



Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electronique  
Laboratoire des Dispositifs de  
Communication  
et de Conversion Photovoltaïque



# Mémoire de Magister en Electronique

Option : Electricité solaire

Présenté par :

**BENKHELIFA Abdelhak**

Ingénieur d'état en électronique de l'université Ferhat Abbas - Sétif

Intitulé

## Etude d'un contrôleur de batteries solaires

Soutenu publiquement le **30/06/2012** devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	MALEK Ali	Directeur de Recherche	Centre de Développement des Énergies Renouvelables
<b>Directeur :</b>	HADDADI Mourad	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
<b>Examineurs :</b>	LARBES Chérif	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
	AIT-CHEIKH Md Salah	Maitre de Conférences	Ecole Nationale Polytechnique

**ENP 2012**

## دراسة مراقب شحن البطاريات الشمسية.

### ملخص:

تستخدم عادة في الأنظمة الكهروضوئية البطاريات لتخزين الطاقة المنتجة. حاليا تعد بطارية الرصاص المفتوحة أكثر تكنولوجيات تخزين الطاقة استعمالا في التطبيقات الكهروضوئية، نظرا لثمنها المنخفض ووفرتها مقارنة بالأنواع الأخرى من البطاريات. لكن مدة حياة و أداء بطارية الرصاص حساسان للغاية لطريقة الشحن المستعملة. كما تبين كذلك أن الألواح الكهروضوئية لا تعتبر مطلقا مصدرا مثاليا لشحن البطاريات. لهذا يلعب مراقب الشحن دورا مهما في الحفاظ على البطارية و إطالة عمرها. يصف هذا العمل تصميم مراقب شحن لبطارية الرصاص بمتحكم مصغر. يتكون المراقب المقترح من محول خافض-رافع بثلاثة أنماط اشتغال و تعقب نقطة الإستطاعة القصوى. يستخدم هذا المراقب كذلك خوارزمية شحن بأربع مراحل بالإضافة إلى تقدير حالة شحن البطارية. تتطرق أيضا هذه الوثيقة لمختلف تكنولوجيات البطاريات الشمسية وتكنولوجيا بطارية الرصاص خاصة، بالإضافة إلى عرض حال حول مراقبات الشحن.

**الكلمات الدلالية:** الأنظمة الكهروضوئية الذاتية، بطارية الرصاص، محول خافض - رافع، تعقب نقطة الإستطاعة القصوى ، حالة الشحن

## ETUDE D'UN CONTRÔLEUR DE BATTERIS SOLAIRES.

### RESUME :

Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, le stockage de l'énergie est généralement assuré par des batteries. La batterie au plomb ouverte est actuellement la plus utilisée dans les applications photovoltaïques, vu son faible coût et sa large disponibilité comparée aux autres types de batteries. Néanmoins sa durée de vie et ses performances sont très sensibles au régime de charge utilisé. Il a été établi aussi que les panneaux photovoltaïques ne constituent pas une source idéale pour charger les batteries. C'est pourquoi, le rôle du contrôleur de charge est crucial pour la protection de la batterie et la prolongation de sa durée de vie.

Ce travail décrit la conception d'un contrôleur de charge de batteries au plomb à base de microcontrôleur. Le contrôleur proposé est constitué d'un convertisseur abaisseur-élevateur positif à commande MPPT et à trois modes de fonctionnement. Ce contrôleur utilise aussi un algorithme de charge à quatre étapes en plus de l'estimation du SOC de la batterie.

Il est également abordé dans ce document les différentes technologies de batteries solaires et la technologie au plomb en particulier, ainsi qu'un état de l'art sur les contrôleurs de charge.

**Mots-clés :** Système photovoltaïque autonome ; Accumulateur au plomb ; Convertisseur abaisseur-élevateur ; MPPT ; État de charge

## STUDY OF A SOLAR BATTERY CHARGE CONTROLLER.

### ABSTRACT:

Generally, in stand-alone photovoltaic systems energy storage is provided by batteries. Nowadays the open lead-acid battery is the most widely used energy storage technology in photovoltaic applications, given its low cost and availability compared to other battery types. However its life and its performance are very sensitive to the used charging regime. It has also been established that photovoltaic panels are not an ideal source for charging batteries. Therefore, the role of the charge controller is essential for protecting battery and extending its lifetime.

This work describes the design of a microcontroller based lead-acid battery charge controller. The proposed controller uses an MPPT controlled positive Buck-Boost converter with three operation modes. This controller also uses a four stages charging algorithm in addition to battery SOC estimation. It is also addressed in this paper the various technologies of solar batteries especially the lead-acid battery. A state-of-the-art review of charge controllers is presented too.

**Keywords:** Stand-alone photovoltaic system; Lead-acid battery; Buck-boost converter; MPPT; State of charge

# *Remerciements*

*Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de mémoire, le Professeur **Mourad HADDADI** de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), pour avoir proposé et encadré ce mémoire. Je lui exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité, ses conseils judicieux et surtout pour son indulgence. Ce travail de mémoire n'aurait jamais abouti sans son soutien indéfectible et ses encouragements.*

*Je remercie également Monsieur **Ali MALEK**, Directeur de recherche au CDER, pour avoir présidé le jury de mon mémoire, ainsi que Messieurs **Chérif LARBES**, professeur à l'ENP, et **Mohamed Salah AIT-CHEIKH**, Maître de conférences à l'ENP, pour avoir accepté d'être examinateurs de mon mémoire.*

*Mes plus tendres remerciements à ma mère pour ses sacrifices d'hier, pour ses prières et ses vœux de bien-être d'aujourd'hui.*

*Enfin, au terme de ces remerciements, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes frères et sœurs pour leur soutien et leur compassion. Je remercie également tous les membres de ma belle-famille pour leur convivialité et leur sens de l'hospitalité.*

*Je ne peux oublier de remercier ma campagne et épouse bien-aimée, qui a partagé mon « angoisse de la page blanche » des années durant, qui a su me supporter avec sérénité, patience, compréhension et amour.*

*A la mémoire de mon défunt père, Puisse Allah l'accueillir dans Ses vastes paradis !*

