue avec le temps dès l'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois)
Silicium monocristallin	<ul style="list-style-type: none"> - bon rendement de 14% à 16% - nombre de fabricants élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - coût élevé - baisse du rendement avec l'augmentation de la température
Silicium polycristallin	<ul style="list-style-type: none"> - cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module - rendement de 9% à 11% - lingot moins cher à produire que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> - rendement faible sous un faible éclairage

TABLE 1.5– Comparaison de trois types de cellules PV.

4 – Couplage des cellules PV

Un module photovoltaïque est l'association de plusieurs cellules en série et en parallèle. Le couplage en série augmente la tension, et le couplage en parallèle augmente le courant. Le champ photovoltaïque est l'association de plusieurs modules en série et en parallèle. La figure 1.13 illustre graphiquement ces différents éléments [36].

1.2.2 Stockage d'énergie électrique

Le réseau électrique peut délivrer une certaine quantité d'énergie destinée à la recharge des VEs. Si l'offre d'énergie est inférieure à la demande, toutes utilisations confondues (domestique, recharge de VEs, éclairage public,...), le réseau électrique n'est pas en mesure de satisfaire toutes les demandes. Face à cette situation, des problèmes peuvent survenir à partir d'une augmentation substantielle de la demande. Ces problèmes peuvent augmenter le coût de production, de distribution et de vente de

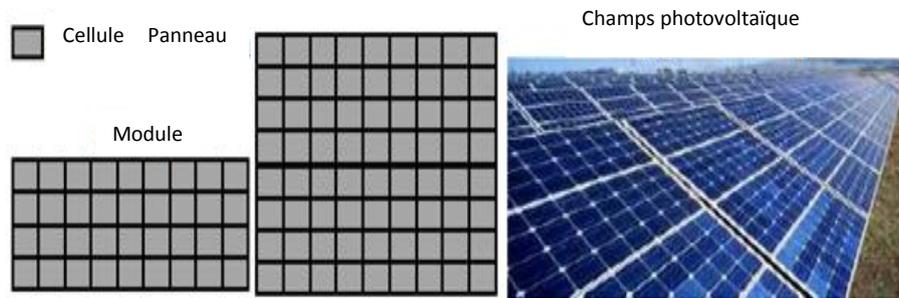


FIGURE 1.13– Illustration graphique des éléments photovoltaïques.

l'énergie [37], [38], [39] et [40]. Pour remédier à ces problèmes, une stratégie de stockage de l'énergie lorsque la production dépasse la demande est indispensable. Le système de stockage d'énergie peut englober différentes technologies de stockage. Nous citons la technologie électrochimique basée sur les batteries, la technologie électrique basée sur les super-condensateurs, et la technologie mécanique basée sur des volants d'inertie ou d'autres combinaisons [41], [42], [43], [44] et [45]. Chaque technologie est caractérisée par : l'énergie spécifique, la puissance spécifique, la durée de vie, le coût, et l'impact environnemental [46]. Le diagramme de Ragone présenté dans la figure 1.14 permet de comparer les performances énergétiques de ces différentes technologies en fonction de leur puissance et de leur énergie massique [7], [26].

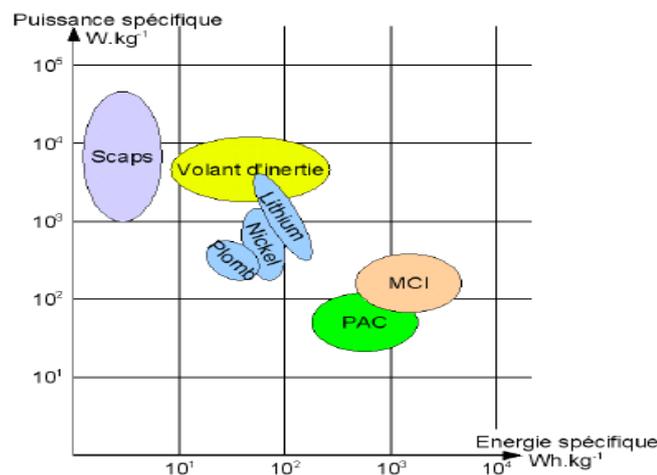


FIGURE 1.14– Diagramme de Ragone [26].

Notons que, Scaps = Super-condensateur ; MCI = Moteur à Combustion Interne ; PAC = Pile à Combustible.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales technologies de stockage de l'énergie.

1 – Les batteries

a – Batteries Ni-Cd

Les batteries Ni-Cd ont été découvertes en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un

premier brevet en 1899, qu'il étendit aux États-Unis en 1901. La batterie NI-Cd a une électrode positive en Nickel, et une électrode négative en Cadmium, et une électrolyte à base d'hydroxyde de potassium [47].

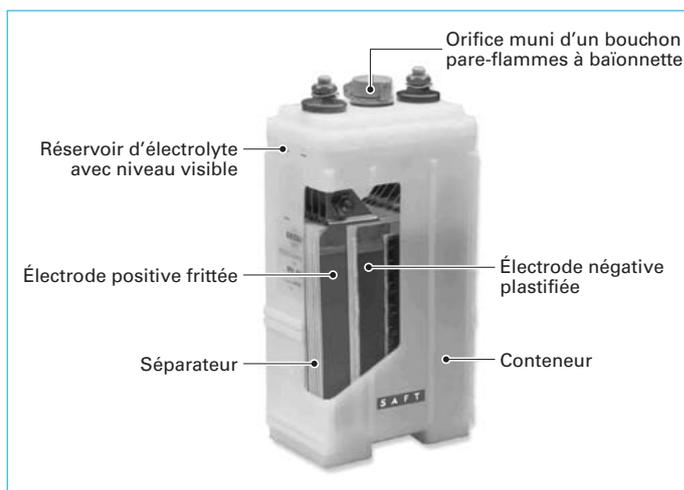


FIGURE 1.15– Vue éclatée d'une batterie Ni-Cd industrielle [47].

Cette batterie a un cycle de recharge/décharge assez important plus que les autres batteries. Elle permet une recharge simple et rapide, même après une longue durée de stockage [17].

Néanmoins, elle présente quelques inconvénients liés à son coût élevé [17], [26], à la tension faible de chacune de ses cellules, et à son impact assez important sur l'environnement [26] [28]. Son marché se maintient dans les usages industriels (applications aéronautiques, ferroviaires, stationnaires, où son utilisation reste autorisée) en raison de ses performances et notamment sa forte puissance spécifique.

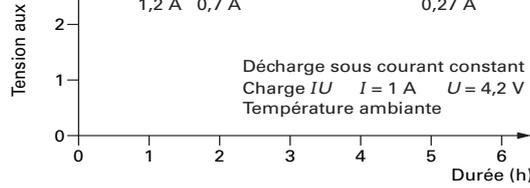
b – Batteries Lithium-Ion

Au début des années 90, principalement sous l'impulsion des constructeurs japonais d'équipements portables, deux nouvelles filières de stockage de l'électricité ont émergés. Il s'agit des batteries au lithium. En rupture avec les technologies traditionnelles, les batteries à base du lithium sont dotées d'une technique récemment mise au point et en cours de développement. Cette technique présente une capacité électrochimique très importante. La figure 1.16 montre une batterie Li-Ion en section oblongue.

Une batterie lithium est une batterie dont la réaction électrochimique fait intervenir le lithium. Cette batterie offre la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume). De plus, elle n'a pas d'effet mémoire et elle a une faible auto-décharge par rapport aux autres technologies de batteries.

Nous distinguons plusieurs sortes de batteries lithium.

- 1 – La batterie Lithium-métal où l'électrode négative est composée de Lithium métallique (source de problèmes de sécurité),



de stockage
Tensions limites :
– en charge.....
– en décharge

1.2 Recharge de véhicules électriques

Figure 12 – Caractéristiques de charge et de décharge d'une batterie lithium-ion (coke-LiCoO₂)

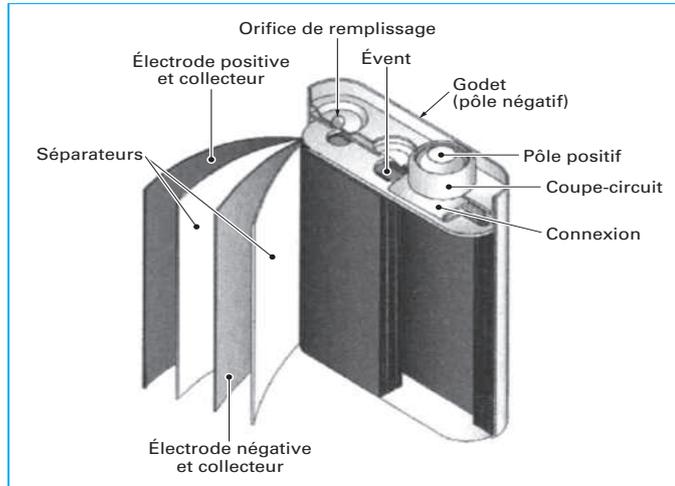


Figure 13 – Accumulateurs Li-ion de section oblongue (Gamme « Medium prismatic » de Saft)

2 Tableau 5 – Essais en cycle destinés à un u

Capacité (mAh)	Plage d'utilisation en tension (V)	Courant de charge et de décharge (mA)
40	4,10 à 2,75	7 (C/6)
1 100	4,10 à 2,75	550 (C/2) / 1 100 (C/10)

Si, dans le domaine médical, les batteries sont utilisées, les accumulateurs au lithium sont à éviter. Il faut exclure les dendrites, sources de danger et de surchauffe. Les anodes sont à base graphite. Des considérations développées au chapitre 3.2. Le tableau 5 présente quelques exemples d'accumulateurs existants.

On se doute qu'il faut multiplier les précautions lors de l'implantation de l'accumulateur. Il s'agit de ce qui relève de l'électrochimie, et de la nécessité d'être informé en temps réel de l'état de l'accumulateur. La spectroscopie Raman est une information. Il existe des indicateurs de fin de vie (EOL Ind.) basés sur ce principe pour éviter les surcharges dont les conséquences sont décrites au paragraphe 3.2. La tension aux bo

Ce document a été délivré pour le compte de 7200031239 - université de picardie // 194.57.110.242

- La batterie Lithium-Ion est le lithium reste à l'état ionique, mais à l'oxydation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer),
- La batterie Lithium-polymère qui représente une alternative à la batterie Lithium-Ion. Elle délivre un peu moins d'énergie, mais elle est beaucoup plus sûre. L'électrode négative est en Lithium, et l'électrolyte est un alliage de Lithium et de fer.

Contrairement aux autres batteries, les batteries lithium-Ion ne sont pas liées à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'une batterie Lithium-Ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes face à la constance observée avec les autres couples. Il est donc délicat de tirer des règles générales à propos de cette batterie. En outre, les marchés de forts volumes (électronique nomade) et de fortes énergies (automobile, aéronautique, etc.) n'ont pas les mêmes besoins en termes de durée de vie.

c – Batteries au plomb

La batterie au plomb a été inventée par l'ingénieur français Gaston Planté en 1860, et utilisée dans le premier véhicule en France (Jamais Contente) en 1881.

Une batterie au plomb est un ensemble d'éléments en plomb-acide sulfurique. Ces éléments sont couplés en série, et réunis dans un même boîtier pour obtenir la tension souhaitée. La tension de la batterie au plomb dépend du nombre d'éléments qui la constituent. Chaque élément a une tension de 2 V et une batterie de 12 V sera dotée de 6 éléments. Une batterie au plomb est schématisée par la figure 1.17.

Nous distinguons trois catégories d'application des batterie au plomb :

- Batterie de démarrage : il s'agit des batteries embarquées dans les véhicules thermiques, qui assurent le démarrage des moteurs thermiques, et qui alimentent les auxiliaires utilisés dans la voiture (éclairage, alarme, verrouillages des portes, etc.),

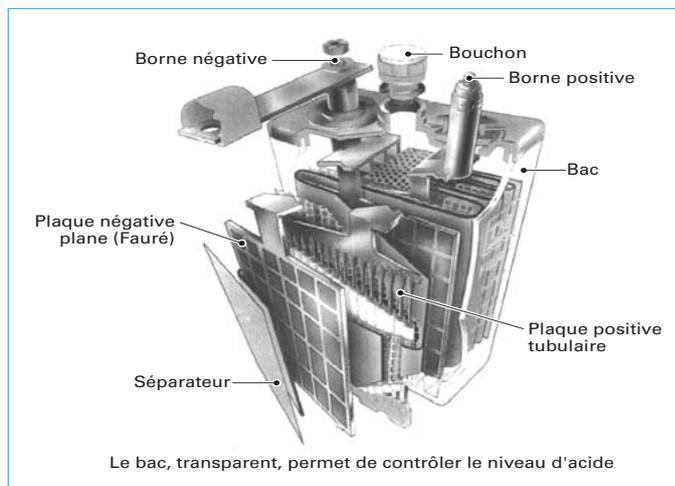


FIGURE 1.17– Batterie au plomb munie de plaques positives tubulaires [49].

- 2 – Batterie de traction : il s'agit des batteries utilisées le plus souvent dans les chariots élévateurs [17], locotracteurs, engins de manutention [49],
- 3 – Batterie stationnaire : c'est des batteries utilisées pour stocker de l'énergie fournie par le réseau électrique ou par des micros réseaux (exemple : panneaux photovoltaïques). Les spécificités des systèmes de stockage stationnaires d'électricité sont très différentes des spécificités des systèmes embarqués. Dans les systèmes stationnaires, la quantité d'énergie et la puissance disponible totale deviennent largement prépondérantes. Ces systèmes sont utilisés essentiellement dans les sites de production d'énergies renouvelables [28] ou ils viennent en appui aux réseaux électriques.

La batterie au plomb, que nous utilisons dans ce travail, peut être utilisée comme batterie stationnaire. Son poids important n'est pas une contrainte. Elle est disponible, moins coûteuse quelque soit l'application, et possède une durée de vie raisonnable. En raison de sa robustesse et de sa stabilité, la batterie au plomb est largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques [50], [51].

Les batteries au plomb sont divisées en deux groupes [52] :

- a – Les batteries « classiques » ou ouvertes (*Vented Batteries*) :
Ce type de batterie nécessite une maintenance au cours de laquelle le niveau de l'électrolyte doit être réajusté avec de l'eau désionisée pour le bon fonctionnement de la batterie.
- b – Les batteries scellées VRLA (*Valve Regulated Lead-Acid*) :
Ces batteries sont aussi appelées batteries sans entretien. Ici, la cellule est fermée. L'électrolyte y est immobilisé sous forme de gel, ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat).

2 – Super-condensateurs

Les super-condensateurs sont des condensateurs qui peuvent fournir une densité de puissance

élevée et une densité d'énergie relativement élevée. Ils ne permettent pas de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique comme les batteries.

Globalement, l'augmentation de cette capacité peut suivre trois voies : la modification de la surface des électrodes S , la permittivité du diélectrique ϵ les séparant ou encore la distance entre les deux électrodes d (figure 1.18).

L'équation (1.1) montre l'expression de cette capacité.

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (1.1)$$

Les super-condensateurs exploitent le principe de la capacité double couche qui permet une forte réduction de la distance inter-électrodes grâce à l'insertion d'un électrolyte entre les deux électrodes recouvertes par un diélectrique [53], [54]. De plus, l'emploi de charbons actifs dans les matériaux d'électrodes permet d'augmenter davantage le terme capacitif.

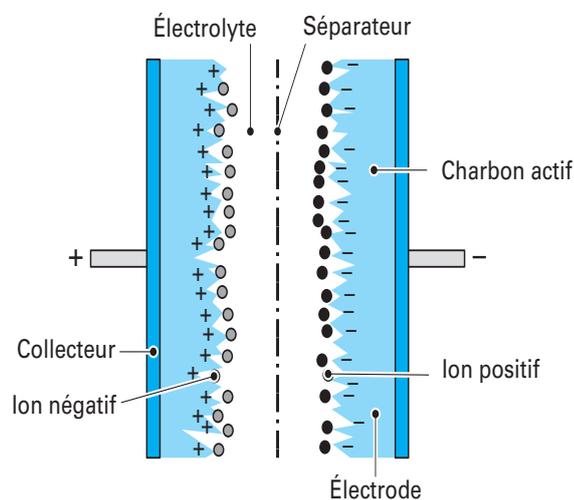


FIGURE 1.18– Schéma fonctionnel d'un super-condensateur [55].

Certes, l'utilisation d'un électrolyte entraîne une augmentation considérable des capacités. Le montage des super-condensateurs en série permet une sommation de leurs tensions respectives. Un montage en parallèle permet une augmentation des courants de recharge et de décharge admissibles.

1.2.3 Topologies de recharge

La plupart des VEB ont besoin d'incorporer un chargeur embarqué permettant la recharge de la batterie partout où se trouve une prise électrique. Cependant, les chargeurs embarqués sont limités à la puissance de sortie en raison de la taille et du poids imposés par la conception des véhicules. Un chargeur externe de haute puissance nécessite moins de temps pour recharger les batteries [16]. Il peut réduire le coût et le poids du véhicule. De même il participe également à la sécurité et au refroidissement du véhicule [41].

La figure 1.19 présente deux possibilités de recharge des batteries de traction d'un VE [16]. Echanger directement les batteries déchargées par d'autres batteries complètement chargées en

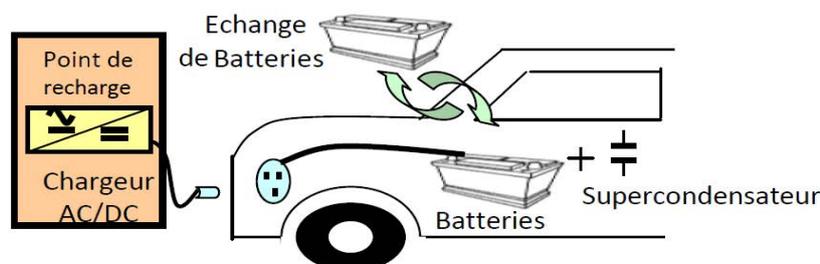


FIGURE 1.19– Deux possibilités de recharge d'un VE : chargeur externe et substitution des batteries

quelques minutes [16], [56]. C'est une solution proposée pour pallier aux problèmes de longues attentes dans les stations de recharge pour une recharge complète. La deuxième possibilité est d'utiliser un chargeur externe AC/DC permettant de recharger les batteries embarquées dans les VEs. La puissance est fournie par un courant continu. En d'autres termes, la puissance est transmise directement à partir du point de recharge pour recharger les batteries du véhicule sans avoir besoin d'un chargeur embarqué dans le véhicule.

La figure 1.20 illustre un flux bidirectionnel d'énergie entre le réseau et le véhicule [16]. Il s'agit des flux réseau à véhicule (G2V pour Grid-to-Vehilce) et véhicule à réseau (V2G pour Vehicle-to-Grid). Le chargeur embarqué dans le véhicule convertit le courant alternatif en courant continu

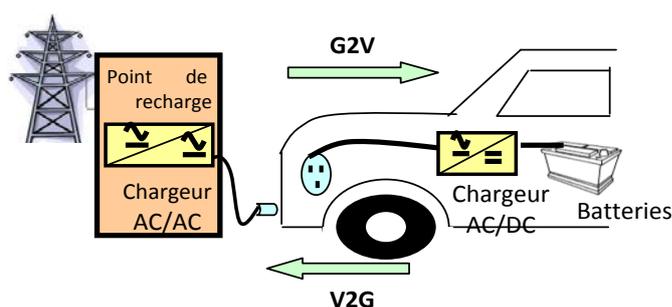


FIGURE 1.20– Flux bidirectionnel d'énergie G2V et V2G.

nécessaire pour recharger les batteries. Le chargeur AC/AC permet d'adapter les paramètres du réseau (la puissance, la tension et le courant) à ceux du chargeur AC/DC embarqué dans le véhicule. Plus précisément, ce convertisseur se charge d'adapter la fréquence et la tension requise par le réseau avec le mode de fonctionnement des concepts G2V et V2G. Un chargeur intégré dans le véhicule présente une bonne solution pour supporter le mode de recharge lente [41].

D'autres solutions alternatives, autres que le réseau électrique, peuvent être envisagées pour la recharge des VE. Une de ces solutions est illustrée par la figure 1.21. Cette figure montre le flux d'énergie d'un micro réseau (générateurs solaires installés sur le toit d'une maison) vers un chargeur embarqué dans le véhicule (H2V pour Home-to-Vehicle) ou du véhicule vers la maison (V2H pour Vehicle-to-Home) [16].

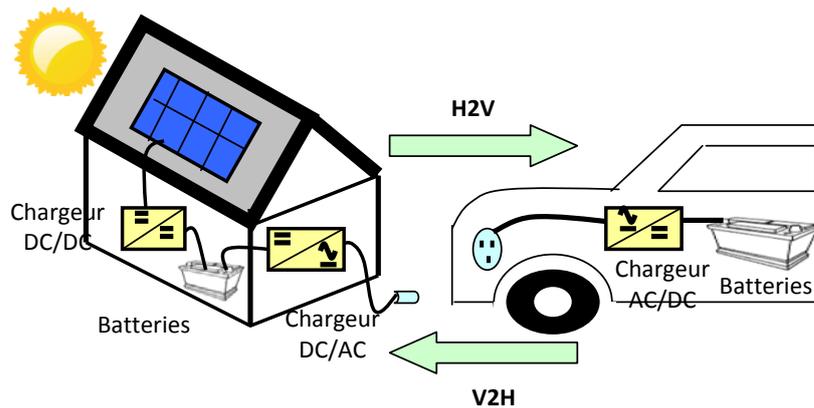


FIGURE 1.21– Flux d'énergie (H2V) et (V2H).

Ces modes de recharge/décharge des VE représentent des solutions potentielles, néanmoins, elles souffrent d'absence de normalisation par rapport aux différents constructeurs automobiles. A ce jour les constructeurs automobiles n'ont pas réussi à trouver une solution normalisée pour les charges rapides. Selon le type de véhicule, la charge rapide doit se faire en DC (pour les véhicules d'origine japonais) ou en AC (pour les véhicules Renault ou Daimler). Selon [22], il existe des bornes mixtes AC et DC compatible avec les 2 types de recharge. Notons que les bornes de recharge lentes ont des prises IEC62196 de type 3 et sont compatibles avec tous les types de véhicules.

Les bornes de recharge se distinguent par la puissance délivrée qui impacte nettement le temps de recharge. Ainsi, nous distinguons plusieurs niveaux de recharge comme illustré dans la figure 1.22 [22].

	Puissance	Configurations	Connectique	Durée de charge
Charge lente	Borne de charge 230V Mono - 16A 3kW	Version « coffret mural » Version « sur pied » 1 ou 2 prises par borne	Prise IEC62196 Type3 	VE : 8h VEHR: 2h
	Borne de charge 400V Tri - 32A 23kW	 coffret mural  sur pied	Prise IEC62196 Type3	VE : 1h
Charge rapide	Borne de charge 400V Tri - 63A 43kW AC		Câble attaché à la borne avec à son extrémité la connectique véhicule	VE : 0:30h
	Borne de charge 50kW DC			VE : 0:20h
	Borne mixte AC et DC			0:20 à 0:30h

FIGURE 1.22– Modes de recharge.

1.2.4 Les moyens de recharge

1 – Remplacement de batteries

Cette solution est proposée pour pallier au problème des temps de recharge qui sont assez longs. Des stations de recharge proposent d'échanger les batteries déchargées par d'autres batteries complètement chargées. Cette solution de recharge se fait dans des stations dédiées et uniquement pour des batteries de location [56].

2 – Recharge rapide

Dans l'avenir, une augmentation significative des ventes des VE est prévue, c'est pourquoi l'accent est mis sur le développement de stations de recharge. Les études sont orientées vers la diminution de la durée requise de temps de recharge par une augmentation de la tension et du courant de recharge [41], [57], et [58]. Il en résulte des recharges rapides par l'augmentation de l'énergie transférée vers la batterie.

La technologie proposée dans [41] pour une recharge rapide porte sur l'utilisation d'un super-condensateur comme système de stockage d'énergie. Un super-condensateur possède une grande densité d'énergie qui peut réduire le temps de recharge. Une station de recharge rapide permet d'économiser de l'énergie lorsque l'offre dépasse la demande. Le concept d'une station de recharge dotée d'un super-condensateur est illustré dans la figure 1.23 [41].

D'autre part, la méthode de recharge combinée (courant constant et tension constante, CC/CV) suit un algorithme de recharge appliqué pour obtenir des recharges rapides [25], [59], [60], [61]. En effet, dans un premier temps, dans l'étape de régulation en courant continu CC, un courant continu

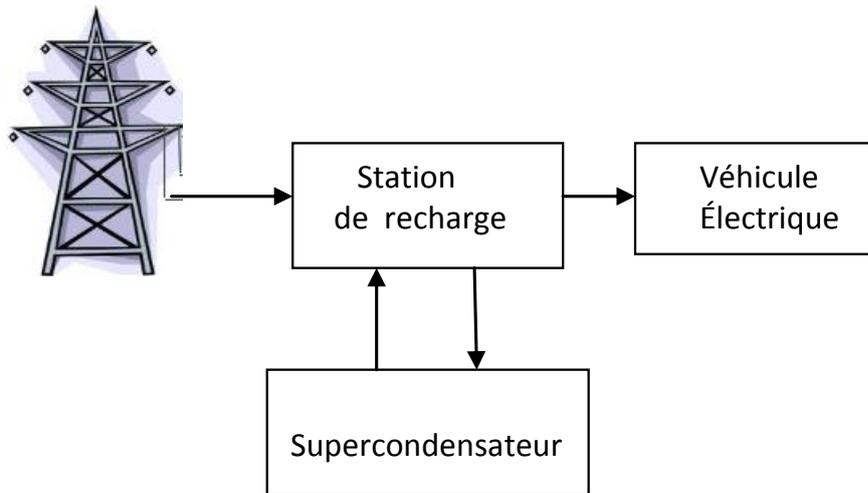
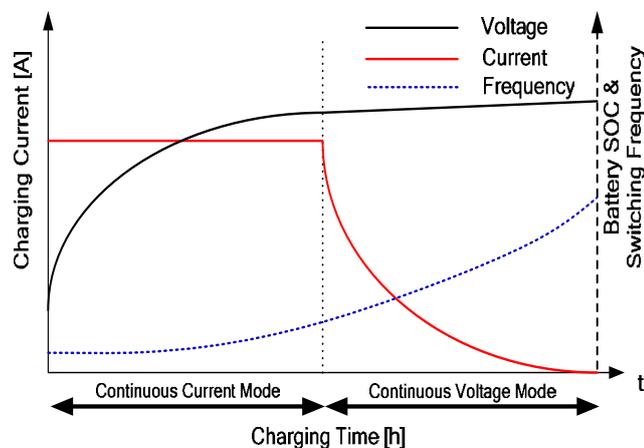
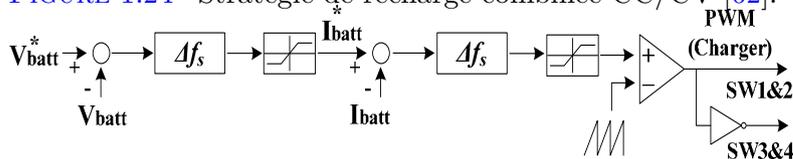


FIGURE 1.23– Schéma fonctionnel d’une station de recharge rapide.

est appliqué aux bornes de la batterie. Ce courant de recharge doit être inférieur au courant de recharge maximum autorisé défini par le fabricant de la batterie. Pendant cette étape de régulation, la tension aux bornes de la batterie augmente jusqu’à atteindre la tension maximale. Une fois que cette tension maximale est atteinte, le processus de recharge commute en mode régulation en tension continue CV, ainsi la tension de recharge reste constante à sa valeur maximale. Par conséquent, pendant ce mode de fonctionnement de régulation en tension, le courant de recharge diminue jusqu’à atteindre une valeur de courant de 0,03 C. Ceci indique la fin de recharge et la batterie est considérée pleinement chargée [62]. La figure 1.24 présente la stratégie de recharge combinée CC/CV.

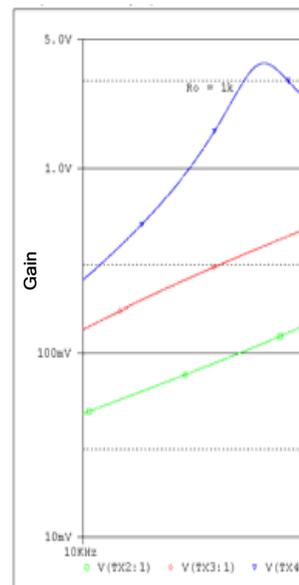


(a) Battery charging strategy according to SOC with frequency control. FIGURE 1.24– Stratégie de recharge combinée CC/CV [62].

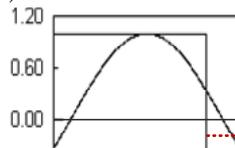


(b) Optimal frequency tracking scheme

Fig. 4. Control scheme for battery charging.



(a) Gain characteristic ac



3 – Recharge lente

La recharge lente fait référence soit à une recharge lente avec un temps de charge avoisinant les 8 heures (pour certaines technologies), soit à une recharge accélérée avec un temps de charge de 1 heure. Le chargeur lent est généralement embarqué dans le véhicule. Les principaux inconvénients de ces chargeurs se résument en un temps de recharge important, le poids, le volume et le prix des véhicules munis de ces chargeurs. Un chargeur embarqué doit avoir un petit volume et un petit poids tout en assurant une meilleure efficacité de puissance [62].

1.3 Flux énergétique

Le flux énergétique est un concept qui représente un système où les VE sont connectés au réseau électrique. Les VE peuvent alimenter le réseau par le déchargement total ou partiel des quantités d'énergie stockées dans les batteries lorsque les demandes atteignent leurs pics et que les VE ne se servent pas de ces énergies. Il s'agit ici de transférer l'énergie stockée dans la batterie du véhicule vers le réseau (V2G). Inversement, lorsque l'offre d'énergie est très importante par rapport à la demande, les batteries des VE peuvent être considérées comme moyens de stockage d'énergie. Il s'agit ici du flux d'énergie G2V. Un convertisseur bidirectionnel introduit un système de stockage d'énergie dans les véhicules [40] et [63]. Cette technologie repose sur les deux flux G2V (ou H2V) et V2G (ou V2H) comme illustré dans la figure 1.25.

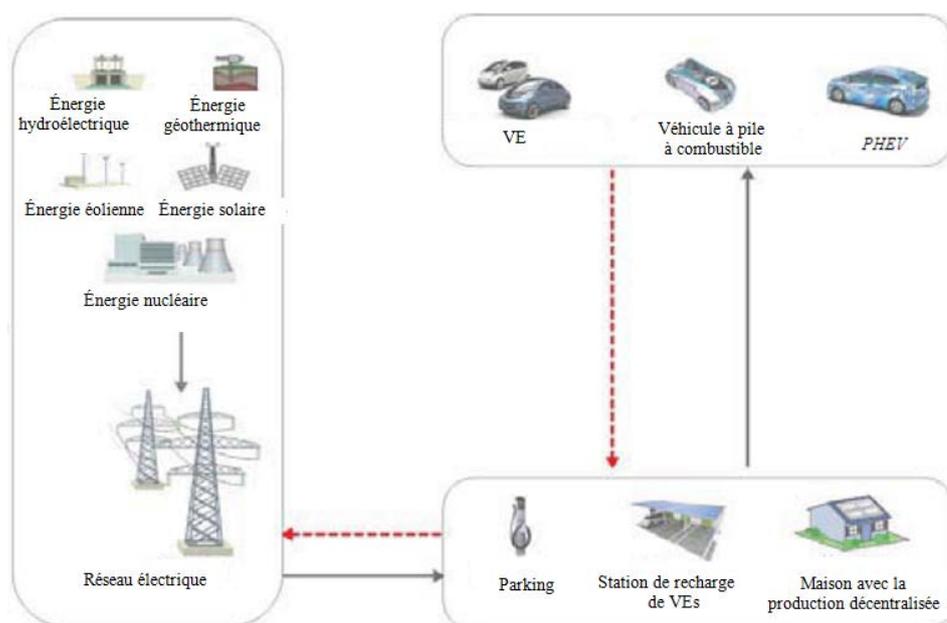


FIGURE 1.25– Conception V2G (pointillé) et G2V (continue) [64].

Pour mettre en place ces concepts de flux énergétiques bidirectionnels, trois éléments principaux doivent être installés dans le VE [44] : un convertisseur de puissance bidirectionnel qui permet une circulation d'énergie dans les deux sens (du véhicule vers le réseau et du réseau vers le véhicule), un

système de gestion d'énergie (EMS) nécessaire pour la mesure et le contrôle de la quantité d'énergie de la batterie du véhicule. Le troisième élément est un protocole de communication entre l'opérateur du réseau et le VE permettant de transférer toutes les informations utiles pour l'EMS et d'évaluer le coût et les revenus associés.

La gestion optimale des flux (V2G ou G2V) permet d'assurer des performances énergétiques, une stabilité et un fonctionnement équilibré au sein des infrastructures de recharge tout en garantissant le fonctionnement normal des VEs. De même une affectation optimale des VEs aux stations de recharge, compte tenu des contraintes liées aux infrastructures et VEs tout en répondant aux demandes pouvant être fluctuantes et imprévisibles, participe davantage à une gestion optimale des flux énergétiques. Ce point fera l'objet du quatrième chapitre de ce mémoire.

1.4 Conclusion

Le véhicule électrique est actuellement le moyen de transport le plus "*propre*" qui suscite le plus d'intérêt de la part des constructeurs automobiles et des pouvoirs publics. Son objectif est de pallier aux différents problèmes liés aux véhicules thermiques.

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu général sur les VEs ainsi que les principaux éléments les constituant. Nous avons rappelé les différentes sources d'énergie exploitées pour la recharge des VEs en mettant l'accent sur les énergies renouvelables, et en particulier sur l'énergie solaire qui nous intéresse dans ce travail de recherche. De même, différents moyens de stockage d'énergie ont été présentés.

Nous avons abordé également les moyens, les technologies et les modes de recharge de ces véhicules. Deux modes de recharge ont été présentés : une recharge lente permettant de fournir une puissance de 3 kW pour un temps de recharge assez important avoisinant les 8 heures, et une recharge rapide avec une durée de recharge allant de 20 à 30 min. Dans le but de réduire les temps de recharge qui représentent l'inconvénient majeur des VEs, quelques techniques de recharge rapide ont été présentées. Dans ce cadre, nous allons utiliser, une méthodes de recharge rapide basée sur un algorithme de recharge CC/CV pour recharger les batteries de traction. De même, parmi les sources d'énergie évoquées dans ce chapitre, nous utiliserons, dans ce travail, un micro réseau alimenté par l'énergie solaire à l'aide de panneaux photovoltaïques.

Le chapitre s'est terminé par la présentation des flux d'énergie échangeables entre le réseau électrique et le véhicule. Dans le contexte des flux V2G, nous avons mis l'accent sur la possibilité d'utiliser les batteries de traction des VEs comme moyen de stockage d'énergie.

Sur la base des éléments et des composants présentés dans ce chapitre, nous procédons dans le chapitre suivant au dimensionnement des éléments d'un système de recharge de véhicules électriques. L'objectif de cette étude est de définir la quantité d'énergie électrique nécessaire pour propulser un VE avec des caractéristiques et un profil bien déterminés.

Chapitre 2

Dimensionnement d'un système de recharge de VEs

2.1 Introduction

Sans émission de gaz, sans rejet de particules dans l'aire et sans bruits sonores, le VE apporte une réponse efficace et concrète à la diminution de l'empreinte environnementale des transports [20]. Il constitue le maillon manquant du panorama des moyens de mobilité (train, tramway, bus, vélo), et répond pleinement aux modes de déplacement des derniers kilomètres principalement dans les zones urbaines.

Comme évoqué dans le premier chapitre, plusieurs solutions sont envisageables pour la recharge des VEs allant d'une recharge domestique à une recharge à l'aide d'une borne publique. Ces infrastructures de recharge peuvent être alimentées soit par le réseau électrique, soit par les énergies renouvelables, soit par des sources hybrides

Le système de recharge illustré par la figure 2.1 a pour but de recharger les VEs à partir de l'énergie renouvelable issue des panneaux photovoltaïques. Une deuxième fonctionnalité de ce système consiste à alimenter les appareils domestiques et les batteries au plomb (batteries stationnaires) à partir de l'énergie stockée dans les batteries de traction (V2H).

Comme illustré dans la figure 2.1, ce système de recharge est constitué de panneaux photovoltaïques, d'éléments de stockage d'énergie (d'une batterie au plomb stationnaire et d'une batterie embarquée dans le VE), deux convertisseurs de puissance DC/DC et d'un onduleur DC/AC.

Après avoir déterminé l'ensemble des éléments clés constituant un système de recharge, nous procédons aux dimensionnements de ces éléments afin de définir l'énergie nécessaire pour propulser un VE ayant un profil de référence donné. Cette étude nous permettra de déterminer les caractéristiques ainsi que les quantités des éléments nécessaires pour satisfaire ce besoin à savoir : le nombre de panneaux PVs, le type de montage des modules des PVs, le choix des batteries, le choix des régulateurs et des convertisseurs, etc.

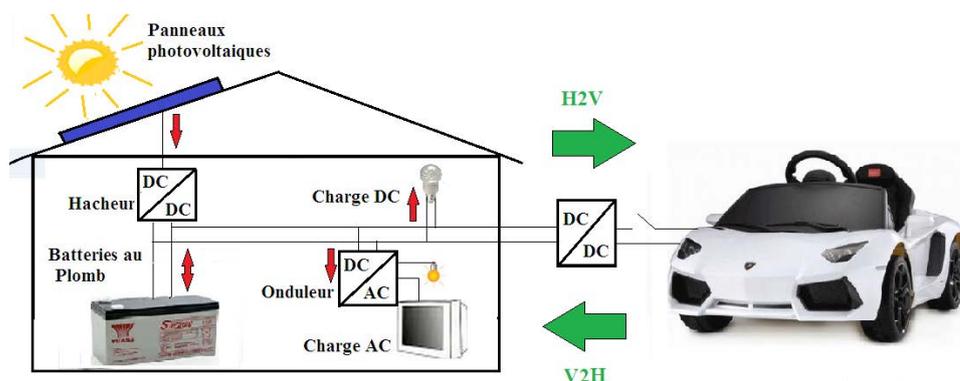


FIGURE 2.1– Architecture des flux énergétiques bidirectionnels H2V et V2H.

Plus précisément, nous présentons la démarche adoptée pour le dimensionnement du pack de batteries Li-Ion (batteries de traction du VE), du pack de batteries au plomb (batteries stationnaires installées dans la station de recharge), des panneaux photovoltaïques et des convertisseurs de puissance. Pour effectuer cette étude de dimensionnement nous nous focalisons sur les caractéristiques des fiches techniques des différents composants du système. Enfin, nous présentons et analysons les résultats obtenus.

2.2 Structure d'un système de recharge

Dans le but d'étudier la structure d'un système de recharge afin de faciliter son dimensionnement, nous rappelons le rôle de chaque élément le constituant.

Les panneaux solaires : ce sont des panneaux photovoltaïques permettant de convertir de l'énergie solaire en énergie électrique. Pour produire un maximum d'énergie, les panneaux doivent être orientés correctement pour capturer le maximum de rayons solaires. Ces panneaux peuvent alimenter des appareils domestiques, la batterie au plomb, et/ou recharger le VE quand il est connecté.

Les batteries stationnaires (ou batteries au plomb) : le rôle de ces batteries est de stocker l'énergie électrique et de la restituer pour alimenter les appareils domestiques et/ou recharger le véhicule lorsque l'énergie solaire est insuffisante (pendant les jours nuageux) ou lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible (pendant la nuit).

Le convertisseur DC/DC unidirectionnel en courant (le hacheur survolteur) : c'est un convertisseur élévateur qui est relié aux panneaux photovoltaïques. Il permet d'élever la tension des panneaux photovoltaïques à la tension des batteries au plomb. Il permet également d'obtenir le maximum de puissance des PVs par l'application d'un algorithme MPPT.

L'onduleur : c'est un convertisseur de type DC/AC. Il permet de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir des sources d'énergie électrique délivrant un courant continu.

Le convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant (le hacheur réversible en courant) : il permet de recharger le véhicule électrique à partir de l'énergie solaire, et de recharger les appareils domestiques et/ou les batteries au plomb à partir de l'énergie stockée dans les batteries des VE en cas de besoin.

Les batteries des véhicules électriques (ou batteries Li-Ion) : ont pour rôle de stocker l'énergie et de la restituer soit pour propulser les véhicules soit pour alimenter les appareils domestiques et/ou les batteries au plomb en cas de besoin.

Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement aux flux énergétiques H2V et donc à la recharge des VE à partir de l'énergie solaire. De ce point de vue, nous simplifions le système de recharge de la figure 2.1. Le système simplifié est illustré dans la figure 2.2. Ce système de recharge est composé d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, des batteries (batterie stationnaire au plomb et batterie d'attraction Li-Ion), et deux convertisseurs de puissance DC/DC.

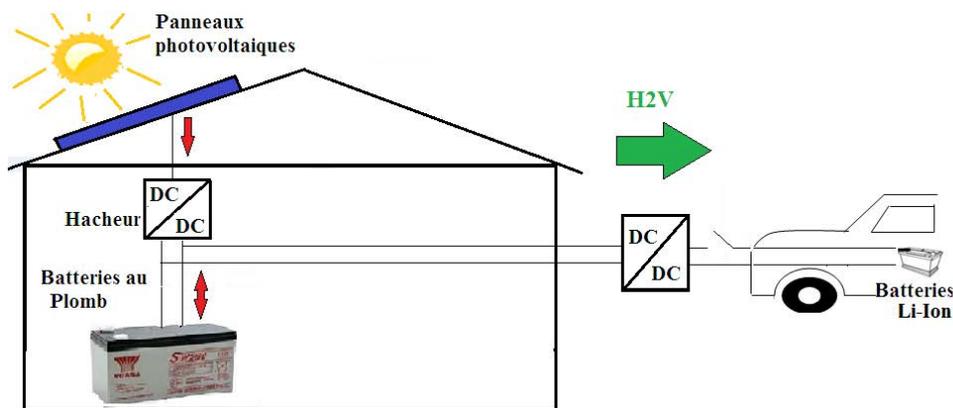


FIGURE 2.2– Architecture des flux énergétiques unidirectionnel H2V.

Pour étudier la gestion de l'énergie dans le système de recharge, nous considérons la structure du système de la figure 2.3. Les éléments de ce système sont connectés à un bus DC ; le bus a une tension égale à la tension du pack de batteries au plomb. Il permet de filtrer les fluctuations de puissance provenant des convertisseurs DC/DC utilisés dans le système.

Afin d'étudier le système de recharge de la figure 2.2 et assurer son bon fonctionnement, le dimensionnement de ses éléments s'avère indispensable. Dans cette section, nous dimensionnons le système du point de vue énergétique. Pour ce faire, nous commençons par déterminer la quantité d'énergie dont le véhicule a besoin pour se mouvoir à partir de ses données mécaniques et un profil de vitesse. Connaissant cette quantité d'énergie, il est possible de déterminer la capacité en Ah des batteries de traction du véhicule. De même, il est possible de déterminer le nombre de modules ainsi que la puissance des PVs nécessaire pour alimenter la batterie du VE. Il est également possible de calculer la capacité des batteries de stockage (batteries au plomb). Dans cette étude de dimensionnement, le besoin énergétique prime sur les autres paramètres du système tels que le prix, la marque, etc.

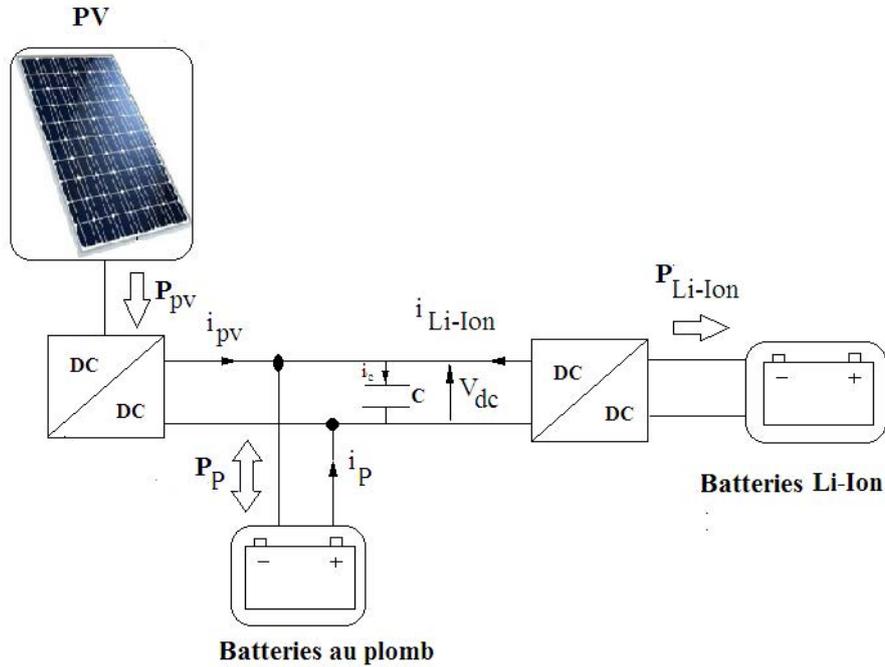


FIGURE 2.3– Structure du système de recharge unidirectionnel étudié.

2.3 Motorisation du véhicule électrique

Le véhicule électrique, avec moins de bruit et sans pollution (sans émission de gaz d'échappement), apparaît comme une nouvelle façon de se déplacer confortablement en milieu urbain. Son utilisation est déjà rendue obligatoire pour certains déplacements en milieux fermés ou en atmosphères explosives (usines, zones fermées accueillant du public, industries sensibles). Pour ce travail, nous considérons un VE à usage urbain dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 2.1.

Masse maximale	1000 kg
Vitesse moyenne	45 km/h
Vitesse maximale	120 km/h
Accélération de 0 à 45 km/h	en moins de 15 s
Autonomie	100 km
Coefficient de pénétration dans l'air C_x	0.3
Coefficients de frottement C_r	0.01
Surface frontale S	$2.5 m^2$
Densité de l'air ρ	$1.225 kg/m^3$
Accélération de la pesanteur g	$9.81 N/kg$

TABLE 2.1– Cahier des charges du VE considéré dans l'étude.

2.3.1 Puissance et énergie nécessaires pour la propulsion d'un VE

La puissance nécessaire pour la propulsion d'un VE est celle qui permet de vaincre les forces de frottement dues à l'apesanteur, à l'aérodynamique et au roulement. Ces forces sont illustrées par la figure 2.4

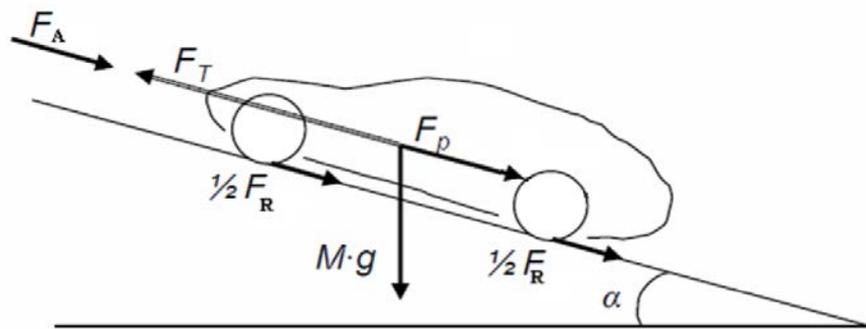


FIGURE 2.4– Bilan des forces exercées sur un véhicule en mouvement.

Avec :

- \vec{F}_T : Force de traction ou de propulsion,
- \vec{F}_R : Force de frottement des pneus avec le sol,
- \vec{F}_A : Force aérodynamique,
- \vec{F}_P : Force de pente,
- M : Masse totale du véhicule,
- g : Accélération de la pesanteur,
- α : Angle d'inclinaison du véhicule avec l'axe horizontal.

Selon la loi de Newton [2] et [17], l'accélération du véhicule peut être exprimée par l'équation suivante :

$$M \cdot \vec{a} = \vec{F}_T + \vec{F}_R + \vec{F}_A + \vec{F}_P \quad (2.1)$$

Avec :

- \vec{a} : Accélération du véhicule.

La force de traction F_T peut s'écrire lorsqu'on fait une projection des forces sur l'axe du mouvement, sous la forme suivante :

$$F_T = F_R + F_A + F_P + M \cdot a \quad (2.2)$$

F_R est la force de résistance au roulement liée au coefficient de roulement des pneus. En pratique, avec des pneumatiques très faible, et avec une pression de gonflage comprise entre 1,8 et 2,2 N/cm^2 , le

coefficient de résistance au roulement, noté C_r , vaut 0,01.

L'effort de résistance au roulement \vec{F}_R s'exprime selon [17] et [65] par :

$$F_R = C_r.M.g.\cos(\alpha) \quad (2.3)$$

F_A est la force de résistance aérodynamique. Elle est proportionnelle à la masse volumique de l'air ($1,225\text{kg}/\text{m}^3$), au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale S du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air C_x (environ 0,3 à 0,4 habituellement). La résistance de la force aérodynamique est défini selon [17] et [65] par :

$$F_A = \frac{1}{2}.\rho.S.C_x.V^2 \quad (2.4)$$

Avec :

- ρ : Densité de l'air,
- V : Vitesse relative par rapport à l'air,
- C_x : Coefficient de pénétration dans l'air,
- S : Section frontale du véhicule.

F_P est la force nécessaire pour vaincre une pente. La résistance de la force d'une pente est défini selon [2] et [65] par :

$$F_P = M.g.\sin(\alpha) \quad (2.5)$$

Les paramètres M , g et α sont définis auparavant.

Enfin, $M.a$ est le terme dynamique d'accélération ou de décélération du véhicule ($a > 0$ pour une phase d'accélération et $a < 0$ pour une phase de décélération, $a = 0$ pour une vitesse constante).

L'accélération peut être exprimée en fonction de la vitesse [2] par :

$$a = \frac{dV}{dt} \quad (2.6)$$

La puissance d'une masse à une vitesse donnée est définie comme étant le produit de la force par la vitesse [2], [65].

$$P = F_T.V \quad (2.7)$$

En utilisant toutes ces équations, l'expression de la puissance d'une masse à une vitesse donnée peut être exprimée par l'équation 2.8 ([16], [66]). Ainsi, nous exprimons le modèle simulink du profil de cette puissance par la figure 2.5.

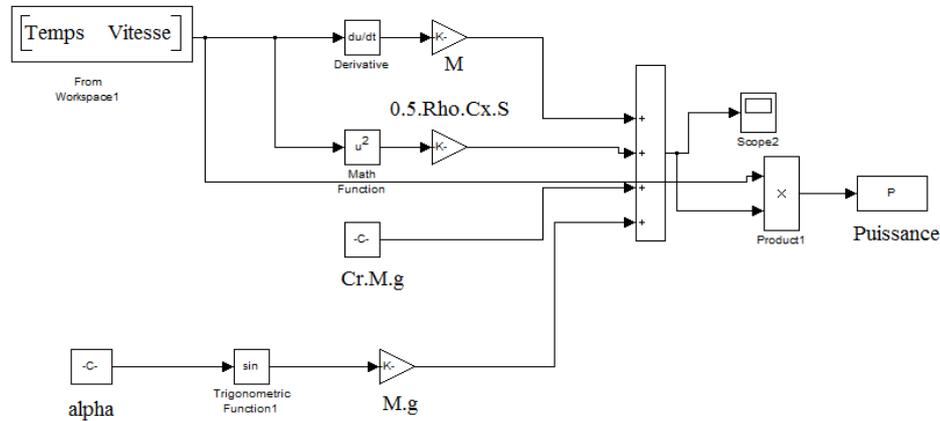


FIGURE 2.5– Modèle simulink du profil de puissance

$$P = [C_r.M.g.\cos(\alpha) + M.g.\sin(\alpha) + M\frac{dV}{dt} + \frac{1}{2}.\rho.S.C_x.V^2].V \quad (2.8)$$

A partir de cette puissance, nous déterminons l'énergie nécessaire pour la propulsion du véhicule considéré par l'équation suivante :

$$E = \frac{A}{V}.P \quad (2.9)$$

Avec :

- A : Autonomie de véhicule en km,
- V : Vitesse relative par rapport à l'aire en km/h,
- P : Puissance absorbée en W

En se basant sur les deux équations 2.8 et 2.9, nous déterminons dans ce qui suit les quantités d'énergie nécessaires pour propulser le VE pour deux profils différents de vitesse.

2.3.2 Motorisation à vitesse constante

Dans ce cas, le dimensionnement se fait en considérant que le véhicule roule sur une route plate ($\alpha = 0$ radian) à une vitesse constante (accélération nulle). Nous considérons plusieurs valeurs de vitesse allant de 10 km.h^{-1} à 120 km.h^{-1} .

Étant données les caractéristiques du VE (voir le tableau 2.1), nous déterminons la puissance et l'énergie nécessaires pour le véhicule. Le tableau 2.2 donne les résultats obtenus pour les différentes valeurs de vitesse avec le calcul des différentes forces exercées sur le véhicule.

Vitesse du véhicule	10	30	50	90	110	120	$km.h^{-1}$
Vitesse en $m.s^{-1}$	2.8	8.4	14	25.2	30.8	33.3	$m.s^{-1}$
Résistance au roulement	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	98.1	N
Résistance au roul. en kW	0.3	0.8	1.4	2.5	3	3.3	kW
Résistance de l'air	3.6	32.4	90.03	291.7	435.8	518.6	N
Résistance de l'air en kW	0.01	0.3	1.3	7.4	13.4	17.3	kW
Force de résistance totale	101.7	130.5	188.1	389.8	533.8	616.7	N
Puissance absorbée	0.3	1.9	2.6	9.9	16.4	21	kW
Énergie pour 100 km	2.8	3.7	5.3	10.9	15	17.2	kWh

TABLE 2.2– Résultat de calcul de l'énergie à vitesses constantes.

Notons que la puissance calculée concerne tout véhicule circulant à vitesse constante que ce soit véhicule électrique, à gaz, à pétrole, ou autres type de véhicules. A titre d'exemple, un véhicule circulant à 50 Km/h avec une autonomie de 100 Km a besoin de 5,3 kWh d'énergie. Par contre, pour le même véhicule circulant à une vitesse de 120 Km/h l'énergie nécessaire est de 17,2 kWh.

2.3.3 Motorisation à vitesse variable

Ce dimensionnement a pour but de déterminer l'énergie nécessaire pour le véhicule afin de parcourir une distance avec un profil variable de vitesse. Ce profil de vitesse est celui de NEDC composé de 4 cycles urbains répétés appelés ECE-15 et un cycle extra urbain EUDC [67]. La figure 2.6 donne l'évolution de la vitesse en fonction du temps (cycle de conduite NEDC) [16].

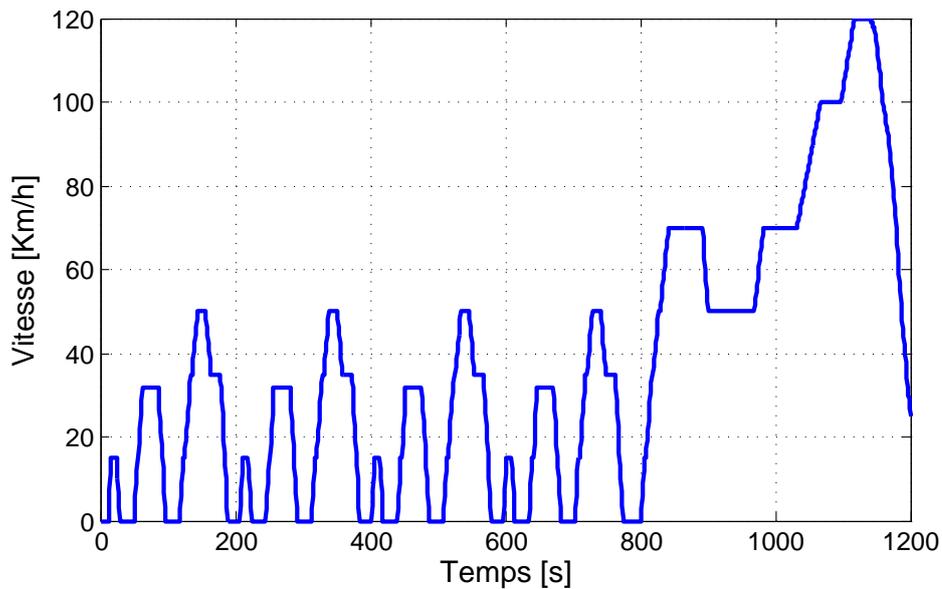


FIGURE 2.6– Profil de vitesse NEDC.

Dans la figure 2.6, nous distinguons trois phases de vitesse :

- 1 – Phase d'accélération $a > 0$ (la vitesse augmente linéairement),
- 2 – Phase de décélération $a < 0$ (la vitesse diminue linéairement),
- 3 – Phase d'accélération nulle $a = 0$ (la vitesse est constante).

La puissance du véhicule selon le profil NEDC peut être calculée par l'expression (2.8) et représentée par la figure 2.7.

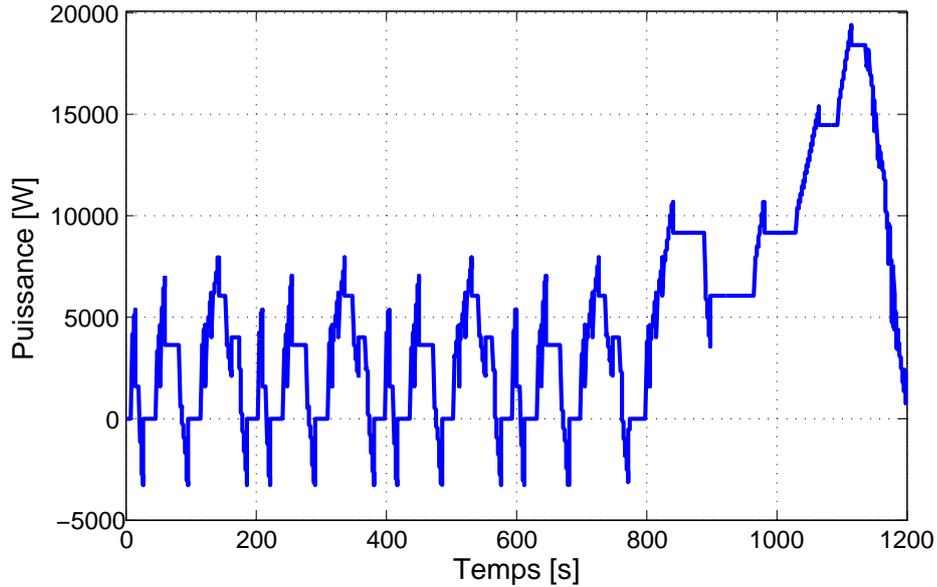


FIGURE 2.7– Évolution de la puissance en fonction du temps pour une pente de 0%.

Les variations brutales de la puissance sont causées par le changement de vitesse. Dans cet exemple, la puissance crête de la voiture atteint 18 kW [66].

Pour le calcul de la puissance du véhicule, nous considérons la vitesse moyenne durant son déplacement, et nous supposons que le véhicule circule sur une route sans pente (l'angle d'inclinaison $\alpha = 0$ radian) avec une vitesse maximale de 120 km/h. Le profil de ce véhicule avec les caractéristiques précitées sont présentés dans le tableau 2.5 :

Distance	11,02 km
Vitesse moyenne V_{moy}	36,4 km/h
Vitesse maximale V_{max}	120 km/h
Accélération max	$1,04m/s^2$
Nombre d'arrêts	12

TABLE 2.3– Profil NEDC du véhicule.

Compte tenu des caractéristiques du véhicule et du profil considéré, la puissance ainsi que la quantité d'énergie nécessaire pour sa propulsion sont exprimées dans le tableau 2.4.

Vitesse du véhicule	36.4	$km.h^{-1}$
	10.2	$m.s^{-1}$
Résistance au roulement	98.1	N
	1	kW
Résistance de l'air	47.7	N
	0.5	kW
Résistance accélération	1040	N
	10.6	kW
Force de résistance totale	1185.8	N
Puissance absorbée	12.1	kW
Énergie pour 11.2 km	3.7	kWh

TABLE 2.4– Résultat du calcul de l'énergie du véhicule à vitesse moyenne.

A partir de ces résultats, nous remarquons que pour une vitesse moyenne de 36,4 km/h, l'énergie absorbée pour un parcours de 11,2 km est de 3,7 kWh. Nous constatons que pour un véhicule ayant une autonomie de 100 km et circulant avec une vitesse maximale de 120 km/h, l'énergie embarquée est largement suffisante pour parcourir le profil de vitesse NEDC (qui est de 11,2 km). Nous retenons donc pour la suite de nos calculs un véhicule dont l'énergie nécessaire est de 17,2 kWh.

2.4 Choix des batteries du système de recharge

Comme expliqué précédemment, dans le système de recharge considéré dans ce travail, il y a 2 technologies des batteries, les batteries stationnaires et les batteries de traction. Cette étape de l'étude consiste à déterminer la technologie de batteries à utiliser pour satisfaire les exigences du EV étudié. Pour ce faire, nous nous limitons à la comparaison de quatre technologies de batteries (batterie au plomb, batterie Ni-MH, batterie Li-ion, et batterie Ni-Cd). Les caractéristiques de ces quatre technologies sont exposées dans le tableau 2.5 [19].

	Énergie massique [Wh/kg]	Densité d'énergie [Wh/litre]	Coût indicatif [Euros/kWh]
Batterie au Plomb	30-50	75-120	200-250
Batterie Ni-MH	60-110	220-330	1500-2000
Batterie Li-Ion	150-190	220-330	2000
Batterie Ni-Cd	45-80	80-150	600

TABLE 2.5– Comparaison des technologies de batteries.

Nous calculons la masse et le volume de chaque technologie selon les expressions suivantes :

$$M_{Batterie} = \frac{E}{\text{énergie massique}} \quad (2.10)$$

$$V_{Batterie} = \frac{E}{\text{densité d'énergie}} \quad (2.11)$$

Avec :

- $M_{Batterie}$: La masse de la batterie en kg,
- $V_{Batterie}$: Le volume de la batterie en litre,
- E : Le besoin énergétique du véhicule en Wh.

En utilisant ces expressions, la masse et le volume de chaque batterie sont présentés dans le tableau 2.6. A partir des valeurs du tableau 2.5, nous constatons que la batterie Li-Ion possède la plus grande énergie massique comparée aux autres batteries.

	$M_{Batterie}$ [kg]	$V_{Batterie}$ [litre]
Batterie au Plomb	430	215
Batterie Ni-MH	246	78
Batterie Li-Ion	101	57
Batterie Ni-Cd	344	172

TABLE 2.6– Masses et volumes des différentes technologies de batteries

La comparaison de la masse et du volume des différentes batteries (voir tableau 2.6) montre que la batterie Li-Ion est plus avantageuse comparée aux autres batteries. Compte tenu de ces résultats de comparaison, les batteries Li-ion sont les mieux adaptées pour être embarquées dans les VEs en termes de masse, de volume et d'énergie massique. Ceci est confirmé par la plupart des constructeurs de VEs qui adoptent cette technologie de batteries. Pour toutes ces raisons, nous choisissons la batterie Li-Ion comme batterie de traction embarquée dans le VE de notre système de recharge. De même, en raison de son faible coût, de sa capacité importante et de sa disponibilité comparée aux autres types de batteries, la batterie au plomb est retenue dans cette étude comme batterie stationnaire du système de recharge étudié. Sa grande masse ne contraint pas le système. Dans ce qui suit, nous présentons d'autres avantages de ces deux technologies (batteries Li-Ion et batteries au Plomb). De même, nous abordons quelques inconvénients et limites de chacune de ces deux technologies.

a) Avantages et inconvénients des batteries Li-Ion :

Les batteries lithium-Ion sont largement utilisés dans de nombreux appareils électroniques et dans les véhicules électriques en raison de leur performance énergétique et leur fiabilité [68]. En effet, ces batteries sont caractérisées par une densité d'énergie importante, un nombre de cycles élevé [69], une faible auto-décharge [70], et une tension élevée par élément (3.6V ou 3.7V) comme illustré dans le tableau 1.4. Cependant le coût de ces batteries reste élevé comparé aux autres technologies [69] (voir le tableau 1.4). Elles sont également caractérisées par leur limite en termes de surcharge sous peine d'explosion. Le coût et la sécurité représentent donc les inconvénients majeurs de cette technologie. Plusieurs sortes de batteries Li-Ion existent dans le marché. Parmi elles, nous distinguons :

- La batterie lithium-ion polymère : ces batteries peuvent prendre des formes fines et variées. Avec leurs faibles poids, elles peuvent être déposées sur des supports flexibles. En termes de résistance à la surcharge et aux fuites d'électrolytes, elles sont plus sûres que les autres technologies Li-ion. Ces batteries présentent également quelques inconvénients dont une faible densité énergétique, moins de cycles de vie et un coût élevé par rapport à d'autres technologies Li-Ion.

- La batterie lithium-fer-phosphate (LiFePO₄) : ce type de batterie possède une tension plus faible que les autres technologies, mais plus sûre, plus solide, moins toxique. Sauf dans le cas d'une utilisation intensive, ces batteries ont une longue durée de vie. Elles ont une puissance massique et volumique élevée. Leur résistance faible empêche de grandes pertes dans la batterie. A cause de leur technologie complexe, ces batteries restent plus chères. Compte tenu de leurs faibles tensions, elles ne sont pas compatibles avec des VEs exigeant des batteries de traction à haut tension.

b) Avantages et inconvénients des batteries au plomb :

Les batteries au plomb sont des batteries bon marché et fiables. Elles n'ont pas d'effet mémoire, et elles ont une durée de vie assez longue. Ce type de batteries ne nécessite pas d'entretien. Cependant, elles sont contraignantes par un poids élevé, une faible autonomie, la sensibilité au froid. Ce type de batteries est moins adapté pour les VEs.

De manière générale, il y a deux grandes familles de batteries au plomb : les batteries ouvertes et les batteries à recombinaison de gaz.

- Les batteries ouvertes ont une durée de vie allant de 5 à 15 ans, et sont des technologies les moins chères. En revanche, elles ont besoin d'une maintenance régulière avec des conditions d'installation spécifiques.

- Quant aux batteries à recombinaison de gaz, elles ne nécessitent pas beaucoup d'entretiens. De même, elles sont caractérisées par un faible taux de dégazage, par l'absence de risque de fuite d'acide, et enfin elles sont aisément transportables. Ce type de batterie présentent tout de même quelques inconvénients dont la nécessité d'une régulation précise de la charge, elles sont sensibles aux hautes températures et à l'emballage thermique (plus que les batteries ouvertes). Elles perdent rapidement de l'électrolyte dans des environnement chauds, et enfin leur durée de vie en cyclage profond est assez faible.

Le dimensionnement d'un système de recharge de VEs à partir de l'énergie produite par des panneaux solaires consiste à adapter et ajuster les différents éléments du système aux besoins d'un cahier des charges. Dans ce qui suit, nous procédons aux dimensionnements de ces éléments afin de produire et stocker la quantité d'énergie suffisante selon le cahier des charges défini.

2.5 Dimensionnement des batteries Li-Ion

Pour se propulser, un véhicule électrique a besoin de pouvoir stocker de l'énergie électrique produite par la transformation des énergies cinétiques et potentielles lors des phases de récupération. Le VE se distingue du véhicule hybride du fait qu'il doit en plus stocker l'énergie nécessaire afin d'assurer son autonomie et des performances acceptables. Les besoins de stockage ne sont donc pas les mêmes pour les deux types de véhicules.

2.5.1 Méthode de dimensionnement des batteries Li-Ion

Le dimensionnement des batteries de traction Li-ion consiste à déterminer la capacité (ou la densité d'énergie en Wh/kg) nécessaire pour répondre à un cahier des charges bien défini et fixant la tension du pack de batteries. Pour le choix de cette batterie, plusieurs critères et paramètres peuvent être pris en compte selon l'utilisation et les performances souhaitées. Pour notre étude, la tension du pack de batteries Li-Ion imposée est fixée à 200 V. La sélection d'une batterie se fait en fonction des critères suivants, et par ordre d'importance :

- 1 – La capacité en Ah,
- 2 – L'énergie, le poids (énergie massique),
- 3 – Le nombre de cycles (nombre de recharges/décharges),
- 4 – La durée de vie, le prix,
- 5 – L'entretien,
- 6 – La tension, l'encombrement (fonction de l'utilisation).

Selon le profil du véhicule retenu, dont l'énergie absorbée est 17,2 kWh, la capacité du pack de batteries est défini par la formule suivante :

$$C_{PACK} = \frac{E}{U_{PACK}} = \frac{17200}{200} = 86Ah \quad (2.12)$$

Avec :

- C_{PACK} : La capacité du pack de batteries en Ah,
- E : L'énergie absorbée Wh,
- U_{PACK} : La tension du pack de batteries de traction en V.

2.5.2 Choix de la batterie de traction Li-Ion

Les fabricants de batteries Li-Ion proposent une large gamme de produits. Afin de choisir notre batterie de traction, la capacité (ou la densité d'énergie) que propose le constructeur doit être supérieur ou égale à celle que nous venons de calculer (2.12).

$$C_{constructeur} > C_{PACK} \quad (2.13)$$

et

$$E_{constructeur} > E_{PACK} \quad (2.14)$$

Après avoir comparé différentes batteries Li-ion et conformément aux performances calculées ci-dessus, nous avons choisi une batterie de la marque Boston Power : *Swing Tempo 7101 Lithium-Ion battery module* : 7.4V (voir figure 2.8).

Cette batterie est un module de plusieurs cellules mis en série et en parallèle. Ce module a une capacité de 101 Ah ce qui est largement suffisant pour satisfaire les besoins et le cahier des charges du véhicule considéré (2.12). Nous présentons dans le tableau 2.7 quelques caractéristiques de ce module.



FIGURE 2.8– Un module Swing Tempo 7101

Capacité nominale	101Ah
Énergie nominale	775Wh
Tension nominale	7.4V
Densité d'énergie	185Wh/L
Courant constant de recharge	20A à 8.4V
Tension constante de recharge	8.4V à C/50
Plage de tension de fonctionnement	5.5V à 8.4V
Courant maximal de décharge	50A
Poids nominal du module	5.2kg
Dimensions	284 × 180.8 × 80.64mm
Température en cas de recharge	−10 à 60°C
Température en cas de décharge	−40 à 70°C

TABLE 2.7– Caractéristiques du module Swing Tempo 7101

2.5.3 Constitution du pack de batteries

Le pack de batteries est constitué de plusieurs éléments (modules) mis en série et en parallèle.

1 – Nombre d'éléments en série :

La mise en série des éléments des batteries permet d'avoir une tension plus élevée. Étant donné que nous souhaitons avoir une tension de 200 V et que nous disposons d'éléments de 7,4 V, il nous faut donc au moins 27 modules comme calculé par la formule suivante :

$$N_s = \frac{U_{PACK}}{U_{élément}} = \frac{200}{7.4} = 27 \quad (2.15)$$

Pour des raisons d'équilibrage si les modules sont rangés par couple, notre pack sera donc constitué de 28 modules.

2 – Nombre d'éléments en parallèle :

La mise en parallèle des éléments permet d'avoir la capacité souhaitée. Ce nombre se calcul de la manière suivante :

$$N_p = \frac{C_{PACK}}{C_{élément}} \quad (2.16)$$

Vu que la capacité de la batterie que nous avons choisi est suffisante pour satisfaire notre cahier des charges, il n'est pas nécessaire de mettre des éléments en parallèle. Un seul module est suffisant : $N_p = 1$.

Compte tenu de ces calculs, la batterie *Swing Tempo 7101* Lithium-Ion permet de satisfaire les besoins énergétiques du véhicule. Le tableau 2.8 donne les caractéristiques de la batterie et du pack de batteries retenu.

	Module	Pack
Capacité nominale [Ah]	101	101
Énergie nominale [Wh]	775	21000
Tension nominale [V]	7.4	200
Poids [kg]	5.2	140.4

TABLE 2.8– Caractéristiques du pack de batteries de traction.

2.6 Dimensionnement des panneaux solaires

2.6.1 Les panneaux photovoltaïques

Dans les panneaux solaires, l'effet photovoltaïque consiste à transformer la lumière (issue des rayons solaires) en énergie électrique. Ce principe a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Becquerel. Scientifiquement parlant ce phénomène a lieu lorsqu'un matériau semi-conducteur absorbe des photons, émis par la lumière, qui lui permettent de produire une tension électrique. Un panneau solaire est composé de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elle en série ou en parallèle [71].

Plus la puissance des cellules est grande et plus leur nombre est élevé, plus les panneaux produisent. Une cellule classique est composée d'un semi-conducteur de type P et d'un autre de type N qui produisent du courant à leur jonction sous l'effet des photons. Les rayons solaires sont convertis en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Un ensemble de cellules constituent un module générant du courant continu (DC). Notons que le rendement des panneaux photovoltaïques diminue avec la chaleur et l'ancienneté. Ce phénomène est pris en compte dans la phase de dimensionnement des systèmes de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. La puissance et la tension varient en fonction de l'ensoleillement.

L'assemblage de plusieurs modules constitue un panneau photovoltaïque. Cet assemblage peut se faire de différentes façons afin d'être adapté aux caractéristiques des équipements d'usage. Lorsque le montage



FIGURE 2.9– Panneaux photovoltaïques installés sur le toit d'une maison.

de deux modules est fait en parallèle, la tension résultante ne varie pas alors que l'intensité totale est égale à la somme des intensités des deux modules. Ce montage est donc adapté aux équipements fonctionnant en 12 V (DC) et nécessitant une forte intensité. Lorsque le montage de deux modules est fait en série, la tension résultante est la somme des tensions de chaque module soit 24 V (DC) mais l'intensité ne varie pas. L'assemblage de plusieurs modules en série et en parallèle permet d'obtenir des valeurs de tension et d'intensité souhaitées pour une utilisation optimale. La quantité d'électricité produite par les modules dépend de la quantité d'énergie solaire reçue. Afin d'optimiser ce paramètre, l'inclinaison et l'orientation des panneaux doivent être définies avec précision.

Il est judicieux de rappeler que les panneaux sont fixés sur des supports métalliques fabriqués avec un angle correct d'inclinaison. L'ensemble est scellé sur des supports surélevés, le plus souvent sur les toits des maisons (voir figure 2.9). La fixation des panneaux sur les toits doit être très résistante pour éviter tout endommagement (arrachage par le vent par exemple). De même, leur installation sur les toits permet de les sécuriser contre les vols ou les casses et permet de raccourcir la distance du câblage pour le raccordement des équipements électriques. Cependant, cela implique une maintenance plus fastidieuse. En effet, les panneaux doivent être nettoyés fréquemment afin de maximiser leur productivité et allonger leur cycle de vie.

2.6.2 Méthode de dimensionnement des panneaux

La principale difficulté dans le dimensionnement d'un système à panneaux photovoltaïques réside dans l'évaluation de l'énergie réellement consommée par l'équipement d'usage. Celle-ci dépend de l'utilisation qui va en être faite et n'est donc pas toujours facile à déterminer. Cette étape est importante car c'est le point de départ d'une étude de dimensionnement. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque se fait en suivant une démarche par étapes que l'on peut résumer comme suit :

1 – Calcul de l'énergie consommée par jour (E_c) :

Il s'agit de déterminer la quantité d'énergie consommée par l'équipement d'usage au cours d'une journée. Pour cela, deux paramètres sont importants, le nombre d'heures d'utilisation de l'équipement

dans une journée et la puissance de fonctionnement de celui-ci en Watts (W). La formule reliant ces trois paramètres est donnée par :

$$E_c = N_{Hj} \times P_f \quad (2.17)$$

Avec :

- E_c : Énergie consommée par jour en Wh/j,
- N_{Hj} : Nombre d'heures d'utilisation par jour,
- P_f : Puissance de fonctionnement du récepteur en W.

A titre d'exemple, l'énergie consommée par six lampes (12 V) de 12 Watts qui fonctionnent 7 heures par jour : $7 \times (6 \times 12) = 504$ Wh/j.

2 – Calcul de l'énergie à produire (E_p) :

Une fois que l'énergie à consommer est connue, il faut déterminer la quantité d'énergie que les modules photovoltaïques devront produire. De manière générale, l'énergie à produire doit être supérieure à l'énergie à consommer car il y a des pertes dues au rendement des différents équipements (modules, batteries, régulateur, onduleur). Ces pertes sont dues aussi à l'incertitude météorologique, à l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison et aux déperditions dans les câbles. Ces pertes sont intégrées dans le calcul grâce à un coefficient correcteur noté k . Pour le dimensionnement des modules photovoltaïques, le coefficient correcteur utilisé est $k = 1,3$. Ce chiffre est particulièrement élevé car il prend aussi en compte la charge des batteries si l'appareil fonctionne toute la journée. Enfin, cette majoration garantit une certaine marge de sécurité. L'énergie à produire est exprimée donc par :

$$E_P = E_C \times k \quad (2.18)$$

Par exemple, l'énergie à produire pour les six lampes considérées dans l'exemple précédent est : $504 \times 1,65 = 832$ Wh/j.

3 – Calcul de la puissance crête (P_c) des modules à installer :

C'est l'unité de référence qui permet de comparer les performances des cellules ou des modules. La puissance crête est la puissance maximale délivrée dans les conditions suivantes :

- a) Un ensoleillement permettant d'avoir $1000W/m^2$,
- b) Une température ambiante de $= 25^\circ C$,
- c) L'épaisseur de l'atmosphère doit être égale à 1,5.

La puissance crête des modules à installer pour un fonctionnement optimal dépend de l'énergie à produire mais aussi de l'ensoleillement moyen sur le site. Pour une ville comme Belfort (située à l'Est de la France), le nombre moyen d'heures de soleil par jour est de $5h/j$ [72]. Formellement, cette puissance de crête est donnée par :

$$P_C = \frac{E_P}{E_{\text{ensoleillement}}} \quad (2.19)$$

Par exemple, la puissance crête des modules à installer pour l'exemple précédent dans la ville de Belfort est : $832 / 5 = 166$ Wc.

Dans ce cas de figure, il semble largement suffisant d'installer deux modules de 90 Wc. Ce calcul nous donne alors la puissance crête du générateur à installer pour satisfaire les besoins en énergie évalués. Pour atteindre cette valeur, il est souvent nécessaire d'assembler plusieurs modules. De manière générale, la puissance installée doit toujours être supérieure au résultat de ce calcul afin d'avoir une marge de sécurité supplémentaire. Ce surdimensionnement permet en outre de recharger les batteries tout en utilisant l'équipement d'usage à pleine puissance.

Pour notre étude, nous utilisons des panneaux photovoltaïques PHOTOWATT (PWX500-12V)(disponibles dans le laboratoire) illustré par la figure 2.10



FIGURE 2.10– Panneau photovoltaïque PWX500-12V.

2.7 Dimensionnement des batteries au plomb

2.7.1 La batterie au plomb (batterie stationnaire)

Compte tenu de sa dépendance totale des rayons solaires, l'énergie électrique produite par des panneaux photovoltaïques doit être stockée soigneusement. En effet, la production d'énergie s'atténue en fonction de la diminution des rayons solaires pour atteindre une production "zéros" pendant la nuit. Il est donc important de mettre en place un dispositif de stockage adéquat. Pour ce faire, des batteries conçues pour emmagasiner des quantités importantes d'énergie et pour les restituer de manière constante en courant continu sur de longues périodes sont envisageables. Théoriquement, une batterie de 100Ah peut fournir un courant de 1 Ampère pendant 100 heures. La seconde caractéristique d'une batterie est sa tension nominale. Dans les systèmes à panneaux photovoltaïques, deux types de batteries au plomb sont utilisés pour deux usages bien spécifiques :

- 1 – Des batteries solaires à électrolyte liquide sont utilisées pour les services fonctionnant la nuit et qui nécessitent un courant stable et continu pendant une longue durée (les congélateurs par exemple). Ces batteries sont particulièrement adaptées à ce type d'usage car elles ont une grande profondeur de décharge, de l'ordre de 80% de la capacité de la batterie. La profondeur de décharge indique le niveau jusqu'auquel la batterie peut être déchargée sans impliquer la détérioration de celle-ci. La durée de vie d'une batterie est caractérisée par son nombre de cycles (une charge et une décharge constituent un cycle). De façon générale, les batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques ont une durée de vie élevée et permettent un grand nombre de cycles.
- 2 – Des batteries de démarrage sont utilisées pour les services nécessitant un fort courant au démarrage (moulin et soudure par exemple). Ces batteries permettent de fournir un courant de forte intensité très rapidement, ce qui détériorerait trop vite des batteries solaires. Cependant, les batteries de démarrage ne supportent pas bien les décharges de plus de 40 %. Leur utilisation doit donc se limiter à des systèmes qui ne fonctionnent que pendant la production de l'énergie solaire (pendant la journée). Ces batteries ont une durée de vie estimée deux fois plus courte que les batteries solaires.

De manière générale, il est difficile d'anticiper la durée de vie d'une batterie. Celle-ci dépend fortement de la nature d'utilisation, du nombre de recharges/décharges, du service utilisé, etc. Cependant, un contrôle régulier du niveau de l'électrolyte et du système de régulation de la recharge/décharge allongent la durée de vie de la batterie et de ses équipements.

Quelque soit le mode d'utilisation des panneaux photovoltaïques, les critères de dimensionnement à respecter sont quasiment les mêmes. Seules les réflexions diffèrent :

- 1 – Pour une installation autonome, le coût d'investissement est souvent privilégié,
- 2 – Pour une installation raccordée au réseau, le dimensionnement consiste à produire le maximum possible d'énergie.

2.7.2 Méthode de dimensionnement des batteries au plomb

Après avoir déterminé le nombre de modules photovoltaïques à installer, il faut que le système soit capable de fournir et stocker l'énergie nécessaire, tout en tenant compte de certains aléas qui pourraient survenir (pannes éventuelles, intempéries, nuages etc.).

Pour le stockage de cette énergie, les batteries stationnaires doivent être dimensionnées selon quatre critères :

- a) l'énergie à consommer (E_c) par l'équipement d'usage (batteries Li-ion de la voiture),
- b) le nombre de jours d'autonomie (N) correspondant au nombre de jours de fonctionnement des batteries,
- c) la profondeur de décharge maximale (D) acceptable pour les batteries (nous considérons 70% pour les batteries solaires dans le cadre de cette étude) ;
- d) la tension (U) du pack de batteries (nous considérons 48V pour cette étude).

Connaissant les valeurs de ces paramètres, il est possible de calculer la capacité (C) en Ah des batteries stationnaires à mettre en place [37] :

$$C = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (2.20)$$

A titre d'exemple, la capacité d'une batterie pour un fonctionnement optimal pendant trois jours d'autonomie est : $(504 \times 3) / (0,7 \times 12) = 180$ Ah. Pour cet exemple, pour assurer l'alimentation de 6 lampes, il semble raisonnable d'adopter une batterie solaire de 200 Ah.

Comme pour les modules photovoltaïques, plusieurs batteries peuvent être installées pour atteindre la capacité souhaitée. Pour notre étude, nous utilisons la batterie de la marque YUASA et de référence SW280 (disponible dans le labora



FIGURE 2.11– La batterie au plomb YUASA SW280

2.8 Mise en application

Le tableau 2.9 récapitule les données nécessaires pour le dimensionnement d'un système de recharge de VEs à panneaux photovoltaïques. Compte tenu de ce que nous venons de décrire, le tableau 2.10, présente

les calculs du dimensionnement proposé.

Données				
Composante du système de recharge	Puissance $P_f(W)$	Heures N_{Hj}	Coefficient Correcteur k	Ensoleillement (h/j)
Voiture électrique	4704	6	1.3	5

TABLE 2.9– Données nécessaires pour le dimensionnement.

Calculs	
Énergie consommée par jour $E_c(Wh/j)$	28224
Énergie à produire E_p en (Wh/j)	36691
Puissance crête P_c des modules à installer (W_c)	7300

TABLE 2.10– Calculs pour le dimensionnement.

En utilisant la batterie au plomb *YAUUSA* et le panneau photovoltaïque *PHOTOWATT*, nous allons réaliser notre pack de batteries de stockage d'énergie et notre pack de panneaux photovoltaïques. Notons que sur le marché, il y a plusieurs modules photovoltaïques et batteries au plomb normalisés.

Les caractéristiques, les données ainsi que les résultats du dimensionnement des différents éléments du système de recharge considéré sont donnés dans les tableaux ci-après. Ainsi, les caractéristiques du panneau *PWX500-12V*, utilisé pour le dimensionnement, sont présentées dans le tableau 2.11. Les résultats du dimensionnement du pack photovoltaïque sont présentés dans le tableau 2.12.

Caractéristiques de <i>PWX500-12V</i>	
Puissance Maximal	50 W_c
Tension maximale	17.2 V
Courant maximale	2.9 A
Tension circuit ouvert	21.6 V
Courant de court-circuit	3.2 A
Type de module	multi cristalline
Nombre de cellules	4 × 9
Dimensions du module	1042mm × 462mm × 45mm

TABLE 2.11– Caractéristiques du panneau *PWX500-12V*.

Pack de panneaux photovoltaïques	
Nombre total de modules	148
Nombre de modules en série	2
Nombre de modules en parallèle	74
Puissance Maximale	$7,4kWc$
Tension	$35V$
Poids	$148 \times 9,2kg = 1361kg$
Surface	$70m^2$

TABLE 2.12– Résultats de dimensionnement du pack photovoltaïque.

Le tableau 2.13 présente les données nécessaires pour le dimensionnement du pack de batteries et le tableau 2.14 expose les caractéristiques de la batterie au plomb Yuasa SW280 utilisée dans le système de recharge. Le tableau 2.15 récapitule les résultats de dimensionnement du pack de batteries au plomb.

Données			
Énergie $E_c(Wh/j)$	Autonomie	Profondeur de décharge D	Tension U
28224	1 jour	100%	48V

TABLE 2.13– Données utilisées pour le dimensionnement du pack de batteries.

Caractéristiques de la batterie YUASA SW280	
Capacité nominale	$7.6Ah$
Tension	$12V$
Volume	$151 \times 65 \times 99mm$
Poids	$2.7Kg$
Énergie/ Volume	$93Wh/l$
Énergie/ Masse	$30Wh/Kg$
Résistance interne batterie chargée	$15m\Omega$
Tension de recharge à ($20^\circ C$) en cycle	$14.7V$
Tension de recharge en floating	$13.65V$
Courant de décharge maximum par minute	$50A$
Courant de recharge maximale	$1.9A$

TABLE 2.14– Caractéristiques de la batterie au plomb Yuasa SW280.

Pack de batteries au plomb	
Nombre de modules en série	4
Nombre de modules en parallèle	78
Courant de recharge maximale	148A
Tension nominale	48V
Tension de recharge	58.8V
Capacité	588Ah

TABLE 2.15– Résultats de dimensionnement du pack de batteries au plomb.

2.9 Les convertisseurs de puissance DC/DC

Les convertisseurs DC/DC ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Nous distinguons deux types de convertisseurs DC/DC : les hacheurs (convertisseurs non isolés), et les alimentations à découpage (convertisseurs comportant un transformateur assurant l'isolation galvanique). Dans ce travail, le choix s'est porté sur le premier type qui est à son tour divisé en trois catégories :

a) Hacheurs non réversibles :

Ces hacheurs n'assurent pas la réversibilité, ni en courant, ni en tension. Donc le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge. Nous citons trois types de hacheurs non réversibles :

- 1) Hacheurs dévolteurs pour lesquels la tension moyenne de la sortie est inférieure à la tension de l'entrée.
- 2) Hacheurs survolteurs pour lesquels la tension moyenne de la sortie est supérieure à celle de l'entrée.
- 3) Hacheurs à accumulation utilisés comme hacheurs à stockage inductif de type buck-boost, ou hacheurs à stockage capacitif (hacheur de Cuk), ou hacheurs dérivés de hacheur de Cuk.

b) Hacheurs réversibles :

Ces hacheurs assurent la réversibilité soit en courant, soit en tension, soit en courant et en tension. Le transfert d'énergie s'effectue donc soit de la source vers la charge ou de la charge vers la source. Dans ce qui suit nous présentons le dimensionnement de chacun de ces trois types.

- 1) Hacheurs réversibles en courant : dans ces hacheurs, le changement de sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que le signe de la tension est constant.
- 2) Hacheurs réversibles en tension : la tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs positives ou négatives de la tension d'entrée du hacheur. Ce qui permet, suivant la valeur du rapport cyclique, de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative. En revanche, du fait que les interrupteurs ne sont pas réversibles, le signe du courant doit rester constant dans la charge.
- 3) Hacheurs réversibles en tension et en courant : la tension moyenne de sortie et le courant moyen de sortie peuvent être positifs ou négatifs. La source et la charge peuvent avoir leurs

rôles inversés suivant le signe de ces grandeurs. Ce type de hacheurs devient hacheurs en tension en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversibles en courant. Dans ce cas, le courant dans la charge peut changer de signe.

c) Hacheurs quasi-résonant :

Le principe de l'introduction de la résonance dans un montage consiste à remplacer, dans les cellules de commutation, l'interrupteur bicommandé par un macro-interrupteur résonant.

Dans notre étude, nous allons utiliser deux hacheurs : le premier est un hacheur non réversible en courant (survolteur), et le deuxième est un hacheur réversible en courant. Nous justifions ce choix dans ce qui suit, et nous détaillons le rôle de chacun de ces hacheurs.