## TABLE DES MATIERES

	Page
<b>INTRODUCTION</b> .....	11
<b>Chapitre 1 INTRODUCTION AUX SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	15
1. LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	15
1.1. Systèmes autonomes.....	19
1.2. Systèmes connectés au réseau.....	20
2. STOCKAGE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	21
3. BATTERIES SOLAIRES.....	26
3.1. Batterie au plomb-acide.....	28
3.2. Batterie au Nickel-Cadmium.....	29
3.3. Nickel-Métal Hydride.....	29
3.4. Batterie au Lithium Ion.....	29
<b>Chapitre 2 L'ACCUMULATEUR AU PLOMB</b> .....	
1. INTRODUCTION.....	31
2. CONCEPTS FONDAMENTAUX.....	32
2.1. La cellule électrochimique.....	32
2.2. Piles et accumulateurs.....	33
3. CONSTITUTION.....	33
3.1. Électrodes.....	34
3.1.1 Électrode positive.....	34
3.1.2 Électrode négative.....	34
3.2. Séparateurs.....	35
3.3. Électrolyte.....	35

---

3.3.1	Électrolyte liquide.....	35
3.3.2	Électrolyte gélifié ou absorbé.....	36
3.4.	Boîtier.....	36
4.	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	36
5.	TECHNOLOGIE.....	38
4.1.	Batterie au plomb ouverte.....	38
4.2.	Batterie au plomb étanche.....	38
6.	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES.....	40
6.1.	La capacité.....	40
6.1.1	La capacité nominale en n heures.....	40
6.1.2	La capacité stockée.....	41
6.1.3	La capacité récupérable.....	41
6.2.	Le rendement énergétique.....	41
6.3.	Le rendement en courant.....	42
7.	MODES DE CHARGE DES ACCUMULATEURS AU PLOMB.....	42
8.	VULNERABILITÉ DE L'ACCUMULATEUR AU PLOMB.....	43
9.1.	Effet de la température.....	43
9.2.	Corrosion des électrodes.....	44
9.3.	Sulfatation.....	44
9.4.	Stratification.....	45
<b>Chapitre 3 ETAT DE L'ART DANS LES CONTROLEURS DE CHARGE POUR SYSTEMES PHOTOVOTAIQUES.....</b>		
1.	INTRODUCTION.....	46
2.	FONCTIONS D'UN RÉGULATEUR DE CHARGE.....	46
2.1.	Contrôle de la charge.....	46
2.2.	Contrôle de la décharge.....	46

2.3.	Fonction de sécurité.....	47
2.4.	Fonction de convivialité.....	47
3.	STRUCTURE GÉNÉRALE D'UN CONTROLEUR DE CHARGE.....	47
4.	TYPES DE CONTRÔLEURS DE CHARGE.....	48
4.1.	Régulateurs à connexion directe.....	48
4.2.	Régulateurs avec adaptation d'impédance.....	49
5.	STRUCTURE DU CONVERTISSEUR DC/DC.....	49
5.1.	Convertisseur Buck.....	49
5.2.	Convertisseur Boost.....	55
<b>Chapitre 4 CONCEPTION ET MISE EN.ŒUVRE.....</b>		
1.	INTRODUCTION.....	60
2.	CAHIER DE CHARGE.....	60
3.	STRUCTURE DU CONTRÔLEUR DE CHARGE PROPOSÉ.....	60
3.1.	Étage de puissance.....	61
3.2.	Étage d'acquisition et de contrôle.....	64
3.3.	Étage d'affichage.....	66
3.4.	Carte d'alimentation.....	66
4.	STRATÉGIE DE COMMANDE PROPOSÉE.....	67
<b>CONCLUSION.....</b>		70
<b>REFERENCES.....</b>		71
<b>ANNEXE.....</b>		75

## LISTE DES FIGURES

	Page
Fig. 1	Prévision de la demande mondiale d'énergie primaire..... 11
Fig. 2	Intensité et répartition de l'irradiation globale horizontale en Algérie..... 13
Fig. 1.1	Système photovoltaïque de base..... 15
Fig. 1.2	Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire..... 16
Fig. 1.3	Rendement et prix des différentes technologies de modules PV (2008)..... 16
Fig. 1.4	Allure de la caractéristique I-V d'une cellule solaire..... 18
Fig. 1.5	Caractéristique P-V d'une cellule solaire..... 18
Fig. 1.6	Types des systèmes photovoltaïques..... 19
Fig. 1.7	Système photovoltaïque autonome simplifié..... 20
Fig. 1.8	Système connecté au réseau simplifié..... 21
Fig. 1.9	Décalage entre production et consommation d'énergie photovoltaïque..... 22
Fig. 1.10	Types de technologies de stockage d'électricité..... 23
Fig. 1.11	Caractéristiques techniques des principales solutions de stockage..... 24
Fig. 1.12	Niveau de maturité technologique des différents moyens de stockage d'électricité..... 24
Fig. 1.13	Coûts d'investissement pour différentes technologies de stockage d'électricité..... 25
Fig. 1.14	Durée de vie d'une batterie en fonction de la profondeur de décharge..... 27
Fig. 1.15	Comparaison des différentes technologies de batteries en termes de densité d'énergie massique et volumique..... 28
Fig. 1.16	Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques..... 28
Fig. 2.1	La première batterie au plomb constituée de neuf cellules..... 31
Fig. 2.2	Constitution d'un accumulateur au plomb..... 34
Fig.2.3	Principe de fonctionnement d'un accumulateur au plomb-acide..... 37
Fig. 2.4	Mode de charge d'une batterie au plomb..... 43
Fig. 2.5	Tension de charge recommandée pour différents températures de batterie (Compensation de température)..... 44
Fig.3. 1	Régulateur de type shunt..... 48
Fig.3. 2	Régulateur de type série..... 48
Fig. 3.3	Structure avec étage d'adaptation d'impédance..... 49
Fig. 3.4	Circuit idéal du hacheur série..... 50