2.10 Dimensionnement d'un hacheur non réversible en courant (survolteur)

Il s'agit d'une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension d'entrée V_{in} (notée également dans cette étude V_{pv} et correspondant à la tension fournie par les panneaux PVs) afin d'atteindre une tension désirée V_o (égale à la tension des batteries au plomb V_p). Dans un souci de simplification, nous supposons que le hacheur au niveau de l'utilisateur est parfait. La figure 2.12 montre la topologie d'un hacheur survolteur utilisée [16]. Le circuit est alimenté par une source de tension V_{in} . La tension à

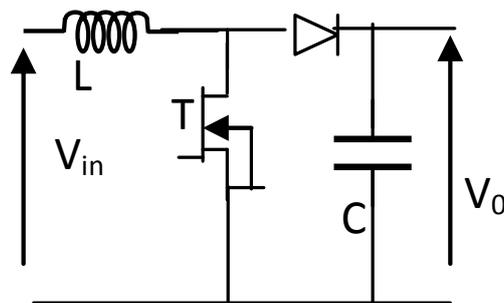


FIGURE 2.12– Topologie d'un hacheur survolteur.

la sortie de hacheur est V_o . L'interrupteur T, symbolisé ici comme un MOS FET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique d (compris entre 0 et 1). La régulation de la tension de sortie se fait par le contrôle du rapport cyclique moyen D exprimé en fonction des tensions V_{in} et V_o de la manière suivante :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.21)$$

Les expressions de l'inductance L et le condensateur C sont données par :

$$L = \frac{D * V_{in}}{F * \Delta I} \quad (2.22)$$

$$C = \frac{D * I_{max}}{F * \Delta V_o} \quad (2.23)$$

Avec :

- $F=20$ (kHz) : la fréquence de commutation du hacheur,
- $\Delta I = 6.3\% I_{max}$ (A) : l'oscillation du courant dans l'inductance autour de la valeur moyenne,
- $\Delta V = 0.1$ (V) : l'oscillation de la tension de sortie autour de la valeur moyenne.

Pour un rapport cyclique moyen $D = 27\%$, nous obtenons le tableau récapitulatif 2.16 avec des paramètres permettant de passer de la tension de PV ($V_{pv} = V_{in} = 35V$) à la tension du pack de batteries au plomb ($V_p = V_o = 48V$) :

Courant I_{in}	Tension V_{in}	Courant I_o	Tension V_o	L	C
205 A	35 V	154 A	48 V	4.725e-4H	2e-3

TABLE 2.16– Paramètres de dimensionnement du hacheur survolteur.

2.11 Choix du régulateur

Pour les régulateurs, le choix est vaste, les fonctions sont très diverses et les prix sont très variés. Il faut donc s'assurer que celui que l'on choisira offre les fonctions et les caractéristiques voulues. Les paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement d'un régulateur sont : le courant (d'entrée et de sortie) et la tension. Les régulateurs se caractérisent en effet, par l'intensité du courant fourni par le module photovoltaïque, l'intensité du courant fourni aux charges et la tension de la batterie. Par exemple, un régulateur 10 A accepte une intensité maximale de 10 A venant du module. L'ampérage du régulateur doit être supérieur à l'intensité fournie par les panneaux et à l'intensité appelée par l'équipement d'usage. Si ces valeurs sont respectées, le régulateur pourra protéger convenablement le système contre les surintensités et les courts-circuits. Pour notre étude, nous appliquons un régulateur MPPT pour obtenir la puissance maximale à la sortie des panneaux photovoltaïques.

2.12 Dimensionnement d'un hacheur réversible en courant

Dans la station de recharge, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que le signe de la tension reste invariable. Donc le hacheur utilisé pour recharger les batteries de traction est un hacheur réversible en courant. Ce hacheur a donc un double emploi : il permet soit de recharger le véhicule électrique à partir de l'énergie solaire, soit de recharger les batteries au plomb à partir de l'énergie stockée dans les batteries de traction. Le rapport cyclique D_L contrôlant ce convertisseur est compris entre 0 et 1. Ce convertisseur est présenté dans la figure 2.13.

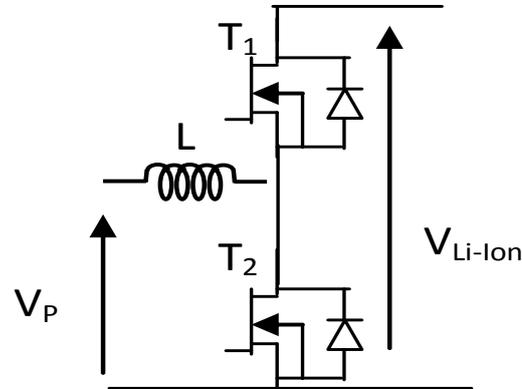


FIGURE 2.13– Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.

Le convertisseur est constitué d'une inductance L et deux interrupteurs T_1 et T_2 , symbolisés ici comme des IGBTs de puissance. Comme indiqué précédemment, nous nous intéressons dans cette étude à un système H2V. Donc l'entrée du convertisseur est du côté des batteries au plomb avec une tension de 48 V et la sortie est du côté des batteries de traction Li-Ion à 200 V. La fréquence de commutation du convertisseur F est de 20 KHz.

Les expressions de l'inductance L et du rapport cyclique moyen D_L sont données par les expressions suivantes :

$$D_L = 1 - \frac{V_p}{V_{Li-Ion}} \quad (2.24)$$

$$L = \frac{D_L * V_p}{F * \Delta I} \quad (2.25)$$

Avec :

- $\Delta I = 6.3\% I_{max}$ (A) : l'oscillation du courant dans l'inductance,
- V_p : la tension du pack de batteries au plomb,
- V_{Li-Ion} : la tension du pack de batteries Li-Ion.

Pour un rapport cyclique moyen $D_L = 76\%$, nous obtenons le tableau récapitulatif suivant avec des paramètres permettant de passer de la tension du pack de batteries au plomb ($V_p = 48V$) à la tension du pack de batteries Li-Ion ($V_{Li-Ion} = 200V$) :

Courant I_p	Tension V_p	Courant I_{Li-Ion}	Tension V_{Li-Ion}	Inductance L
150 A	48 V	20 A	200 V	0.0024 H

TABLE 2.17– Paramètres de dimensionnement du chargeur des batteries Li-Ion.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les différents composants indispensables pour un système de recharge de véhicules électriques à base de l'énergie solaire. Le rôle et les caractéristiques de chaque

composant sont exposés. Compte tenu de ces éléments et de leurs caractéristiques et dans le but de satisfaire le cahier des charges de recharge d'un VE, nous avons dimensionné ces différents éléments.

Ainsi, nous avons commencé par le calcul de la puissance de traction d'un VE d'une masse de 1000 kg ayant une vitesse maximale de 120 km/h et une autonomie de 100 km. La connaissance de cette puissance de traction permet de définir la quantité d'énergie nécessaire pour propulser le VE qui est de 17,2 kWh. De ce fait, une batterie de technologie Li-ion d'une capacité de 86 Ah et d'une tension nominale de 200 V semble être la mieux adaptée pour produire cette énergie.

Dans cette étude, les panneaux solaires servent de source d'énergie pour recharger les batteries de traction Li-Ion. Ces panneaux sont dimensionnés pour produire la quantité d'énergie nécessaire pour le système de recherche étudié. Le dimensionnement proposé permet de produire 36.692 kWh/j ce qui correspond à une puissance des panneaux de $7,3 kW_c$. Enfin, la capacité du pack de batteries au plomb dédiée au stockage de l'énergie solaire est de 588 Ah selon l'étude de dimensionnement proposée et les caractéristiques du système de recharge. En analysant les résultats de dimensionnement proposé, nous constatons que le cahier des charges du système de recharge est satisfait avec le nombre d'éléments exactes à mettre en place pour chaque composant du système. Notons également que la manière dont ces éléments sont assemblés joue un rôle primordial dans la production de la quantité d'énergie souhaitée.

Après avoir décrit et dimensionné les différents composants d'un système de recharge de VEs à base de l'énergie solaire, nous procédons, dans le chapitre 3, à la modélisation de ces composants. Cette phase permet de décrire, d'une façon formelle, le comportement de chaque composant du système et d'en prédire le fonctionnement.

Chapitre 3

Modélisation du système de recharge de VEs

3.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de représenter formellement les différents éléments du système de recharge. En effet cette modélisation mathématique a pour but de définir les équations mathématiques qui régissent le système afin d'en prédire et évaluer le comportement. Nous expliquons la démarche adoptée pour la modélisation de la batterie Li-Ion, de la batterie au plomb, du panneau photovoltaïque et des convertisseurs de puissance. Les modèles théoriques obtenus sont simulés et les résultats obtenus sont analysés et commentés.

Plus précisément, nous proposons un modèle de batterie au plomb permettant d'exprimer la tension de la batterie en fonction du temps, à partir des paramètres électriques, en utilisant les données du constructeur (en cas de décharge) et les résultats expérimentales (en cas de recharge) en utilisant la méthode des moindres carrés. Le modèle proposé est simulé et les résultats de simulation obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux et aux données théoriques.

Un modèle théorique décrivant le comportement du panneau photovoltaïque est présenté. En se basant sur les résultats expérimentaux, et en utilisant la méthode des moindres carrés, nous identifions les paramètres du modèle. La validation de ce modèle sera faite par une étude comparative des résultats de simulation avec les résultats expérimentaux. Les résultats de simulation seront comparés également avec les données théoriques du panneau.

De même, nous présenterons un modèle de la batterie Li-Ion décrivant l'évolution de la tension de la batterie en fonction de l'énergie. La validation du modèle théorique proposé fera l'objet d'une étude comparative des résultats de simulation et des données du constructeur figurant sur la fiche technique de la batterie.

Avant de commencer cette étude de modélisation, nous rappelons, les éléments principaux de notre

système de recharge qui feront l'objet d'une modélisation et d'une analyse mathématique dans le reste de ce chapitre.

- 1 – Générateurs photovoltaïques (PV) de 7.4 kWc, installés sur une superficie de 70 m^2 .
- 2 – Deux éléments de stockage d'énergie :
 - un pack de batteries au plomb de capacité 588 Ah sous une tension de 48 V.
 - un pack de batteries Li-Ion de capacité 101 Ah sous une tension de 200 V.
- 3 – Deux convertisseurs de puissance DC/DC.

3.2 Modélisation des batteries : état de l'art

Dans la littérature, le comportement de la batterie a été largement représenté par de nombreux modèles à plusieurs degrés de complexité. En effet, plusieurs travaux de recherche ont proposé des modèles de batteries décrivant leurs comportements suivant différents objectifs. Ces derniers vont de la conception de la batterie, l'évaluation et l'optimisation jusqu'à l'amélioration de ses performances.

Selon ces recherches, les modèles de batteries peuvent être classés en trois catégories :

- 1 – La première catégorie représente **des modèles électrochimiques** qui peuvent être utilisés pour optimiser les aspects de la conception physique des batteries. Ils caractérisent les mécanismes fondamentaux de la production d'énergie et relient les paramètres électriques de la batterie (tension et courant) avec les paramètres chimiques [72]. Cependant, ces modèles sont complexes et leurs comportements sont régis par des systèmes d'équations différentielles non linéaires [73]. Des algorithmes numériques complexes sont fournis pour la simulation de ces modèles, et nécessitent beaucoup de temps (allant jusqu'à plusieurs jours) pour obtenir des solutions acceptables. De plus, des informations spécifiques sur les batteries sont généralement difficiles à obtenir en raison de la nature des technologies utilisées [50].
- 2 – La deuxième catégorie est basée sur **des modèles mathématiques** [74]. Ces modèles sont en général, trop abstraits, pour incarner un modèle spécifique, mais encore forts utiles pour les concepteurs de systèmes. Ils adoptent des équations empiriques ou des méthodes mathématiques comme les approches stochastiques pour prédire l'évolution des systèmes et étudier leurs comportements et leurs propriétés telles que l'autonomie d'une batterie, son efficacité ou sa capacité [50].
- 3 – La troisième catégorie est fondée sur **des modèles électriques** [75]. Ces modèles se situent entre les modèles électrochimiques et les modèles mathématiques. Ce sont des modèles par équivalence électrique, utilisant, une combinaison de sources de tension, des résistances et des condensateurs. Cela permet la co-conception et la co-simulation avec d'autres circuits et systèmes électriques [50].

Chacune de ces catégories de modèles est caractérisée par une équation décrivant la tension de la batterie. Dans ce qui suit, nous donnons les équations caractérisant chaque modèle.

- 1 – **Modèle électrochimique (ou Modèle de Shepherd) :**

Le modèle de Shepherd est, d'un certain point de vue, le modèle de batterie le plus connu et le plus souvent utilisé dans la description des véhicules hybrides. Le modèle décrit le comportement

électrochimique de la batterie directement, en termes de tension et de courant. Il est souvent utilisé en conjonction avec l'équation de Peukert [50], [76], [77] pour obtenir la tension de la batterie et son état de charge (SOC) en tenant compte des variations de consommation de puissance. On peut écrire :

$$E = E_0 - RI - K(1 - q) \quad (3.1)$$

Avec :

- E : Tension de la batterie en [V],
- E_0 : Tension de circuit ouvert d'une cellule de batterie lorsque la batterie est complètement chargée en [V],
- R : Résistance interne de la batterie en [Ω],
- I : Courant instantané de la batterie en [A],
- K : Résistance de polarisation [Ω],
- q : Ampères-heures accumulées divisées par la capacité pleine de la batterie.

2 – Modèle électrique :

- (a) **Modèle Rint** : le modèle le plus simple et le plus utilisé est un modèle électrique composé d'une source de tension idéale, en série avec une résistance interne [50]. Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure 3.1.

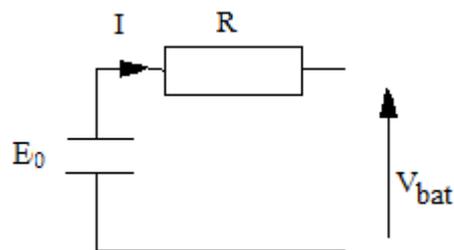


FIGURE 3.1– Modèle Rint.

A partir de ce modèle, l'équation de la tension de la batterie est exprimée par :

$$V_{bat} = E_0 \pm RI \quad (3.2)$$

Avec :

- V_{bat} : Tension de la batterie en [V],
- E_0 : Tension en circuit ouvert en [V],
- R : Résistance interne de la batterie en [Ω],
- I : Courant de la batterie en [A].

Dans l'équation (3.2), la résistance interne R de la batterie est une constante et ne prend pas en compte ni l'état de charge de la batterie SOC [78], ni la température, ni la concentration

électrolytique.

- (b) **Modèle RC** : Le modèle RC est composé de deux condensateurs (C_c, C_b) et trois résistances R_t (résistance terminale), R_e (résistance d'extrémité) et R_c (résistance de condensateur) [79]. Le condensateur C_c , avec une petite capacitance, représente les effets de surface d'une batterie. Le condensateur C_b , avec une très grande capacité, représente l'ample capacité d'une batterie pour stocker une charge chimique. Le paramètre SOC peut être exprimé par la tension sur ce condensateur C_b . Le modèle RC est illustré dans la figure 3.2.

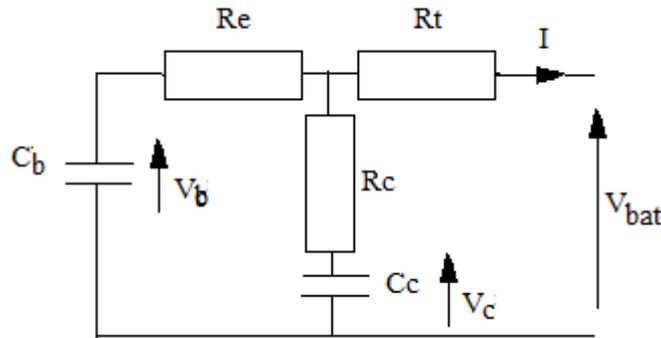


FIGURE 3.2– Modèle RC.

Ce modèle peut être exprimé par les équations [79] :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e+R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e+R_c)} & \frac{R_e}{(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t - \frac{R_e R_c}{R_e+R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3 – Modèle mathématique (Modèle de CIEMAT) :

Ce modèle est basé sur le schéma électrique présenté dans la figure 3.3. Les caractéristiques de ce modèle dépendent de la tension et la résistance interne [50], [80]. Dans ce modèle, la force électromotrice dépend de l'état de charge de la batterie SOC. L'expression de la tension de la batterie décrite par ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_i + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (3.5)$$

Avec :

- V_{bat} : Tension de la batterie en [V],
- n_b : Nombre des cellules en série,
- E_i : Force électromotrice en [V],
- R_i : Résistance interne d'une cellule de la batterie en [Ω],
- I_{bat} : Courant de la batterie en [A].

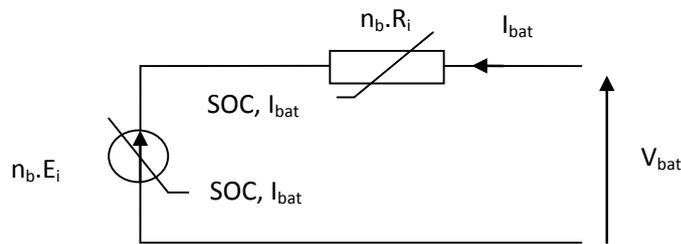


FIGURE 3.3– Modèle mathématique de CIEMAT.

3.3 Modélisation de la batterie Li-Ion

Plusieurs modèles sont donnés dans la littérature afin de fournir une représentation des batteries Li-ion. Ces modèles utilisent une combinaison de sources de tension, de résistances et de condensateurs pour décrire les processus électrochimiques et dynamiques d'une batterie.

1. Modèle de NREL : ce modèle est présenté par une source de tension (tension de circuit ouvert) et une résistance interne. Ces paramètres varient avec le SOC, la température, et le sens de la circulation de courant (cas recharge/décharge) [81], [82]. Ce modèle électrique est illustré par la figure 3.4. La tension de démarrage de la batterie est corrélée à son SOC, et la résistance effective de la batterie est déterminée selon l'équation suivante :

$$R = \frac{E_0 - V_{bat}}{I} \quad (3.6)$$

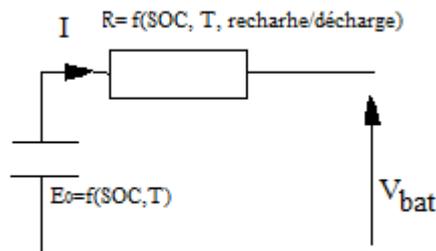


FIGURE 3.4– Modèle de NREL.

2. Modèle de Thévenin :

Le modèle de Thévenin est basé sur le schéma électrique de la figure 3.5 [70], [83].

Il utilise une résistance en série R pour présenter la résistance interne de la batterie et une combinaison (R_p, C_p) pour présenter les processus de charge de la batterie. E_0 présente la tension

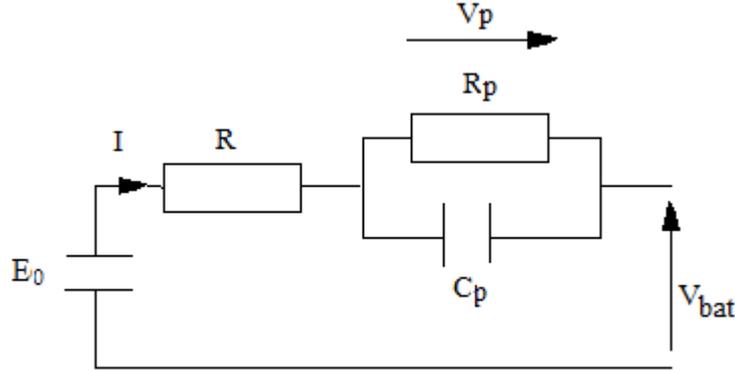


FIGURE 3.5– Modèle de Thévenin.

de circuit ouvert, V_p présente la tension à travers C_p , et V_{bat} présente la tension de la batterie. Ce modèle peut être présenté par les équations suivantes :

$$V_{bat} = E_0 - IR - V_p \quad (3.7)$$

$$\dot{V}_p = \frac{I}{C_p} - \frac{V_p}{R_p \cdot C_p} \quad (3.8)$$

3. Modèle DP (Dual Polarization model) :

Dans ce modèle, la caractéristique de polarisation peut être simulée par le modèle de Thevenin dans une certaine mesure, cependant, la différence entre la polarisation de concentration et la polarisation électrochimique conduit à une simulation inexacte à la fin de recharge ou de décharge. Le modèle de Thévenin ne peut pas prédire la précision de la performance I-V [68]. Un modèle améliorant le modèle DP a été présenté dans [70]. Ce modèle affine la description des caractéristiques de polarisation et simule la polarisation de la concentration et de la polarisation électrochimique séparément. Ce modèle est composé de trois parties : 1) une source de tension E_0 , 2) des résistances internes : une résistance ohmique R , et deux résistances de polarisation qui comprennent R_d pour représenter la résistance efficace qui caractérise la polarisation électrochimique et R_c pour représenter la résistance efficace qui caractérise la polarisation de concentration, 3) les capacités efficaces C_c et C_d . Elles sont utilisées pour caractériser la réponse transitoire pendant le transfert de puissance vers/de la batterie et pour décrire la polarisation électrochimique et la polarisation de concentration séparément.

V_c et V_d sont les tensions à travers C_c et C_d respectivement (voir la figure 3.6).

Selon [70], les équations dérivant ce modèle sont données par :

$$V_{bat} = E_0 - IR - V_c - V_d \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_c = \frac{I}{C_c} - \frac{V_c}{R_c \cdot C_c} \quad (3.10)$$

$$\dot{V}_d = \frac{I}{C_d} - \frac{V_d}{R_d \cdot C_d} \quad (3.11)$$

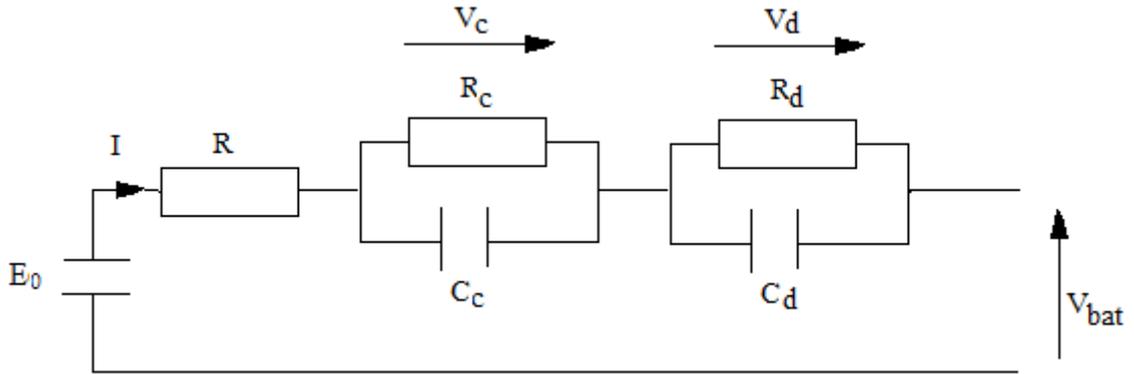


FIGURE 3.6– Modèle DP.

4. Modèle retenu :

La modélisation d'une batterie et en particulier ses composants internes est une procédure très complexe et exige une connaissance approfondie de l'électrochimie. Dans notre étude, la modélisation et la simulation d'un système de recharge de VE, et en particulier la batterie de traction, n'exige pas un tel niveau de connaissance. Nous nous limitons donc à l'étude du comportement général d'une batterie. Nous nous concentrons dans cette étude sur la modélisation de la batterie Li-Ion par une tension contrôlée en série avec une résistance interne [84], [85]. Le modèle étudié est un modèle simple et nécessite de savoir seulement trois points de la courbe de décharge de la batterie pour identifier ses paramètres. Nous présentons plus de détails sur ce modèle dans la section suivante.

3.3.1 Recharge et décharge de la batterie Li-Ion : Tension vs Énergie

L'expression de la tension de la batterie est donnée par l'équation (3.12) :

$$V_{batt} = E_{batt} - R.i \quad (3.12)$$

Avec :

- V_{batt} : Tension de la batterie en [V],
- E_{batt} : Tension de circuit ouvert en [V],
- R : Résistance de la batterie en [Ω],
- i : Courant de la batterie en [A].

L'expression de la tension E_{batt} dépend de l'opération effectuée sur la batterie : en recharge, ou en décharge.

1. Cas de décharge ($i > 0$) :

$$E_{batt} = E_0 - \frac{KQ}{Q - it} (it + i^*) + A.Exp(-B.it) \quad (3.13)$$

Avec :

- E_0 : Tension constante de la batterie en [V],
- K : Résistance de polarisation en [Ω],
- Q : Capacité de la batterie en [Ah],
- it : Charge actuelle de la batterie en [Ah],
- i^* : Courant filtré en [A],
- A : Amplitude de la zone exponentielle en [V],
- B : Charge à la fin de la zone exponentielle en [Ah] $^{-1}$.

Il est important de noter que le terme exponentiel dans l'équation (3.13) est valide pour la batterie Li-Ion. Il y a un phénomène d'hystérésis pour les autres batteries (plomb, NiCd et NiMH) entre la recharge et la décharge, peu importe le SOC de la batterie. Ce problème se produit uniquement dans la zone exponentielle. Ce phénomène peut être représenté par un système dynamique non-linéaire de type :

$$\dot{Exp}(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (3.14)$$

Avec :

- $Exp(t)$: Zone exponentielle de la tension,
- $u(t)$: Mode de recharge ou de décharge.

La tension exponentielle dépend de sa valeur initiale $Exp(t_0)$ et le mode de recharge ($u(t) = 1$) ou le mode de décharge ($u(t)=0$). La figure 3.7 montre un modèle de décharge de la batterie [84].

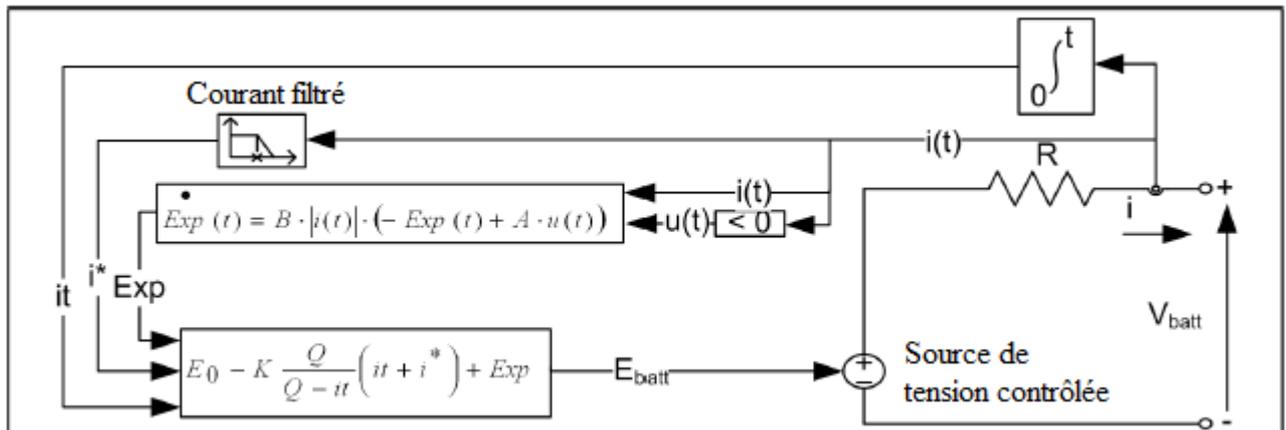


FIGURE 3.7– Modèle de décharge d'une batterie.

2. Cas de recharge ($i < 0$) :

$$E_{batt} = E_0 - \frac{KQ}{Q - it} it - \frac{KQ}{it - 0.1Q} i^* + A \cdot Exp(-B \cdot it) \quad (3.15)$$

3.3.2 Hypothèses du modèle

Pour le modèle (3.12), nous supposons que :

1. La résistance interne est constante pendant les cycles de recharge et de décharge, et ne change pas avec l'amplitude du courant,
2. Les paramètres du modèle sont déduits par les caractéristiques de décharge, et supposés être les mêmes pour la recharge,
3. La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant,
4. La température n'affecte pas le comportement du modèle,
5. L'autodécharge n'est pas présentée,
6. La batterie n'a pas d'effet mémoire.

Les limites de ce modèle se résument à :

1. La valeur minimale de la tension à vide est 0 [V], et la valeur maximale est $2 * E_0$,
2. La valeur minimale de la capacité de la batterie est 0 [Ah], et la valeur maximale est Q.

3.3.3 Identification des paramètres de la batterie Li-Ion

1 – Identification de la résistance R :

La résistance d'une batterie est généralement donnée par sa fiche techniques. Pour la batterie Li-Ion SWING Tempo7101, la résistance d'une cellule est $R_{cell} = 0.017[\Omega]$. Dans cette section, nous calculons la résistance R de la batterie en fonction du nombre de ses cellules. La batterie Li-ion *SWING Tempo7101* que nous avons utilisé dans cette étude est constituée de plusieurs cellules Li-ion *SWING* caractérisées par la tension 3.7 V et la capacité 4.4 Ah. Pour obtenir une tension de = 7.4 V, il faut associer deux cellules en série, et associer 23 cellules en parallèles pour obtenir une capacité totale de = 101 Ah. Nous exprimons donc la résistance interne de la batterie par l'équation (3.16) :

$$R = \frac{N_s \cdot R_{cell}}{N_p} \quad (3.16)$$

Avec :

- R : Résistance de la batterie Li-Ion *SWING Tempo7101*[Ω],
- N_s : Nombre de cellules en série,
- N_p : Nombre de cellules en parallèle,
- R_{cell} : Résistance d'une cellule Ω .

2 – Identification des paramètres A, B, K et E_0 :

Le principal avantage de ce modèle de batterie est que les paramètres peuvent facilement être déduits de la courbe de décharge obtenu à partir des données techniques. En effet, nous estimons seulement trois points de la courbe de décharge : V_c (la tension en pleine recharge), la fin de la zone exponentielle (V_{exp}, Q_{exp}), et la fin de la zone nominale (V_{nom}, Q_{nom}) (voir la figure 3.8). Nous estimons ces points de la courbe de décharge (généralement pour un courant de décharge de 0.2 C), puis nous identifions les paramètres A, B, K et E_0 du modèle (3.13). La figure 3.8 montre une courbe typique de décharge avec les trois points mentionnés auparavant et qui sont nécessaires pour identifier les paramètres de la batterie.

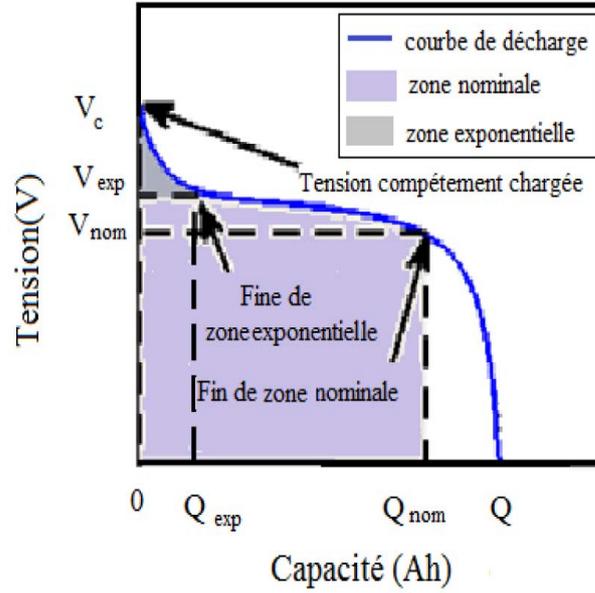


FIGURE 3.8– Courbe de décharge d'une batterie.

Comme détaillé dans [84] et [85], les deux paramètres A et B de la partie exponentielle $A.exp(-B.it)$ de l'équation (3.13) peuvent être exprimés en utilisant les deux premiers points V_c et V_{exp} de la courbe (figure 3.8) de la manière suivante :

$$A = V_c - V_{exp} \quad (3.17)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (3.18)$$

La tension constante E_0 est déduite de la tension de pleine recharge V_c . En effet, lorsque la batterie est pleine : $i.t = 0$ et le courant filtré est nul ($i^* = 0$), la tension de pleine recharge exprimée par les équations (3.12) et (3.13) est donnée par :

$$V_c = E_0 - R.i + A \quad (3.19)$$

Par conséquent E_0 peut être exprimée par :

$$E_0 = V_c + R.i - A \quad (3.20)$$

Les deux points V_{nom} et Q_{nom} de la zone nominale sont reliés par l'équation suivante :

$$V_{nom} = E_0 - \frac{KQ}{Q - Q_{nom}}(Q_{nom} + i) - R.i + A.exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}}Q_{nom}\right) \quad (3.21)$$

La résistance de polarisation K est déduite par le troisième point (V_{nom}, Q_{nom}) et par conséquent par l'équation (3.21). A partir de la courbe de décharge correspondant au courant $0.2C$, nous avons estimé les trois points puis nous avons calculé les paramètres de la batterie A, B, E_0 et K par les équations (3.17), (3.18), (3.20), (3.21).

Une batterie Li-Ion de marque *SWING Tempo7101* est choisie pour notre étude, la tension nominale de cette batterie est $7.4V$, et la capacité nominale de $101Ah$. Le tableau 3.1 représente un récapitulatif des paramètres de cette batterie.

Paramètres de la batterie	Valeurs numériques
E_0 [V]	7.61828
A [V]	0.83
B [Ah] ⁻¹	0.05556
K [Ω]	0.00007033
R [Ω]	0.0014

TABLE 3.1– Paramètres de la batterie Li-Ion *SWING Tempo7101*.

3.3.4 Validation du modèle

Après avoir obtenu les paramètres de la batterie, nous procédons à la validation par simulation du modèle proposé en le comparant avec le modèle des données de la fiche technique de la batterie. La figure 3.9 montre les courbes représentant les données de la fiche technique de la batterie (pointillée) et celles obtenues par le modèle proposé (ligne continue) pour deux valeurs du courant de décharge $0.2C$ et $0.5C$. Dans cette figure, nous observons un palier avant une chute brutale de la tension de la batterie lorsque elle arrive en fin de capacité (fin de décharge). Il est suggéré que la polarisation est grave à la fin de décharge et l'efficacité de décharge est faible [86]. Comme illustré dans cette figure, les résultats de simulation du modèle théorique correspondent aux données de la fiche technique de la batterie, ce qui valide le modèle proposé.

3.4 Modélisation de la batterie au plomb

3.4.1 Représentation de la tension de la batterie

Le but de cette modélisation est d'établir une relation entre la tension de la batterie, à partir des paramètres électriques, et son temps de recharge/décharge. Cette relation sera obtenue à partir de la fiche technique de la batterie. Pour ce faire, nous considérons un modèle de la batterie obtenu à partir d'une source de tension en série et d'une résistance interne. Ces paramètres sont reliés par l'équation suivante :

$$V = E_0 \pm R.I \quad (3.22)$$

Avec :

- E_0 : La tension de circuit ouvert en [V],
- R : La résistance interne en [Ω],

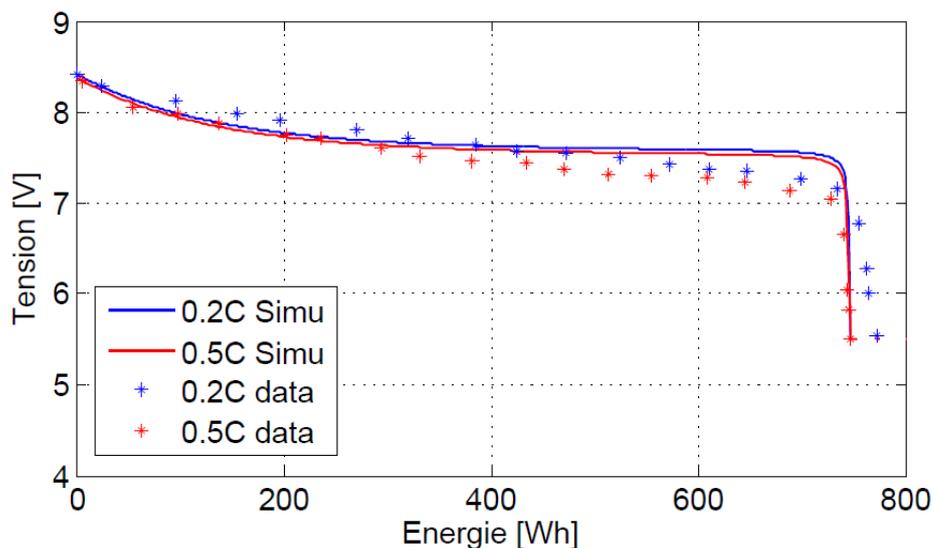


FIGURE 3.9– Comparaison des résultats de simulation et théoriques de la batterie Li-Ion pour un courant de décharge de 0.2C et 0.5C.

- I : Le courant actuel de la batterie en [A],
- V : La tension de la batterie en [V].

Dans cette relation, la résistance interne de la batterie est supposée constante et ne dépend pas de son état de charge [78].

Dans cette section, nous proposons une approche de modélisation pour la tension de décharge et de recharge de la batterie au plomb. En effet, le modèle proposé prend en compte les paramètres électriques de la batterie et le temps de recharge/décharge. Dans cette étude, seulement trois paramètres de la batterie (la tension de circuit ouvert E , le courant I , et le temps t) doivent être connus afin de prévoir l'évolution de la tension de la batterie. Le modèle proposé exprime l'évaluation de la tension de la batterie pour des valeurs du courant autres que celles données dans la fiche technique. Ce modèle est spécifique pour les batteries YUASA et utile pour notre système H2V.

Dans cette étude, nous utilisons la batterie au plomb de type *YUASA SW280*. C'est une batterie stationnaire étanche au plomb à combinaison de gaz régulée par soupapes qui a une tension de 12[V] et une capacité nominale de $C_{20} = 7.6$ [Ah]. En d'autres termes, la batterie peut fournir un courant de $7.6/20=0.38$ A pendant 20 heures de démarrage avant sa décharge.

Les données théoriques de la batterie YUASA indiquent la relation entre la tension à vide et l'état de charge initiale [87]. Pour la batterie *YUASA* et pour la plupart des batteries au plomb, cette relation est linéaire comme illustré dans la figure 3.10.

En utilisant une technique d'approximation linéaire, la relation liant la tension E et l'état de recharge SOC de la batterie est donnée par :

$$E = 1.282SOC + 11.45 \quad (3.23)$$

3.4.2 Estimation de l'état de charge d'une batterie :

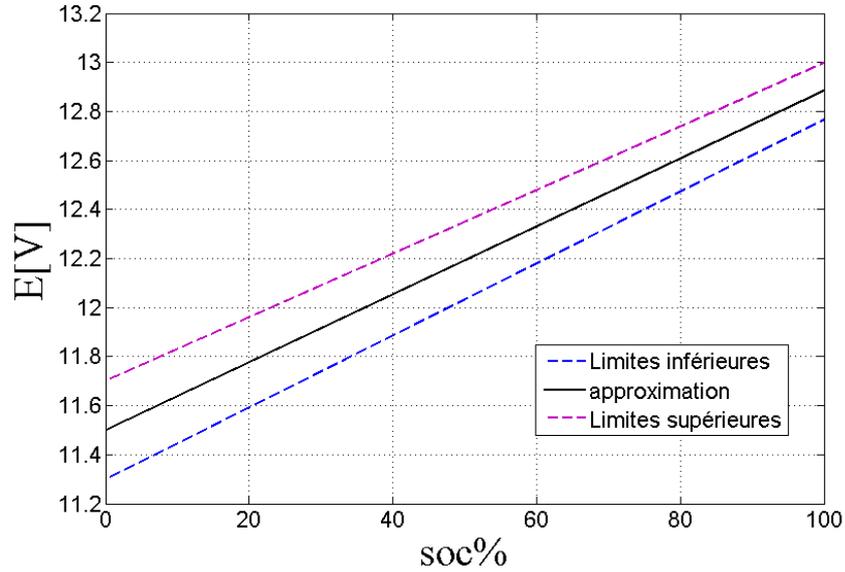


FIGURE 3.10– Variation de la tension à vide en fonction du SOC pour la batterie YUASA.

L'état de charge (ou encore State of Charge - SoC) d'une batterie est un des paramètres les plus importants d'une batterie. En général, l'état de charge d'une batterie est le ratio de la capacité actuelle Q et la capacité nominale Q_n . L'état de charge d'une batterie peut être exprimé par la formule suivante :

$$SOC = \frac{Q}{Q_n} \quad (3.24)$$

Plusieurs méthodes mathématiques sont développés dans la littérature pour l'estimation de ce paramètre. Dans ce qui suit, nous présentons quelques-unes.

1 – Méthode de tension de circuit ouvert :

Pour les batteries au plomb, il y a une relation linéaire entre le SOC de la batterie et sa tension de circuit ouvert, cette relation peut être exprimée par :

$$E = a_1 SOC + a_0 \quad (3.25)$$

Avec :

a_0 : tension terminale de la batterie quand $SOC = 0\%$,

a_1 : peut être obtenu à partir de la connaissance des valeurs de a_0 et de E pour une valeur de 100% pour le SOC.

La méthode de tension de circuit ouvert est fondée sur la tension de circuit ouvert des batteries qui est proportionnelle au SOC lorsqu'elles sont déconnectées de la charge pendant une période de plus de deux heures. Contrairement à la batterie au plomb, il n'existe pas de relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et le SOC pour la batterie Li-Ion [88], [89].

2 – Méthode de comptage par Coulomb :

Cette méthode mesure et intègre le courant de décharge de la batterie dans un intervalle de temps afin d'estimer le SOC de la batterie. Comme détaillé dans [90], l'estimation du SOC de la batterie

par la méthode de comptage par Coulomb est exprimée par l'équation suivante :

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int_0^t I dt \quad (3.26)$$

Avec :

- SOC_0 : État de charge initial,
- C_n : Capacité nominale de la batterie [Ah],
- I : Courant de la batterie [A].

La méthode de comptage par Coulomb est assez imprécise et elle ne tient pas compte des variations des températures et état des batteries.

3 – Méthode de comptage par Coulomb modifiée :

Afin d'améliorer la méthode de comptage par Coulomb, une nouvelle technique appelée méthode de comptage par Coulomb modifiée est proposée dans [88]. La méthode de comptage par Coulomb modifiée utilise le courant corrigé pour améliorer la précision de l'estimation. L'expression du courant corrigé est donnée en fonction du courant de décharge par la relation quadratique suivante :

$$I_c(t) = K_2 I(t)^2 + K_1 I(t) + K_0 \quad (3.27)$$

où K_0, K_1, K_2 sont des constantes à déterminer par des testes expérimentaux. L'estimation avec une précision supérieure du SOC de la batterie par la méthode de comptage de Coulomb modifiée, est donnée par l'équation suivante [88] :

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int_0^t I_c dt \quad (3.28)$$

3.4.3 Approche de modélisation

Le but de cette approche est de déterminer une relation de la tension de la batterie à partir des paramètres électriques et du temps de recharge/décharge en utilisant les données du constructeur (en cas de décharge) et des données expérimentales (en cas de recharge). Notre premier objectif est de trouver une relation explicite qui exprime la tension de décharge de la batterie en fonction du temps. Pour ce faire, nous procédons par étape de la façon suivante :

- 1 – À partir de la courbe obtenue des données de la fiche technique exprimant la tension de décharge en fonction du temps, nous relevons quelques points de la courbe,
- 2 – En utilisant la méthode d'interpolation, nous traçons la courbe $V = f(t)$ avec les points relevés,
- 3 – Ensuite, nous obtenons une expression analytique de la courbe (courbe de tendance),
- 4 – Nous comparons le tracé de la courbe analytique obtenu avec celui obtenu à partir des données de la fiche technique de la batterie.

L'équation analytique obtenue nous permet d'avoir une relation décrivant l'évolution de la tension de décharge de la batterie en fonction du temps. Pour obtenir l'expression de la tension de recharge de la batterie, nous procédons à la recharge de cette dernière avec un courant constant dont la valeur ne

dépasse pas le courant maximum de recharge de la batterie. En effet, nous rechargeons la batterie avec un courant constant I_1 jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne l'état de surcharge, puis nous la déchargeons à courant constant jusqu'à ce que la tension atteigne le point de décharge profond. Nous répétons ce processus avec plusieurs valeurs différentes du courant I_2, I_3, \dots, I_n .

Enfin, les courbes obtenues, à partir des opérations de recharge, décrivent la variation de la tension de recharge aux bornes de la batterie. Sur la base des données et des courbes obtenues, nous déduisons l'expression de la tension de recharge de la batterie par la méthode d'extrapolation. Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit bien d'une équation polynomiale de troisième degré en temps. Donc, l'expression de la tension de recharge/décharge de la batterie peut être exprimée par (3.29) :

$$V = At^3 + Bt^2 + Ct + D \quad (3.29)$$

Avec :

A, B, C, et D sont les paramètres de la batterie et dont les expressions sont détaillées dans les deux sections suivantes. Il est important de noter que les paramètres A, B et C dépendent du courant de la batterie. Le paramètre D dépend du courant de la batterie et de la tension du circuit ouvert comme nous allons constater.