Fig. 3.5	Courant dans la self du hacheur série.....	51
Fig. 3.6	Courant en discontinuité dans la self du hacheur série.....	52
Fig. 3.7	Schéma équivalent du hacheur série à $t \in [0, d.T_s]$ .....	52
Fig. 3.8	Schéma équivalent du hacheur série à $t \in [d.T_s, T_s]$ .....	53
Fig. 3.9	La caractéristique de la tension d'inductance.....	54
Fig. 3.10	Le rapport de conversion M (d) pour un hacheur série.....	55
Fig. 3.11	Schéma de principe d'un Boost.....	55
Fig. 3.12	Schéma équivalent du hacheur survolteur à $t \in [0, d.T_s]$ .....	56
Fig. 3.13	Schéma équivalent du hacheur survolteur à $t \in [d.T_s, T_s]$ .....	57
Fig. 3.14	L'allure du rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.....	59
Fig.4.1	Schéma synoptique du contrôleur.....	61
Fig.4.2	Étage de puissance.....	62
Fig. 4.3	Les trois modes de fonctionnement du convertisseur proposé.....	63
Fig. 4.4	Étage de commande.....	64
Fig. 4.5	Mesure des tensions.....	65
Fig. 4.6	Mesure du courant du générateur PV.....	65
Fig. 4.7	Mesure du courant de la batterie.....	65
Fig. 4.8	Mesure de la température de la batterie.....	66
Fig. 4.9	Carte d'affichage.....	66
Fig.4.10	Carte d'alimentation.....	67
Fig.4.11	Machine d'états du système.....	68
Fig.4.12	Organigramme du choix du mode de fonctionnement.....	69
Fig. A.1	Schéma du contrôleur de batterie à réaliser.....	75



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Comparaison des différents types de batteries à usage solaire.....	30
Tableau 2.1 Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au Plomb.....	39
Tableau 4.1 Cahier des charges.....	60

## NOMENCLATURE

$I$	courant	(A)
$P$	puissance	(W)
$T$	température	(K)
$I_{cc}$	courant de court-circuit	(A)

### Symboles grecques

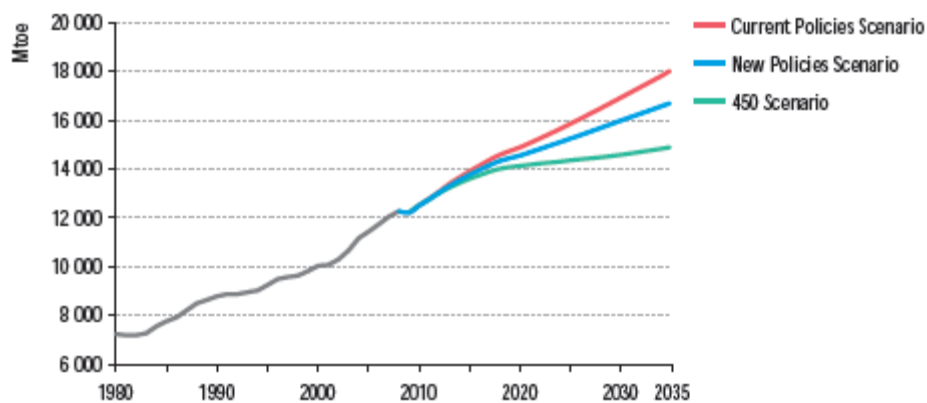
$\alpha$	coefficient d'absorption
$\beta$	angle d'attaque (rad)

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début de ce siècle, la consommation mondiale d'énergie est en croissance continue. En 2010, la consommation énergétique mondiale (tous types d'énergie confondus) a connu une augmentation de +5,6%, un taux jamais atteint depuis 1973, date de la première crise mondiale de l'énergie [1]. Cette croissance de la consommation mondiale d'énergie, d'après les expert du domaine, est le résultat logique de deux facteurs à savoir, la croissance démographique et l'amélioration du revenu par individu dans les pays émergents, la Chine et l'Inde principalement [2]. D'après les experts toujours [1, 3-5], cette tendance à la hausse de la consommation énergétique mondiale se maintiendra au cours des décennies à venir. Les spécialistes du groupe BP, dans leur rapport « *BP Energy Outlook 2030* » de juin 2011 [2], mentionnent que la consommation mondiale en énergie primaire est susceptible d'augmenter de 39% au cours des vingt prochaines années.

Bien plus encore, dans leurs scénarios énergétiques à long terme, plusieurs acteurs du monde de l'énergie [1, 3-5] prévoient une forte expansion de la demande mondiale en énergie. A titre d'exemple, même d'après le scénario le plus optimiste de l'AIE (Agence internationale de l'énergie) dit « Scénario 450 »\*, (cf. Figure1), il est attendu que la demande mondiale d'énergie primaire croîtrait de 22% entre 2008 et 2035, soit un taux moyen annuel de 0,7% [3]. Ces mêmes prévisions indiquent aussi que les combustibles fossiles - pétrole, charbon et gaz naturel - resteront les sources d'énergie prédominantes en 2035.



**Fig. 1** : Prévion de la demande mondiale d'énergie primaire [3]

Subséquentement, les prix des hydrocarbures ont connu durant cette dernière décennie des hausses soutenues, atteignant parfois des prix records comme celui enregistré en juillet 2008 où le baril de pétrole a frôlé la barre de 147 USD [6]. Bien entendu, il n'ya pas que les facteurs économique qui sont la cause de cet envolée des cours du pétrole durant cette

décennie. Des facteurs géopolitiques en plus à la spéculation sur les marchés internationaux ont, eux aussi, largement contribué à consolider cette tendance à la hausse des prix.

Ainsi, le modèle énergétique du monde tel que nous le connaissons aujourd'hui, basé essentiellement sur les ressources fossiles, instauré depuis plus d'un siècle et demi, se trouve plus que jamais menacé.