1 – Identification des paramètres A, B, C

Les paramètres A, B et C sont donnés par des polynômes de degré sept en fonction du courant de la batterie I en utilisant la méthode des moindres carrés. Ces paramètres sont déterminés selon la recharge ou la décharge de la batterie comme suit :

1 – Cas de recharge $I < 0$:

$$A = a * e - 07,$$

$$B = b,$$

$$C = c,$$

2 – Cas de décharge $I > 0$:

$$A = (4.63e - 13) * a,$$

$$B = (2.7778e - 009) * b,$$

$$C = 0.016667 * c.$$

où a, b et c sont donnés par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = M.N^t \quad (3.30)$$

Le vecteur N et la matrice M sont donnés par les équations suivantes :

$$N = [I^7, I^6, I^5, I^4, I^3, I^2, I, 1] \quad (3.31)$$

$$M = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 & c_8 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

La matrice M est calculée par la méthode des moindres carrés (*Least Square Fitting*) dans les cas de recharge et de décharge.

1 – Cas de recharge $I < 0$:

$$M = \begin{pmatrix} -0.304 & -2.279 & -6.997 & -11.37 & -10.51 & -5.478 & -1.472 & -0.154 \\ 1.926e04 & 0.001 & 0.004 & 0.007 & 0.007 & 0.003 & 9.314e-04 & 9.73e-05 \\ -0.311 & -2.329 & -7.155 & -11.638 & -10.763 & -5.613 & -1.508 & -0.157 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

2 – Cas de décharge $I > 0$:

$$M = \begin{pmatrix} -0.0031 & 0.122 & -1.618 & 8.158 & -19.49 & 20.97 & -10.61 & 1.891 \\ -3e004 & 0.022 & -0.515 & 5.071 & -20.24 & 33.39 & -17.86 & 3.265 \\ 3e-07 & -1.6e-05 & 0.0003 & -0.0023 & 0.008 & -0.01 & -0.002 & 5.284e-06 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

2 – Identification du paramètre D :

Le paramètre D représente la tension de démarrage de recharge/décharge de la batterie. Expérimentalement, le paramètre D peut être exprimé comme suit :

$$D = E \pm dv \quad (3.35)$$

Avec :

- E : Tension en circuit ouvert,
- dv : Variation de la tension de la batterie au début de recharge/décharge.

Nous utilisons le signe "+" (respectivement "-") dans le cas de recharge de la batterie (resp. de décharge).

La chute de tension sur la batterie au début de recharge/décharge dv est donnée par l'équation :

$$dv = R.I \quad (3.36)$$

Le paramètre R, correspondant à la résistance de la batterie, est une fonction du courant de la batterie I. Cette relation est déterminée en utilisant la méthode des moindres carrés. Pour ce faire, nous mesurons plusieurs valeurs de la tension en circuit ouvert E et plusieurs valeurs de la tension de démarrage V_0 de la batterie, puis nous déterminons les valeurs $dv = E - V_0$. A partir de ces différentes valeurs de dv et en utilisant l'équation (3.36), nous obtenons une valeur de la résistance R pour chacune des valeurs correspondant à dv , puis nous calculons la relation entre R et I en utilisant la méthode d'interpolation. D'après ces calculs, la résistance R est exprimée par une équation polynomiale du cinquième degré.

$$R = P_1.I^5 + P_2.I^4 + P_3.I^3 + P_4.I^2 + P_5.I + P_6 \quad (3.37)$$

Les paramètres P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 et P_6 sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Les valeurs de ces paramètres sont déterminées selon la recharge ou la décharge de la batterie par :

1 – Cas de recharge $I < 0$:

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40.968 & 193.12 & 339.77 & 275.94 & 101.68 & 13.759 \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

2 – Cas de décharge $I > 0$:

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.071 & 0.7288 & -2.795 & 4.913 & -3.905 & 1.331 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

3.4.4 Le banc d'essai de la batterie au plomb

Dans cette section, nous présentons le banc d'essai de la batterie au plomb. Nous avons signalé que les tests et les expérimentations relatifs à cette étude ont été effectués au laboratoire FEMTO-ST/FCLAB (Belfort). La plate-forme expérimentale utilisée pour tester le modèle de la batterie est présentée par les figures 3.11 et 3.12.

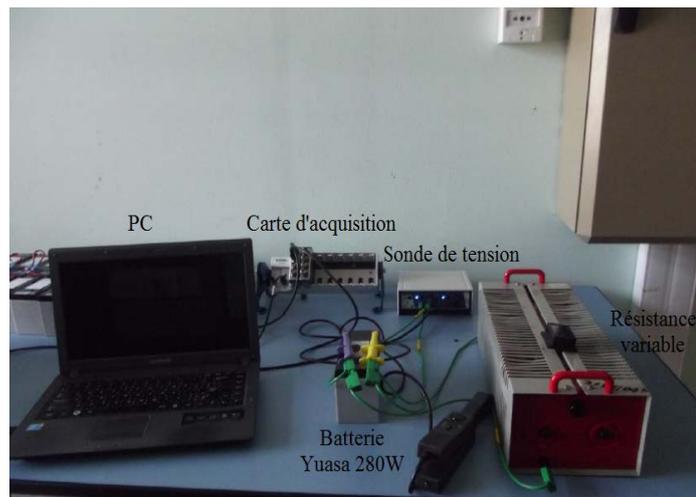


FIGURE 3.11– Dispositif expérimental de test de décharge de la batterie.

a- Dispositif expérimental de test des batteries

Le matériel nécessaire pour effectuer les essais comme illustré dans les figures 3.11, 3.12 est constitué de :

- 1- Une alimentation régulée en courant pour pouvoir recharger à courant constant,
- 2- Une charge électronique pour décharger à courant constant (résistance variable),
- 3- Une batterie *YUASA* 280W,
- 4- Une carte d'acquisition (châssis NI (National Instrument)) avec une sonde de tension,
- 5- Un PC avec Labview.

D'un point de vue électrique, la batterie est sollicitée en courant au travers une source et une charge commandable.

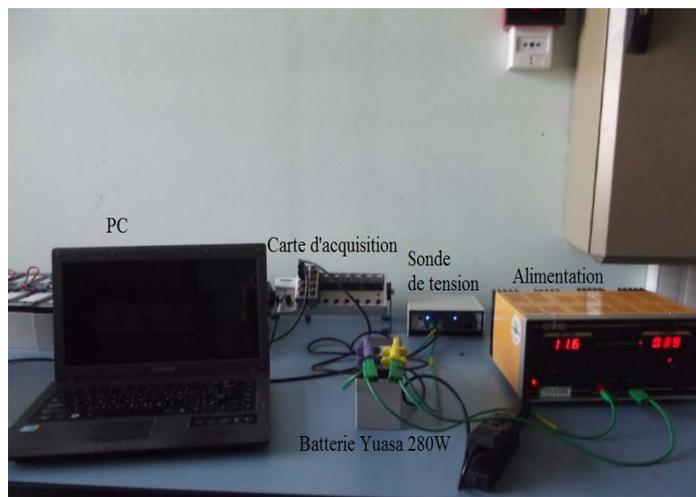


FIGURE 3.12– Dispositif expérimental de test de recharge de la batterie.

b- Mesures et acquisition de données

Lors des essais, nous avons fait l'acquisition des valeurs de tension et de courant afin d'exprimer l'évolution de la tension de la batterie en fonction de temps. Comme on peut le remarquer sur les figures 3.11 et 3.12.

- 1- Une pince ampérométrique servant à mesurer et contrôler le courant de la batterie.
- 2- Un système d'acquisition de données connecté à un ordinateur équipé du logiciel Labview. Ce programme permet d'enregistrer , toutes les 0.1 secondes, les valeurs dans un fichier Excel et d'afficher une mesure issue du système d'acquisition.
- 3- Une sonde différentielle pour observer l'évolution temporelle de la tension aux bornes de la batterie.

Pour permettre la connexion au châssis NI, les tensions et les courants sont reconditionnés par une sonde de tension et par un capteur de courant.

c- Essais de la batterie

a- Objectifs des essais

- 1 – Déterminer l'expression de la tension de recharge de la batterie,
- 2 – Déterminer l'évolution de la tension de la batterie en cas de recharge/décharge en fonction de temps et les comparer avec les résultats de simulation,
- 3 – Déterminer la chute de la tension au début de la recharge/décharge de la batterie, puis déterminer la valeur de la résistance de la batterie. Cette résistance représente la chute de la tension en début de recharge/décharge de la batterie.

b- Procédure des essais

Tout d'abord, nous procédons à la recharge de la batterie. Pour cela, nous réglons la valeur de la tension de l'appareil de recharge (alimentation de courant et tension programmable) au seuil de la tension maximale de la batterie pour la charger complètement. En suite, sur le même appareil, nous fixons le courant de recharge désiré. Nous commençons la recharge

en branchant la batterie avec l'appareil de recharge. La tension à la borne de la batterie augmente jusqu'à atteindre la valeur réglée sur l'alimentation. Ensuite, nous procédons à la décharge de la batterie. Après avoir rechargé complètement la batterie, nous la déchargeons à partir d'une résistance électrique dont on peut fixer le courant de décharge. Pour ce faire, nous réglons le courant de décharge, puis nous déclenchons la décharge en branchant la batterie avec la charge. La tension à la borne de la batterie va donc diminuer.

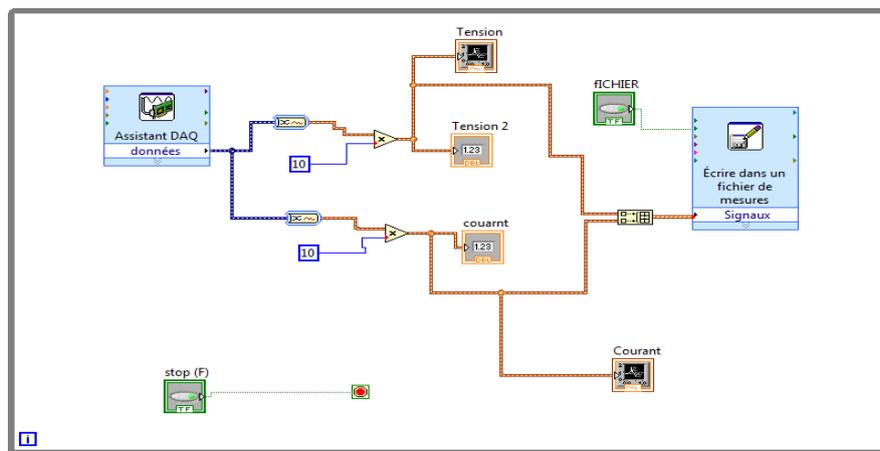


FIGURE 3.13– Le programme Labview utilisé pour l'acquisition des données.

3.4.5 Résultats expérimentaux du modèle de la batterie au plomb

Dans le but d'approfondir la validation du modèle analytique de la batterie, nous procédons à une étude comparative des résultats de la simulation obtenus avec des mesures expérimentales. Les expérimentations sont effectuées à température ambiante. La figure 3.14 montre les résultats de la décharge de la batterie pour deux valeurs différentes du courant $I = 3.22A$ et $I = 2.9A$. La figure 3.14 montre que les courbes expérimentales correspondent à celles obtenues par simulation. Ceci confirme la validation du modèle analytique proposé décrivant la tension de décharge de la batterie YUASA SW280.

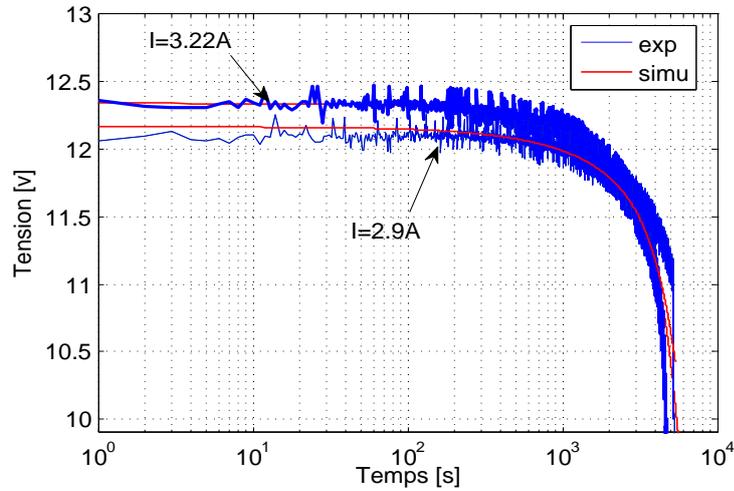


FIGURE 3.14– Comparaison des résultats de simulation de la tension de décharge de la batterie, et des résultats expérimentaux.

Afin de valider le modèle polynomial de tension de recharge de la batterie donné par l'équation (3.29) et déterminer sa précision, nous comparons les résultats de simulation et ceux des expérimentations. Ainsi, les figures 3.15 et 3.16 représentent respectivement les courbes de ces résultats pour deux valeurs différentes du courant de recharge $I = 1.7A$ et $I = 0.6A$.

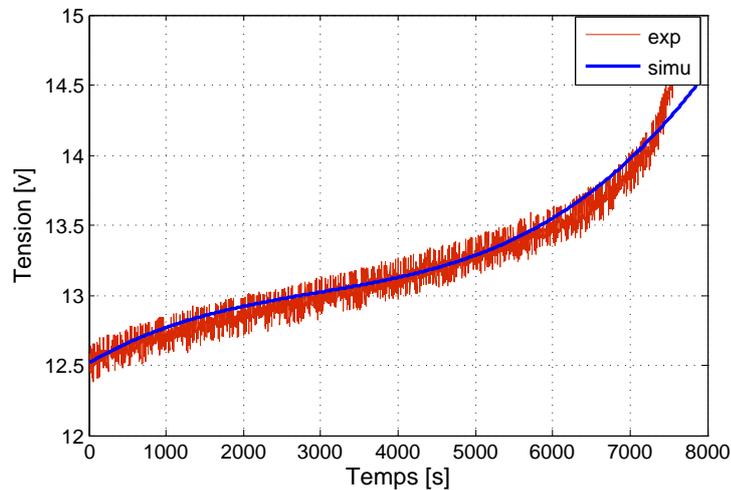


FIGURE 3.15– Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour un courant de recharge de $I=1.7A$.

A partir de cette étude de comparaison, nous démontrons la précision du modèle analytique de recharge de la batterie. Les résultats de simulation sont proches des résultats expérimentaux avec une erreur relative de l'ordre de 0,32% pour un courant de recharge de 0.6A, et une erreur de 0,44% pour un courant de recharge de 1.7A comme illustré dans le tableau 3.2.

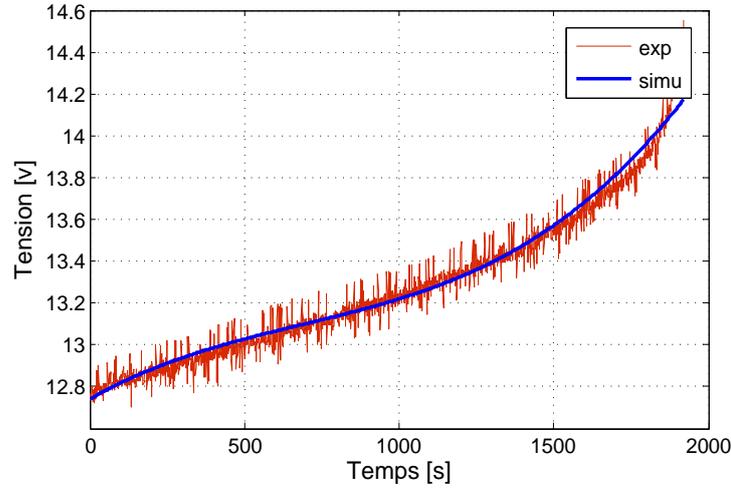


FIGURE 3.16– Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour un courant de recharge $I = 0.6A$.

Courant de recharge	Erreur absolue	Erreur relative
$I=1.7$ [A]	0.0581	0.44%
$I=0.6$ [A]	0.0421	0.32%

TABLE 3.2– Erreurs absolues et relatives entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux pour la recharge de la batterie.

3.4.6 Résultats de simulation du modèle de la batterie au plomb

La tension de décharge de la batterie obtenue par le modèle théorique ainsi que celle obtenue à partir des données théoriques sont tracées pour plusieurs valeurs de courant de décharge sur un même graphique comme illustré dans la figure 3.17.

Afin de prouver la pertinence du modèle proposé, nous étudions les écarts entre les résultats de simulation obtenus et les résultats théoriques de la batterie. Les erreurs absolues Err_{abs} et les erreurs relatives Err_{rel} entre ces résultats sont calculées par les équations suivantes :

$$Err_{abs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{sim}(i) - V_{datasheet}(i)| \quad (3.40)$$

$$Err_{rel} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{sim}(i) - V_{datasheet}(i)}{V_{datasheet}(i)} \right| \quad (3.41)$$

Ces erreurs sont rapportées dans le tableau 3.3, où $C_n = 7.6Ah$ est la capacité nominale de la batterie.

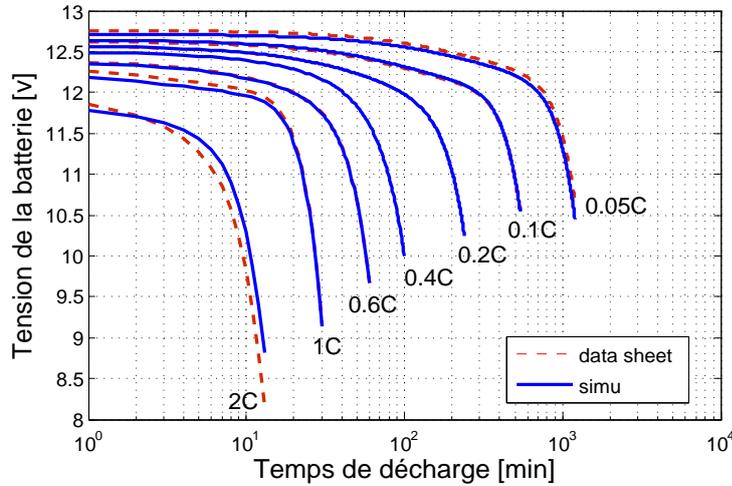


FIGURE 3.17– Comparaison des résultats de simulation et théoriques de la tension de décharge de la batterie.

Le courant nominal de décharge	Erreur absolue	Erreur relative
$0.05C_n$	0.05	0.44%
$0.1C_n$	0.01	0.1%
$0.2C_n$	0.003	0.03%
$0.4C_n$	8.95.e-4	0.008%
$0.6C_n$	0.006	0.05%
$1C_n$	0.05	0.43%
$2C_n$	0.276	2.83%

TABLE 3.3– Erreurs absolues et relatives entre les résultats de simulation et théoriques de la tension de décharge de la batterie.

A partir des résultats du tableau 3.3, nous constatons une bonne précision du modèle pour chaque valeur de courant de décharge. Les courbes de simulation coïncident avec celles des données de la fiche technique. Ceci permet de conclure que l'expression analytique représente bien l'évolution de la tension aux bornes de la batterie YUASA SW280.

3.5 Modélisation des panneaux photovoltaïques

Plusieurs recherches sont développées pour la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque. Le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque décrit la courbe de courant-tension de la jonction PN. Un modèle de la cellule photovoltaïque à double diode est proposé dans [91] et [92]. Ce modèle est constitué d'une source de courant pour modéliser le flux lumineux, de deux diodes reprenant les phénomènes de polarisation de la jonction PN, et de deux résistances (une résistance shunt et une résistance en série) pour présenter les pertes. Le circuit équivalent de ce modèle est représenté par la figure 3.18.

La courbe courant-tension peut être simplifiée en considérant que la résistance shunt est infini comme

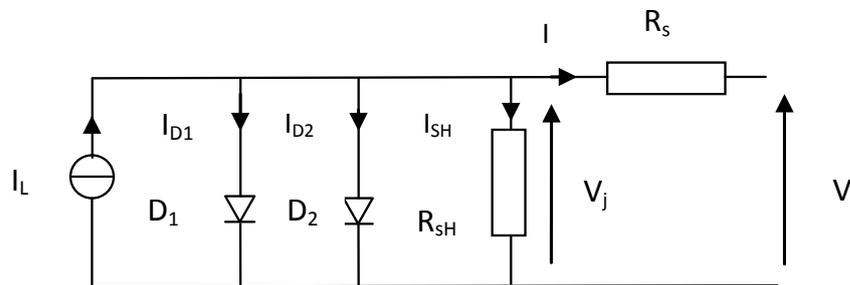


FIGURE 3.18– Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque (modèle à 2 diodes).

démontré dans [93], [94] et [95].

Un autre modèle a été proposé pour la représentation de la cellule photovoltaïque dans [92]. Ce modèle exprimé par une équation polynomiale donne la puissance maximale fournie par un groupe de panneaux photovoltaïques pour un éclairage. Le modèle de la cellule photovoltaïque le plus classique et le plus employé dans la littérature est un modèle qui utilise une diode comme détaillé dans [96] et [97], [98].

3.5.1 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

Afin d'analyser le comportement électrique d'une cellule solaire, un modèle électrique équivalent est considéré. Une cellule photovoltaïque idéale peut être considérée comme une source de courant I_L en parallèle avec une diode. Dans la pratique, une cellule photovoltaïque n'est pas idéale, donc une résistance shunt (R_{sh}) et une résistance en série (R_s) sont ajoutées au modèle pour représenter les pertes électriques [16] et [98]. Comme illustré dans la figure 3.19, la cellule du panneau photovoltaïque est modélisée par un circuit équivalent [35].

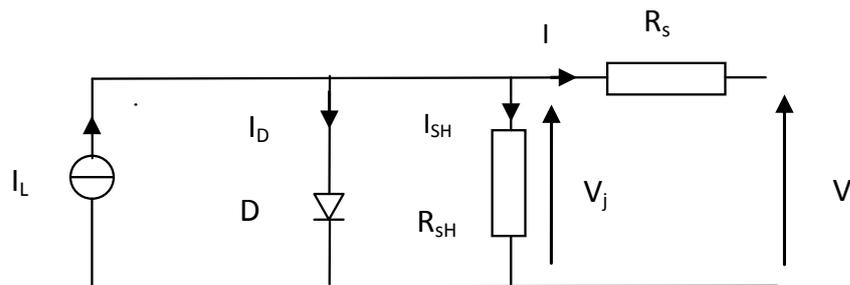


FIGURE 3.19– Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le courant de sortie de la cellule est exprimé comme suit :

$$I(t) = I_L(t) - I_D(t) - I_{SH}(t) \quad (3.42)$$

Avec :

- I : Courant de sortie,
- I_L : Courant généré,
- I_D : Courant de diode,

- I_{SH} : Courant traversant la résistance shunt.

Selon la loi d'Ohm, le courant traversant la résistance shunt est exprimé comme suit :

$$I_{SH}(t) = \frac{V_j(t)}{R_{SH}} \quad (3.43)$$

Avec :

- V_j : Tension aux bornes de la diode et la résistance R_{SH} ,
- R_{SH} : Résistance shunt.

La tension $V_j(t)$ peut être exprimée par l'expression suivante :

$$V_j(t) = V(t) - R_S \cdot I(t) \quad (3.44)$$

Avec :

- R_S : Résistance en série,
- V : Tension de sortie de cellule,
- I : Courant de sortie de cellule,

Le courant traversant la diode est exprimé, selon l'équation de diode Shockley, comme suit :

$$I_D(t) = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{qV(t)}{nKT}\right] - 1 \right\} \quad (3.45)$$

Avec :

- I_0 : Courant de saturation inverse,
- n : Facteur d'idéalité de la diode (1 pour une diode idéale),
- q : Charge élémentaire ($1.6022 \times 10^{-19}C$),
- K : Constante de Boltzmann ($1.3806 \times 10^{-23}J/K$),
- T : Température absolue.

En remplaçant les expressions (3.43), (3.44) et (3.45) dans l'équation (3.42) on obtient l'équation caractéristique d'une cellule PV reliant le courant et la tension.

$$I(t) = I_L(t) - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V(t) + I(t)R_s)}{nKT}\right] - 1 \right\} - \frac{V(t) + I(t)R_s}{R_{SH}} \quad (3.46)$$

Le courant I_L est presque égale au courant de court-circuit I_{sc} pour une cellule photovoltaïque de haute qualité (dans ce cas R_s a une petite valeur et R_{SH} a une grande valeur). Notons $I_L \approx I_{sc}$ [36], [99]. Le courant de court-circuit I_{sc} peut être exprimé par l'expression suivante [35] :

$$I_{sc}(t) = I_{scs}(t) \times \frac{E}{E_{ref}} [1 + \alpha(T - T_{ref})] \approx I_L. \quad (3.47)$$

Avec :

- E : Éclairement [W/m^2],
- E_{ref} : Éclairement mesuré dans des conditions de tests standards 1000 [W/m^2],
- I_{scs} : Courant de court-circuit mesuré en test standard [A],
- T : Température d'une cellule [K],

- T_{ref} : Température dans des conditions de tests standards 298.15 [K],
- α : Coefficient de la température du courant de court-circuit.

L'équation (3.46) décrit les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Le module photovoltaïque est une combinaison de plusieurs cellules en série n_s et plusieurs cellules en parallèles n_p . Compte tenu de ces cellules en série et en parallèle, le comportement d'un module photovoltaïque composé de plusieurs cellules devient [36] :

$$I_m(t) = n_p \times [I_L(t) - I_0 \exp\left(\frac{q(V(t) + I_m(t) \frac{R_{sm}}{n_p}}{n_s \times nKT}\right) - 1] - \frac{V(t) + I_m(t) \cdot R_{sm}}{n_p \times R_{SHm}} \quad (3.48)$$

Avec :

- I_m : Courant du module,
- R_{sm} : Résistance du module en série,
- R_{SHm} : Résistance du module en parallèle,
- n_s : Nombre des cellules en série,
- n_p : Nombre des cellules en parallèle.

Généralement, sauf indication contraire de la part du constructeur, un module est composé de trente six cellules en série et une seule branche en parallèle : $n_s = 36$ cellules et $n_p = 1$ cellule.

Le module PWX500-12V est utilisé dans cette étude. Ses caractéristiques dans les conditions standards ($E_{ref} = 1000W/m^2$, $T_{ref} = 25^\circ C$) sont rapportés dans le tableau 3.4.

Puissance max (W)	50
Courant à la puissance max (A)	2.9
Tension à la puissance max (V)	17.2
Courant de court circuit (A)	3.2
Tension de circuit ouvert (V)	21.6

TABLE 3.4– Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque PWX500-12V

3.5.2 Identification des paramètres du module photovoltaïque

Les paramètres R_{sm} , R_{SHm} et I_0 du module photovoltaïque sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Elle réalise des ajustements des données expérimentaux et résoudre des équations non linéaires en identifiant les paramètres de ces équations. L'identification paramétrique est faite en considérant deux courbes de polarisation du module (deux courbes courant-tension) obtenues par des expérimentations effectuées sous le ciel de Belfort (France). Les testes sont effectués pendant différents jours du mois de Novembre. Les courbes obtenues représentent les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (la première courbe correspond à un éclairnement de $342.187W/m^2$ et une température de cellule de $26.67^\circ C$, la deuxième courbe correspond à un éclairnement de $280W/m^2$ et une température de cellule de $22^\circ C$). Le tableau 3.5 montre les valeurs des paramètres du module PWX500-12V utilisés pour la simulation.

$R_{sm}(\Omega)$	$R_{SHm}(\Omega)$	$I_0(A)$
0.2297	60.78	3.886e-009

TABLE 3.5– Paramètres électriques du panneau photovoltaïque PWX500-12V.

3.5.3 Le banc d'essai du panneau photovoltaïque

a)- Le schéma de câblage

Nous donnons ci-après le schéma de câblage qui nous avons utilisé pour les tests effectués sur le panneau photovoltaïque. La figure 3.20 illustre le couplage du module photovoltaïque avec la charge variable et les appareils de mesures.

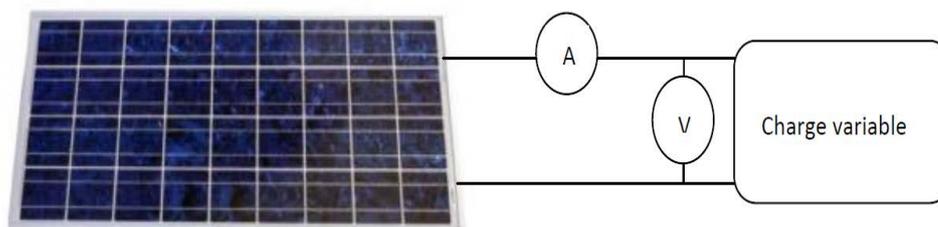


FIGURE 3.20– Schéma de câblage du panneau photovoltaïque.

Le matériel nécessaire pour effectuer les essais est constitué de :

- Une charge électronique (résistance variable),
- Un module photovoltaïque PWX500-12V.

La plate-forme expérimentale utilisée pour tester le module photovoltaïque est représentée par la figure 3.21. Pour tracer la courbe de polarisation du panneau photovoltaïque, nous imposons une résistance variable à la charge du système permettant de faire varier la tension en fonction de la résistance de la charge. Un balayage de la tension des panneaux de 0 à V_{oc} (tension de circuit ouverte) a été effectué pour tracer cette courbe.

b)- Mesures et acquisition de données

Lors des essais, nous faisons une acquisition des valeurs de tension, du courant, de la température de la cellule et de l'éclairement afin de trouver la courbe de polarisation et la courbe de puissance. Comme illustrée par la figure, nous avons utilisé les appareils de mesure suivants pour ce test :

- 1- Ampèremètre pour mesurer et contrôler le courant,
- 2- Voltmètre pour mesurer la tension,
- 3- Thermomètre de contacte pour mesurer la température de la cellule photovoltaïque,
- 4- Luxmètre pour mesurer l'éclairement.

c)- Essais du panneau photovoltaïque

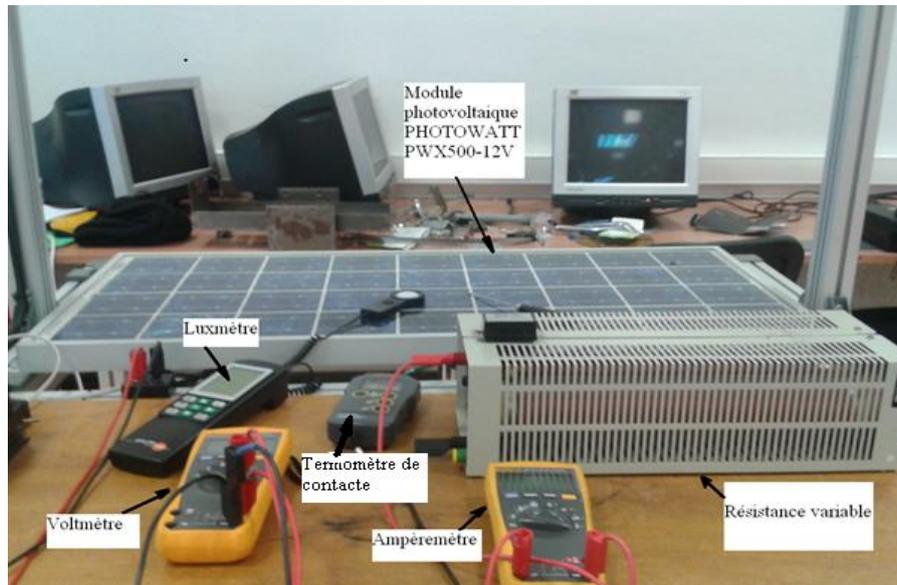


FIGURE 3.21– Dispositif expérimental de tests des panneaux.

1 – Objectifs des essais

- Déterminer la courbe de polarisation et la courbe de puissance du panneau photovoltaïque,
- Déterminer les paramètres électriques du panneau photovoltaïque à partir de la courbe de polarisation.

2 – Procédure des essais

Pour mener les tests, nous avons procédé de la façon suivante :

- a) Régler la résistance à une petite valeur, puis mesurer le courant,
- b) Changer la valeur de la résistance, puis mesurer la tension et le courant,
- c) Répéter la démarche pour plusieurs valeurs de la résistance,
- d) Mesurer l'éclairement pour plusieurs points du panneau, puis prendre la valeur moyenne,
- e) Mesurer la température de la cellule de plusieurs points du module, puis prendre la valeur moyenne.

3.5.4 Implantation sur Matlab

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque se résument en quatre paramètres électriques principaux :

- a) I_{max} : Courant correspondant à la puissance maximale,
- b) V_{max} : Tension correspondant à la puissance maximale,
- c) V_{oc} : Tension de circuit ouvert,
- d) I_{cc} : Courant de court-circuit.

Pour tracer ces caractéristiques, nous imposons une résistance variable à la charge du système. Ceci permet de faire varier la tension en fonction de la résistance de la charge. Le schéma Simulink du module PV avec une charge variable RL est présenté dans la figure 3.22.

Après l'élaboration du schéma Simulink du panneau photovoltaïque PWX500-12V qui alimente une charge variable, les courbes caractéristiques de ce panneau : $I = f(V)$ et $P = f(V)$ sous les conditions de tests standards : $E_{ref} = 1000W/m^2$ et $T_{ref} = 25^\circ C$ sont représentées par la figure 3.23. Cette figure fait apparaître les valeurs numériques des paramètres du module I_{max} , V_{max} , V_{oc} , I_{cc} .

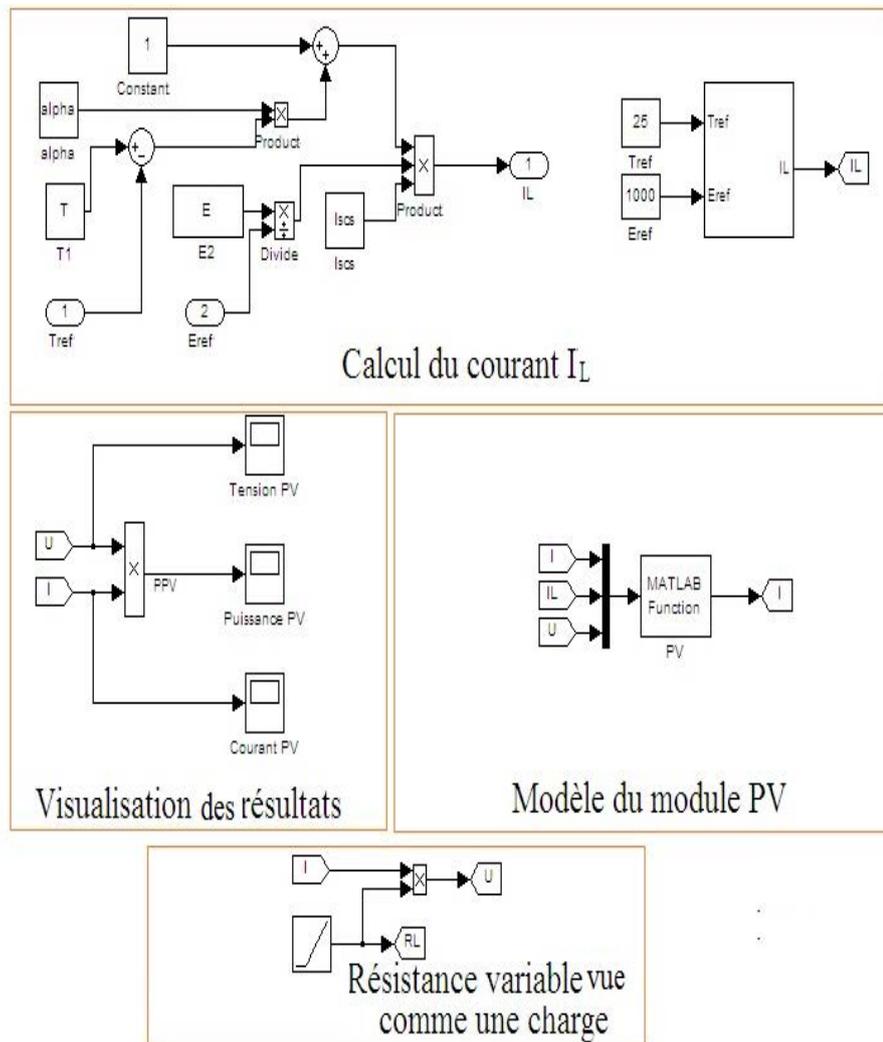


FIGURE 3.22– Schéma Simulink d'un module PV avec une charge variable RL.

3.5.5 Validation du modèle

Après l'obtention des paramètres du module photovoltaïque PWX500-12V, les caractéristiques courant-tension de ce module sont simulées en utilisant l'équation (3.48). Afin de valider le modèle proposé, nous avons comparé les résultats de simulation aux résultats expérimentaux. Pour ce faire, nous avons simulé le

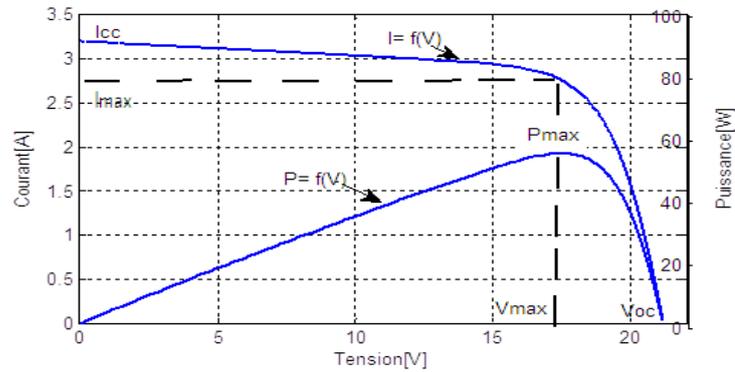


FIGURE 3.23– L'évolution du courant (resp. de la puissance) en fonction de la tension d'un panneau PWX500-12V.

modèle pour plusieurs valeurs de l'éclairement et de la températures des cellules, puis nous avons comparé les résultats expérimentaux avec les résultats de la simulation pour les mêmes valeurs d'éclairement et de température. La figure 3.24 représente l'évolution du courant du panneau en fonction de sa tension à partir des résultats de simulation et les données expérimentales I-V.

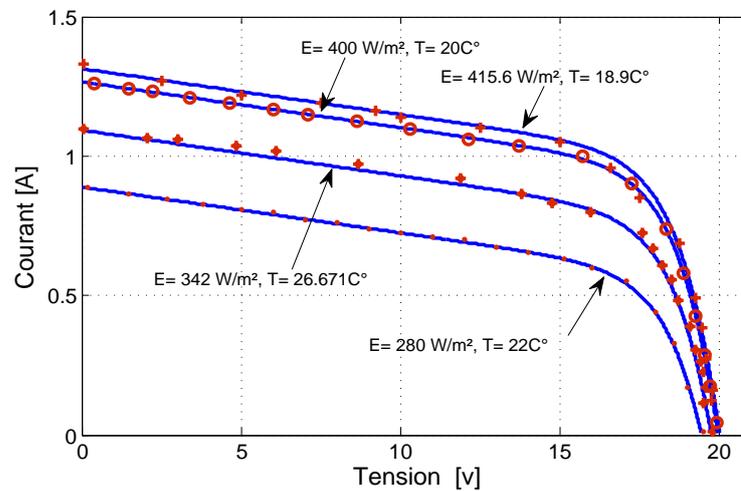


FIGURE 3.24– Courant vs Tension : comparaison des résultats de simulation et des résultats expérimentaux.

La figure 3.25 représente l'évolution de la puissance du panneau en fonction de sa tension à partir des résultats de simulation et des données expérimentales P-V. Les deux figures 3.24 et 3.25 montrent que les résultats de simulation (courbes continues en bleu) et les résultats expérimentaux (pointillés en rouge) sont en parfaite concordance.

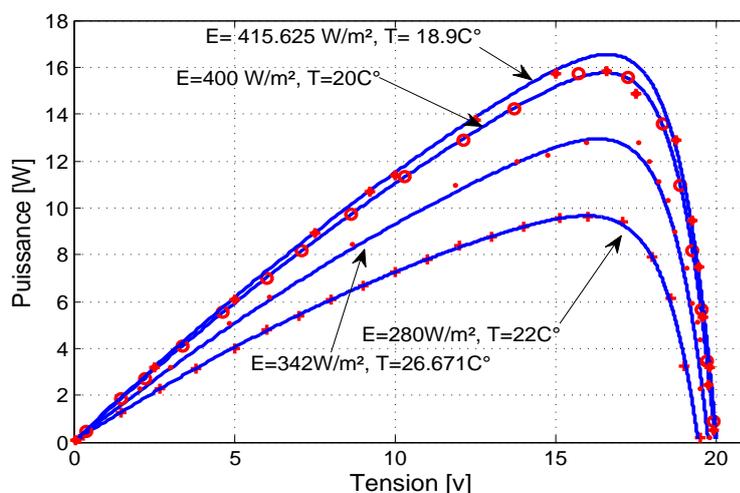


FIGURE 3.25– Puissance vs Tension : comparaison des résultats de simulation et des résultats expérimentaux.

Les résultats de simulation de ce modèle sont comparés aussi aux données théoriques (data sheet du module PV) pour plusieurs valeurs de l'éclairement : $1000W/m^2$, $800W/m^2$, $600W/m^2$, $500W/m^2$ et $400W/m^2$.

La figure 3.26 représente l'évolution du courant en fonction de la tension pour les différentes valeurs de

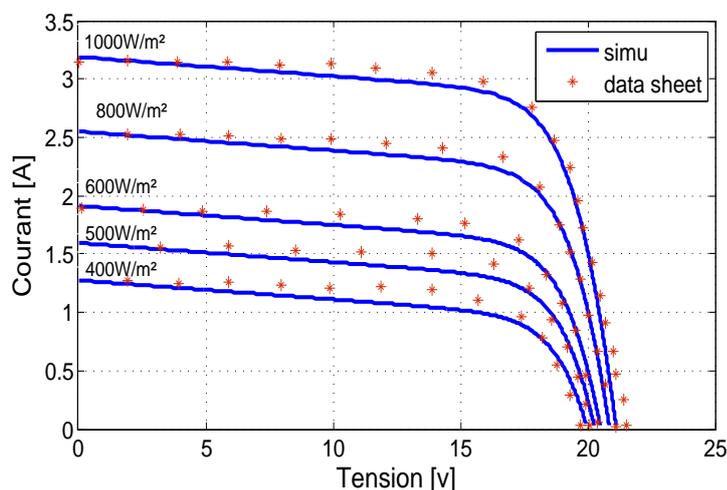


FIGURE 3.26– Courant vs Tension pour plusieurs valeurs de l'éclairement et à $T=25^{\circ}C$.

l'éclairement considérées et pour une température de $T = 25^{\circ}C$. Cette figure montre la superposition des résultats de simulation et les données théoriques du panneau. Nous constatons à travers cette comparaison que les résultats de simulation (courbes continues en bleu) sont identiques aux résultats théoriques (pointillés en rouge), ce qui permet de valider le modèle avec les paramètres proposés.

3.6 Algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking)

L'algorithme MPPT est une technique de commande permettant de suivre le point de puissance maximale d'une source non linéaire. Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes ont été développées et publiées au sujet et de l'algorithme MPPT. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la gamme de l'efficacité, la vitesse de convergence, suivi correct lors de la variation de l'éclairement et/ou de température, et le matériel nécessaire pour la mise en œuvre ou la popularité, etc. Parmi ces techniques, l'algorithme *P&O* (Perturbe and Observe) et l'algorithme de l'incrémentement de la conductance sont les plus utilisés. Ces techniques présentent l'avantage d'une mise en œuvre facile et simple, mais elles ont également des inconvénients comme on le verra plus tard dans ce chapitre. Autres algorithmes sont développés dans la littérature comme un algorithme basé sur la logique floue, l'algorithme de la tension constante, l'algorithme du courant constant, les algorithmes à base des réseaux de neurones, les algorithmes d'identification en temps réel du point de puissance maximale, etc.. Nous présentons par la suite le principe de ces algorithmes :

1 – Algorithme *P&O* :

L'algorithme *P&O* est simple et facile à utiliser et à implanter dans un système de contrôle de panneaux photovoltaïques. Comme son nom l'indique, cet algorithme fonctionne en perturbant la tension du panneau photovoltaïque PV tout en agissant sur le rapport cyclique moyen D et observant l'impact sur la puissance fournie par le PV. La figure 3.27 montre le principe de fonctionnement de l'algorithme MPPT de type *P&O*.