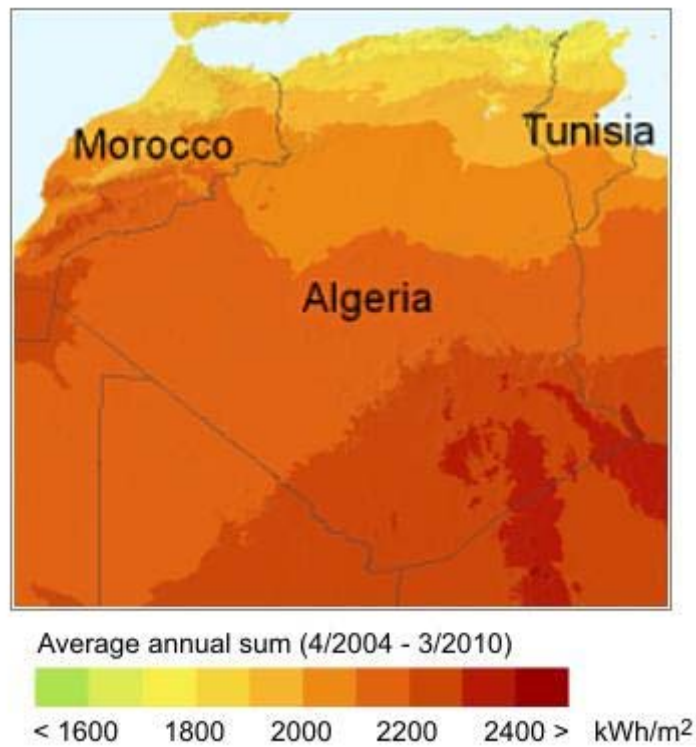
Dans ce contexte énergétique mondial au futur incertain, l'Algérie bien qu'elle soit un pays producteur d'hydrocarbures aujourd'hui, il n'en demeure pas moins qu'elle serait à l'abri d'une éventuelle pénurie à l'avenir.

En effet, d'après BP dans son rapport statistique annuel de juin 2011 [1], les réserves pétrolières prouvées de l'Algérie sont estimées à 12,2 milliards barils, ce qui représente une durée de vie de 18,5 ans au rythme de la production actuelle. D'après la même source toujours, les prévisions pour le gaz naturel sont plus optimistes et donnent 4,5 trillion m<sup>3</sup> comme réserves prouvées, en termes de durée de vie cela représente un peu plus de 56 ans au rythme de la production actuelle bien entendu.

Sans se lancer dans la controverse des chiffres des experts en hydrocarbures, notons quand même que bien que ces derniers soient divisés au sujet de la durée de vie et des réserves de pétrole et de gaz en Algérie, ils sont unanimes toutefois à dire qu'il est grand temps que les pouvoirs publics commencent à réfléchir sérieusement à la période de l'après-pétrole. Les dispositions prises et annoncées récemment par les hauts responsables de l'état concernant la promotion des énergies renouvelables en Algérie vont dans ce sens d'ailleurs.

Les énergies renouvelables s'annoncent donc comme une ultime alternative aux énergies fossiles pour le monde tout comme pour l'Algérie. En termes d'énergies renouvelables, pour l'Algérie la filière solaire est indéniablement celle qui s'annonce la plus prometteuse.

Effectivement de par sa situation géographique, l'Algérie recèle un gisement solaire gigantesque, l'un des plus importants au monde en étendue : sur une superficie de plus de 2 millions de km<sup>2</sup> et en intensité : avec une durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national qui dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts-plateaux et Sahara) et une énergie moyenne reçue qui varie entre 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays [7]. Cependant l'exploitation de ces potentialités reste faible sinon négligeable : l'absence de statistiques et de chiffres est d'ailleurs une preuve éloquente de la contribution dérisoire des énergies renouvelables dans le mix énergétique national, mais aussi du peu d'intérêt que portent les pouvoirs publics au secteur des énergies renouvelables en Algérie !



**Fig. 2 :** Intensité et répartition de l'irradiation globale horizontale en Algérie [8]

Dès le milieu des années 70, l'Algérie avait entrepris un ambitieux programme national d'électrification qui avait pour objectif l'amélioration des conditions de vie des populations des campagnes tout en assurant un développement harmonieux de l'espace rural.

Bien que le taux d'électrification soit passé de 57% en 1977 à plus de 96% actuellement [9], ils subsistent encore des zones du pays privées d'électricité notamment dans les régions du Sud, les Hauts-plateaux et certaines zones rurales au Nord, alors que les systèmes photovoltaïques autonomes pourraient bien être exploités pour contribuer à résoudre ce problème. Bien évidemment ce sont ces régions là qui très vastes, très éloignées du réseau de distribution national et très faiblement peuplées, où se justifie le plus techniquement aussi bien qu'économiquement la réalisation de réseaux isolés et décentralisés.

Il est à noter toutefois que les systèmes autonomes qui, globalement, utilisent les batteries au plomb ouvertes comme élément de stockage d'énergie, en plus des coûts prohibitifs des panneaux solaires, se trouvent assez souvent défectueux. Ce qui constitue un handicap quant à l'éventualité d'un déploiement massif de ces systèmes surtout parmi une population au niveau intellectuel limité et aux ressources économiques limitées également. Les défaillances des systèmes photovoltaïques autonomes sont imputables dans leur majorité aux batteries.

En effet la batterie de stockage est le maillon faible de ces systèmes. La batterie au plomb est très sensible aux cycles de charge et de décharge qu'elle subit durant son service. Une batterie surchargée ou trop déchargée peut subir des dégâts irréversibles ce qui écourte sa durée de vie effective et par le fait même induit des frais supplémentaires au coût total du système.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de mémoire est de développer un système de gestion de la charge et décharge de l'élément de stockage, la batterie au plomb ouverte précisément, dans un système photovoltaïque autonome pour garantir un fonctionnement optimal du système et prolonger la durée de vie de la batterie. Ce travail, comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une description succincte des systèmes photovoltaïques, vu la multitude de documents disponible dans la littérature traitant de ce sujet. Nous y abordons également la problématique du stockage de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque et les solutions disponibles. Le concept de batterie solaire ou photovoltaïque y est évoqué également.

Dans le chapitre suivant, une description détaillée de l'accumulateur au plomb est présentée. L'accumulateur au plomb bien que connu depuis plus d'une centaine d'années, reste encore largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les contrôleurs de charge pour batteries solaires.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous exposons notre contribution personnelle à ce travail de mémoire. La mise en œuvre d'un prototype de contrôleur de batterie solaire ainsi que quelques résultats expérimentaux sont présentés.

---

\* En octobre 2009, l'AIE a présenté son scénario énergétique, baptisé «450» en référence à la limite de concentration des gaz effet de serre, de CO<sub>2</sub> notamment, dans l'atmosphère de 450 parties par million (ppm) que le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) préconise de ne pas dépasser pour atteindre l'objectif de limitation du réchauffement climatique à +2°C en 2100

Dans ce scénario, il est supposé des politiques nationales de réduction des émissions vigoureuses qui encouragent le déploiement de technologies sobres en carbone (amélioration de l'efficacité énergétique, véhicules hybrides et électrique, énergies renouvelables, captage et stockage du CO<sub>2</sub>) et des investissements très importants qui seront compensés en partie par une réduction de la facture pétrolière [11].

# **CHAPITRE 1**

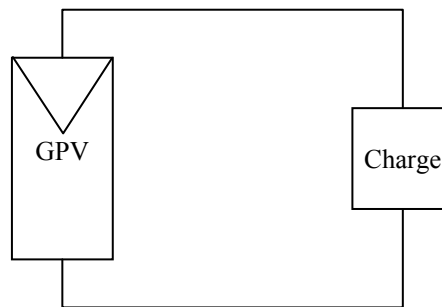
## **1. INTRODUCTION AUX SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES**



## 1 LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

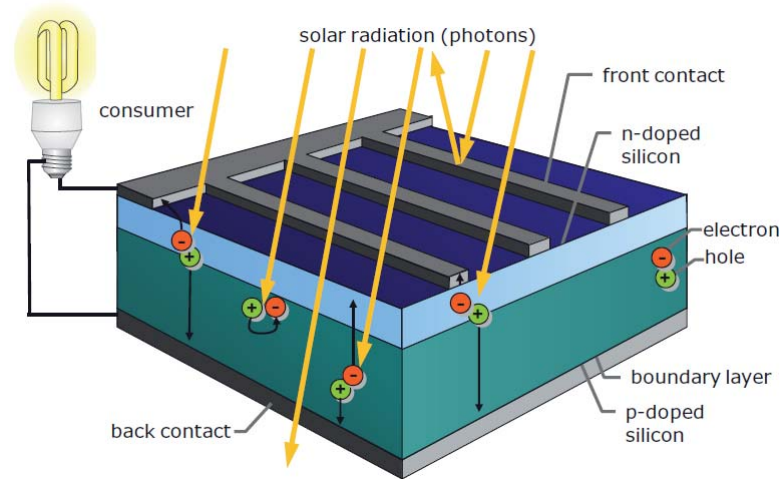
Un système photovoltaïque se compose de plusieurs éléments interconnectés destinés à réaliser une tâche bien déterminée, qui peut être fournir de l'électricité au réseau public de distribution, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice ou l'une des nombreuses utilisations possibles de l'électricité solaire [12].

Dans sa forme la plus simple, un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque auquel est reliée une charge à courant continu (Figure 1.1).



**Fig. 1.1** : Système photovoltaïque de base

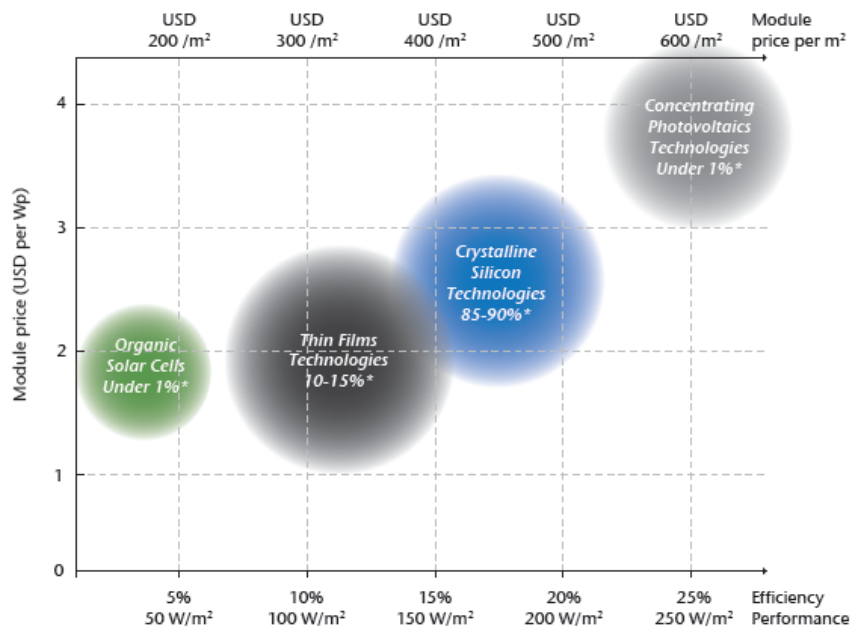
Le générateur photovoltaïque, comme son nom l'indique, génère de l'électricité par conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Il est constitué d'un ou plusieurs modules ou panneaux photovoltaïques raccordés les uns aux autres en série et/ou en parallèle pour fournir la tension et l'intensité désirés. Le module photovoltaïque lui-même se compose d'un certain nombre de cellules photovoltaïques qui, généralement, sont reliées entre elles en série. La cellule photovoltaïque ou encore cellule solaire est le constituant élémentaire du module photovoltaïque. C'est une grande jonction p-n en matériaux semi-conducteurs, spécialement conçue pour générer un courant électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière [13-18], c'est l'effet photovoltaïque, dit aussi effet Becquerel. L'effet photovoltaïque fut découvert par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel qui, en 1839, observa que certains matériaux, quand exposés à la lumière, produisaient un courant électrique [19, 20].



**Fig. 1.2 :** Structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire [21]

Divers matériaux semi-conducteurs sont utilisés pour la fabrication des cellules solaires tels que le silicium (Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuInSe}_2$ ), ...

Avec un rendement de 14% à 15% pour le polycristallin et de près de 16% à 19% pour le monocristallin, actuellement le silicium cristallin est de loin le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque. Il détient plus de 90% du marché mondial des cellules photovoltaïques [22].