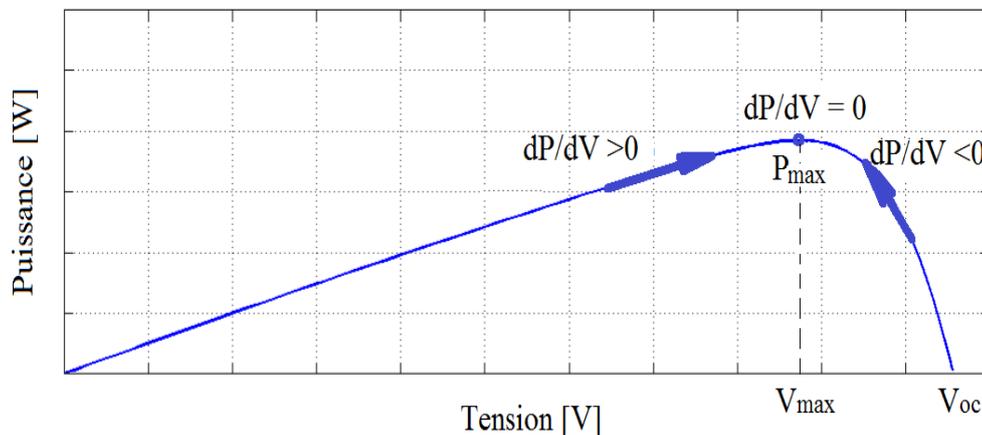


FIGURE 3.27– Principe de fonctionnement de l'algorithme MPPT de type *P&O*

Nous remarquons que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation déplace le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale. L'algorithme *P&O* continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), alors la perturbation éloigne le point de fonctionnement du point de puissance maximale. L'algorithme

inversera la direction de la perturbation suivante. Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le point de puissance maximale soit atteint. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure 3.28 [28]. Cet algorithme fonctionne de la manière suivante :

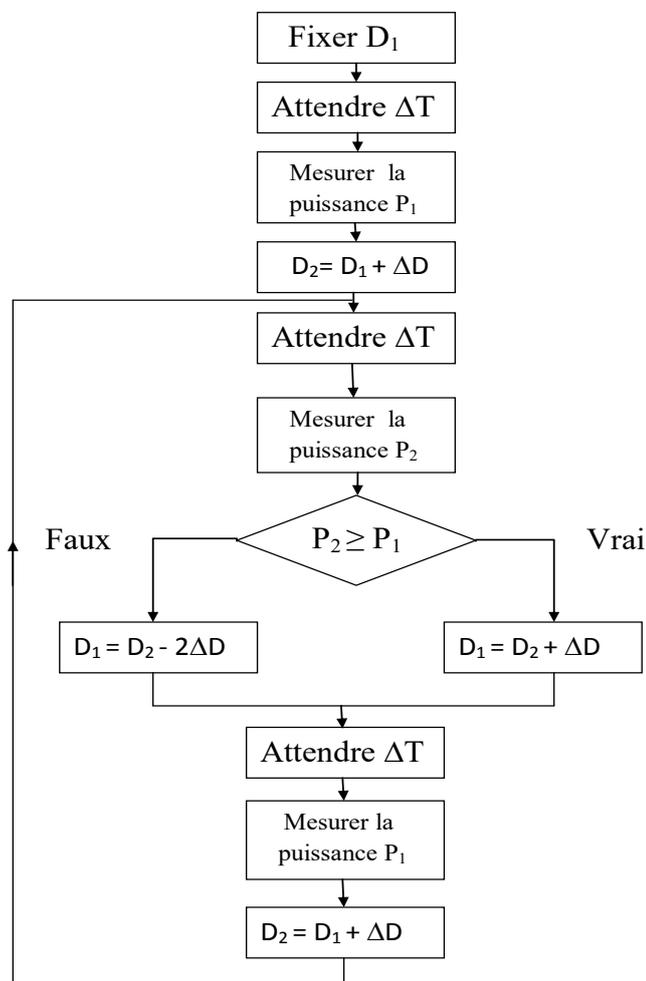


FIGURE 3.28– Organigramme de l'algorithme MPPT de type $P\&O$.

- 1– l'algorithme fixe un rapport cyclique D_1 de commande de convertisseur ;
- 2– après un certain temps ΔT , la puissance P_1 est mesurée puis le rapport cyclique est augmenté d'un pas ΔD : $D_2 = D_1 + \Delta D$;
- 3– après le temps ΔT , la puissance du panneau P_2 est mesurée ;
- 4– la comparaison des deux puissances mesurées P_1 et P_2 est effectuée,
 - si $P_2 \geq P_1$, l'augmentation du rapport cyclique permet l'augmentation de la puissance générée par le panneau. Il faut donc continuer d'augmenter le rapport cyclique : $D_1 = D_2 + \Delta D$;
 - sinon, l'augmentation du rapport cyclique ne permet pas d'augmenter ou de maintenir la puissance générée, il faut donc le diminuer : $D_1 = D_2 - 2\Delta D$;
- 5– revenir à l'étape 2 de l'algorithme.

Donc l'algorithme adapte en permanence le rapport cyclique commandant le convertisseur de manière à imposer la tension aux bornes du générateur PV qui permet de se rapprocher du point de puissance maximale. Cependant cet algorithme n'atteint pas précisément le point à puissance maximum car il change le point de fonctionnement de PV en permanence. Des oscillations se présentent autour du point de puissance maximale ce qui provoque des pertes de puissance. L'algorithme *P&O* est contraint par l'amplitude des perturbations injectées et qui conditionnent l'importance des oscillations autour du point de puissance maximale ainsi que le temps de convergence. Cet algorithme ne permet pas d'atteindre le maximum de puissance en cas de changement très rapide de l'éclairement ce qui représente un inconvénient majeur [100] et [101].

2 – Algorithme de l'Incrémentation de la Conductance :

Cet algorithme est basé sur la connaissance de la conductance (I/V) et l'incrément de la conductance ($d(I/V)$) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. Si l'incrément de conductance ($d(I/V)$) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-(I/V)$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Le principe de cet algorithme est présenté dans la figure 3.29. Cet algorithme est plus rapide que l'algorithme *P&O*. Il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant il présente de mauvais résultats pour des ensoleillements faibles, et il est plus complexe que l'algorithme *P&O*.

3 – Algorithme de la tension constante :

Cet algorithme est basé sur une relation linéaire entre la tension correspondant à la puissance maximale et la tension de circuit ouvert, cette relation est donnée par l'équation suivante [102] :

$$V_{max} = k_1 \cdot V_{oc} \quad (3.49)$$

k_1 est une constante de proportionnalité dépendant des caractéristiques du PV. Ce facteur est compris entre 0.73 et 0.8 [102]. On mesure en temps réel la tension de circuit ouvert V_{oc} pour déduire la tension correspondant à la puissance maximale V_{max} selon l'équation (3.49). Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point optimal en ajustant la tension du panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension correspondant à la puissance maximale. Les avantages de cette méthode sont la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations en état stationnaire. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est la perte de l'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lors de la déconnexion de la charge du PV (lorsque on mesure la tension V_{oc}). De plus, la détermination de la valeur optimale du paramètre k_1 est très difficile. Ce qui désavantage la méthode. De même, cette méthode ne présente pas assez de précision et donc le système ne fonctionne pas toujours au point optimal.

4 – Algorithme du courant constant :

Cet algorithme est basé sur une relation linéaire entre le courant correspondant à la puissance maximale I_{max} et le courant du court-circuit I_{cc} . Cette relation est donnée par l'équation suivante [102] :

$$I_{max} = k_2 \cdot I_{cc} \quad (3.50)$$

k_2 est une constante de proportionnalité dépendant des caractéristiques du PV. Ce facteur est compris entre 0.85 et 0.92 [102]. On mesure le courant du court-circuit I_{cc} pour en déduire le

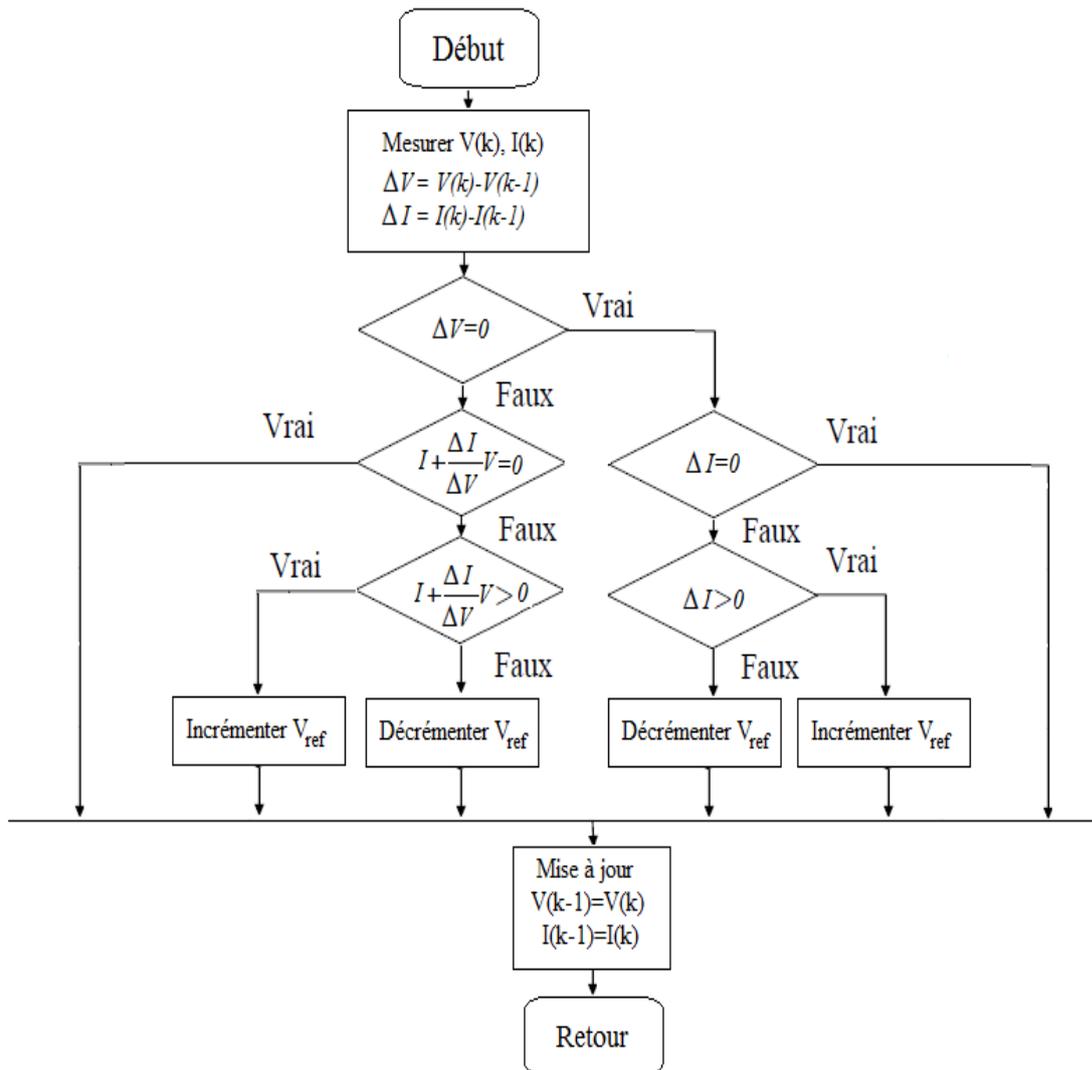


FIGURE 3.29– Algorithme de l'Incrément de la Conductance

courant correspondant à la puissance maximale I_{max} selon l'équation (3.50). La mesure du courant I_{cc} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau photovoltaïque et mesurer le courant I_{cc} à l'aide d'un capteur de courant. Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. La puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant I_{cc} . De plus, le point optimal n'est jamais atteint.

5 – Algorithme basé sur la logique floue :

Récemment, un algorithme basé sur la logique floue a été utilisé dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cet algorithme est robuste et efficace, il ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. Cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de cet algorithme est plus complexe que les autres algorithmes.

Dans notre étude, le rapport cyclique du hacheur survolteur pour le panneau PV est contrôlé par un algorithme MPPT de type *P&O* pour les avantages précisés ci-dessus. Nous avons appliqué cet algorithme et nous avons obtenu les résultats présentés dans les figures 3.30 et 3.31.

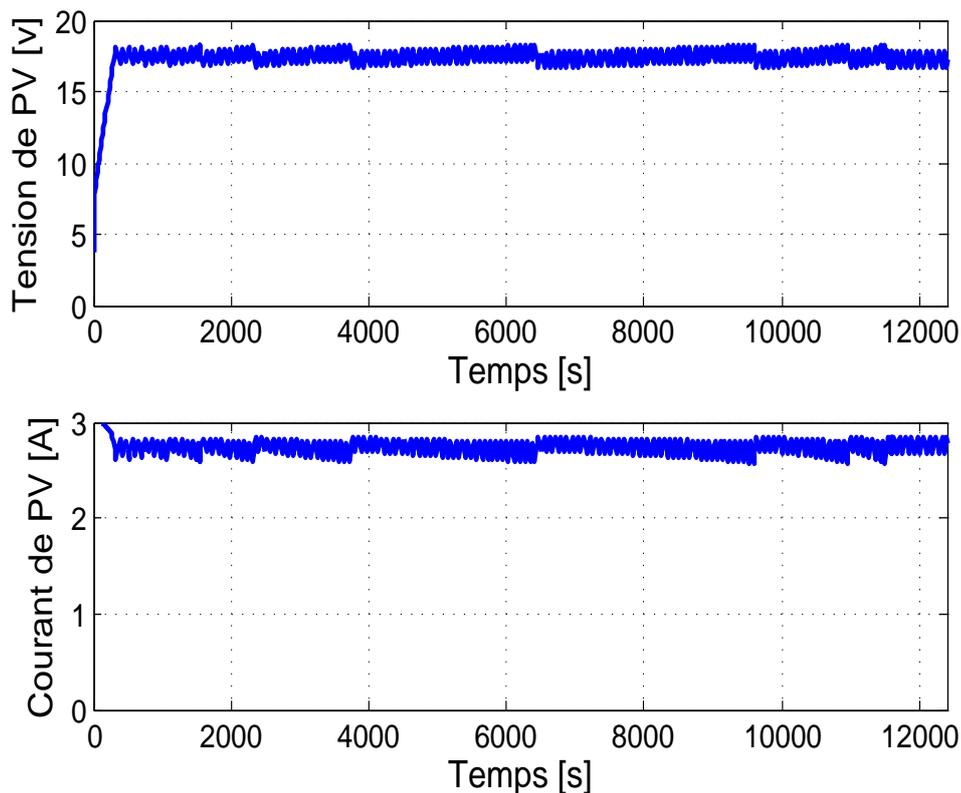


FIGURE 3.30– L'évolution de la tension et du courant du PV en fonction de temps et en appliquant *P&O*.

La figure 3.30 représente la tension et le courant du panneau en appliquant l'algorithme de MPPT de type *P&O*, et la figure 3.31 montre la puissance du panneau en appliquant le même algorithme.

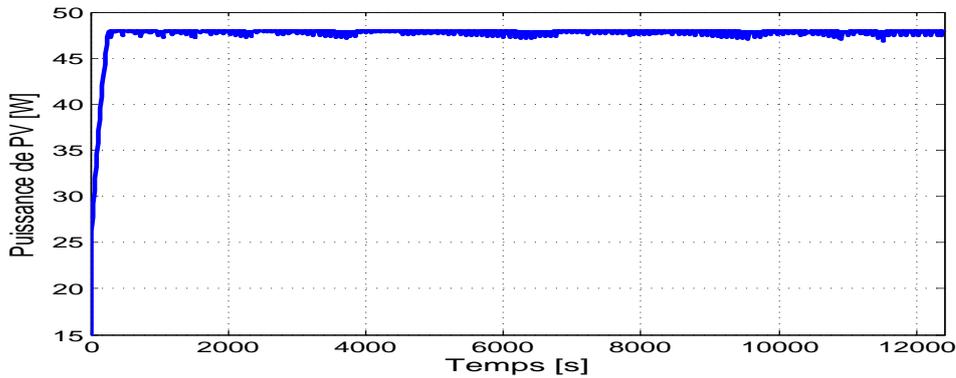


FIGURE 3.31– Puissance de PV en appliquant MPPT $P\&O$

De ces figures, nous constatons que les résultats obtenues en régime établi sont proches aux valeurs optimales données par la fiche technique des panneaux photovoltaïques PWX500-12V comme exposé dans le tableau 3.4.

3.7 Modélisation des convertisseurs de puissance

1. Hacheur non réversible en courant (survolteur) :

Nous rappelons la topologie du hacheur survolteur utilisé dans ce travail comme illustrée dans la figure 3.32 [16].

Le circuit est alimenté par une source de tension V_{in} (notée également V_{pv}). La tension appliquée

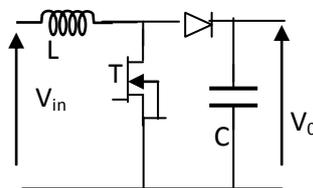


FIGURE 3.32– Topologie d'un hacheur survolteur.

à la sortie de convertisseur est V_0 (égale à la tension du pack de batteries au plomb). Le hacheur fonctionne en deux phases selon l'état de l'interrupteur T comme suit :

Phase 1 : en mode de conduction continue. Quand l'interrupteur T est fermé la diode est ouverte et la tension d'entrée V_{in} est alors appliquée sur l'inductance L (voir Fig. 3.33).

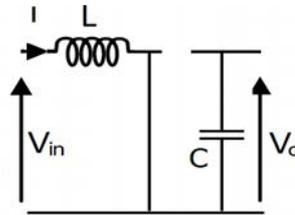


FIGURE 3.33– Le schéma équivalent du circuit de phase 1 du hacheur survolteur.

La loi de maille pour cette phrase de fonctionnement peut être donnée par l'équation :

$$V_{in} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.51)$$

Phase 2 : lorsque l'interrupteur T est ouvert, le courant accumulé dans l'inductance passe par la diode en direction de la charge. Il entraîne ainsi une tension de sortie V_0 supérieur à la tension d'entrée (voir Fig. 3.34).

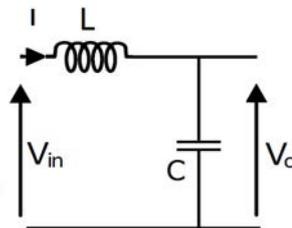


FIGURE 3.34– Le schéma équivalent du circuit de phase 2 du hacheur survolteur.

La loi de maille pour cette phrase de fonctionnement peut être donnée par l'équation :

$$V_{in} - V_o = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.52)$$

La moyenne temporelle des deux équations (3.51), (3.52) donne le modèle moyen de ce convertisseur :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_{in} - (1 - d)V_0 \quad (3.53)$$

Notons que la tension de sortie s'exprime en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen D du convertisseur (Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1). La régulation de la tension de sortie se fait par le contrôle du rapport cyclique moyen comme exprimé par l'équation (2.21). A partir de l'équation (2.21), nous constatons que le convertisseur est toujours élévateur de tension ($V_{in} < V_0$).

2. Chargeur pour les batteries Li-ion :

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 2, le convertisseur utilisé pour charger les batteries Li-Ion est présenté dans la figure 3.35.

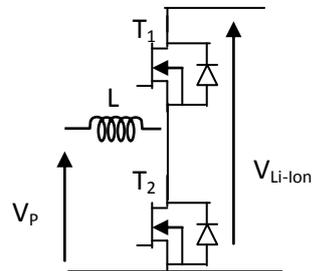


FIGURE 3.35– Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.

Ce convertisseur bidirectionnel en courant fonctionne en deux phases distinctes selon l'état des interrupteurs comme suit :

Phase 1 : quand l'interrupteur T_1 est fermé, l'interrupteur T_2 est ouvert, le schéma équivalent du circuit de cette phase est présenté dans la figure 3.36.

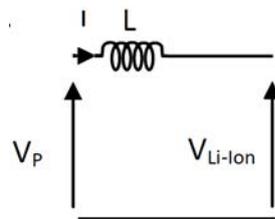


FIGURE 3.36– Le schéma équivalent du circuit de phase 1.

La loi de maille pour cette phase de fonctionnement de convertisseur peut être donnée par l'équation :

$$V_p = L \cdot \frac{di}{dt} + V_{Li-Ion} \quad (3.54)$$

Phase 2 : quand l'interrupteur T_1 est ouvert, l'interrupteur T_2 est fermé, la figure 3.37 présente le schéma équivalent du circuit de cette phase.

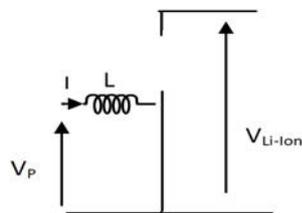


FIGURE 3.37– Le schéma équivalent du circuit de phase 2.

La loi de maille pour la deuxième phase de fonctionnement peut être donnée par l'équation :

$$V_p = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.55)$$

La moyenne temporelle des deux équations (3.54), (3.55) donne le modèle moyen de ce convertisseur :

$$L \cdot \frac{di}{dt} = V_p - (1 - D_L)V_{Li-ion} \quad (3.56)$$

En appliquant un algorithme de recharge CC/CV dont le principe est détaillé dans le chapitre 1 à ce convertisseur, nous pouvons recharger rapidement les batteries du véhicule électrique [16]. Ce point constitue une des perspectives de ce travail.

3.8 Résultats de simulation

La plate-forme de simulation de notre système PV est composée des panneaux photovoltaïques, d'un pack de batteries au plomb, et d'un hacheur survolteur. En appliquant l'algorithme MPPT (*P&O*), le schéma Simulink du système PV est illustré dans la figure 3.38. Après avoir modélisé et dimensionné le

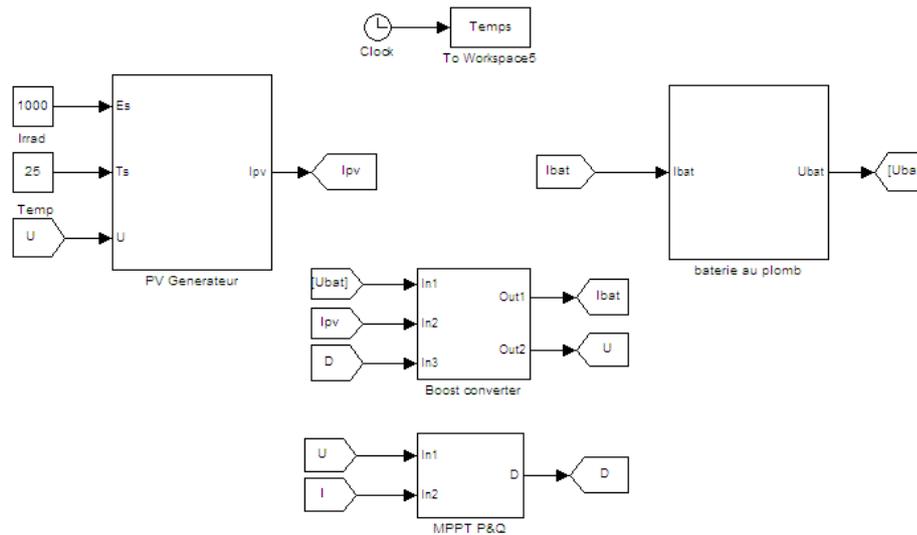


FIGURE 3.38– Schéma Simulink d'un système PV contrôlé par MPPT.

système de recharge, il est maintenant possible de recharger le pack de batteries au plomb par un courant issu des panneaux photovoltaïques. Un système de surveillance basé sur la tension du pack de batteries au plomb est utilisé pour réguler le processus de recharge du pack de batteries au plomb à partir des PVs. Il permet de couper l'alimentation en électricité des batteries lorsque elles sont complètement chargées (SOC atteint 100%). La valeur de la tension maximale du pack est de 57,7 V. Cette valeur correspond à la tension du pack de batteries au plomb lorsqu'il est complètement chargé. Le principe du système de contrôle est représenté dans la figure 3.39. La tension et le courant de recharge du pack de batteries au plomb en appliquant l'algorithme MPPT sont présentés dans la figure 3.40. Le SOC initial est 10%. Nous constatons à partir de la figure 3.40 que la tension du pack de batteries augmente jusqu'à une valeur maximale et puis qu'elle reste constante. Quand la tension du pack de batteries atteint cette valeur, le courant de recharge s'arrête grâce au système de surveillance. Nous remarquons donc qu'au bout de 3

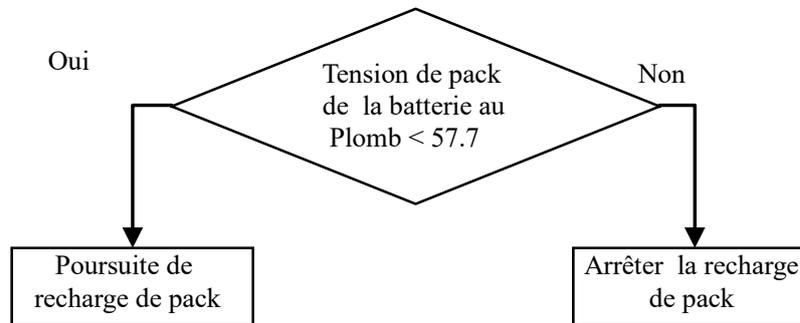


FIGURE 3.39– Système de surveillance de la recharge du pack des batteries au plomb à partir des PVs.

heures, le pack de batteries est complètement chargé (SOC = 100%), la tension maximale atteint 57,7 V et le courant devient nul.

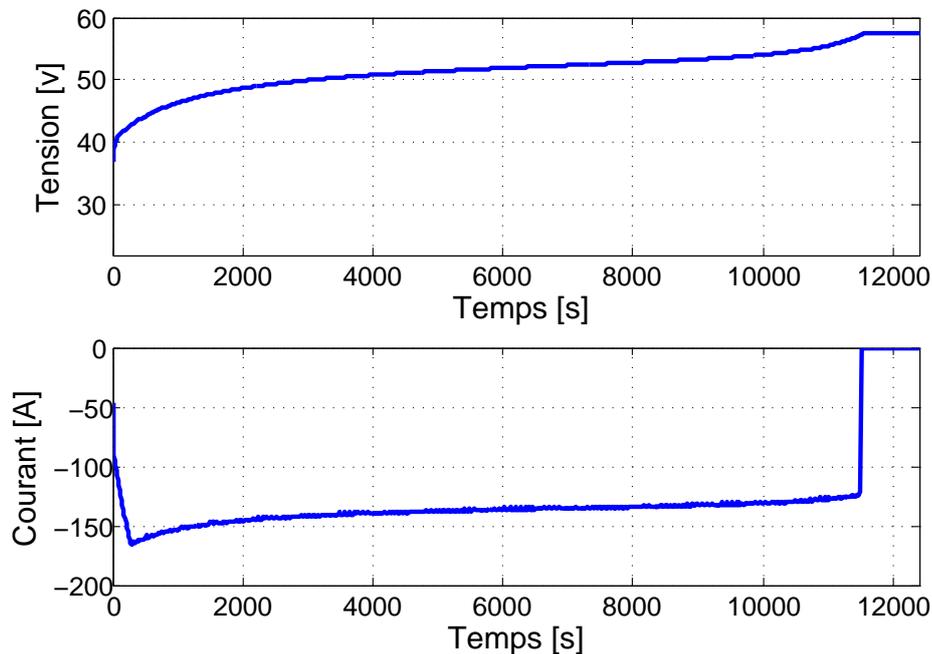


FIGURE 3.40– Recharge de la batterie au plomb à partir des PVs en appliquant l’algorithme MPPT (*P&O*).

3.9 Conclusion

Afin de bien coordonner le fonctionnement de tous les éléments de notre système de recharge, une modélisation de l’ensemble du système est nécessaire pour simuler le fonctionnement de chacun de ses composants.

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une modélisation mathématique des éléments d’un système de recharge de véhicules électriques. Ce système est composé de panneaux photovoltaïques, de pack de batteries au plomb, de pack de batteries Li-Ion et deux convertisseurs DC/DC. Nous avons proposé un modèle pour la batterie au plomb et nous avons identifié ses paramètres. Ce modèle est validé en comparant les résultats de simulation avec les données des tests expérimentaux et les données théoriques. Nous avons également modélisé la batterie Li-Ion et nous avons identifié ses paramètres. Ce modèle est validé par simulation et par comparaison avec les données théoriques de la batterie. Pour la modélisation des PVs, nous avons considéré un modèle pour lequel nous avons identifié les paramètres par des tests. Ensuite, nous avons validé ce modèle, intégrant les paramètres obtenus, en comparant les résultats de simulation obtenus avec les résultats expérimentaux et les données théoriques. De même, nous avons appliqué un algorithme MPPT de type *P&O* pour obtenir la puissance maximale à la sortie des PVs. Compte tenu de cette puissance, un système de surveillance a été appliqué pour protéger le pack de batteries au plomb contre des problèmes de surtension. Enfin, nous avons procédé, par simulation, à la recharge du pack de batteries au plomb à partir du courant des panneaux photovoltaïques. Les résultats obtenus montrent qu’une recharge complète nécessite 3 heures au bout desquelles la tension du pack de batteries se stabilise

autour d'une valeur maximale de 57,7 V lorsque le pack de batteries est complètement chargée.

Pour réduire les temps de recharge des VEs, ce travail se poursuivra par l'application d'un algorithme de recharge CC/CV pour recharger rapidement et directement le VE à partir de l'énergie solaire (si elle est suffisante). Si l'énergie solaire n'est pas suffisante, la recharge se fera uniquement en combinant l'énergie issue des PVs et l'énergie déjà stockée dans les batteries au plomb. Sinon, si l'énergie solaire n'est pas disponible, la recharge se fera à l'aide de l'énergie stockée dans les batteries au plomb. Nous éditorons également ce travail pour l'étude de gestion des flux énergétiques du système V2H. Il s'agit de commander le système sources-chargeur et de gérer les flux énergétiques bidirectionnels entre le véhicule et le micro réseau en cas de besoin. Ce travail nécessitera une étude et une recherche de solutions au regard des critères optimaux à définir.

L'optimisation et la gestion de recharge/décharge des véhicules électriques peuvent être vues selon un autre angle. Il s'agit de gérer d'une façon optimale l'affectation des VEs aux stations de recharge. Ce problème d'affectation peut être abordé par la programmation mathématique en tenant compte de plusieurs contraintes liées aux contextes et aux caractéristiques hétérogènes de la plupart des VEs, des stations de recharge, des conditions de circulation et des infrastructures, etc. L'objectif étant d'affecter chaque VE à la station de recharge la plus adéquate. Cette problématique sera donc abordée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Optimisation et planification des opérations de recharge de véhicules électriques

4.1 Introduction

Dans un avenir proche, une augmentation significative des ventes des véhicules électriques est prévue. C'est pourquoi l'accent doit être mis sur le développement des infrastructures et des techniques de recharge ainsi que sur la planification des opérations de recharge et l'affectation des VEs aux stations de recharge. Des études et des recherches sont orientées vers la diminution de la durée requise de recharge des VEs. Parmi les solutions envisagées pour remédier à ce problème, il est possible d'augmenter la tension et le courant de recharge, et par conséquent, l'énergie transférée au véhicule électrique. Ou encore échanger le pack de batteries déchargées par un autre pack complètement chargé. Dans ces cas, les temps d'attente des VEs se limite à la durée de l'échange des packs des batteries. L'affectation optimale des VEs aux stations de recharge et la gestion des flottes de VEs pour les opérations de recharge permettent également de réduire les temps d'attente au niveau des stations de recharge.

Une approche d'optimisation permettant une affectation optimale des VEs aux stations de recharge est proposée dans ce chapitre. Cette approche permet de proposer à chaque VE, selon ses caractéristiques et ses besoins, la station la plus adéquate. Dans un premier temps nous allons aborder cette approche d'affectation des VEs (avec les mêmes caractéristiques)aux stations de recharges (avec la même puissance de recharge) dans des conditions normales. Nous appelons conditions normales dans ce travail : un trafic fluide, itinéraires avec faibles pentes, faible utilisation des accessoires électriques, profils de vitesse constants, etc.. Le système est dit sous conditions perturbées quand ces conditions ne sont pas satisfaites. Dans un deuxième temps, nous abordons ce problème d'affectation pour un système de recharge avec des conditions perturbées. Le deuxième volet de ce travail porte sur l'affectation des VEs de différentes

caractéristiques (différentes marques et différents modèles) aux stations de recharge avec différentes caractéristiques (différentes puissances de recharge ou encore des recharges lentes et des recharges rapides).

L'objectif principal de cette étude est d'affecter les VEs aux stations de recharge dans les conditions précitées tout en minimisant l'énergie électrique consommée. Plus précisément, il s'agit de garder l'état de charge de la batterie de chaque VE affecté à une station de recharge au plus haut niveau possible au moment de son arrivée à la station. Ceci permet de réduire le temps de recharge et par conséquent de réduire le temps d'occupation de la station de recharge. Ce temps sera réduit encore davantage en combinant cette solution de minimisation de la consommation d'énergie, avec l'augmentation de la tension et du courant des points de recharge.

Pour ce faire, cette étude porte sur la modélisation du problème, à l'aide d'un programme mathématique linéaire en formalisant le contexte global du système et des contraintes associées. Parmi les informations nécessaires pour la formalisation du problème, nous citons les informations associées aux stations de recharge : l'état de ces stations, leurs localisations, le service de recharge fourni, etc. Le deuxième type d'informations concerne les VEs telles que le SOC des batteries, localisation des VEs, les besoins en terme d'utilisation des accessoires électriques. D'autres informations liées aux conditions du trafic sur les routes, les itinéraires avec ou sans pentes, recherche de points d'intérêts par les conducteurs, etc. sont nécessaires et seront intégrées dans le modèle mathématique.

La deuxième phase de cette étude consiste à résoudre le programme mathématique décrivant le système de recharge et ses différentes contraintes et à déterminer la solution d'affectation optimale. L'approche proposée sera finalement illustrée et validée à l'aide des exemples numériques avec une étape de passage à l'échelle.

4.2 État de l'art

Plusieurs études et algorithmes ont été proposés dans la littérature au sujet de la gestion de recharge des VEs et de leurs connexions aux infrastructures de recharge dont [103], [104], [105], [106].

Dans [104], un algorithme d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques est appliqué pour optimiser le comportement de recharge d'un PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) connecté au réseau électrique. Ce travail a un double objectif, maximiser l'énergie transférée du réseau vers le véhicule, et minimiser le vieillissement de la batterie.

Dans [105], un processus de recharge des VEs a été formalisé comme problème d'optimisation et de planification. Dans ce travail, les auteurs ont proposé un schéma optimal de planification globale et un schéma optimal de planification locale pour la recharge des EVs. L'objectif de la planification globale est de minimiser le coût total de tous les VEs qui effectuent leurs recharge pendant une journée. Tandis que dans le schéma de la planification locale, l'optimisation du coût se fait par groupe de VEs (les VEs sont rangés par groupes selon leurs arrivés à la station de recharge). Il a été prouvé dans cette étude que l'optimisation du schéma de planification locale est plus pratique que celui de la planification globale. En effet, La planification globale nécessite des informations sur les futures recharges (pour toute la journée) ainsi que les heures d'arrivée et les périodes de recharge des VEs. Ceci n'est pas forcément nécessaire pour la planification locale dans laquelle les VEs sont traités pas groupe pour un moment donné. Les simulations ont démontré que le schéma de planification locale est plus performant que celui de planification globale.

Les auteurs de [106] ont proposé une plate-forme de collaboration permettant de renforcer la synergie entre les différentes entités impliquées dans un système de recharge de VEs. Il s'agit essentiellement

d'un système d'aide à la décision pour l'information et le guidage des VEs vers les stations de recharge. L'architecture de la plate-forme est basée sur les technologies de communication [107], [108], les services Web et les techniques de géo-positionnement [109]. Une approche d'optimisation pour la planification optimale et l'affectation des véhicules électriques à des stations de recharge est proposée dans ce travail.

Le problème de routage des VEs soumis à des contraintes énergétiques par le biais d'un réseau composé de plusieurs nœuds de recharge est étudié dans [110]. Les auteurs ont cherché à minimiser les temps mis par les véhicules pour atteindre leurs destinations par la détermination d'itinéraires optimaux. Trouver les itinéraires optimaux et minimiser la distance à parcourir sont des problèmes résolus par des algorithmes d'optimisation tels que Dijkstra et Bellman [111], [112] et [113]. Une méthodologie pour planifier la recharge et l'affectation des itinéraires pour une flotte de VEs a été présentée dans [114]. Cette méthodologie consiste à minimiser les coûts de fonctionnement avec la recherche d'itinéraires optimaux pour acheminer les VEs vers les points de recharge. Les auteurs ont également prouvé, dans ce travail, que la planification des recharges et l'affectation des itinéraires ont des effets sur les durées de vie des batteries.

4.3 Problème d'affectation

Le problème d'affectation est un problème de recherche opérationnelle pour lequel l'objectif à atteindre ainsi que les contraintes à respecter peuvent être exprimés par des équations (ou inéquations) linéaires à variables binaires. Un problème d'affectation permet d'affecter n individus pour effectuer m tâches (n et m sont des entiers naturels). Nous citons à titre d'exemple le problème d'affectation des ouvriers à des postes de travail, des professeurs à des classes, des équipages à des vols aériens, etc.

Dans le cadre de ce travail, notre objectif principal est de trouver la meilleure affectation des véhicules électriques aux stations de recharge tout en respectant un ensemble de contraintes liées aux VEs, aux stations de recharge, et aux contextes des déplacements des VEs vers les stations de recharge. L'objectif étant d'acheminer un VE, selon ses besoins, vers une station de recharge tout en consommant le minimum d'énergie. Ceci permet de satisfaire sa demande en terme d'énergie et réduire le temps d'occupation de la station de recharge.

Étant donné n véhicules électriques et m stations de recharge (n est beaucoup plus grand que m). Nous associons à chaque véhicule électrique un ensemble de paramètres :

- 1 – L'énergie dont il a besoin,
- 2 – L'énergie restant dans la batterie,
- 3 – La distance que l'on peut parcourir avec cette énergie,
- 4 – Sa position (coordonnées GPS),
- 5 – Le mode de conduite du conducteur et les accessoires électriques utilisés (phares, chauffage, climatisation, essuies glace, auto-radio, etc.).

De même, à chaque station de recharge nous associons les paramètres suivants :

- 1 – Sa puissance de recharge,
- 2 – Le nombre de points de recharge,
- 3 – Les conditions climatiques (favorables ou non : nuit/ensoleillement (en cas de stations de recharge à base des panneaux photovoltaïques),
- 4 – Sa position,

5 – La présence d’autres points d’intérêt à proximité (supermarché, restaurant, centre de loisir, etc).

Un autre point important à prendre en compte dans la modélisation, est la nature des itinéraires empruntés par les VEs, notamment entre la position d’un VE et les stations de recharge. Chaque itinéraire est caractérisé par un ou plusieurs paramètres dont les conditions du trafic (trafic fluide ou non), zone urbaine, itinéraire avec ou sans pente, etc.).

Pour les conducteurs, le problème le plus important n’est pas seulement de trouver le point de recharge le plus proche, mais surtout le plus adéquat contenu des paramètres précités. Notons que la station de recharge la plus proche n’est pas forcément la plus adéquate. En effet, plusieurs facteurs peuvent empêcher l’arrivée à la station la plus proche avec l’énergie disponible dans la batterie. Par exemple, le cas de fortes embouteillages sur les routes, plusieurs VEs déjà en attente dans la station, route avec fortes pentes, etc. Se diriger vers une autre station, plus lointaine, peut s’avérer donc plus avantageux que d’aller se recharger dans la station la plus proche.

Pour les VEs, la consommation d’énergie est fortement liée aux caractéristiques environnementales et aux contextes des déplacements et la nature des conduites. L’infrastructure, la vitesse du véhicule, les conditions du trafic sont des facteurs importants qui impactent la consommation d’énergie [110]. Ce genre de problème d’affectation peut être abordé par la théorie de la programmation mathématique. Parmi les logiciels de programmation mathématique utilisés pour résoudre les problèmes d’optimisation, dont le problème d’affectation fait partie, nous citons Cplex, Xpress-mp, Microsoft Excel. Dans ce travail, nous utilisons le solveur Microsoft Excel pour résoudre ce problème. Il est très efficace et peut être manipulé sans avoir de solides compétences en mathématiques ou en programmation.

Dans ce qui suit, nous définissons la matrice d’affectation dont les éléments $c(i, j)$ représentent les coefficients d’affectation. Cette matrice est présentée par le tableau 4.1 et schématisée par la figure 4.1.

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	...	...	S_m
VE_1	$c(1, 1)$	$c(1, 2)$	$c(1, 3)$	...	...	$c(1, m)$
VE_2	$c(2, 1)$	$c(2, 2)$	$c(2, 3)$	...	...	$c(2, m)$
VE_3	$c(3, 1)$	$c(3, 2)$	$c(3, 3)$	...	...	$c(3, m)$
...
...
VE_n	$c(n, 1)$	$c(n, 2)$	$c(n, 3)$	...	...	$c(n, m)$

TABLE 4.1– Matrice d’affectation des véhicules électriques aux stations de recharge.

Pour $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq j \leq m$, chaque coefficient d’affectation $c(i, j)$ de la matrice est exprimé selon les paramètres du système que nous détaillons dans la suite de ce chapitre.

Compte tenu du comportement dynamique du système étudié, chaque coefficient $c(i, j)$ dépend du temps, nous écrivons ainsi $c(i, j, t)$ comme coefficient d’affectation du véhicule VE_i à la station de recharge S_j à l’instant t .

Les coefficients $c(i, j, t)$ peuvent être calculés de façon optimale selon les informations échangées entre les VEs, demandant à être rechargés, avec les stations de recharge via une plateforme intermédiaire. Cette plateforme est illustrée par la figure 4.2. Nous nous référons aux travaux développés dans [106] pour plus de détails sur cette plateforme collaborative intermédiaire entre les VEs et les stations de recharge.

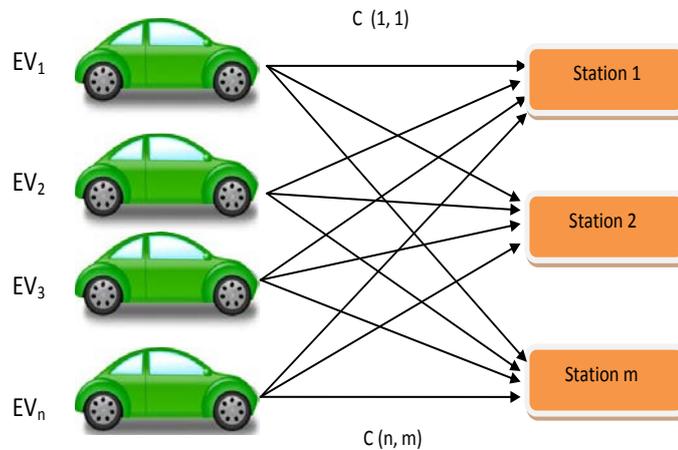


FIGURE 4.1– Possibilités d'affectation des VEs aux stations de recharge.

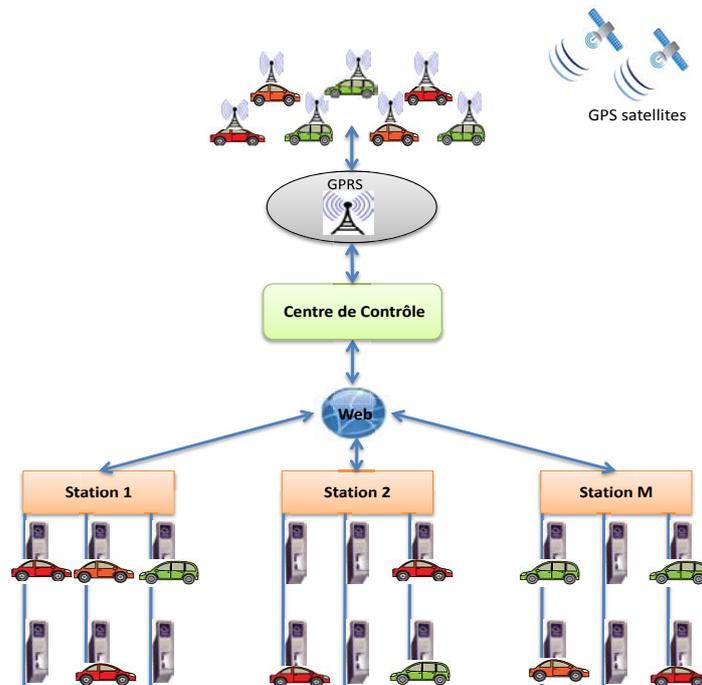


FIGURE 4.2– Système de recharge de VEs.