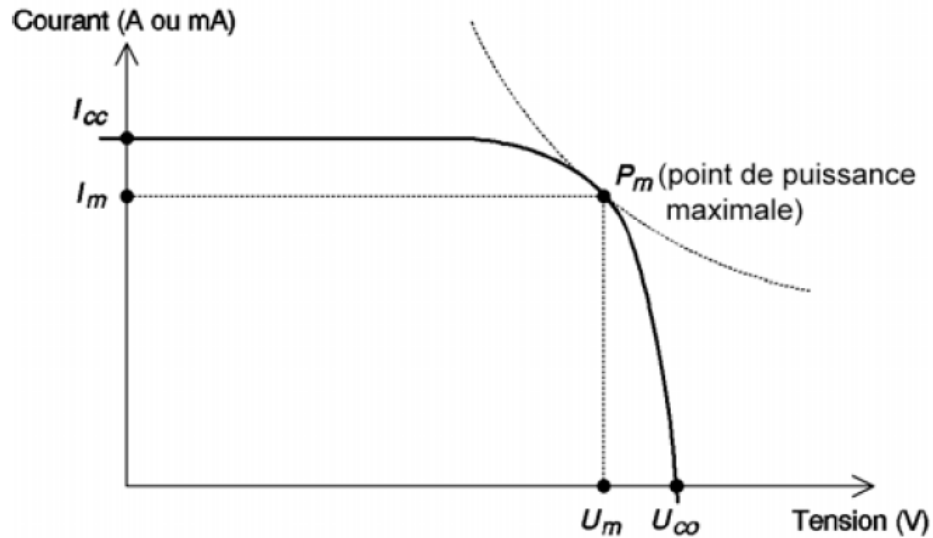
**Fig. 1.3 :** Rendement et prix des différentes technologies de modules PV (2008) [23]

Comme nous l'avons énoncé précédemment, une cellule solaire génère un courant électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle transforme donc l'énergie lumineuse en énergie électrique. De ce fait, une cellule photovoltaïque est un générateur électrique, et en tant que tel, elle est caractérisée par des grandeurs électriques essentielles, à savoir le courant et la tension. Les variations du courant débité par une cellule PV en fonction de la tension à ses bornes sont généralement représentées par une courbe, souvent appelée caractéristique I-V. Chaque cellule solaire possède sa propre caractéristique I-V. Sur la figure 1.4 est représentée la courbe typique de la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque. Sur cette courbe, on distingue trois points caractéristiques :

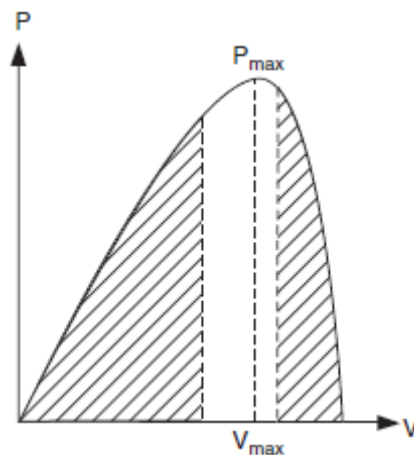
- Le point  $I_{cc}$  et qui correspond au courant de la cellule lorsque son pôle positif et son pôle négatif se trouvent court-circuités. Dans ce cas, la tension aux bornes de la cellule est nulle.
- Le point  $U_{co}$  qui est la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit-ouvert. C'est le courant de la cellule qui est nul dans ce cas.
- Le point,  $P_m$  noté souvent  $P_{MPP}$ , est le point de puissance maximale de la cellule PV localisé par le courant  $I_m$  et la tension  $U_m$

La puissance d'une cellule solaire en fonction de sa tension est aussi représentée sur une courbe (Figure 1.5)

Dans la pratique, ce sont des réseaux de caractéristiques I-V qui sont fournis par les fabricants des modules photovoltaïques. La caractéristique I-V d'un panneau solaire est identique à celle d'une cellule, seul l'ordre de grandeur de leurs paramètres électriques (courant  $I_{cc}$ , tension  $U_{co}$  et puissance  $P_{MPP}$ ) diffère puisque le panneau solaire est constitué d'un certain nombre de cellules photovoltaïques qui, généralement, sont reliées entre elle en série.



**Fig. 1.4** : Allure de la caractéristique I-V d'une cellule solaire [24]



**Fig.1.5** : Caractéristique P-V d'une cellule solaire

Le déploiement massif de l'utilisation de l'énergie électrique d'origine solaire dans divers domaines et le souci croissant de vouloir toujours obtenir des systèmes PV plus performants, ont stimulé la mise en œuvre de systèmes PV de configurations aussi diversifiées que complexes pour satisfaire des besoins spécifiques. En effet, la structure d'un système PV dépend de plusieurs facteurs dont les plus importantes sont :

- la localisation ou le site de l'application,
- la fonction à remplir,
- le type de la charge à alimenter.

Mais d'une manière générale, les systèmes photovoltaïques peuvent être classés en deux grandes catégories, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau et les systèmes photovoltaïques autonomes [16-18, 25, 26]. Comme nous pouvons le constater sur la figure ci-dessous, chaque catégorie est elle-même subdivisée en plusieurs sous-catégories distinctes.