Cette architecture est composée d'un ensemble de stations de recharge, d'un centre de contrôle (plateforme), d'un ensemble de VEs géolocalisés. Chaque station de recharge possède un nombre donné de points de recharge. Ces composants communiquent via les technologies de communication et les systèmes de géo-positionnement tels que GPS, GPRS, Web, etc. comme montrer dans le figure 4.2. En effet, les informations concernant les stations de recharge (station libre/occupée, puissance de recharge, prix de recharge, positionnement, etc.) sont envoyées régulièrement et enregistrées dans la base de données du centre de contrôle. Le VE se connecte au centre de contrôle via un dispositif de communication embarqué (PDA, GSM, etc.) pour demander des informations sur les stations de recharges les plus adéquates selon

ses caractéristiques. Le centre de contrôle se charge de chercher la meilleure station et de prévoir (réserver) un point de recharge pour le VE demandeur en fonction de son arrivée à cette station. Les informations sur l'état de chaque station de recharge sont enregistrées et mises à jour régulièrement dans la base de données de la plateforme [106].

Dans ce qui suit, nous procédons à la formalisation du problème par un programme mathématique linéaire intégrant toutes ces informations et toutes les contraintes de fonctionnement du système.

4.4 Formulation du problème

4.4.1 Hypothèses

Cette étude consiste à sélectionner le meilleur choix d'affectation des véhicules électriques aux stations avec un minimum d'énergie consommée. Ceci permet d'éviter la surcharge des stations en minimisant les temps de recharge des VEs. De même, elle permet de minimiser les temps d'attente des chauffeurs des VEs passés aux station de recharge. Dans le système de recharge considéré dans ce travail, nous supposons que :

- 1 – Les ressources sont limitées (chaque station de charge est dotée d'un nombre fixe et limité de points de recharge),
- 2 – Les caractéristiques des véhicules électriques sont identiques,
- 3 – Un VE peut être affecté à une seule station de recharge,
- 4 – Une station de recharge peut recevoir plusieurs VEs selon sa capacité et la disponibilité de ses points de recharge,
- 5 – Les stations de recharge ont les mêmes caractéristiques.

4.4.2 Notations

n	Nombre de véhicules électriques (VE_1, VE_2, \dots, VE_n)
m	Nombre de stations de recharge (S_1, S_2, \dots, S_n)
$c(i, j, t)$	Coefficient d'affectation du VE_i à la station de recharge S_j à l'instant t
$k(i, j, t)$	Densité de véhicules sur l'itinéraire entre la position du VE_i et la station S_j à l'instant t [veh/km].
$v(i, j, t)$	Vitesse du véhicule en fonction des conditions de circulation à l'instant t [km/h].
$v_f(i, j, t)$	Vitesse de référence sur l'itinéraire entre la position du VE_i et la station S_j à l'instant t [km/h].
$k_{jam}(i, j, t)$	Densité du trafic sur l'itinéraire qui emmène de l a position du VE_i vers la station de recharge S_j à l'instant t [veh/km].
$q(i, j, t)$	Flux des véhicules [veh/h]
$d(i, j, t)$	Distance séparant le véhicule VE_i et la station de recharge S_j à l'instant t
$C_n(i)$	Capacité nominale de la batterie de traction du VE_i .
$A(i)$	Autonomie de la batterie de traction du véhicule VE_i .
$SOC_0(i, t)$	État de charge initiale de la batterie du VE_i à l'instant t , donné en %.
$SOC_f(i, j, t + T)$	État de charge finale de la batterie du VE_i à son arrivé à la station de recharge S_j (c'est-à-dire à l'instant $t+T$), donné en %.
$T(i, j, t)$	Temps nécessaire pour effectuer la distance $d(i, j, t)$.
$E_{cn}(i, j, t + T)$	Énergie consommée entre la position du VE_i et la station S_j dans les conditions normales.
$E_{cp}(i, j, t + T)$	Énergie consommée pour une distance entre la position du VE_i et la station S_j dans les conditions perturbées.
$x(i, j, t)$	Variables binaires du problème.

Avec :

$$x(i, j, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } VE_i \text{ est affecté à la station de recharge } S_j \text{ à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

4.4.3 Fonction objectif

Dans cette section, nous procédons à la formalisation du problème d'affectation sous forme d'un programme linéaire, nous rappelons l'objectif de notre travail :

- Affecter les VEs aux stations de recharge adéquates. Pour cette affectation, nous distinguons deux cas de figure. Seul le premier sera considéré dans ce travail.
 - Affectation des VEs à charger aux stations de recharge adéquates.
 - Affectation des VEs à décharger aux stations de recharge en cas de flux V2H ou V2G.
- Designer le trajet le plus convenable pour chaque VE pour minimiser la consommation d'énergie de son emplacement jusqu'à l'arrivée à sa destination (station de recharge suggérée). Ceci permet, en conséquence, de garder l'état de charge de la batterie à son plus haut niveau possible $SOC_f(i, j, t+T)$.

Le coefficient d'affectation $c(i, j, t)$ peut être exprimé en fonction des paramètres du problème comme suit : $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$c(i, j, t) = f(d(i, j, t), SOC_0(i, t), SOC_f(i, j, t + T), q(i, j, t), k_{jam}(i, j, t), E_{cn}(i, j, t + T), v_f(i, j, t)) \quad (4.1)$$

Dans ce qui suit, nous déterminons l'expression explicite de cette fonction ainsi que celles de tous les paramètres qui participent au calcul du coefficient $c(i, j, t)$.

La relation entre la vitesse du véhicule électrique et la densité des véhicules est proposée par Greenshield dans [115]. Greenshield a supposé la relation entre la vitesse et la densité de flux du trafic comme linéaire. L'équation de cette relation est donnée par (4.2) :

$$v = v_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_{jam}}\right) \quad (4.2)$$

Dans le contexte de notre travail, nous traitons plusieurs VEs et plusieurs stations de recharge. Cette équation devient donc : $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$v(i, j, t) = v_f(i, j, t) \cdot \left(1 - \frac{k(i, j, t)}{k_{jam}(i, j, t)}\right) \quad (4.3)$$

La densité des véhicules est proportionnelle au flux de véhicules selon la relation (4.4), [115], [116] : $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$k(i, j, t) = \frac{q(i, j, t)}{v(i, j, t)} \quad (4.4)$$

Le temps nécessaire pour parcourir la distance $d(i, j, t)$ par le véhicule est calculé par l'expression (4.5) : $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$T(i, j, t) = \frac{d(i, j, t)}{v(i, j, t)} \quad (4.5)$$

Les équations (4.4) et (4.5) donnent l'expression de la densité en fonction du flux des véhicules et le temps $T(i, j, t)$. Cette expression est donnée par (4.6). $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$k(i, j, t) = \frac{q(i, j, t) \cdot T(i, j, t)}{d(i, j, t)} \quad (4.6)$$

Les équations (4.3) et (4.6) permettent d'obtenir l'équation (4.7) qui exprime la relation de la vitesse en fonction du flux des véhicules $q(i, j, t)$, le temps $T(i, j, t)$, et la distance $d(i, j, t)$: $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$v(i, j, t) = v_f(i, j, t) \cdot \left(1 - \frac{q(i, j, t) \cdot T(i, j, t)}{d(i, j, t) \cdot k_{jam}(i, j, t)}\right) \quad (4.7)$$

La consommation d'énergie $E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t))$ est proportionnelle à la distance parcourue $d(i, j, t)$. Cette consommation est donnée par l'équation suivante : $\forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t)) = \frac{C_n(i) \cdot d(i, j, t)}{A(i)} \quad (4.8)$$

Comme évoqué dans [117], l'état de charge de la batterie du véhicule électrique à son arrivée à la

station de recharge $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ peut s'exprimer en fonction de $SOC_0(i, t)$, $E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t))$, et de la variance de la vitesse (ralentissement et accélération).

Dans notre cas le $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ est donné par l'expression suivante :

$$SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)) = SOC_0(i, t) - E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t)) \cdot \int_{t+T(i, j, t)}^t v(i, j, s) ds \quad (4.9)$$

L'équation (4.10) est obtenue en combinant les équations (4.7) et (4.9). Cette équation exprime l'état de charge de la batterie SOC_f à son arrivée à la station de recharge S_j en fonction des paramètres du système. $\forall i = 1, \dots, n$, $\forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)) = SOC_0(i, t) - E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t)) \cdot Y(i, j, t) \quad (4.10)$$

Avec :

$$Y(i, j, t) = \int_{t+T(i, j, t)}^t v_f(i, j, s) \left(1 - \frac{q(i, j, s) \cdot T(i, j, s)}{d(i, j, s) \cdot k_{jam}(i, j, s)}\right) ds \quad (4.11)$$

Comme nous l'avons souligné auparavant, notre objectif est que l'état de charge de la batterie du véhicule électrique, au moment d'arrivée à sa destination, reste au plus haut niveau possible. Il s'agit plus précisément de :

- 1 – Consommer moins d'énergie en arrivant à la station de recharge proposée,
- 2 – Réduire le temps de recharge (en supposant que les stations de recharges sont identiques) et par conséquent réduire le temps passé dans la station de recharge,
- 3 – Réduire les coûts de recharge (en supposant que les stations de recharges sont identiques).

Compte tenu de l'équation 4.10 exprimant l'état de charge $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ de la batterie du VE_i lors de son arrivé à la station S_j , nous définissons le coefficient d'affectation comme suit : $\forall i = 1, \dots, n$, $\forall j = 1, \dots, m$, et à chaque instant t ,

$$c(i, j, t) = SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)). \quad (4.12)$$

Ainsi, la fonction objectif de notre problème d'optimisation peut être formulée comme suit :

$$Maximiser Z(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)) \cdot x(i, j, t). \quad (4.13)$$

4.4.4 Formalisation des contraintes du problème

- 1 – Pour $i = 1, \dots, n$, et à un instant donné t :

$$\sum_{j=1}^m x(i, j, t) = 1 \quad (4.14)$$

Cette équation exprime la contrainte d'affectation de chaque véhicule à une seule station de recharge.

2 – Pour $j = 1, \dots, m$, et à un instant donné t :

$$\sum_{i=1}^n x(i, j, t) \leq n_j \quad (4.15)$$

Cette équation signifie qu'une station de recharge peut recevoir jusqu'à n_j véhicules en même temps (le nombre de points de recharge de la station S_j étant n_j).

4.5 Résolution et discussions

Nous étudions l'exemple numérique suivant :

- 1 – $n = 6$ véhicules électriques à charger ;
- 2 – $m = 4$ stations de recharge ;
- 3 – Les distances $d(i, j, t)$ sont différentes selon la position de chaque VE_i par rapport à chaque station S_j ;
- 4 – L'état de charge initial $SOC_0(i, t)$ de chaque VE_i est connue ;
- 5 – Nous supposons que le calcul démarre à l'instant initiale $t = t_0 = 1h$ (le choix de cette valeur est donné par la suite), et que l'état du système (positions des VEs, états de charge des batteries, disponibilité des points de recharge au sein des stations de recharge, etc.) évolue dans le temps,
- 6 – Le nombre de points de recharge dans les stations de recharge sont donnés respectivement par $n_1 = 1, n_2 = n_3 = n_4 = 2$.

De même, nous considérons que les véhicules électriques VE_i sont de modèle MIA ELECTRIC dont l'autonomie $A(i) = 80km$, et la capacité nominale de la batterie $C_n(i) = 8kWh$.

Comme évoqué précédemment, nous considérons les deux cas suivants :

- a) Affecter les VE_i aux stations de recharge S_j dans des conditions normales,
- b) Affecter les VE_i aux stations de recharge S_j dans des conditions perturbées.

4.5.1 Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions normales

Dans ce cas, les conditions de circulation, la nature des infrastructures, les accessoires électriques du VE n'impactent pas fortement la consommation de l'énergie du VE. Ainsi, l'équation 4.9 devient : $\forall i = 1, \dots, 6, \forall j = 1, \dots, 4$, et à l'instant t ,

$$SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)) = SOC_0(i, j, t) - E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t)) \quad (4.16)$$

Compte tenu des différentes équations données auparavant, nous calculons les valeurs des états de charge $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ et de consommation d'énergie $E_{cn}(i, j, t + T(i, j, t))$ pour tous les véhicules considérés. A titre d'exemple, nous présentons les données et les résultats de consommation pour le

Paramètres du VE_1	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(1,j,t)[\text{km}]$	2	5	10	7
$SoC_0(1,t)$	70	70	70	70
$E_{cn}(1,j,t+T(1,j,t))[\text{kWh}]$	0.2	0.5	1	0.7
$SoC_f(1,j,t+T(1,j,t))$	69.8	69.5	69	69.3

TABLE 4.2– Résultat de calcul de SoC_f et E_{cn} pour le véhicule VE_1

véhicule VE_1 dans le tableau 4.2. La consommation d'énergie pour chaque station est illustrée par la figure 4.3.

A partir des résultats obtenus nous constatons que la consommation d'énergie par le véhicule VE_1 est maximum pour la plus longue distance parcourue parmi toutes les distances considérées (soit pour atteindre S_3). En analysant ces résultats, nous constatons que la consommation d'énergie dépend principalement de

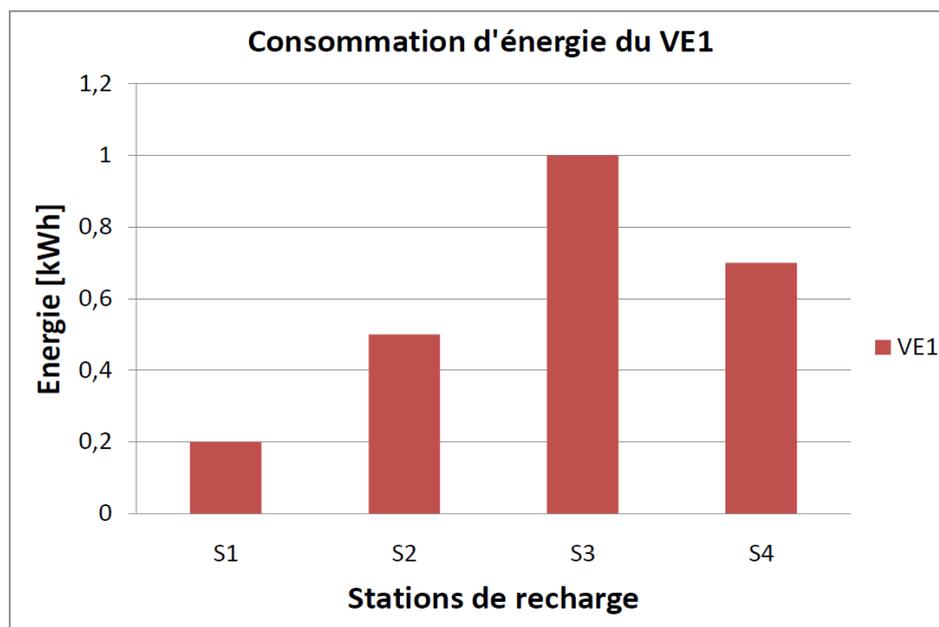


FIGURE 4.3– Consommation d'énergie du VE_1 en fonction des positions des stations de recharge

la distance parcourue. Ainsi, Le véhicule VE_1 consomme plus d'énergie pour se rendre à la station S_3 , alors qu'un minimum d'énergie est consommée pour se rendre à la station S_1 .

Dans le tableau 4.3, nous présentons les résultats de calculs des coefficients SoC_f et E_{cn} pour tous les véhicules VE_i , pour $i = 1 \dots 6$.

Paramètres des VE_i/S_j		S_1	S_2	S_3	S_4	
VE_1	$SOC_0(1,t) = 70$	$E_{cn}(1, j, t+T)$	0.2	0.5	1	0.7
		$SOC_f(1, j, t + T)$	69.8	69.5	69	69.3
VE_2	$SOC_0(2,t) = 75$	$E_{cn}(2, j, t+T)$	1	0.4	0.7	0.6
		$SOC_f(2, j, t + T)$	74	74.6	74.3	74.4
VE_3	$SOC_0(3,t)=65$	$E_{cn}(3, j, t+T)$	1	0.5	0.3	0.7
		$SOC_f(3, j, t + T)$	64	64.5	64.7	64.3
VE_4	$SOC_0(4,t)=60$	$E_{cn}(4, j, t+T)$	1	0.7	0.9	0.4
		$SoC_f(4, j, t + T)$	59	59.3	59.1	59.4
VE_5	$SOC_0(5,t)=66$	$E_{cn}(5, j, t+T)$	0.2	0.5	0.3	0.9
		$SOC_f(5, j, t + T)$	65.8	65.5	65.7	65.1
VE_6	$SOC_0(6,t) = 53$	$E_{cn}(6, j, t+T)$	0.4	0.2	1	0.65
		$SOC_f(6, j, t + T)$	52.6	52.8	52	52.35

TABLE 4.3– Résultats de calcul des coefficients d’affectation SOC_f et E_{cn} pour l’ensemble des véhicules

Dans l’annexe B, nous détaillons les résultats obtenus pour chaque véhicule. La figure 4.4 récapitule les résultats de consommation d’énergie E_{cn} par chaque VE pour se rendre à chaque stations de recharge.

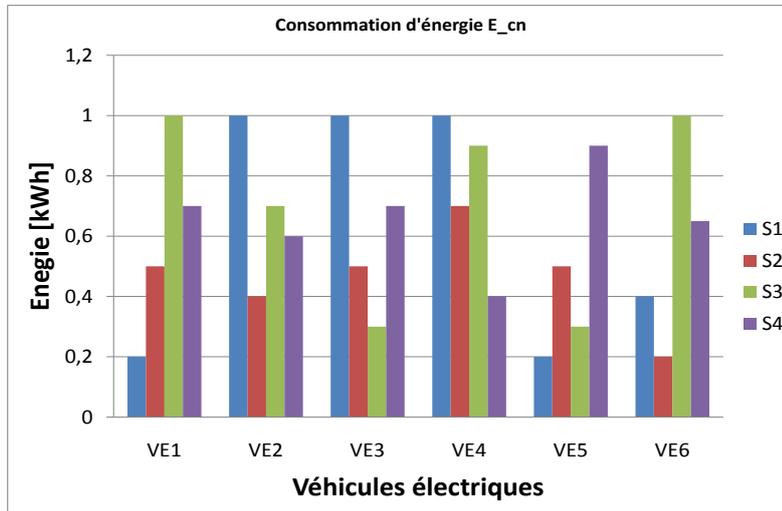


FIGURE 4.4– L’énergie nécessaire E_{cn} de chaque véhicule VE_i pour arriver à chaque station de recharge S_j .

De cette figure, nous constatons que, par exemple, le véhicule électrique VE_4 a besoin de beaucoup d’énergie pour se rendre à la station de recharge S_1 , par contre il peut en consommer moins pour se rendre

à la station de recharge S_4 .

De même, la figure 4.5 représente une estimation de l'état de charge SOC_f de chaque VE à son arrivée à chaque station de recharge.

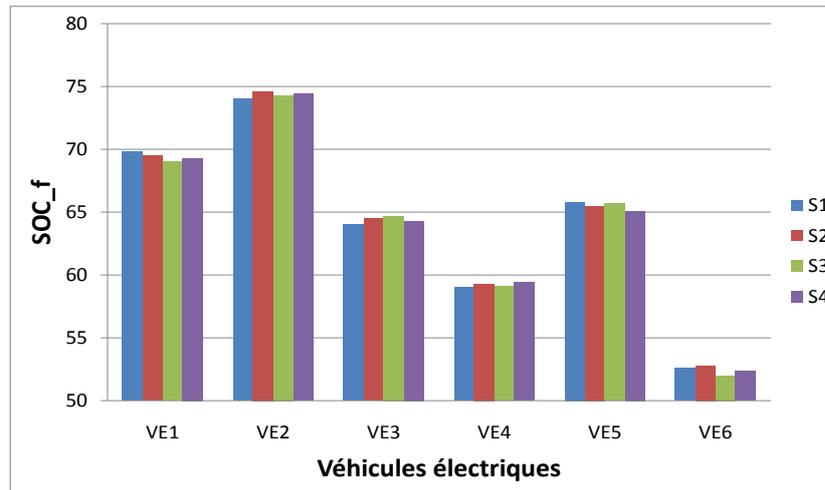


FIGURE 4.5– SOC_f de chaque véhicule VE_i correspondant chaque station de recharge S_j .

Les valeurs des paramètres SOC_f correspondent aux valeurs des coefficients d'affectation des VEs aux stations de recharge $c(i, j, t)$. A partir de tableau 4.3, nous construisons la matrice d'affectation telle qu'elle est présentée par le tableau 4.1. En utilisant le solveur d'Excel, nous avons pu obtenir la solution correspondant aux meilleures affectations des véhicules électriques aux stations de recharge, toute en respectant les différentes contraintes du problème. La matrice d'affectation est donnée, en soulignant les affectations retenues en gris et en gras, dans le tableau 4.4 :

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4
VE_1	69,8	69,5	69	69,3
VE_2	74	74,6	74,3	74,4
VE_3	64	64,5	64,7	64,3
VE_4	59	59,3	59,1	59,4
VE_5	65,8	65,5	65,7	65,1
VE_6	52,6	52,8	52	52,35
n_j	1	2	2	2

TABLE 4.4– Valeurs optimales des coefficients d'affectation des VEs aux stations de recharge pour un moment donné.

Le tableau 4.5 présente un récapitulatif des résultats obtenus :

Station de recharge	S_1	S_2	S_3	S_4		
Nombre de VE à charger simultanément	1	2	2	2		
Nombre de VE affecté	1	2	2	1		
Les VE affectés	VE_1	VE_2	VE_6	VE_3	VE_5	VE_4
SOC_f	69,8	74,6	52,8	64,7	65,7	59,4

TABLE 4.5– Affectation optimale.

A partir de ce tableau, nous constatons que :

- 1 – Le but global d’une meilleure affectation de tous les VEs est atteint,
- 2 – Le nombre de VEs autorisés dans chaque station de charge n’est pas dépassé,
- 3 – Chaque VE est affecté à une et une seule station de recharge,
- 4 – Chaque affectation est réalisée avec la valeur maximale du paramètre SOC_f .

4.5.2 Affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions perturbées

Dans cette étude, nous allons affecter les VE_i aux stations de recharge S_j en considérant des conditions de circulation perturbées évoquées précédemment.

Pour ce faire, nous procédons de la même manière que dans le cas précédent et nous calculons la valeur de $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ et de la consommation de l’énergie $E_{cp}(i, j, t + T(i, j, t))$ pour chaque véhicule électrique VE_i et chaque station S_j .

Dans un premier temps, nous commençons par calculer le temps nécessaire $T(i, j, t)$ pour chaque véhicule VE_i afin de se rendre à la station S_j . Puis nous calculons les valeurs des coefficients d’affectations.

- 1 – Calcul de temps $T(i, j, t)$:

Nous commençons les calculs pour le véhicule V_1 . Pour ce faire, nous considérons les caractéristiques suivantes :

Paramètres	Valeurs numériques
$t = t_0$ (l’heure de départ)	1h
$v_f(1, 1, t_0)$	60 km/h
$q(1, 1, t_0)$	1300 veh/h
$d(1, 1, t_0)$	2km
$k_{jam}(1, 1, t_0)$	200 veh/km
$SOC_0(1, t_0)$	90

TABLE 4.6– Valeurs nécessaires pour le calcul.

Le temps $T(1, 1, t_0)$ est donné par une équation reliant la vitesse et la distance comme suit (4.17) :

$$T(1, 1, t_0) = \frac{d(1, 1, t_0)}{v(1, 1, t_0)} \quad (4.17)$$

En combinant l'équation (4.7) et l'équation (4.17), nous obtenons l'équation suivante :

$$T(1, 1, t_0) = \frac{d(1, 1, t_0)}{v_f(1, 1, t_0) \left(1 - \frac{q(1, 1, t_0) \cdot T(1, 1, t_0)}{d(1, 1, t_0) \cdot k_{jam}(1, 1, t_0)}\right)} \quad (4.18)$$

Cette équation est une équation de seconde degré en temps T. Le discriminant de cette équation est donné par l'expression suivante :

$$\Delta = v_f(1, 1, t_0)^2 - 4 \cdot d(1, 1, t_0) \cdot \frac{v_f(1, 1, t_0) \cdot q(1, 1, t_0)}{k_{jam}(1, 1, t_0) \cdot d(1, 1, t_0)} \quad (4.19)$$

Compte tenu du signe positif de Δ , nous obtenons les deux solutions positives :

$$T_1(1, 1, t_0) = \frac{v_f(1, 1, t_0) + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot \frac{v_f(1, 1, t_0) \cdot q(1, 1, t_0)}{k_{jam}(1, 1, t_0) \cdot d(1, 1, t_0)}} \quad (4.20)$$

$$T_2(1, 1, t_0) = \frac{v_f(1, 1, t_0) - \sqrt{\Delta}}{2 \cdot \frac{v_f(1, 1, t_0) \cdot q(1, 1, t_0)}{k_{jam}(1, 1, t_0) \cdot d(1, 1, t_0)}} \quad (4.21)$$

En intégrant le temps t_0 correspondant au temps de départ du véhicule de sa position initiale, nous obtenons les deux valeurs possibles de temps pour se rendre à la station de recharge S_1 :

$$t_1 = t_0 + T_1(1, 1, t_0) \quad (4.22)$$

$$t_2 = t_0 + T_2(1, 1, t_0) \quad (4.23)$$

Par conséquent, nous obtenons deux valeurs de l'état de charge de la batterie SOC_f et deux valeurs de l'énergie consommée E_{cp} :

a – L'énergie consommée E_{cp1} durant le temps de parcours t_1 :

$$E_{cp1} = SOC_0(1, t_0) - SOC_f(1, 1, t_1) \quad (4.24)$$

b – L'énergie consommée E_{cp2} durant le temps de parcours t_2 :

$$E_{cp2} = SOC_0(1, t_0) - SOC_f(1, 1, t_2) \quad (4.25)$$

Les résultats obtenus pour les deux temps de parcours sont présentés dans le tableau suivant :

$T_1(1, 1, t_0)$	0.27h
$T_2(1, 1, t_0)$	0.038h
t_1	1.27h
t_2	1.038h
$SOC_f(1, 1, t_1)$	85.645
$SOC_f(1, 1, t_2)$	89.47
E_{cp1}	4.349kWh
E_{cp2}	0.528kWh

TABLE 4.7– Résultats de calcul de SOC_f et E_{cp} pour le couple (VE_1, S_1) et pour les deux valeurs t_1 et t_2

Étant données les deux valeurs possibles du temps de parcours $T(1, 1, t_0)$ et par conséquent deux valeurs de SOC_f , nous devons choisir la valeur à retenir pour le reste des calculs. Pour ce faire, nous effectuons les calculs pour différentes conditions de trafic (différentes valeurs de $q(1, 1, t_0)$). Le tableau 4.8 présente les résultats de ces calculs :

$q(1, 1, t_0)$ [veh/h]	2500	2300	2000	1700	1300	1000	800	600	400
$T_1(1, 1, t_0)$ [h]	0.1127	0.13	0.158	0.2	0.27	0.363	0.464	0.631	0.9655
$T_2(1, 1, t_0)$ [h]	0.0473	0.04	0.042	0.04	0.038	0.037	0.036	0.035	0.0345
$t_1(1, 1, t_0)$ [h]	1.1127	1.13	1.158	1.2	1.27	1.363	1.464	1.631	1.9655
$t_2(1, 1, t_0)$ [h]	1.0473	1.04	1.042	1.04	1.038	1.037	1.036	1.035	1.0345
$SOC_f(1, 1, t_1)$	86.213	86	85.84	85.7	85.65	85.74	85.92	86.31	87.204
$SOC_f(1, 1, t_2)$	88.467	88.7	88.96	89.2	89.47	89.66	89.78	89.89	89.996
E_{cp1} [kWh]	3.7868	3.96	4.159	4.29	4.349	4.26	4.077	3.689	2.7964
E_{cp2} [kWh]	1.5332	1.32	1.041	0.8	0.528	0.34	0.223	0.111	0.0036

TABLE 4.8– Résultats de calcul des paramètres SOC_f et E_{cp} pour le couple (VE_1, S_1) pour différentes conditions de trafic.

Nous constatons à partir du tableau 4.8 que les consommations d'énergie dans les conditions perturbées varient avec l'évolution du flux des véhicules sur l'itinéraire considéré.

La figure 4.6 montre la variation de la consommation d'énergie pour les deux cas E_{cp1} et E_{cp2} en fonction de $q(1, 1, t_0)$. Nous constatons à partir de cette figure que la consommation d'énergie est normalement proportionnelle au flux de véhicules pour le cas 2 (E_{cp2}). Cependant la consommation d'énergie est anormalement proportionnelle au flux de véhicules pour le cas 1 (E_{cp1}). En d'autres termes, pour le cas 2 (E_{cp2}) la consommation d'énergie augmente avec l'augmentation de flux de véhicules sur la route, ce qui correspond plus à la réalité. Tandis que pour le cas 1, la valeur de la consommation (E_{cp1}) diminue avec l'augmentation de flux de véhicules sur la route, ce qui est absurde.

Compte tenu de ces résultats, nous retenons l'équation (4.21) pour calculer le temps nécessaire pour chaque véhicule VE_i pour se rendre à la station de recharge S_j dans la suite de cette étude.

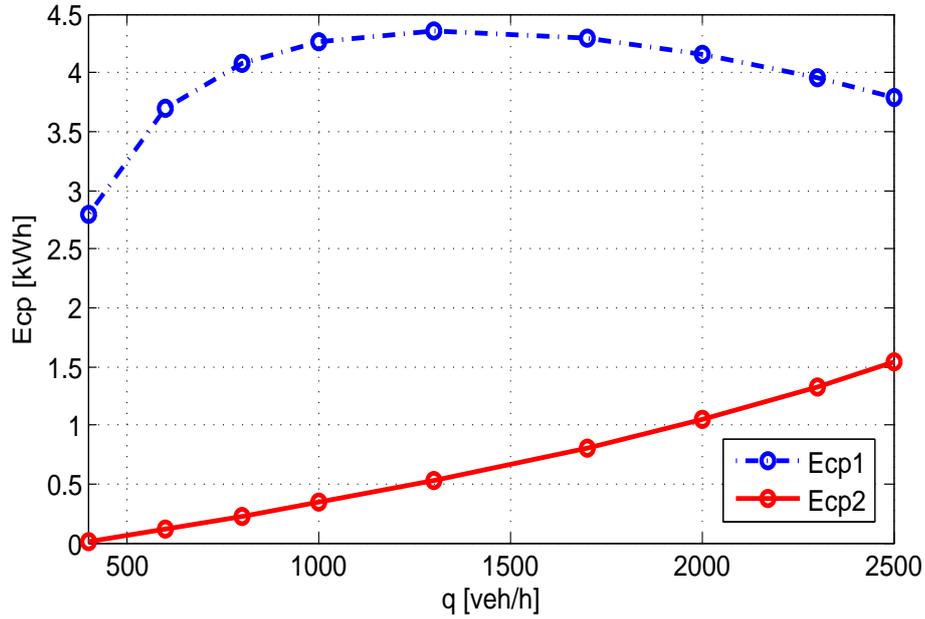


FIGURE 4.6– Variation E_{cp1} et E_{cp2} en fonction de $q(1, 1, t_0)$.

L'expression du temps de parcours donné par l'équation (4.20) sera donc écartée pour sa non conformité à la réalité.

2 – Calcul de SOC_f et E_{cp} pour l'ensemble des véhicules

Nous allons affecter les VE_i aux stations de recharge S_j dans les conditions perturbées. Pour ce faire, nous calculons les valeurs de $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ et de consommation d'énergie $E_{cp}(i, j, t + T(i, j, t))$, en considérant les données suivantes : $v_f = 60 km/h$, $k_{jam} = 200 veh/km$. A l'instant $t = t_0 = 1h$ chaque véhicule électrique est caractérisé par son état de charge SOC_0 et sa position par rapport à toutes les stations de recharge.

Le tableau suivant présente les calculs effectués pour VE_1 .

VE_1	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(1, j, t_0)[km]$	2	5	10	7
$SOC_0(1, t_0)$	70	70	70	70
$q(1, j, t_0)$ [veh/h]	1300	600	2000	1000
$E_{cn}(1, j, t_0)[kWh]$	0.2	0.5	1	0.7
$SOC_f(1, j, t_0 + T)$	68.9448	69.014	68.66	68.706
$E_{cp}(1, j, t_0)$ [kWh]	1.05515	0.9861	1.3397	1.2939

TABLE 4.9– Valeurs de SOC_f et E_{cp} obtenus pour le véhicule VE_1 .

Dans la figure 4.7, nous comparons les consommations d'énergie dans les conditions perturbées E_{cp}

et les conditions normales E_{cn} du véhicule VE_1 à destination de chaque station de recharge S_j pour ($j = 1, \dots, 4$).

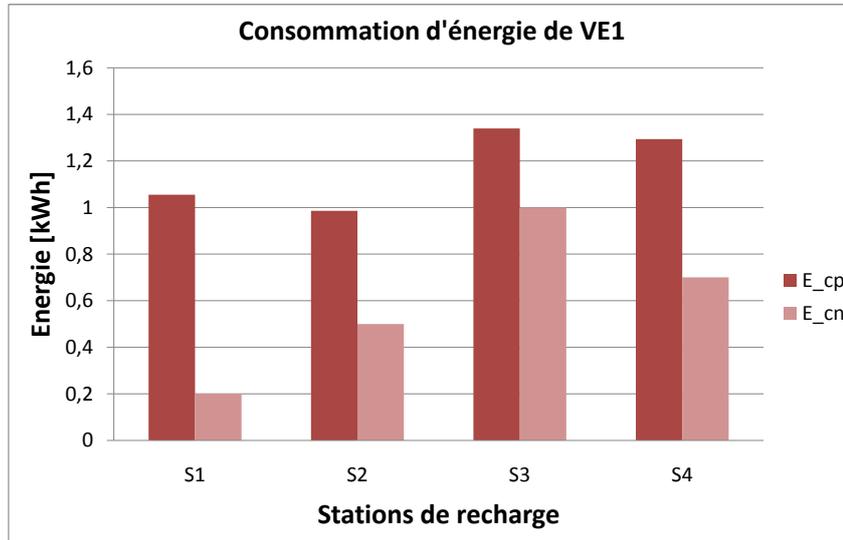


FIGURE 4.7– Comparaison de la consommation d’énergie E_{cn} et E_{cp} par VE_1 pour les différentes S_j .

A partir de cette figure, nous constatons que pour une circulation dans des conditions normales, la consommation d’énergie est moins importante que celle consommée pendant la circulation en conditions perturbées. Ce même constat est fait dans la figure 4.8 qui présente les variations des deux consommations E_{cp} et E_{cn} par le véhicule VE_1 en fonction des flux de véhicules $q(1, j, t_0)$. Nous pouvons aussi constater à partir de cette figure que le véhicule VE_1 peut se rendre à la station de recharge S_1 en consommant le minimum d’énergie dans les conditions normales. Tandis que dans les conditions perturbées, ce même véhicule (VE_1) consomme moins d’énergie pour se rendre à la station S_2 .

Nous étudions également, dans la figure 4.9, les variations des quantités d’énergie consommées E_{cp} et E_{cn} par le véhicule VE_1 en fonction des distances à parcourir $d(1, j, t_0)$.

De la figure 4.9, nous constatons ce qui suit :

- 1 – La consommation d’énergie E_{cn} est linéairement proportionnelle à la distance d parcourue ;
- 2 – La consommation d’énergie E_{cp} n’est pas en général linéairement proportionnelle à la distance parcourue puisque il y a d’autres paramètres qui perturbent le fonctionnement normal du système.

Nous nous limitons ici à la présentation des résultats obtenus pour le véhicule EV_1 . Le reste des résultats pour tous les véhicules, avec plus de détails, sont exposés en annexe B.

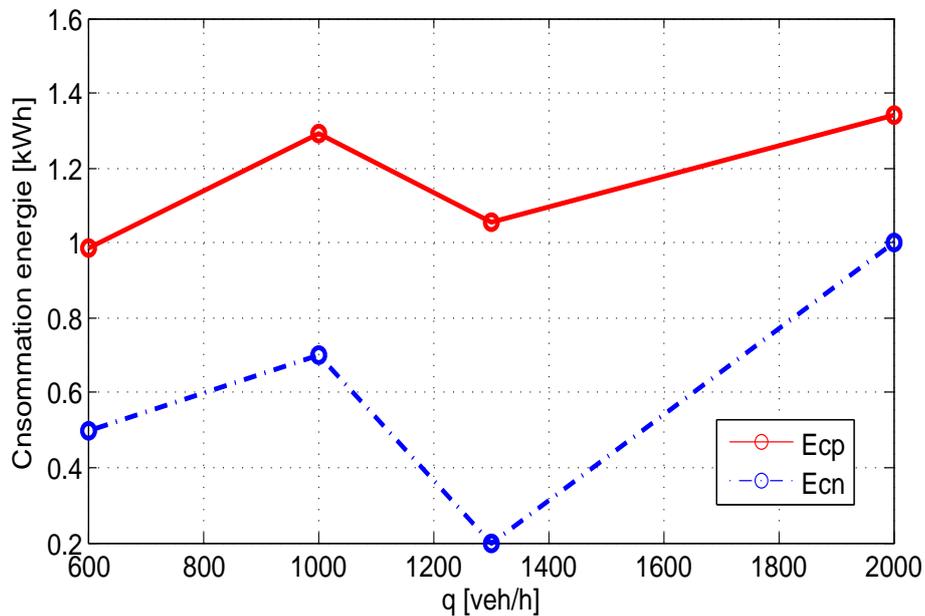


FIGURE 4.8— Évolution de la consommation d'énergie par le VE_1 en fonction du flux de véhicules dans les conditions normales et perturbées.

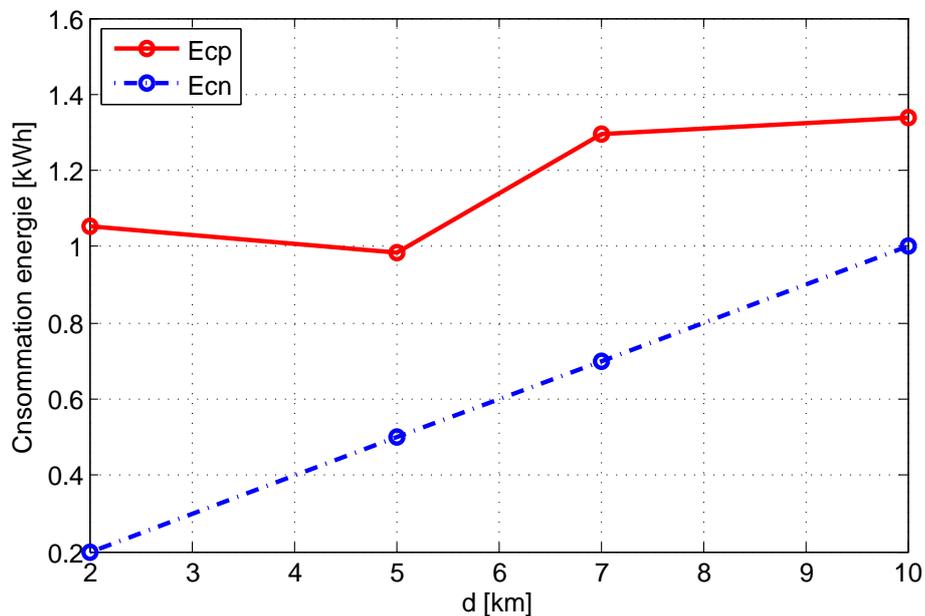


FIGURE 4.9— Variation de la consommation d'énergie E_{cp} et E_{cn} par VE_1 en fonction de la distance parcourue.

Sur la base des résultats obtenus, nous présentons dans ce qui suit un récapitulatif des valeurs des coefficients SOC_f et E_{cp} pour tous les véhicules VE_i (pour $i = 1, \dots, 6$) et toutes les stations de recharge S_j (pour $j = 1, \dots, 4$).

Paramètres des VE_i		S_1	S_2	S_3	S_4	
VE_1	$SOC_0(1, t_0) = 70$	$E_{cp}(1, j, t+T)$	1.05515	0.9861	1.3397	1.2939
		$SOC_f(1, j, t+T)$	68.9448	69.014	68.66	68.706
VE_2	$SOC_0(2, t_0) = 75$	$E_{cp}(2, j, t+T)$	3.873	3.2574	1.77124	2.6105
		$SOC_f(2, j, t+T)$	71.127	71.743	73.2288	72.389
VE_3	$SOC_0(3, t_0)=65$	$E_{cp}(3, j, t+T)$	2.99	0.7223	1.6588	5.7727
		$SOC_f(3, j, t+T)$	62	64.278	63.341	59.227
VE_4	$SOC_0(4, t_0)=60$	$E_{cp}(4, j, t+T)$	5	1.6877	4.5348	3.5936
		$SOC_f(4, j, t+T)$	55	58.312	55.4652	56.406
VE_5	$SOC_0(5, t_0)=66$	$E_{cp}(5, j, t+T)$	1.3927	0.7223	0.7061	2.2263
		$SOC_f(5, j, t+T)$	64.607	65.278	65.294	63.774
VE_6	$SOC_0(6, t_0) = 53$	$E_{cp}(6, j, t+T)$	1.5117	1.9177	5.2737	2.4665
		$SOC_f(6, j, t+T)$	51.488	51.082	47.7263	50.534

TABLE 4.10– Résultats de calcul des coefficients d'affectation SOC_f et de consommation E_{cp} pour l'ensemble des véhicules.

Pour une illustration graphique, nous représentons les résultats obtenus dans la figure 4.10.

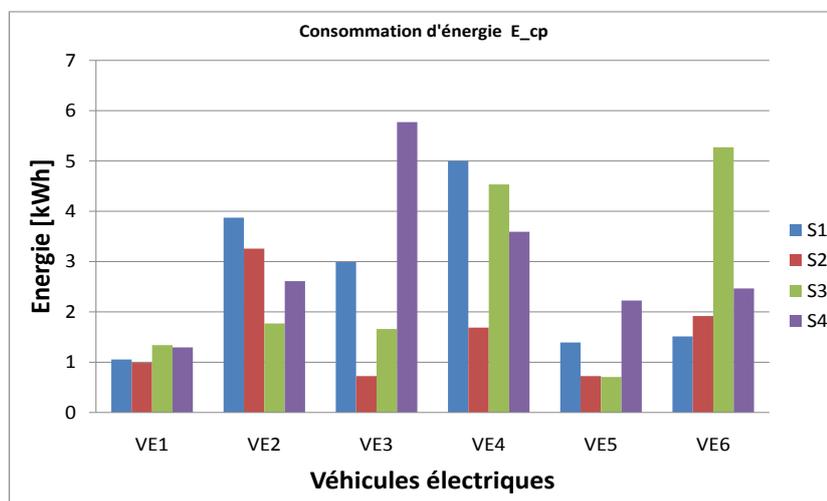


FIGURE 4.10– La consommation d'énergie E_{cp} pour chaque couple (VE_i, S_j) .

Cette figure montre les consommations d'énergie dans les conditions perturbées $E_{cp}(i, j, t+T(i, j, t))$ par tous les véhicules. Nous constatons que les quantités d'énergie consommées par les véhicules VE_1 , VE_3 et VE_4 atteignent leurs valeurs minimales pour se rendre à la station de recharge S_2 . Mais compte tenu de la capacité de cette station de recharge, seuls deux véhicules peuvent être affectés en même temps

à cette station. Nous devons donc choisir les deux véhicules consommant le moins d'énergie pour se rendre à cette station.

Nous procédons de la même manière pour illustrer graphiquement l'état de charge SOC_f de chaque véhicule au moment de son arrivée à chaque station de recharge.

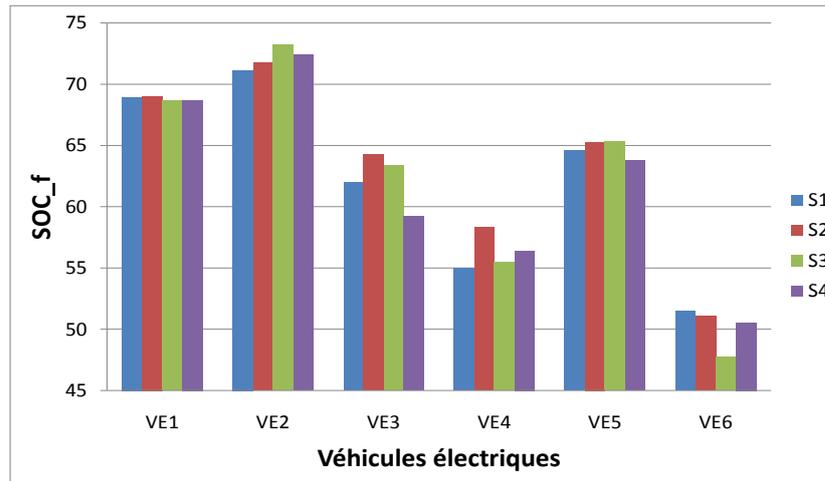


FIGURE 4.11– L'état de charge SOC_f de chaque véhicule VE_i à son arrivée à chaque station S_j .