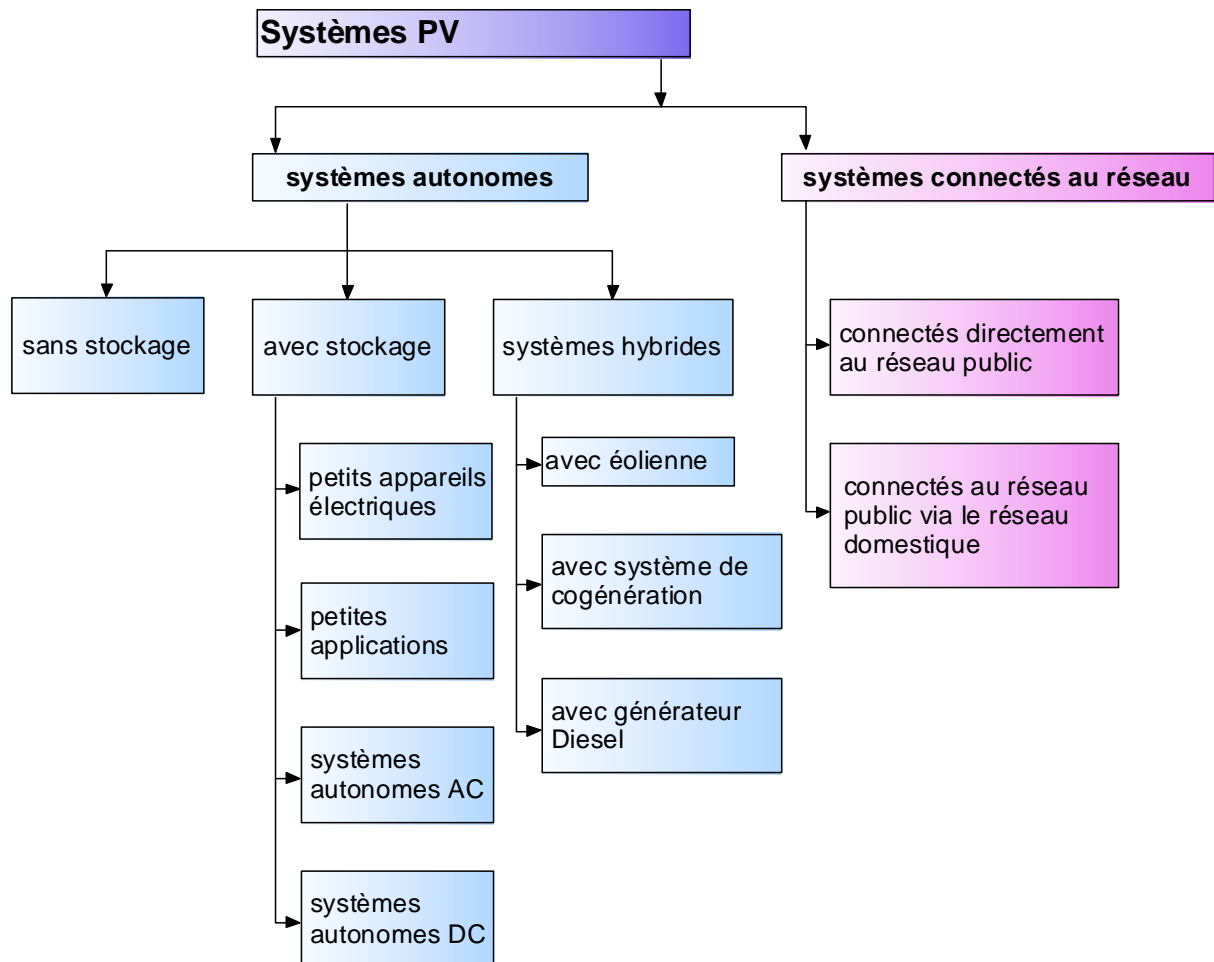
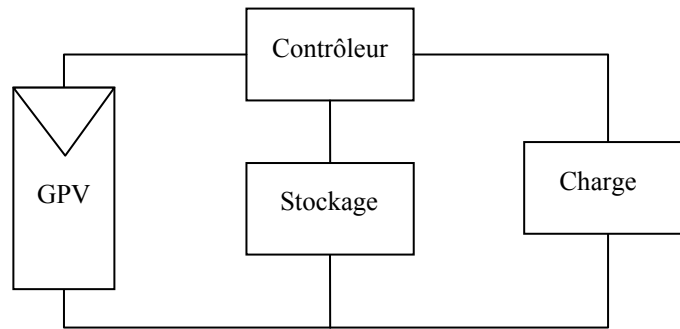


Fig. 1.6 : Types des systèmes photovoltaïques [25]

### 1.1 Systèmes autonomes

Historiquement, les systèmes autonomes ou isolés sont les plus anciens, ils sont apparus à la fin des années 1950 avec les panneaux solaires montés sur les satellites. Ce n'est que plus tard, après la crise de l'énergie qu'a connue le monde dans les années 1970, que les premières applications terrestres sont apparues [18]. Les installations photovoltaïques autonomes se caractérisent par leur indépendance physique du réseau de distribution. Généralement, ils s'installent en sites isolés et éloignés, là où le réseau public fait défaut à cause de contraintes géographiques ou économiques : le cas des zones montagneuses, des régions du sud enclavées et très faiblement peuplées.



**Fig.1.7** : Système photovoltaïque autonome simplifié

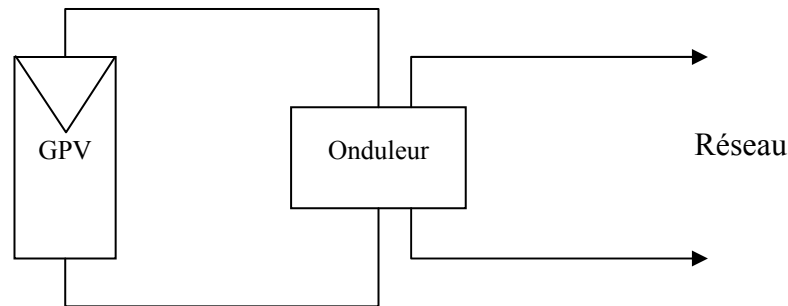
Mis à part dans les applications photovoltaïques dites « au fil du soleil » comme le pompage ou la ventilation, les systèmes photovoltaïques autonomes nécessitent un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement, de jour comme de nuit, en hiver comme en été. Suivant les applications, l'autonomie du système varie de deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques, à une quinzaine de jours pour les applications professionnelles.

Des batteries de différentes technologies sont couramment utilisées pour le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Actuellement, la batterie au plomb, bien que connue depuis plus de cent cinquante ans, offre le meilleur compromis en termes de prix et de durée de vie [27].

## 1.2 Systèmes connectés au réseau

On entend par système photovoltaïque connecté au réseau tout système photovoltaïque dont le générateur est couplé via un convertisseur DC/AC (onduleur) à un réseau électrique public ou domestique (figure 1.5). L'onduleur constitue le cœur du système PV connecté au réseau. C'est lui qui convertit la tension continue du générateur photovoltaïque en tension alternative monophasée ou triphasée de caractéristiques compatibles avec celles du réseau. Il est souvent équipé d'un système de recherche du point de puissance maximale pour assurer un rendement optimal des panneaux photovoltaïques (MPPT) [18, 28].