Après avoir calculé les valeurs des coefficients SOC_f pour tous les véhicules, nous pouvons en déduire la matrice d'affectation pour ce deuxième cas (voir le tableau 4.11)

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4
VE_1	68,9448	69,014	68,66	68,706
VE_2	71,127	71,743	73,2288	72,389
VE_3	62,01	64,278	63,341	59,227
VE_4	55	58,312	55,4652	56,406
VE_5	64,6073	65,278	65,294	63,774
VE_6	51,488	51,082	47,7263	50,534

TABLE 4.11– Coefficients d'affectation des VEs aux stations de recharges

Une fois cette matrice d'affectation obtenue, nous appliquons un algorithme d'optimisation pour obtenir la solution optimale correspondant à la meilleure affectation de chaque véhicule.

Le tableau 4.12 représente une matrice binaire dans laquelle les "1" correspondent aux meilleures affectations trouvées, et les "0" correspondent aux affectations non retenues.

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4
VE_1	0	0	0	1
VE_2	0	0	1	0
VE_3	0	1	0	0
VE_4	0	1	0	0
VE_5	0	0	1	0
VE_6	1	0	0	0
n_j	1	2	2	2

TABLE 4.12– Matrice des affectations retenues et non retenues.

Compte tenu de la matrice des affectations retenues (tableau 4.12), les états de charge des batteries des VEs aux moments de leurs arrivées aux stations de recharge auxquelles ils sont affectés sont donnés (en gris) dans le tableau 4.13 .

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4
VE_1	68,9448	69,014	68,66	68,706
VE_2	71,127	71,743	73,2288	72,389
VE_3	62,01	64,278	63,341	59,227
VE_4	55	58,312	55,4652	56,406
VE_5	64,6073	65,278	65,294	63,774
VE_6	51,488	51,082	47,7263	50,534
n_j	1	2	2	2

TABLE 4.13– Valeurs optimales des coefficients d'affectation pour un moment donné.

Le récapitulatif des affectations retenues est donné dans le tableau suivant :

Station de recharge	S_1	S_2	S_3	S_4		
Nombre de VE à charger simultanément	1	2	2	2		
Nombre de VE affectés	1	2	2	1		
Les VE affectés	VE_6	VE_3	VE_4	VE_2	VE_5	VE_1
SOC_f	51,49	64,28	58,31	73,23	65,29	68,71

TABLE 4.14– Résultats de l'affectation optimale.

Nous constatons, à partir de ces résultats, que :

- a) Le but global de l'affectation est atteint,

- b) Le nombre de VEs autorisés simultanément dans chaque station de recharge n'est pas dépassé,
- c) Chaque affectation est réalisée avec la valeur maximale de SOC_f ,
- d) Tous les véhicules électriques sont affectés et chacun est affecté à une seule station de recharge.

4.5.3 Comparaison des résultats obtenus

Dans cette section, nous comparons les résultats des affectations optimales obtenus dans les deux cas considérés. Le cas des conditions normales, et le cas des conditions perturbées.

Station de recharge	S_1	S_2	S_3	S_4
Nombre de VEs autorisé en même temps	1	2	2	2
Nombre de VEs affectés	1	2	2	1
Les VE affectés dans les conditions normales	VE_1	VE_2 et VE_6	VE_3 et VE_5	VE_4
Les VE affectés dans les conditions perturbées	VE_6	VE_3 et VE_4	VE_2 et VE_5	VE_1

TABLE 4.15– Affectation optimale dans les deux cas étudiés.

Dans ce tableau, nous remarquons que l'affectation optimale des véhicules électriques aux stations de recharge adéquates est différente pour les deux cas. Par exemple, le VE_1 est affecté, dans les conditions normales, à la station de recharge S_1 , alors que dans les conditions perturbées il est affecté à la station S_4 et ainsi pour les autres véhicules.

Dans ce qui suit nous continuons cette phase de validation de l'approche proposée avec un système de grande taille avec des composants ayant des caractéristiques différentes.

4.6 Passage à l'échelle avec un système à composantes hétérogènes

Dans cette étude d'extension, nous considérons un nombre important de VEs et de stations de recharge possédant des caractéristiques et des technologies différentes. Plus précisément, d'une part nous considérons des VEs de différentes marques et différents modèles, donc de besoins variés. Et d'autre part, des stations de recharge avec différentes puissances de recharge (lente, rapide). Dans cette étude, nous nous limitons au problème d'affectation des VEs aux stations de recharge dans des conditions perturbées évoquées précédemment. Une autre contrainte majeure dans cette étude consiste à veiller à ce que le niveau des batteries au moment de l'arrivée des VEs aux stations de recharge ne dépasse pas le seuil minimal défini par les constructeurs. Le système à étudier est composé de :

- a) $n = 18$ véhicules électriques ($EV_1, EV_2, \dots, EV_{18}$);
- b) $m = 7$ stations de recharge (S_1, S_2, \dots, S_7);
- c) $R = 4$ stations avec des bornes de recharge rapides (50kW DC) (S_1, S_2, S_3, S_4)

- d) $L = 3$ stations avec des bornes de recharge lentes (230V Mono-16A)(3kW))(S_5, S_6, S_7)
- e) Le nombre de points de recharge dans chaque station de recharge est donné : $n_1 = 1, n_2 = n_3 = n_4 = 2, n_5 = 4, n_6 = 3, n_7 = 5$;
- f) Les significations des autres paramètres définis dans le cas précédent restent les mêmes pour ce deuxième cas tels que les distances $d(i, j, t)$ séparant les positions des VEs (VE_i) et les stations de recharge (S_j), L'état de charge initial $SOC_0(i, t)$ de chaque VE, la temps de début des calculs $t_0 = 1h$, etc..

Les marques et les modèles des véhicules électriques considérés dans cette étude sont donnés dans le tableau 4.16.

VE	Marque de VE	Modèle de VE
$VE_3, VE_6, VE_9, VE_{12}, VE_{15}, VE_{18}$	Heuliez	MIA ELECTRIC
VE_2, VE_{10}, VE_{16}	Citroën	Citroën C-ZERO
VE_1, VE_{17}	Renault	TIWIZY
VE_4, VE_{11}, VE_{14}	Peugeot	Peugeot ion
$VE_5, VE_7, VE_8, VE_{13}$	Peugeot	Peugeot Partner Electrique Venturi

TABLE 4.16– Marques et modèles des VEs considérés dans l'étude

Les caractéristiques de ces véhicules sont illustrées dans le tableau 4.17, plus de détails sur ces véhicules sont exposés en annexe A.

Modèle de VE	$C_n[kWh]$	A [km]	Topologie de la batterie	SOC_{min}
MIA ELECTRIC	8	80	LiFePO4	30
Citroën C-ZERO	16,3	130	Li-Ion	20
TIWIZY	7	100	Li-Ion	20
Peugeot ion	16,3	130	Li-Ion	20
Peugeot Partner Electrique Venturi	23,5	120	Zebra	0

TABLE 4.17– Caractéristiques des VEs considérés dans l'étude

Nous contraignons le problème par ce qui suit :

- a) Affecter les véhicules de modèles Citroën C-ZERO et Peugeot ion aux stations de recharge rapide ;
- b) Affecter les véhicules de modèles MIA ELECTRIC, TIWIZY et Peugeot Partner Electrique Venturi aux stations de recharge lente.

Le tableau 4.18 récapitule ces contraintes et ces choix d'affectation.

VE	Marque de VE	Modèle de VE	Mode de recharge
VE_3, VE_6, VE_9 $VE_{12}, VE_{15}, VE_{18}$	Heuliez	MIA ELECTRIC	Recharge lente
VE_2, VE_{10}, VE_{16}	Citroën	Citroën C-ZERO	Recharge rapide
VE_1, VE_{17}	Renault	TIWIZY	Recharge lente
VE_4, VE_{11}, VE_{14}	Peugeot	Peugeot ion	Recharge rapide
VE_5, VE_7 VE_8, VE_{13}	Peugeot	Peugeot Partner Electrique Venturi	Recharge lente

TABLE 4.18– Contraintes d'association des VEs aux stations de recharge

En considérant ces différents modèles des VEs et des stations de recharge, l'objectif à atteindre est double. D'une part, affecter chaque modèle de VE à une station de recharge de manière adéquate. Et d'autre part effectuer cette affectation de façon à garder l'état de charge de la batterie du VE, à sa destination, à son plus haut niveau possible, et ne pas dépasser le seuil minimum défini par le fabricant de la batterie SOC_{min} comme illustré dans le tableau 4.17.

Dans ce cas étendu avec plus de contraintes, la fonction objectif du programme linéaire du problème reste identique à celle donnée dans l'équation 4.13. Comme nous allons le remarquer par la suite, la modification interviendra au niveau des contraintes.

4.6.1 Formalisation des contraintes du problème dans le cas étendu

- 1 – Pour $i \in I$ (I : l'ensemble des VEs qui nécessitent une recharge rapide), et à un instant donné t :

$$\sum_{j=1}^R x(i, j, t) = 1 \quad (4.26)$$

Cette équation exprime la contrainte d'affectation de chaque véhicule à une seule station de recharge rapide.

- 2 – Pour $i \in J$ (J : l'ensemble des VEs qui nécessitent une recharge lente), et à un instant donné t :

$$\sum_{j=R+1}^L x(i, j, t) = 1 \quad (4.27)$$

Cette équation exprime la contrainte d'affectation de chaque véhicule à une seule station de recharge lente.

- 3 – Pour $j = 1, \dots, m$, et à un instant donné t est :

$$\sum_{i=1}^n x(i, j, t) \leq n_j \quad (4.28)$$

Cette équation exprime le fait qu'une station de recharge peut recevoir jusqu'à n_j véhicules en même temps.

- 4 – Pour $i = 1, \dots, n$, et pour $j = 1, \dots, m$, et à un instant donné t :

$$SOC_f(i, j, t + T(i, j, t)) \geq SOC_{min}(i). \quad (4.29)$$

Cette équation modélise le fait que l'état de charge de chaque batterie SOC_f ne doit pas dépasser le seuil minimum SOC_{min} défini par le constructeur.

4.6.2 Calcul de SOC_f et E_{cp} pour l'ensemble des véhicules

Pour affecter les VEs aux stations de recharge adéquates S_j dans les conditions perturbées, nous calculons les valeurs de $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ pour tous les véhicules par l'équation (4.10) et de consommation d'énergie $E_{cp}(i, j, t + T(i, j, t))$ pour l'ensemble des véhicules VEs. Pour ce faire, nous considérons les données suivantes : $v_f = 60km/h$, $k_{jam} = 200veh/km$. A l'instant $t = t_0 = 1h$ chaque véhicule électrique est caractérisé par son état de charge SOC_0 . Le tableau 4.19 présente les différentes données du système.

Données VE_i/S_j			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
VE_1	$SOC_0(1, t_0) = 25$	$d(1, j, t_0)$	2	5	10	7	3	4	1
		$q(1, j, t_0)$	1300	600	800	1800	1400	1500	800
VE_2	$SOC_0(2, t_0) = 27$	$d(2, j, t_0)$	10	4	7	6	2	6,7	8
		$q(2, j, t_0)$	1200	2000	1700	1800	900	1900	2550
VE_3	$SOC_0(3, t_0)=40$	$d(3, j, t_0)$	10	5	3	7	6	8	12
		$q(3, j, t_0)$	1350	1200	1500	2400	2300	2500	1500
VE_4	$SOC_0(4, t_0)=33$	$d(4, j, t_0)$	10	7	9	4	2,4	3,2	8
		$q(4, j, t_0)$	1000	900	800	2100	600	1200	720
VE_5	$SOC_0(5, t_0)=20$	$d(5, j, t_0)$	2	5	3	9	2,4	7	11
		$q(5, j, t_0)$	1550	1200	1000	2000	450	900	2350
VE_6	$SOC_0(6, t_0) = 34$	$d(6, j, t_0)$	4	2	10	6,5	1	12	3
		$q(6, j, t_0)$	1400	1900	950	1800	300	1500	800
VE_7	$SOC_0(7, t_0) = 50$	$d(7, j, t_0)$	1	2	3	5	8	14	11
		$q(7, j, t_0)$	1500	1200	1100	1300	1250	800	700
VE_8	$SOC_0(8, t_0) = 34$	$d(8, j, t_0)$	5,5	2,3	8,7	6,5	10	15	12
		$q(8, j, t_0)$	1400	1000	1050	1800	1340	1455	700
VE_9	$SOC_0(9, t_0)=55$	$d(9, j, t_0)$	3	2,4	3,8	7	9	5,5	12
		$q(9, j, t_0)$	1100	1000	1400	2000	800	500	700
VE_{10}	$SOC_0(10, t_0)=24$	$d(10, j, t_0)$	7	8	9	13	5	4	3
		$q(10, j, t_0)$	1000	1200	2200	1800	1300	1200	800
VE_{11}	$SOC_0(11, t_0)=30$	$d(11, j, t_0)$	9	4,4	6,8	8	7,5	2	14
		$q(11, j, t_0)$	2100	1000	800	2000	950	450	1100
VE_{12}	$SOC_0(12, t_0) = 39$	$d(12, j, t_0)$	7,6	5	1	6,4	14	12	10
		$q(12, j, t_0)$	1000	1200	2200	1800	1700	1430	1600
VE_{13}	$SOC_0(13, t_0)=28$	$d(13, j, t_0)$	4	5	7	6,1	3	9	10
		$q(13, j, t_0)$	900	1200	800	2000	700	1000	1200
VE_{14}	$SOC_0(14, t_0)=22$	$d(14, j, t_0)$	6	5,7	10	8	2	3	1
		$q(14, j, t_0)$	1400	900	2300	1800	400	500	200
VE_{15}	$SOC_0(15, t_0) = 40$	$d(15, j, t_0)$	4	11	7	6,1	5	2	9,7
		$q(15, j, t_0)$	900	1200	800	2000	1920	600	950
VE_{16}	$SOC_0(16, t_0)=30$	$d(16, j, t_0)$	3	1,7	11	4	10	8,4	7,2
		$q(16, j, t_0)$	1300	1100	2500	1500	400	750	480
VE_{17}	$SOC_0(17, t_0)=23$	$d(17, j, t_0)$	2,3	8	5	9	7	13	1
		$q(17, j, t_0)$	400	1200	800	2000	1400	800	200
VE_{18}	$SOC_0(18, t_0) = 39$	$d(18, j, t_0)$	13	17	11	15	7	5	3
		$q(18, j, t_0)$	900	1500	700	1200	1750	800	400

TABLE 4.19– Données du système

A partir de ces données, nous calculons la consommation d'énergie E_{cp} pour l'ensemble des véhicules VE_i (pour $i = 1, \dots, 18$) et pour l'ensemble des stations de recharge S_j (pour $j = 1, \dots, 7$). Les résultats de calcul obtenus sont exposés dans le tableau suivant :

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
VE_1	0,7386	0,6903	4,2542	1,5868	1,02	1,2442	0,2289
VE_2	4,8561	4,0843	2,2209	3,2732	0,705	3,6216	8,641
VE_3	2,9904	0,7223	1,6588	5,7727	5,07774	6,4574	5,09117
VE_4	6,2692	2,1162	5,686	4,5057	0,2107	1,3477	4,4410
VE_5	2,7274	1,4145	1,3827	4,3599	0,0505	3,3052	6,5264
VE_6	1,5117	1,9177	5,2737	2,4665	0,0526	5,0912	0,358
VE_7	1,50811	1,8154	1,7359	2,0212	2,2695	28,0531	16,4420
VE_8	2,3291	1,3913	5,7134	4,8302	5,9735	22,8008	20,3647
VE_9	0,8864	0,7161	1,5181	3,3192	4,53482	1,6563	10,3989
VE_{10}	1,6224	1,7513	4,5962	5,6025	1,2941	1,2579	0,4489
VE_{11}	3,67126	0,4871	2,3477	3,6188	2,4968	0,0754	15,2201
VE_{12}	1,8839	0,7223	1,3349	2,4998	7,26726	5,5985	1,4352
VE_{13}	0,5658	1,4145	4,0595	6,8835	0,3717	6,9610	7,5846
VE_{14}	1,22136	0,7528	4,7217	2,1323	0,0089	0,1709	0,0011
VE_{15}	0,2889	5,4301	2,0729	3,5150	3,1875	0,2223	4,8107
VE_{16}	1,5818	0,9227	6,1258	2,2287	10,1653	4,9316	4,3805
VE_{17}	0,04341	0,97774	0,30937	1,5584	0,2673	8,3661	0,0006
VE_{18}	11,2812	16,4417	8,3959	13,7858	2,0167	0,4419	0,2946

TABLE 4.20– Consommation d'énergie E_{cp} pour l'ensemble des véhicules.

Pour une illustration graphique, nous représentons les résultats obtenus par la figure 4.12. Cette figure montre les consommations d'énergie dans les conditions perturbées $E_{cp}(i, j, t + T(i, j, t))$ par tous les véhicules.

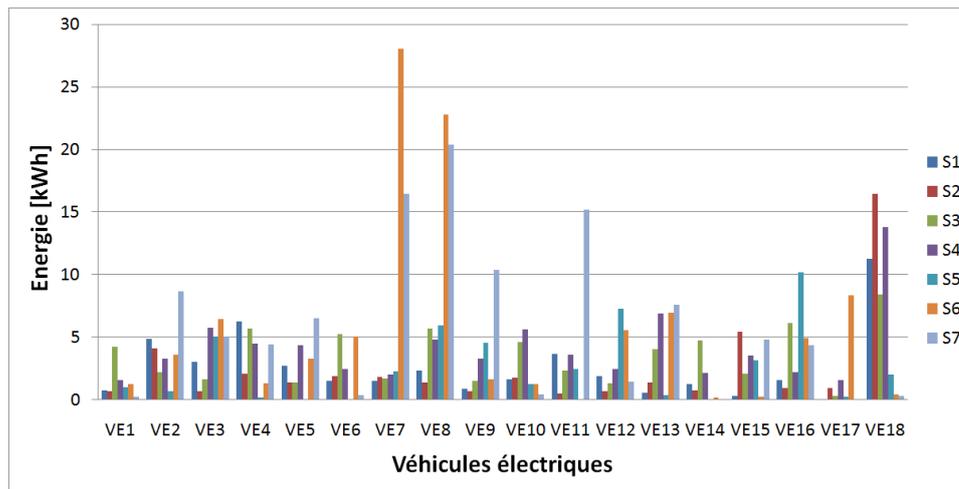


FIGURE 4.12– La consommation d'énergie E_{cp} pour chaque couple (VE_i, S_j) .

En utilisant l'équation (4.10), nous calculons les valeurs de SOC_f de tous les véhicules. Nous présentons dans ce qui suit un récapitulatif des valeurs des coefficients SOC_f pour chaque véhicule VE_i (pour $i = 1, \dots, 18$) pour atteindre la station de recharge S_j (pour $j = 1, \dots, 7$).

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
VE_1	24.2614	24.31	20.746	23.413	23.98	23.756	24.771
VE_2	22.144	22.915	24.78	23.73	26.3	23.38	18.36
VE_3	37.01	39.2777	38.3421	34.2273	34.922	33.5426	34.909
VE_4	26.73	30.88	27.314	28.5	32.789	31.652	28.56
VE_5	17.2726	18.5855	18.617	15.64	19.95	16.695	13.474
VE_6	32.5	32.1	28.726	31.5335	33.947	28.908	33.642
VE_7	48.492	48.185	48.2641	47.979	47.731	21.947	33.558
VE_8	31.6708	32.6086	28.2865	29.1697	28.0265	11.1991	13.635
VE_9	54.1135	54.284	53.482	51.681	50.465	53.344	44.601
VE_{10}	22.3776	22.2486	19.4038	18.3974	22.7059	22.7421	23.551
VE_{11}	26.33	29.513	27.652	26.381	27.5	29.925	14.779
VE_{12}	37.1161	38.278	37.665	36.5	31.7327	33.401	37.565
VE_{13}	27.434	26.5855	23.94	21.1165	27.628	21.04	20.415
VE_{14}	20.778	21.247	17.278	19.8677	21.991	21.829	21.999
VE_{15}	39.711	34.57	37.93	36.485	36.812	39.778	35.19
VE_{16}	28.418	29.077	23.874	27.771	19.8347	25.0684	25.62
VE_{17}	22.956	22.022	22.691	21.442	22.733	14.634	23
VE_{18}	27.7188	22.5583	30.604	25.2142	36.9832	38.558	38.705

TABLE 4.21– Résultats de calcul des coefficients d'affectation SOC_f pour l'ensemble des véhicules.

Pour une illustration graphique, nous pouvons représenter les résultats obtenus par la figure 4.13

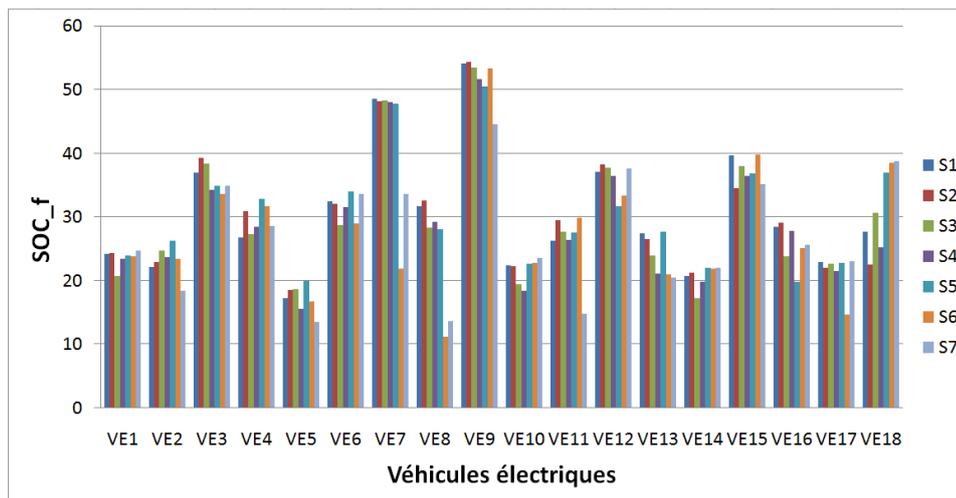


FIGURE 4.13– L'état de charge SOC_f pour chaque couple (VE_i, S_j) .

4.6.3 Résultats d'affectations optimales retenues

Une fois la matrice d'affectation est calculée, nous appliquons l'algorithme d'optimisation adopté pour obtenir la solution optimale correspondant à la meilleure affectation de chaque véhicule. Ainsi, les

affectations retenues, compte tenu des contraintes du système, et les caractéristiques de ses composantes sont représentées (en gris) dans le tableau 4.22.

VE_i/S_j	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	
VE_1	24.2614	24.31	20.746	23.413	23.98	23.756	24.771	
VE_2	22.144	22.915	24.78	23.73	26.3	23.38	18.36	
VE_3	37.01	39.2777	38.3421	34.2273	34.922	33.5426	34.909	
VE_4	26.73	30.88	27.314	28.5	32.789	31.652	28.56	
VE_5	17.2726	18.5855	18.617	15.64	19.95	16.695	13.474	
VE_6	32.5	32.1	28.726	31.5335	33.947	28.908	33.642	
VE_7	48.492	48.185	48.2641	47.979	47.731	21.947	33.558	
VE_8	31.6708	32.6086	28.2865	29.1697	28.0265	11.1991	13.635	
VE_9	54.1135	54.284	53.482	51.681	50.465	53.344	44.601	
VE_{10}	22.3776	22.2486	19.4038	18.3974	22.7059	22.7421	23.551	
VE_{11}	26.33	29.513	27.652	26.381	27.5	29.925	14.779	
VE_{12}	37.1161	38.278	37.665	36.5	31.7327	33.401	37.565	
VE_{13}	27.434	26.5855	23.94	21.1165	27.628	21.04	20.415	
VE_{14}	20.778	21.247	17.278	19.8677	21.991	21.829	21.999	
VE_{15}	39.711	34.57	37.93	36.485	36.812	39.778	35.19	
VE_{16}	28.418	29.077	23.874	27.771	19.8347	25.0684	25.62	
VE_{17}	22.956	22.022	22.691	21.442	22.733	14.634	23	
VE_{18}	27.7188	22.5583	30.604	25.2142	36.9832	38.558	38.705	
n_j	1	2	2	2	4	3	5	
	recharge rapide				recharge lente			

TABLE 4.22– Valeurs optimales des coefficients d'affectation SOC_f pour un moment donné.

La figure 4.14 présente les valeurs optimales des coefficients d'affectation (SOC_f) des VEs aux stations de recharge. Par des codes couleurs, cette figure représente également l'affectation optimale pour l'ensemble des VEs aux stations de recharge adéquates dans les conditions perturbées.

Nous pouvons également comparer les valeurs optimales de $SOC_f(i, j, t + T(i, j, t))$ avec les valeurs de SOC_{min} définies par les constructeurs pour tous les véhicules afin de vérifier la satisfaction de cette contrainte. Cette comparaison est représentée dans le tableau 4.24.

	VE_1	VE_2	VE_3	VE_4	VE_5	VE_6	VE_7	VE_8	VE_9	VE_{10}	VE_{11}	VE_{12}	VE_{13}	VE_{14}	VE_{15}	VE_{16}	VE_{17}	VE_{18}
SOC	24.77	24.78	34.9	30.88	19.95	33.64	47.73	28.03	53.34	22.37	27.65	37.65	27.63	21.25	39.78	27.77	23	38.56
SOC_{min}	20	20	30	20	0	30	0	0	30	20	20	30	0	20	30	20	20	30

TABLE 4.23– Valeurs optimales de SOC_f et valeurs de SOC_{min} pour l'ensemble des véhicules.

Pour une illustration graphique, nous représentons les valeurs optimales de SOC_f et SOC_{min} pour tous les véhicules par la figure 4.15.

Cette figure montre que les valeurs optimales de SOC_f (correspondant aux affectations retenues) ne

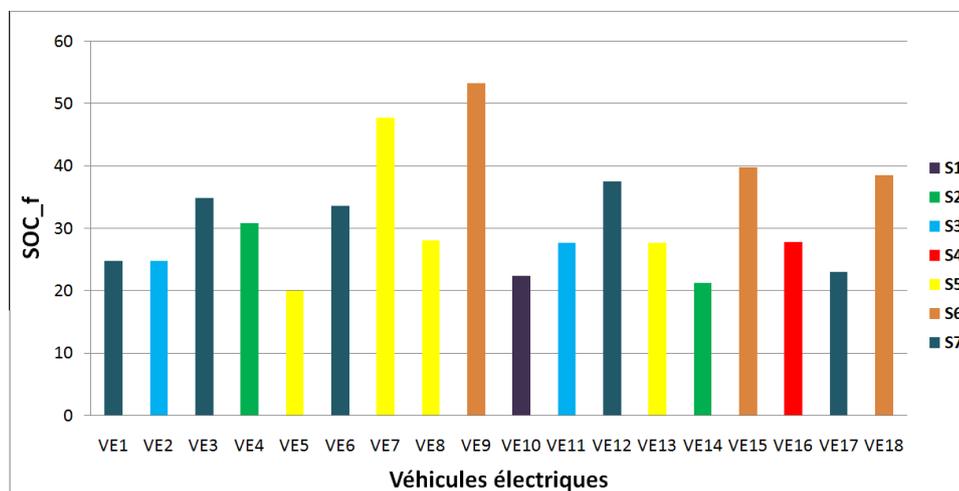


FIGURE 4.14– Les valeurs optimales de SOC_f pour chaque couple (VE_i, S_j) .

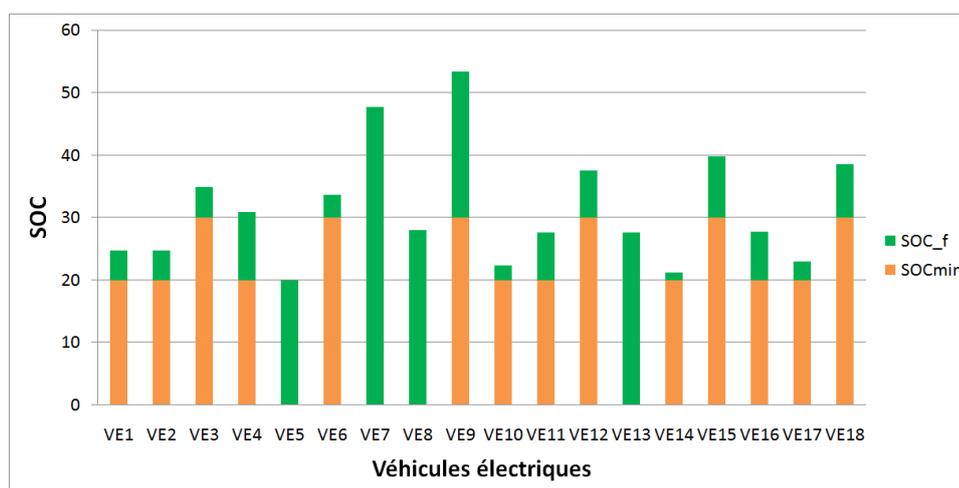


FIGURE 4.15– Comparaison des valeurs optimales de SOC_f et SOC_{min} pour chaque couple (VE_i, S_j) .

dépassent pas les valeurs de SOC_{min} pour tous les véhicules. On rappelle que les véhicules de modèle Peugeot Partner Electrique Venturi ($VE_5, VE_7, VE_8, VE_{13}$) ont des batteries Zebra qui peuvent être déchargées complètement sans être endommagées.

Le récapitulatif de ces résultats est donné dans le tableau suivant :

	Recharge rapide				Recharge lente													
S_j	S1	S2	S3	S4	S5					S6			S7					
Nombre de VE à charger	1	2	2	2	4					3			5					
Nombre de VE affectés	1	2	2	1	4					3			5					
Les VE affectés	VE_{10}	VE_4	VE_{14}	VE_2	VE_{11}	VE_{16}	VE_5	VE_7	VE_8	VE_{13}	VE_9	VE_{15}	VE_{18}	VE_1	VE_3	VE_6	VE_{12}	VE_{17}
SOC_f	22.37	30.88	21.25	24.78	27.65	27.77	19.95	47.73	28.03	27.63	53.34	39.78	38.56	24.77	34.9	33.64	37.65	23
SOC_{min}	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0	30	30	30	20	30	30	30	20

TABLE 4.24– Résultats d’affectation optimale.

Ces résultats montrent que toutes les contraintes du problème sont satisfaites :

- a) Le but global d’une meilleure affectation de tous les VEs est atteint
- b) Le nombre de VEs autorisés dans chaque station de charge n’est pas dépassé
- c) Chaque VE est affecté à une et une seule station de recharge
- d) Les VEs du modèle Citroën C-ZERO (VE_2, VE_{10}, VE_{16}) et du modèle Peugeot ion (VE_4, VE_{11}, VE_{14}) sont affectés aux stations de recharge rapide comme exprimé dans les contraintes.
- e) Les VEs (TIWIZY, MIA ELECTRIC et Peugeot Partner Electrique Venturi) sont affectés aux stations de recharge lente conformément aux contraintes du problème
- f) Pour chaque affectation, le SOC_f ne dépasse pas le seuil minimal défini par le constructeur SOC_{min} .
- g) Chaque affectation est réalisée avec la valeur maximale du paramètre SOC_f .

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une étude d’optimisation et de gestion des affectations des véhicules électriques aux stations de recharge. Pour ce faire, nous avons formalisé le problème par un programme mathématique linéaire avec un objectif à atteindre et des contraintes à satisfaire.

La solution proposée par cette approche est basée sur les quantités d’énergie nécessaires aux véhicules pour atteindre les stations de recharge. En effet, la meilleure affectation d’un véhicule correspond au minimum d’énergie consommée pour se rendre à une station de recharge. L’état de charge (SOC_f) de la batterie du véhicule à son arrivée à la station de recharge doit être au plus haut niveau possible. Ceci permet de réduire le temps de recharge, et par conséquent, le temps d’occupation de la station.

Dans un premier temps, nous avons abordé ce problème d’affectation des véhicules, ayant les mêmes caractéristiques, aux stations de recharge fournissant le même service (c’est à dire avec des caractéristiques identiques) dans les deux cas de figure suivants :

- un système de recherche avec des conditions normales (trafic fluide, itinéraires avec faibles pentes, faible utilisation des accessoires électriques, etc.),
- un système de recharge avec des conditions perturbées (circulation non fluide, itinéraires avec de fortes pentes, profils de vitesse non constants, utilisation excessive des accessoires électriques, etc.).

Pour chacun de ces cas, nous avons obtenu une affectation optimale et adéquate. Toutefois, les résultats obtenus ne sont pas les mêmes pour les deux cas étudiés. L'approche proposée est illustrée par un exemple numérique et les résultats obtenus montrent que l'objectif souhaité est atteint avec la satisfaction de toutes les contraintes.

Ensuite, nous avons étendu cette étude d'affectation à un système de recharge avec de véhicules VEs de différentes marques et différents modèles, et des stations de recharge avec différentes puissances de recharge (lente, rapide). Dans ce cas, nous avons intégré une autre contrainte majeure consistant à veiller à ce que le SOC des batteries au moment d'arrivée des VEs aux stations de recharge ne dépasse pas le seuil minimal défini par les constructeurs. Dans ce deuxième cas, nous nous sommes limités au problème d'affectation des VEs dans un système de recharge de grande taille et qui fonctionne sous des conditions perturbées. Le problème est représenté par un modèle mathématique, et les résultats obtenus prouvent l'existence d'une affectation optimale tout en respectant toutes les contraintes du système.

Comme perspectives de ce problème d'affectation, on peut envisager d'affecter des véhicules électriques, non plus à recharger, mais à décharger à des stations de décharge. Dans ce cas, les batteries des VEs sont considérées comme moyens de stockage d'énergie électrique. L'énergie stockée dans les batteries des véhicules pourrait être réinjectée dans les stations de recharge (réseau électrique) dans le cas où la demande d'énergie est supérieure à l'offre. Dans cette perspective, en plus des contraintes considérées dans ce chapitre, on peut tenir compte de la quantité d'énergie à décharger par chaque véhicule selon ses besoins. L'objectif principal à atteindre est d'assurer une stabilité énergétique du réseau électrique en cas de déséquilibre tous en gardant le fonctionnement normal des VEs.

Conclusions et perspectives

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à l'étude d'un système de recharge de véhicules électriques. Ce travail est divisé en deux axes principaux :

- Modélisation et dimensionnement d'un système de recharge de véhicules électriques à l'aide de l'énergie solaire. Le système de recharge est constitué de panneaux photovoltaïques, de pack des batteries stationnaires de stockage d'énergie, de pack de batteries de traction embarquées dans le véhicule électrique et de convertisseurs de puissance. La modélisation a permis de décrire et de simuler le comportement de chaque élément du système. Tandis que l'étude de dimensionnement a permis de déterminer, selon un cahier des charges défini, la quantité des modules photovoltaïques, le pack de batteries au plomb et le pack de batteries Li-Ion permettant de produire l'énergie nécessaire pour propulser un véhicule électrique.

- Gestion et affectation optimale d'une flotte de véhicules électriques pour les opérations de recharge. Le problème de planification et d'affectation d'un ensemble de VEs aux stations de recharge est étudié. Le problème est modélisé par un programme mathématique linéaire intégrant un ensemble de contraintes. Ces contraintes sont liées principalement aux caractéristiques des VEs, des infrastructures routières, des stations de recharge. Les résultats obtenus ont prouvé la pertinence du modèle proposé.

Synthèse :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les VEs et nous avons abordé leurs moyens de recharge. Deux modes de recharge sont présentés : la recharge lente avec une puissance de 3 kW pour un temps de recharge assez important, et la recharge rapide regroupant plusieurs techniques permettant de diminuer le temps de recharge des véhicule, et par conséquent les temps d'attente et d'occupation des stations de recharge. A la fin de ce chapitre, nous avons abordé le concept d'échange de flux d'énergie entre le réseau électrique (ou un micro réseau) et le véhicule.

Ensuite, nous avons dimensionné les différents éléments d'un système de recharge dans le but de déterminer les besoins énergétiques d'un VE et la quantité d'énergie nécessaire pour le propulser. Ainsi, le dimensionnement des panneaux photovoltaïques, du pack des batteries au plomb de stockage de l'énergie solaire, et du pack des batteries Li-Ion ont permis de choisir les panneaux, les batteries au plomb, les batteries Li-Ion, la puissance crête des panneaux, les capacités des packs de batteries nécessaires pour recharger le VE. La manière dont les éléments de stockage et de production de l'énergie sont assemblés est fournie également par cette étude de dimensionnement. Le dimensionnement d'une station de recharge de VEs alimentée par l'énergie solaire constitue la première contribution de ce travail de recherche. Cette contribution est présentée dans le deuxième chapitre.

La deuxième contribution porte sur la modélisation mathématique des éléments principaux du système de recharge. Les paramètres des modèles des panneaux photovoltaïques et de la batterie au plomb sont identifiés en utilisant la méthodologie des moindres carrés. Les modèles obtenus sont validés expérimentalement et par la comparaison des résultats de simulation avec les données théoriques. L'utilisation de l'algorithme MPPT a permis d'obtenir la puissance maximale des panneaux solaires. La régulation de processus de stockage de l'énergie dans les batteries au plomb est effectuée par un système de supervision. En effet, les batteries stationnaires de stockage de l'énergie peuvent être facilement endommagées par une

surcharge ou par une décharge profonde d'où la nécessité de mise en place d'un système de contrôle de recharge. Dans cette étude, nous avons proposé une approche de modélisation basée sur la tension de la batterie au plomb. En effet, le modèle proposé prend en compte les paramètres électriques de la batterie et sa durée de recharge/décharge. Pour prédire l'évolution de la tension de la batterie, seuls trois paramètres ont besoin d'être connus : la tension de circuit ouvert, le courant et le temps. Les paramètres du modèle sont extraits des données techniques de la batterie (en cas de décharge). Le même modèle de tension de la batterie décrivant le processus de décharge de la batterie est utilisé pour décrire son processus de recharge. Les paramètres du modèle en cas de recharge sont extraits des données expérimentales. Le modèle proposé est réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink et les résultats de simulation obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux effectués sur une batterie de type *Yuasa SW280*. Les résultats de simulation sont comparés également aux données théoriques. L'analyse des résultats obtenus et les comparaisons effectuées montrent l'efficacité du modèle proposé. Ce dernier est spécifique pour les batteries *Yuasa* et permet de prédire l'évolution des processus de recharge/décharge pour plusieurs valeurs du courant différentes des valeurs des courants de constructeur. C'est donc le modèle adopté pour le système de recharge étudié.

L'optimisation et la gestion optimale de l'affectation d'une flotte de VEs (de mêmes caractéristiques) aux stations de recharge (de mêmes caractéristiques) est la troisième contribution de cette thèse. Dans le quatrième chapitre, nous avons proposé un algorithme d'optimisation basée sur la programmation mathématique linéaire. Cet algorithme a permis de gérer d'une façon optimale les problèmes d'affectation des VEs dans des conditions normales et des conditions perturbées. Cette approche a permis d'affecter, de manière adéquate, les VEs aux stations de recharge en consommant le minimum d'énergie au moment de leurs arrivées aux stations de recharge. De ce fait, l'état de charge des batteries des VEs est gardé au plus hauts niveaux possibles, ce qui permet de réduire les temps de recharge et par conséquent les temps passés dans les stations de recharge.

Ce problème d'affectation est étendu avec plus de contraintes à satisfaire et d'objectifs à atteindre. Il s'agit d'affecter des VEs de différentes marques et différents modèles aux stations de recharge avec différentes puissances de recharge (lente et rapide). Dans cette étude, une autre contrainte majeure consiste à veiller à ce que le niveau des batteries au moment d'arrivée des VEs aux stations de recharge ne dépasse pas le seuil minimal défini par les constructeurs.

Perspectives :

Le travail développé dans cette thèse ouvre la voie à de nombreuses perspectives et améliorations. Nous citons quelques-unes de ces pistes. Étude de recharge des batteries de traction à partir de l'énergie solaire en appliquant un algorithme de recharge CC/CV. Cet algorithme permettra de recharger rapidement les batteries de traction à partir de l'énergie solaire (si elle est suffisante), ou de l'énergie solaire et de l'énergie stockée dans les batteries au plomb (si l'énergie solaire n'est pas suffisante). Ou uniquement à partir de l'énergie stockée dans les batteries au plomb si l'énergie solaire est absente. Étude et gestion des flux d'énergie V2H et V2G. Cette étude peut être effectuée dans le cas où les batteries des véhicule électriques sont considérées comme moyens de stockage d'énergie. En effet, les quantités d'énergie stockées dans les batteries des VEs peuvent être restituées pour alimenter les stations de recharge en cas de besoin (dans le cas où la demande d'énergie est supérieure à l'offre). L'étude de modélisation proposée dans ce travail sera donc étendue pour intégrer la gestion et le transfert de l'énergie dans les systèmes V2H et V2G. En considérant

toujours les batteries des VEs comme moyens de stockage de l'énergie, le problème d'affectation sera étendu avec plus de contraintes à satisfaire et d'objectifs à atteindre. Il s'agit d'affecter des VEs à décharger aux stations de décharge. Dans cette étude, nous pouvons tenir compte de la quantité d'énergie à décharger par chaque VE. L'objectif principal à atteindre est d'assurer une stabilité énergétique du réseau électrique en cas de déséquilibre.

Le travail présenté dans le quatrième chapitre peut être étendu en considérant des valeurs variables pour la vitesse de référence v_f et la densité de trafic sur les routes k_{jam} . Des valeurs constantes sont affectées à ces paramètres dans cette thèse pour des raisons de simplification.

Les travaux de cette thèse ont donnés lieu à ces publications :

a)- Revues internationales avec comité de lecture :

- 1 – Mkahl, R. and A. Nait Sidi Moh, Modeling of charging station batteries for electric vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 11, No. 2, pp. 1667-1672, December 2013.
- 2 – Mkahl, R., A. Nait Sidi Moh, J. Gaber and M. Wack, Optimal Solutions for Charging Management of Electric Vehicles Fleets. Soumis au *Journal of Electric Power System Research*.

b)- Conférences internationales avec comité de lecture :

- 1 – Becherif, M., M. Y. Ayad, D. Hissel, and R. Mkahl, Design and sizing of a stand-alone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy, *In the proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1 – 6, 2011.
- 2 – Mkahl, R., A. Nait Sidi Moh, and M. Wack, Modeling and Simulation of Standalone Photovoltaic Charging Stations for Electric Vehicles. *In the proceedings of XIII International Conference on Computer, Communication and Information Sciences, and Engineering (ICC-CISE)*, Vol :9, No :1, pp. 72-80, January 26-27, 2015, Jeddah, Saudi Arabia.
- 3 – Mkahl, R., A. Nait Sidi Moh, J. Gaber, and M. Wack, A linear Optimization Approach for Electric Vehicles Charging. *In the proceedings of 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC15)*. Marrakech-Ouarzazate, Morocco, December 2015.
- 4 – Mkahl, R., A. Nait Sidi Moh, J. Gaber and M. Wack, Towards an Optimal Planning Approach for Electric Vehicle Mobility. *In the proceedings of European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress*, Brussels, December 2015.

Bibliographie

- [1] A. Mkahl, R. Nait Sidi Moh and M. Wack. Modeling and simulation of standalone photovoltaic charging stations for electric vehicles. In *XIII International Conference on Computer, Communication and Information Sciences and Engineering (ICCCISE)*, pages 72–80, Jeddah, Saudi Arabia, January 26-27 2015.
- [2] A. Nouh. *Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 2008.
- [3] M. Kant. La voiture électrique. *Technique de l'ingénieur, Traités Génie électrique*, (D5562) :21, 1995.
- [4] B. Multon. Motorisation des véhicules électriques. *Technique de l'ingénieur*, (3996), 2001.
- [5] B. Multon. Conception et réalisation d'un véhicule électrique. *Revue Technologie*, (125) :56–58, 2003.
- [6] N. Bertone, 1912. www.jacques-leretrait.blogspot.fr/2013/09/voitures-d-italie-bertone-carrozzeria.html. Dernière visite Décembre 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 Toulouse III, Paul Sabatier, 2013.
- [8] R.P. Joshi and A.P. Deshmukh. Hybrid electric vehicles : The next generation automobile revolution. In *IEEE Electric and Hybrid Vehicles*, pages 1–6, Dec. 18–20 2006.
- [9] A. Ravey. *Conception et gestion de l'énergies des architectures pour véhicules hybrides électriques*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [10] A. Florescu. *Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [11] K. T. Chau, C.C. Chan, and C. Liu. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. In *IEEE Transactions on industrial electronics*, volume 55, pages 2246 – 2257, 2008.
- [12] B. Chauchat. *Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1997.

- [13] K. T. Chau and Y. S. Wong. Overview of power management in hybrid electric vehicle. *Energy Conversion and Management*, 43(15) :1953–1968, 2002.
- [14] Z. Q. Zhu and D. Howe. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. In *Proceedings of the IEEE*, volume 95, pages 746–765, Avril 2007.
- [15] P.H. Nguyen. *Impacts des modèles de pertes sur l'optimisation sur cycle d'un ensemble convertisseur – machine synchrone*. Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2011.
- [16] M. Becherif, M. Y. Ayad, D. Hissel, and R. Mkahl. Design and sizing of a stand-alone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, Chicago, IL, Sep. 6–9 2011.
- [17] D. L. B. Mbemba. *Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, Belfort, Décembre 2012.
- [18] D. Diop. *Contribution à la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride série*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 2004.
- [19] A. Boucherit. *Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort–Montbéliard, 2011.
- [20] R. Mosdale. Transport électrique routier batteries pour véhicules électriques. *Techniques de l'ingénieur*, (D5565), 2003.
- [21] M. Debruyne. Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique. *Techniques de l'ingénieur*, (d3278), 2010.
- [22] L. Negre. *Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules (décarbonés)*. 2011.
- [23] M. L. Bicherit. *Evaluation environnementale du véhicule électrique : Méthodologies et application*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2010.
- [24] J. P. Trovão, P. G. Pereirinha, and H. M. Jorge. Design methodology of energy storage systems for a small electric vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, 3 :13–16, May 2009.
- [25] K.W.E. Cheng. Recent development on electric vehicles. In *3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, PESA2009.*, pages 1–5, Hong Kong, May 2009.
- [26] L. Boulon. *Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 2009.
- [27] M. Etezadi-Amoli, K. Choma, and J. Stefani. Student member rapid-charge electric-vehicle stations. *IEEE Transactions on power delivery*, 25(3), 2010.
- [28] D. Paire. *Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides, application à un ascenseur avec récupération d'énergie*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

- [29] Station de recharge véhicules électriques : Solution clé en main. <http://www.terraeco.net/Station-de-Recharge-Vehicules,17324.html>. Dernière visite Décembre 2015.
- [30] P. Odru, F. Badin, S. Biscaglia, J. Bonal, R. Clavreul, J. Kauv, W. Lajnef, P. Lefevre, H. Lesueur, B. Multon, S. Pincemin, A. Rojey, J. Ruer, and P. Stevens. *Le stockage de l'énergie*. Dunod, Paris, 2010.
- [31] B. Multon, O. Gergaud, G. Robin, and H. Ben Ahmed. Consommation d'énergie et ressources énergétiques. *Techniques de l'ingénieur*, (D3900), 2003.
- [32] G. Preetham and W. Shireen. Photovoltaic charging station for plug-in hybrid electric vehicles in a smart grid environment. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pages 1–8, Washington, DC, Jan 2012.
- [33] J. G. Ingersoll and C. A. Perkins. The 2.1kw photovoltaic electric vehicle charging station in the city of santa monica, californa. In *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pages 1509 – 1512, Washington, DC, May 1996.
- [34] J. C. Parejo. Solar power. how to use its energy, 24 Octobre 2008, Dernière visite Décembre 2015. <http://www.petervaldivia.com/technology/energy/solar-power.php>.
- [35] D. Lu. *Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2010.
- [36] K. S. Agbli. *Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM-Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 2012.
- [37] M. Singh, K. Thirugnanam, S. Swami, P. Kumar, and I. Kar. Coordination of electric vehicles in charging stations connected at different nodes of a distribution substation. In *IEEE India Conference (INDICON)*, pages 1260–1265, Kochi, Dec 2012.
- [38] G. G. Christophe Guille. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (v2g) implementation. *Energy Policy*, pages 4379—4390, 2009.
- [39] F. Huang, P. Sarikprueck, Y. Cheng, and W. J. Lee. Design optimization of phev charging station. In *48th IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, pages 1–7, May 2012.
- [40] G. Haines, A. McGordon, and P. Jennings. The simulation of vehicle-to-home systems – using electric vehicle battery storage to smooth domestic electricity demand. In *International Conference on Ecologic Vehicles and Renewable Energies*, Monaco, Mar 2009.
- [41] J. Song, A. Toliyat, D. Tuttle, and A. Kwasinski. A rapid charging station with an ultracapacitor energy storage system for plug-in electrical vehicles. In *IEEE Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pages 2003–2007, Incheon, 2010.

- [42] A. Xu, S. Xie, and X. Liu. Dynamic voltage equalization for series-connected ultracapacitors in ev/hev applications. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 58(8) :3981–3987, Oct 2009.
- [43] P. Bauer, Y. Zhou, J. Doppler, and N. Stemberge. Charging of electric vehicles and impact on the grid. In *IEEE MECHATRONIKA, 13th International Symposium*, pages 121–127, Trencianske Teplice, 2010.
- [44] M. Musio, P. Lombardi, and A. Damiano. Vehicles to grid (v2g) concept applied to a virtual power plant structure. In *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, 2010.
- [45] M. Benaouadj, A. Aboubou, M. Becherif, M. y. Ayad, and M. Behri. Recharging of batteries/supercapacitors hybrid source for electric vehicles application using photovoltaic energy in a stand-alone point. In *1st International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, pages 161 – 166, Hammamet, Mar 2012.
- [46] J. Baker. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36(12) :4368–4373, 2008.
- [47] J. Robert and J. Alzieu. Accumulateurs- accumulateurs à oxyde de nickel. *Technique de l'ingénieur*, 2005.
- [48] J. Robert and J. Alzieu. Accumulateurs- accumulateurs à lithium. *Technique de l'ingénieur*, 2005.
- [49] J. Robert and J. Alzieu. Accumulateurs- accumulateurs au plomb. *Technique de l'ingénieur*, 2004.
- [50] R. Mkahl and A. Nait sidi moh. Modeling of charging station batteries for electric vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 11(2), 2013.
- [51] A. Cherif, M. Jraid, and A. Dhouib. A battery ageing model used in stand-alone pv systems. *Journal of Power Sources*, 112 :49–53, 2002.
- [52] M. A. Camara. *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs*. Thèse de doctorat, Université de Paris Est Créteil, 2011.
- [53] B. E. Conway. *Electrochemical supercapacitors : scientific fundamentals and technological applications*. 1999.
- [54] J. C. Lassègues. Supercondensateurs. *Technique de l'ingénieur*, 2001.
- [55] H. Gualous and R. Gullay. Applications des supercondensateurs. *Technique de l'ingénieur*, 2007.
- [56] K. Tanguy. *Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier*. Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada, 2013.
- [57] F. Nemry, G. Leduc, and A. Muñoz. *Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles : State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency*. European Commission Joint Research Centre, 2009. Tech. Rep.
- [58] S. w. Hadley. *Impact of Plug-in Hybrid Vehicles on the Electric Grid*. 2006. Tech. Rep.

- [59] J. F. Reynaud. *Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [60] G. Y. Choe, J. S. Kim, B. K. Lee, C. Y. Won, and T. W. Lee. A bi-directional battery charger for electric vehicles using photovoltaic pcs systems. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, Lille, Sep 1–3 2010.
- [61] A. Bhattacharjee. Design and comparative study of three photovoltaic battery charge control algorithms in matlab/simulink environment. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2(3), Sep 2012.
- [62] J. S. Kim, G. Y. Choe, H. M. Jung, B. K. Lee, Y. J. Cho, and K. B. Han. Design and implementation of a high-efficiency on-board battery charger for electric vehicles with frequency control strategy. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–6, Lille, Sep 1–3 2010.
- [63] J. Gallardo-Lozano, I. Milanés-Montero, M. A. Guerrero-Martínez, and E. Romero-Cadaval. Electric vehicle battery charger for smart grids. *Electric Power Systems Research*, 90 :18–29, Sep 2012.
- [64] J. Soares, T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, and P. Faria. An optimal scheduling problem in distribution networks considering v2g. In *IEEE*, 2011.
- [65] J. S. Martinez. *Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd : approche par logique floue de type-2 Energy management of a hybrid electric vehicle : an approach based on type-2 fuzzy logic*. Thèse de doctorat, Université de Franch-Comté, 2012.
- [66] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, and E. Berthelo. An innovative control strategy of a single converter for hybrid fuel cell/supercapacitor power source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12) :4024–4031, Dec 2010.
- [67] S. Tamsanya, S. Chungpaibulpattana, and S. Atthajariyakul. Development of automobile bangkok driving cycle for emissions and fuel consumption assessment. In *The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)"*, Bangkok, Thailand, Nov. 21–23 2006.
- [68] W.L. Tsang, K.M. Chan and Y.K. Wong. Lithium-ion battery models for computer simulation. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Hong Kong and Macau, August 16 - 20 2010.
- [69] L. Siguang and Z. Chengning. Study on battery management system and lithium-ion battery. In *IEEE International Conference on Computer and Automation Engineering*, pages 218 – 222, Bangkok, March 8-10 2009.
- [70] S. Li and X. Cheng. A comparative study on rc models of lithium-ion battery. In *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, pages 1 – 4, Beijing, Aug. 31 -Sept. 3 2014.
- [71] Panneaux solaires. <http://www.bati-depot.fr/solaire/panneau-solaire/solaire.html>. Dernière visite Décembre 2015.

- [72] N. Achaibou, M. Haddadi, and A. Malek. Modeling of lead acid batteries in pv systems. In *Siencedirecte, Energy Procedia, Terragreen 2012 : Clean Energy Solutions for Sustainable Environment (CESSE)*., volume 18, pages 538–544, 2012.
- [73] F. Chekired, A. Mahrane, M. Chikh, and Z. Smara. Optimization of energy management of a photovoltaic system by the fuzzy logic technique. In *Siencedirecte, Energy Procedia.*, volume 6, page 513–521, 2011.
- [74] R. A. Jackey. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. In *The Math Works, Inc*, 2007.
- [75] B. Stefano and M. Ceraolo. Dynamical models of lead-acid batteries : Implementation issues. In *IEEE, Transactions on energy conversion*, volume 17, 2002.
- [76] M. Ceraolo. New dynamical models of lead–acid batteries. *IEEE Transactions on power systems conversion*, 2000.
- [77] W. Zhoua, H. Yanga, and Z. Fang. Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar–wind power generation system. In *Siencedirecte, Re-newable 33*, page 1413–1423, 2008.
- [78] M. Durri, A. Cruden, S. Gair, and J.R. McDonald. Dynamic model of a lead acid battery for use ina domestic fuel cell system. *Siencedirecte , Journal of Power Sources 161*, pages 1400–1411, 2006.
- [79] H. He, R. Xiong, and J. Fan. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approche. *Energies*, 4 :582–598, 2011.
- [80] O. Gergaud, B. Robin, and H. Ben Ahmed. Energy modeling of a lead-acid battery within hybrid wind/photovoltaic systems. In *European Power Electronic Conference, Toulouse.*, 2003.
- [81] V.H Johnson. Battery performance models in advisor. *Journal of Power Sources*, 110 :321–329, 2002.
- [82] V.H . Johnson, A. A Pesaran, and T Sack. Temperature-dependent battery models for high-power lithium-ion batteries. In *17th Annual Electric Vehicle Symposium*, Montreal, Canada, Oct. 15–18 2000.
- [83] Y. Jiang, Y. Wang, C. Zhang, S. Guangning, and J. Liu. Research on group methods of second-use li-ion batteries based on k-means clustering model. In *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, pages 1 – 6, Aug. 31 2014–Sept. 3 2014 2014.
- [84] O. Tremblay and L. A. Dessaint. Experimental validation of a battery dynamic model for ev application. *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, world electric vehicle journal*, 3, May,13-16 2009.
- [85] L. A. Dessaint and A. I. Dekkiche. A generuc battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference. VPPC2007*, pages 284 – 289, 2007.

- [86] J. Jiang and C. Zhang. *Fundamentals and Application of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. Wiley, April 2015.
- [87] Gamme Yuasa. Swl batteries stationnaires étanches au plomb à recombinaison de gas régulées par soupapes. Manuel technique, 2010.
- [88] W.Y. Chang. The state of charge estimating methods for battery : A review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013 :1–7, 5 July 2013.
- [89] S. Abu-Sharkh and D. Doerffel. Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 130 :266—274, 2004.
- [90] N. Jantharamin and L. Zhang. A new dynamic model for lead-acid batteries. pages 86–90, 2008.
- [91] A. Zegaouia, P. Petita, M. Ailleriea, J-P. Sawickia, and J-P. Charles. Experimental validation of photovoltaic direct and reversemode model. influence of partial shading. *Energy Procedia*, 18 :1247 – 1253, 2012.
- [92] O. Gergaud. *Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [93] K. C. Kong, M. B. Mamat, Z. Ibrahim, and A. M. Muzathik. New approach on mathematical modeling of photovoltaic solar panel. *Applied mathematical sciences*, 6(8) :381–401, 2012.
- [94] R. Chenni, M. Makhlof, and T. Kerbache. A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Sciencedirecte, Energy*, 32(1) :1724–1730, 2007.
- [95] J. S. Kumari and C. S. Babu. Mathematical modeling and simulation of photovoltaic cell using matlab-simulink environment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2(1) :26–34, 2012.
- [96] E. Mboumboue and D. Njomo. Mathematical modeling and digital simulation of pv solar panel using matlab software. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), 2013.
- [97] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis, E. Muljadi, and P. Jenkins. Acell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. *Sciencedirecte, Solar Energy*, 86 :2695–2706, 2012.
- [98] Guy. Waltisperger. *Architectures intégrées de gestion de l’énergie pour les microsystemes autonomes*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [99] E. Skoplaki and J.A. Palyvos. Operating temperature of photovoltaic modules : Asurvey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34 :23–29, 2009.
- [100] T. Esram and P. L Chapman. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transaction on energy conversion*, 22(2) :439 – 449, June 2007.
- [101] C. Liu, B. WU, and R. Cheung. Advanced algorithm for mppt control of photovoltaic system. In *Canadian Solar Building Conference*, Motreal, 20–24 Aug. 2004.

- [102] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, and M. Abid. Etude comparative de cinq algorithmes de commande mppt pour un système photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(3), Sep. 2014.
- [103] Electrifying the automobile—variations, strategy for the electro-era. *Magazine ADAC*, page 19, 2011.
- [104] B. Lutz, H. Walz, and D. U. Sauer. Optimizing vehicle-to-grid charging strategies using genetic algorithms under the consideration of battery aging. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–7, Chicago, IL, Sep. 6–9 2011.
- [105] Y. He, B. Venkatesh, and L. Guan. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles. *IEEE transactions on smart grid*, 3(3), September 2012.
- [106] A. Ruzmetov, A. Nait Sidi Moh, M. Bakhouya, and M. Wack. Optimal assignment and charging scheduling of electric vehicles. In *IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'13)*, Ouarzazate, Morocco, 2013.
- [107] W. Ait-Cheik-Bihi, A. Nait Sidi Moh, M. Bakhouya, J. Gaber, and M. Wack. Transportml platform for collaborative location-based services. *Journal of Service Oriented Computing and Applications (SOCA)*, 2012.
- [108] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack, and P. Lorenz. Wireless communication technologies for its applications. *IEEE Communications Magazine*, 2010.
- [109] A. Nait Sidi Moh, M. Bakhouya, J. Gaber., and M. Wack. *Geopositioning and Mobility*. Wiley-ISTE, 2013. SBN : 978-1-84821-567-2.
- [110] C.G. Cassandras, T. Wang, and S. Pourazarm. Energy-aware vehicle routing in networks with charging nodes. In *19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, 2014.
- [111] E.W. Dijkstra. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik 1*, pages 269–271, 1959.
- [112] E. Bellman. On a routing problem. *Q. Appl. Math.*, 16, pages 87—90, 1958.
- [113] S. Dreyfus. An appraisal of some shortest path algorithms. *Oper. Res.*, 17, pages 395–412, 1969.
- [114] J. Barco, A. Guerra, L. Muñoz, and N. Quijano. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles : Case study. Oct. 2013.
- [115] Z. Lu and Q. Meng. Analysis of traffic speed-density regression models a case study of two roadway traffic flows in china. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, volume 9, 2013.
- [116] G. Symposium. 75 years of the fundamental diagram for traffic flow theory. In *Transportation research circular E-C149*, 2011.
- [117] C. L. Decker. *Electric vehicle charging and routing management via multi-infrastructure data fusion*. Thèse de doctorat, Institute of Technology, Rochester, 2012.

Annexes

Annexe A

Dans cet annexe, nous présentons quelques exemples de véhicules électriques rechargeables. Parmi ces véhicules, nous citons la Honda Insight commercialisée en 1996 (Fig. A.1), et le Citroën Berlingo électrique qui représente la première génération en 1997 (Fig. A.2).



FIGURE A.1– Honda Insight.

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Honda_Insight#/media/2010_Honda_Insight-DC.jpg

Nous présentons ci-après les caractéristiques de certains exemples de VE. L'ensemble de ces modèles est détaillé dans [22].



FIGURE A.2– Citroën Berlingo I.

Source : [http : //fr.wikipedia.org/wiki/Citroën_Berlingo#mediaviewer/File : Citro%C3%ABn_Berlingo_I_Facelift_front.JPG](http://fr.wikipedia.org/wiki/Citroën_Berlingo#mediaviewer/File:Citro%C3%ABn_Berlingo_I_Facelift_front.JPG)

ZOÉ – Mi 2012 

Dimensions	L 4.08 m x l 1.69 m x H 1.56 m
Sièges	5
Traction	Avant
Moteur électrique	60 kW
Autonomie	160 km
Vitesse maximale	130 km/h
Batterie	Lithium Ion
Capacité batterie	24 kWh



Recharge :

Puissance admissible	Monophasé : 3,5/ 7 kW (230V / 16/32A) Triphasé: 11à 43 kW (400V / 16 à 63A)*
Charge rapide	Oui
Prise côté Véhicule	Type II
Mode de recharge	Mode 3 suivant IEC 61851
Conformité infrastructure de charge	
Echange Batterie	Oui (en option)

* Suivant conditions de température

FIGURE A.3– Caractéristiques du véhicule ZOÉ.

OPEL AMPERA Production en 2011

Dimensions	L m 4,404 l m 1,798 H m 1,430
Sièges	4
Traction	avant
Moteur électrique	111 kW
Autonomie	≥500 km
Vitesse maximale	161 km/h
Batterie	Lithium-ion
Capacité batterie	16 kWh
Recharge :	
Puissance admissible	2011 Ex. Monophasé/ triphasé : x kW (230V / 50Hz)
Charge rapide	3 heures (230V)
Prise côté Véhicule	Type classique: 230V adaptateur vendu avec le véhicule
Mode de recharge	Mode x suivant IEC xxx
Conformité infrastructure de charge	
Echange Batterie	non



FIGURE A.4– Caractéristiques de l'OPEL AMPERA .

Citroën C-ZERO – 2nd semestre 2010



Dimensions	L 3,39 m x l 1,47 m x H 1,60 m
Sièges	4
Traction	Propulsion
Moteur électrique	47 kW
Autonomie	130 km
Vitesse maximale	130 km/h
Batterie	Lithium ion
Energie batterie	16,3 kWh
Recharge :	
Charge normale	Monophasé : 3,5 kW (230 V / 16 A)
Prise côté véhicule	Type 1
Mode de charge	Mode 2 suivant IEC 61851
Charge rapide	Continue : 50 kW (400 V / 125 A)



FIGURE A.5– Caractéristiques de Citroën C-ZERO.

TWIZY – 2^{ème} semestre 2011



Dimensions	L 2.3 m x l 1.2 m x H 1.5 m
Sièges	2
Traction	Arrière
Moteur électrique	15 kW
Autonomie	100 km
Vitesse maximale	75 Km/h
Batterie	Lithium Ion
Capacité batterie	7 kWh



Recharge :

Puissance admissible	Monophasé : 2,3 kW (230V / 10A)
Charge rapide	Non
Prise côté Véhicule	Câble attaché
Mode de recharge	Mode 3 , Mode 1* suivant IEC 61851
Conformité infrastructure de charge	
Echange Batterie	Non

* Utilisation domestique

FIGURE A.6– Caractéristiques du modèle TWIZY.

Peugeot iOn – 2nd semestre 2010



Dimensions	L 3,39 m x l 1,47 m x H 1,60 m
Sièges	4
Traction	Propulsion
Moteur électrique	47 kW
Autonomie	130 km
Vitesse maximale	130 km/h
Batterie	Lithium ion
Energie batterie	16,3 kWh



Recharge :

Charge normale	Monophasé : 3,5 kW (230 V / 16 A)
Prise côté véhicule	Type 1
Mode de charge	Mode 2 suivant IEC 61851
Charge rapide	Continue : 50 kW (400 V / 125 A)

FIGURE A.7– Caractéristiques de la Peugeot iOn.

Peugeot Partner Electrique Venturi – 2nd semestre 2010



Dimensions	L 4,14 m x l 1,96 m x H 1,82 m
Sièges	2
Traction	Traction AV
Moteur électrique	42 kW
Autonomie	120 km
Vitesse maximale	110 km/h
Batterie	Nickel Chlorure de sodium
Energie batterie	23,5 kWh



Recharge :	
Charge normale	Monophasé : 3,5 kW (230 V / 16 A)
Prise côté véhicule	Maréchal
Mode de charge	Mode 1 suivant IEC 61851
Charge rapide	Sans

FIGURE A.8– Caractéristiques de Peugeot Partner Electrique Venturi.

Annexe B

Dans cette annexe, nous détaillons les résultats de calcul pour tous les VEs considérés dans l'exemple numérique du chapitre 4. Pour chaque véhicule, nous présentons une estimation de la quantité d'énergie nécessaire pour se déplacer jusqu'à chaque station de recharge, ainsi qu'une estimation de l'état de charge de la batterie du VE à son arrivée à la station de recharge. Ces paramètres sont calculés pour les deux cas de fonctionnement du système (sous conditions normales et perturbées).

1- Les résultats de calcul dans le cas normal

Les résultats de calcul pour le véhicule VE_2 sont présentés dans le tableau B.1. Une illustration

VE_2	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(2, j, t_0)[\text{km}]$	10	4	7	6
$SOC_0(2, t_0)$	75	75	75	75
$E_{cn}(2, j, t_0 + T)[\text{kWh}]$	1	0.4	0.7	0.6
$SOC_f(2, j, t_0 + T)$	74	74.6	74.3	74.4

TABLE B.1– Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_2 .

graphique de ces résultats est représentée dans la figure B.1.

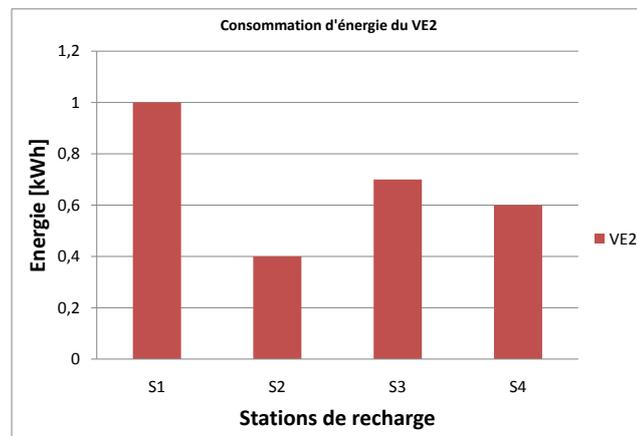


FIGURE B.1– L'énergie nécessaire E_{cn} pour VE_2 pour se rendre aux différentes stations.

Cette figure montre que le véhicule VE_2 consommerait moins d'énergie pour se rendre à la station S_2 . Il s'agirait donc de la station la plus adéquate pour le véhicule VE_2 à condition de satisfaire les autres contraintes.

Les résultats obtenus pour les autres véhicules sont présentés dans ce qui suit.

VE_3	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(3, j, t_0)[\text{km}]$	10	5	3	7
$SOC_0(3, t_0)$	65	65	65	65
$E_{cn}(3, j, t_0 + T)[\text{kWh}]$	1	0.5	0.3	0.7
$SOC_f(3, j, t_0 + T)$	64	64.5	64.7	64.3

TABLE B.2– Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_3 .

VE_4	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(4, j, t_0) [\text{km}]$	10	7	9	4
$SOC_0(4, t)$	60	60	60	60
$E_{cn}(4, j, t_0 + T)[\text{kWh}]$	1	0.7	0.9	0.4
$SOC_f(4, j, t_0 + T)$	59	59.3	59.1	59.4

TABLE B.3– Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_4 .

VE_5	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(5, j, t_0)[\text{km}]$	2	5	3	9
$SOC_0(5, t_0)$	66	66	66	66
$E_{cn}(5, j, t_0 + T)[\text{kWh}]$	0.2	0.5	0.3	0.9
$SOC_f(5, j, t_0 + T)$	65.8	65.5	65.7	65.1

TABLE B.4– Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_5 .

VE_6	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(6, j, t_0)[\text{km}]$	4	2	10	6.5
$SOC_0(6, t)$	53	53	53	53
$E_{cn}(6, j, t+T)[\text{kWh}]$	0.4	0.2	1	0.65
$SOC_f(6, j, t + T)$	52.6	52.8	52	52.35

TABLE B.5– Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_6 .

2- Résultats de calcul dans le cas perturbé

Les résultats de calcul des estimations de la consommation d'énergie par le véhicule VE_2 pour se rendre à chaque station de recharge S_j sont présentés dans le tableau B.6.

VE_2	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(2, j, t_0)$ [km]	10	4	7	6
$SOC_0(2, t_0)$	75	75	75	75
$q(2, j, t_0)$ [veh/h]	1200	2000	1700	1800
$E_{cn}(2, j, t_0)$ [kWh]	1	0.4	0.7	0.6
$SOC_f(2, j, t_0 + T)$	71.127	71.743	73.2288	72.389
E_{cp} [kWh]	3.873	3.2574	1.77124	2.6105

TABLE B.6– Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_2 .

Dans la figure B.2, nous comparons les résultats obtenus pour le véhicules VE_2 dans les deux cas de fonctionnement. Nous constatons que la consommation d'énergie dans les conditions normales E_{cn} est plus faible comparée à la consommation dans les conditions perturbées. De même, le véhicule VE_2 est affecté à la station S_2 dans le cas de fonctionnement normal, alors que dans le cas de fonctionnement perturbé le même véhicule est affecté à la station S_3 .

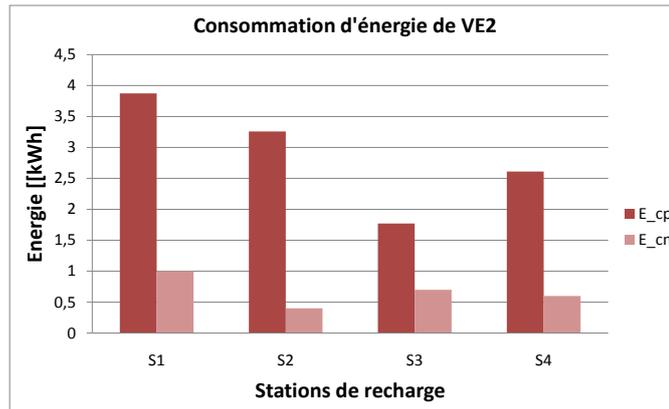


FIGURE B.2– L'énergie nécessaire E_{cn} pour VE_2 pour se rendre aux différentes stations.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus dans le cas de fonctionnement perturbé.

VE_3	S_1	S_2	S_3	S_4
$C_n(3)[kWh]$	8	8	8	8
$d(3, j, t_0)[km]$	10	5	3	7
$SOC_0(3, t_0)$	65	65	65	65
$q(3, j, t_0)$ [veh/h]	1350	1200	1500	2400
$E_{cn}(3, j, t_0)[kWh]$	1	0.5	0.3	0.7
$SOC_f(3, j, t_0 + T)$	62	64.278	63.341	59.227
E_{cp} [kWh]	2.99	0.7223	1.6588	5.7727

TABLE B.7– Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_3 .

VE_4	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(4, j, t_0)[km]$	10	7	9	4
$SOC_0(4, t_0)$	60	60	60	60
$q(4, j, t_0)$ [veh/h]	1000	900	800	2100
$E_{cn}(4, j, t_0)$ [kWh]	1	0.7	0.9	0.4
$SOC_f(4, j, t_0 + T)$	55	58.312	55.4652	56.406
E_{cp} [kWh]	5	1.6877	4.5348	3.5936

TABLE B.8– Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_4 .

VE_5	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(5, j, t_0)[km]$	2	5	3	9
$SOC_0(5, t_0)$	66	66	66	66
$q(5, j, t_0)$ [veh/h]	1550	1200	1000	2000
$E_{cn}(5, j, t_0)$ [kWh]	0.2	0.5	0.3	0.9
$SOC_f(5, j, t_0 + T)$	64.607	65.278	65.294	63.774
E_{cp} [kWh]	1.3927	0.7223	0.7061	2.2263

TABLE B.9– Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_5 .

VE_6	S_1	S_2	S_3	S_4
$d(6, j, t_0)$ [km]	4	2	10	6.5
$SOC_0(6, j, t_0)$	53	53	53	53
$q(6, j, t_0)$ [veh/h]	1400	1900	950	1800
$E_{cn}(6, j, t_0)$ [kWh]	0.4	0.2	1	0.65
$SOC_f(6, j, t_0 + T)$	51.488	51.082	47.7263	50.534
E_{cp} [kWh]	1.5117	1.9177	5.2737	2.4665

TABLE B.10– Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_6 .

A partir de ces résultats, nous constatons que :

- 1 – La consommation d'énergie $E_{cp}(i, j, t_0 + T(i, j, t_0))$ ne dépend pas seulement de la distance parcourue $d(i, j, t_0)$, mais elle dépend aussi du paramètre $q(i, j, t_0)$. Par exemple, l'énergie nécessaire pour le véhicule VE_5 effectuant une distance de $d = 5 \text{ km}$ pour se rendre à la station S_2 est plus faible que l'énergie nécessaire pour le même véhicule VE_5 pour parcourir une distance de $d = 2 \text{ km}$ afin de se rendre à la station S_1 . La consommation d'énergie est donc impactée par d'autres facteurs que la distance parcourue.
- 2 – La consommation d'énergie $E_{cn}(i, j, t_0 + T(i, j, t_0))$ dans les conditions normales est généralement plus faible que dans les conditions perturbées $E_{cp}(i, j, t_0 + T(i, j, t_0))$.

Table des figures

1.1	Véhicule électrique Jamais Contente	10
1.2	Véhicule électrique dessiné par Bertone	11
1.3	Principaux éléments du véhicule électrique VEB	13
1.4	Classification de motorisation électrique des VE	13
1.5	Schéma fonctionnel de la batterie	16
1.6	Structure d'un véhicule tout électrique VEB	19
1.7	Architecture d'un véhicule électrique à supercondensateur : topologie 1	20
1.8	Architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur : topologie 2	20
1.9	Une station de recharge à l'aide de l'énergie solaire	21
1.10	Station de recharge éolienne et station de recharge solaire	22
1.11	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	23
1.12	Types des cellules solaires	24
1.13	Illustration graphique des éléments photovoltaïques	25
1.14	Diagramme de Ragone [26].	25
1.15	Vue éclatée d'une batterie Ni-Cd industrielle.	26
1.16	Batterie Li-Ion en section oblongue	27
1.17	Batterie stationnaire munie de plaques positives tubulaires	28
1.18	Schéma fonctionnel d'un super-condensateur	29
1.19	Deux possibilités de recharge d'un VE : chargeur externe et substitution des batteries	30
1.20	Flux bidirectionnel d'énergie G2V et V2G	30
1.21	Flux d'énergie (H2V) et (V2H)	31
1.22	Modes de recharge	32
1.23	Schéma fonctionnel d'une station de recharge rapide	33
1.24	Stratégie de recharge combinée CC/CV	33
1.25	Conception V2G (pointillé) et G2V (continue)	34
2.1	Architecture des flux énergétiques bidirectionnels H2V et V2H.	38
2.2	Architecture des flux énergétiques unidirectionnel H2V.	39
2.3	Structure du système de recharge unidirectionnel étudié.	40
2.4	Bilan des forces exercées sur un véhicule en mouvement.	41
2.5	Modèle simulink du profil de puissance	43
2.6	Profil de vitesse NEDC	44
2.7	Évolution de la puissance en fonction du temps pour une pente de 0%	45
2.8	Un module Swing Tempo 7101	50
2.9	Panneaux photovoltaïques installés sur le toit d'une maison.	52

2.10	Panneau photovoltaïque PWX500-12V.	54
2.11	La batterie au plomb YUASA SW280	56
2.12	Topologie d'un hacheur survolteur	60
2.13	Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.	62
3.1	Modèle Rint.	67
3.2	Modèle RC.	68
3.3	Modèle mathématique de CIEMAT.	69
3.4	Modèle de NERL.	69
3.5	Modèle de Thévenin.	70
3.6	Modèle DP.	71
3.7	Modèle de décharge d'une batterie.	72
3.8	Courbe de décharge d'une batterie.	74
3.9	Comparaison des résultats de simulation et théoriques de la batterie Li-Ion pour un courant de décharge de 0.2C et 0.5C.	76
3.10	Variation de la tension à vide en fonction du SOC pour la batterie YUASA.	77
3.11	Dispositif expérimental de test de décharge de la batterie.	81
3.12	Dispositif expérimental de test de recharge de la batterie.	82
3.13	Le programme Labview utilisé pour l'acquisition des données.	83
3.14	Comparaison des résultats de simulation de la tension de décharge de la batterie, et des résultats expérimentaux.	84
3.15	Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour un courant de recharge de $I=1.7A$	84
3.16	Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux pour un courant de recharge $I= 0.6A$	85
3.17	Comparaison des résultats de simulation et théoriques de la tension de décharge de la batterie.	86
3.18	Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque (modèle à 2 diodes).	87
3.19	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.	87
3.20	Schéma de câblage du panneau photovoltaïque.	90
3.21	Dispositif expérimental de tests des panneaux.	91
3.22	Schéma Simulink d'un module PV avec une charge variable RL.	92
3.23	L'évolution du courant (resp. de la puissance) en fonction de la tension d'un panneau PWX500-12V.	93
3.24	Courant vs Tension : comparaison des résultats de simulation et des résultats expérimentaux.	93
3.25	Puissance vs Tension : comparaison des résultats de simulation et des résultats expérimentaux.	94
3.26	Courant vs Tension pour plusieurs valeurs de l'éclairement et à $T=25^{\circ}C$	94
3.27	Principe de fonctionnement de l'algorithme MPPT de type $P\&O$	95
3.28	Organigramme de l'algorithme MPPT de type $P\&O$	96
3.29	Algorithme de l'Inrémentation de la Conductance	98
3.30	L'évolution de la tension et du courant du PV en fonction de temps et en appliquant MPPT $P\&O$	99
3.31	Puissance de PV en appliquant MPPT $P\&O$	100
3.32	Topologie d'un hacheur survolteur	100

3.33	Le schéma équivalent du circuit de phase 1 du hacheur survolteur.	101
3.34	Le schéma équivalent du circuit de phase 2 du hacheur survolteur.	101
3.35	Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant.	102
3.36	Le schéma équivalent du circuit de phase 1.	102
3.37	Le schéma équivalent du circuit de phase 2.	102
3.38	Schéma Simulink d'un système PV contrôlé par MPPT (<i>P&O</i>).	103
3.39	Système de surveillance de la recharge du pack des batteries au plomb à partir des PVs.	104
3.40	Recharge du pack de batteries au plomb à partir des PVs en appliquant l'algorithme MPPT <i>P&O</i>	105
4.1	Possibilités d'affectation des VEs aux stations de recharge.	111
4.2	Système de recharge de VEs.	111
4.3	Consommation d'énergie du VE_1 en fonction des positions des stations de recharge	117
4.4	L'énergie nécessaire E_{cn} de chaque véhicule VE_i pour arriver à chaque station de recharge S_j	118
4.5	SOC_f de chaque véhicule VE_i correspondant chaque station de recharge S_j	119
4.6	Variation E_{cp1} et E_{cp2} en fonction de $q(1, 1, t_0)$	123
4.7	Comparaison de la consommation d'énergie E_{cn} et E_{cp} par VE_1 pour les différentes S_j	124
4.8	Évolution de la consommation d'énergie par le VE_1 en fonction du flux de véhicules dans les conditions normales et perturbées.	125
4.9	Variation de la consommation d'énergie E_{cp} et E_{cn} par VE_1 en fonction de la distance parcourue.	125
4.10	La consommation d'énergie E_{cp} pour chaque couple (VE_i, S_j)	126
4.11	L'état de charge SOC_f de chaque véhicule VE_i à son arrivée à chaque station S_j	127
4.12	La consommation d'énergie E_{cp} pour chaque couple (VE_i, S_j)	134
4.13	L'état de charge SOC_f pour chaque couple (VE_i, S_j)	135
4.14	Les valeurs optimales de SOC_f pour chaque couple (VE_i, S_j)	137
4.15	Comparaison des valeurs optimales de SOC_f et SOC_{min} pour chaque couple (VE_i, S_j)	137
A.1	Honda Insight.	163
A.2	Citroën Berlingo I.	164
A.3	Caractéristiques de véhicule ZOÉ	164
A.4	Caractéristiques de l'OPEL AMPERA.	165
A.5	Caractéristiques de Citroën C-ZERO.	165
A.6	Caractéristiques du modèle TWIZY.	166
A.7	Caractéristiques de la Peugeot iOn.	166
A.8	Caractéristiques de Peugeot Partner Electrique Venturi.	167
B.1	L'énergie nécessaire E_{cn} pour VE_2 pour se rendre aux différentes stations.	169
B.2	L'énergie nécessaire E_{cn} pour VE_2 pour se rendre aux différentes stations.	171

Liste des tableaux

1.1	Comparaison de performances de différents types de véhicules entre 2010 et 2020	12
1.2	Étude comparative de fiabilité des moteurs des véhicules électriques	14
1.3	Quelques modèles de VEs	14
1.4	Comparaison de différentes technologies de batteries de traction	18
1.5	Comparaison de trois types de cellules PV.	24
2.1	Cahier des charges du VE considéré dans l'étude.	40
2.2	Résultat de calcul de l'énergie à vitesses constantes.	44
2.3	Profil NEDC du véhicule.	45
2.4	Résultat du calcul de l'énergie du véhicule à vitesse moyenne.	46
2.5	Comparaison des technologies de batteries	46
2.6	Masses et volumes des différentes technologies de batteries	47
2.7	Caractéristiques du module Swing Tempo 7101	50
2.8	Caractéristiques du pack de batteries de traction.	51
2.9	Données nécessaires pour le dimensionnement.	57
2.10	Calculs pour le dimensionnement.	57
2.11	Caractéristiques du panneau PWX500-12V.	57
2.12	Résultats de dimensionnement du pack photovoltaïque.	58
2.13	Données utilisées pour le dimensionnement du pack de batteries.	58
2.14	Caractéristiques de la batterie au plomb Yuasa SW280.	58
2.15	Résultats de dimensionnement du pack de batteries au plomb.	59
2.16	Paramètres de dimensionnement du hacheur survolteur.	61
2.17	Paramètres de dimensionnement du chargeur des batteries Li-Ion.	62
3.1	Paramètres de la batterie Li-Ion <i>SWING Tempo7101</i>	75
3.2	Erreurs absolues et relatives entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux pour la recharge de la batterie.	85
3.3	Erreurs absolues et relatives entre les résultats de simulation et théoriques de la tension de décharge de la batterie.	86
3.4	Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque PWX500-12V	89
3.5	Paramètres électriques du panneau photovoltaïque PWX500-12V.	90
4.1	Matrice d'affectation des véhicules électriques aux stations de recharge.	110
4.2	Résultat de calcul de SoC_f et E_{cn} pour le véhicule VE_1	117
4.3	Résultats de calcul des coefficients d'affectation SOC_f et E_{cn} pour l'ensemble des véhicules	118

4.4	Valeurs optimales des coefficients d'affectation des VEs aux stations de recharge pour un moment donné.	119
4.5	Affectation optimale.	120
4.6	Valeurs nécessaires pour le calcul.	120
4.7	Résultats de calcul de SOC_f et E_{cp} pour le couple (VE_1, S_1) et pour les deux valeurs t_1 et t_2	122
4.8	Résultats de calcul des paramètres SOC_f et E_{cp} pour le couple (VE_1, S_1) pour différentes conditions de trafic.	122
4.9	Valeurs de SOC_f et E_{cp} obtenus pour le véhicule VE_1	123
4.10	Résultats de calcul des coefficients d'affectation SoC_f et de consommation E_{cp} pour l'ensemble des véhicules.	126
4.11	Coefficients d'affectation des VEs aux stations de recharges	127
4.12	Matrice des affectations retenues et non retenues.	128
4.13	Valeurs optimales des coefficients d'affectation pour un moment donné.	128
4.14	Résultats de l'affectation optimale.	128
4.15	Affectation optimale dans les deux cas étudiés.	129
4.16	Marques et modèles des VEs considérés dans l'étude	130
4.17	Caractéristiques des VEs considérés dans l'étude	130
4.18	Contraintes d'association des VEs aux stations de recharge	131
4.19	Données du système	133
4.20	Consommation d'énergie E_{cp} pour l'ensemble des véhicules.	134
4.21	Résultats de calcul des coefficients d'affectation SOC_f pour l'ensemble des véhicules.	135
4.22	Valeurs optimales des coefficients d'affectation SOC_f pour un moment donné.	136
4.23	Valeurs optimales de SOC_f et valeurs de SOC_{min} pour l'ensemble des véhicules.	136
4.24	Résultats d'affectation optimale.	138
B.1	Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_2	169
B.2	Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_3	170
B.3	Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_4	170
B.4	Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_5	170
B.5	Estimations des consommations d'énergie et des SOC_f du véhicule VE_6	170
B.6	Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SoC_f du véhicule VE_2	171
B.7	Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_3	172
B.8	Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_4	172
B.9	Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_5	172
B.10	Estimations des consommations d'énergie E_{cp} et des SOC_f du véhicule VE_6	173

Résumé

La forte dépendance du pétrole et les contraintes écologiques et environnementales obligent de nombreux constructeurs automobiles à développer des programmes de recherche importants pour le développement des véhicules électriques (VEs) et des infrastructures associées. Les batteries embarquées dans les VEs peuvent être rechargées par le réseau électrique ou par une autre source d'énergie renouvelable. Dans ce contexte, cette thèse a pour but d'étudier un système de recharge de VEs à partir de l'énergie solaire. Pour ce faire, une étude de dimensionnement du système a été proposée afin d'évaluer les besoins énergétiques des VEs et déterminer les quantités d'énergie nécessaires pour les propulser. Les éléments principaux du système ont été dimensionnés. Il s'agit des panneaux photovoltaïques, de la batterie de stockage (au plomb), et de la batterie de traction (Li-ion). A partir de cette étude de dimensionnement, nous avons pu déterminer la puissance et la quantité d'énergie nécessaire pour propulser un VE compte tenu de ses caractéristiques. Pour étudier le comportement des différents éléments du système et analyser leur adéquation avec le processus de recharge, une étude de modélisation a été réalisée, et chaque élément est représenté par un modèle mathématique. L'analyse et la comparaison des résultats obtenus (résultats de simulation et résultats expérimentaux) ont permis de valider les modèles proposés. De même, cette étude de modélisation a permis de valider le choix des composants du système de recharge. Dans le but de gérer efficacement les processus et les planifications des opérations de recharge, une étude d'optimisation d'affectation des VEs aux stations de recharge a été effectuée. Pour ce faire, le problème a été formalisé par un programme mathématique linéaire avec un objectif à atteindre et des contraintes, liées aux caractéristiques des VEs, des stations de recharge et des conditions de circulation, à satisfaire. Cette approche a permis d'affecter les VEs aux stations de recharge, de manière adéquate et optimale, .

Mots-clés : Véhicules électriques, Stations de recharge, Batteries, Panneaux photovoltaïques, Dimensionnement, Modélisation, Simulation et validation expérimentale, Optimisation, Flux de véhicules.

Abstract

The strong dependence on oil and ecological and environmental constraints force many car manufacturers to develop new research programs for the promotion of electric vehicles (EVs) and associated infrastructures. The embedded batteries into the EVs can be charged by the electrical network or by another source of renewable energy. In this context, the work presented in this thesis aims to study a system of EVs charging using solar energy through photovoltaic panels. To do so, a sizing study of the system has been proposed in order to evaluate the energy needs for an EV and determine the quantity of required energy for its propel. The key elements of the system have been sized: photovoltaic panels, storage battery (Lead-acid) and traction battery (Li-ion). From this sizing study and considering the EV characteristics, we determined the energy quantity required for its propel. With the aim to study the behavior of each system component and analyze its adequacy with the charging process, a modeling study was conducted, and each element is represented by a mathematical model. The performed analysis and comparison of obtained results (simulation and experimental results) allowed us to validate the developed models. In addition, this modeling study, allowed the validation of the choice of all components of charging system. In order to effectively manage the processes and plans of charging operations, an optimization study for assigning EVs to charging stations was carried out. In fact, the problem was formalized by a linear program with the aim to assign each EV to an adequate charging station. The assignment takes into account various constraints and characteristics of EVs, as well as those of charging stations, traffic conditions, interest points of drivers, etc. The proposed approach allowed to assign adequately and optimally EVs to charging stations while satisfying all constraints.

Key words : Electric vehicles, Charging stations, Batteries, Panels photovoltaic, Sizing, Modeling, Simulation and experimental validation, Optimization, Flow of vehicles.