Dans ce genre de systèmes photovoltaïques, une partie ou la totalité de l'énergie électrique produite est injectée directement sur le réseau, qui joue ainsi le rôle de stockage [16, 29]. La figure 1.3 illustre la configuration minimale d'un tel système.



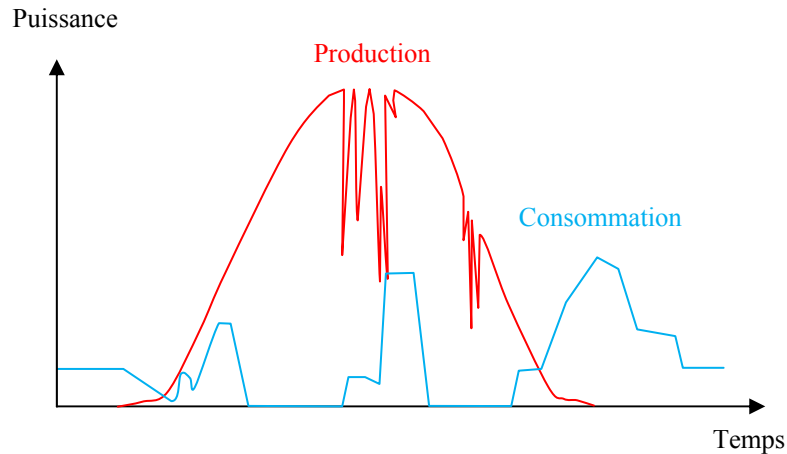
**Fig.1.8** : Système connecté au réseau simplifié

## 2 STOCKAGE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Le stockage de l'énergie consiste à conserver une quantité d'énergie pour son utilisation ultérieure. Par extension, l'expression « stockage d'énergie » désigne également le stockage de matières contenant de l'énergie telles que le pétrole, le gaz, le charbon,....[30, 31].

Par énergie photovoltaïque, on entend cette énergie électrique issue d'un générateur PV par transformation directe de l'énergie solaire en électricité. Comme les autres énergies renouvelables d'ailleurs, l'énergie photovoltaïque est une énergie dite intermittente. Elle est directement disponible le jour seulement. En outre, elle est de nature imprévisible et aléatoire puisque dépendante des aléas atmosphériques. Notons aussi que la production de l'énergie PV est assez souvent en décalage temporel par rapport à sa consommation [32], comme le montre la figure 1.7.

Si bien que le stockage de l'énergie photovoltaïque revêt un intérêt capital aussi bien pour les systèmes PV autonomes que pour les systèmes PV connectés au réseau. Pour les premiers, il permet de couvrir le déficit en énergie lorsque l'éclairement solaire est nul (la nuit) ou insuffisant (par temps nuageux) et éventuellement de différer la consommation du surplus en énergie à des périodes où la demande est supérieure à la production disponible. Pour les seconds, le stockage aide à équilibrer le réseau en périodes de pointes de consommation électrique.

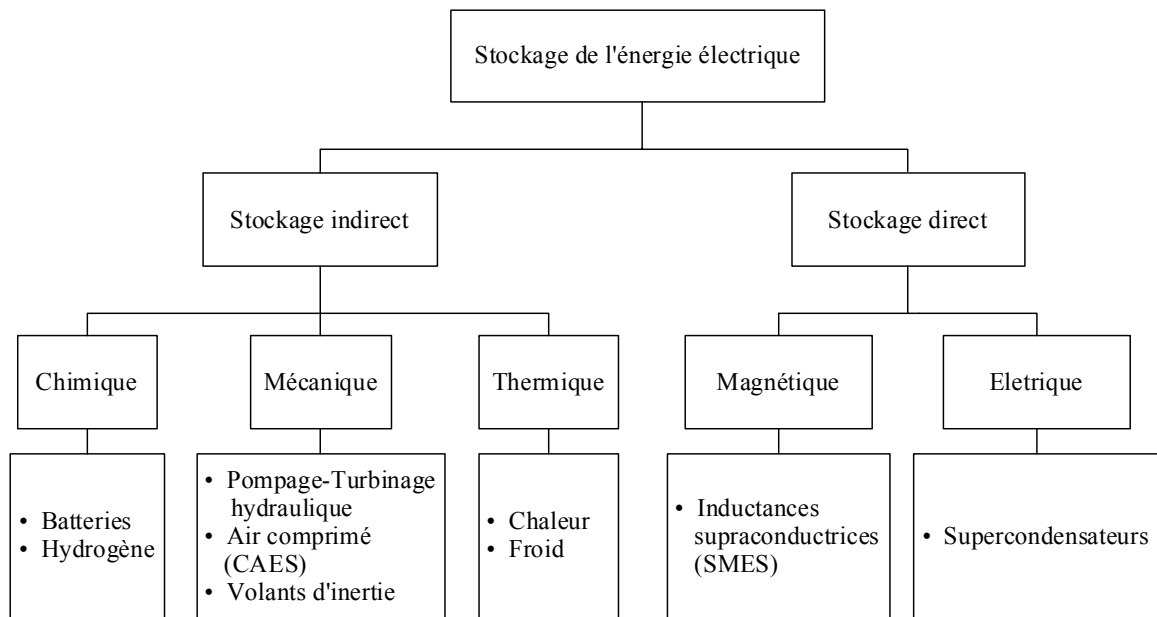


**Fig. 1.9 :** Décalage entre production et consommation d'énergie photovoltaïque

Bien qu'actuellement il existe plusieurs moyens de stockage de l'énergie électrique, l'électricité a néanmoins longtemps été considérée comme non stockable ou du moins difficilement stockable. Cela est dû au fait que l'électricité est massivement produite, transportée et utilisée en courant alternatif. Or dans le contexte énergétique précédant les années 1980, les moyens de conversion permettant le « stockage du courant alternatif » étaient excessivement coûteux, voire très peu fiables ou inexistantes. Tout cela a changé grâce à l'arrivée d'une électronique de puissance très performante, notamment en rendement, économique et dont les puissances traitées sont maintenant très élevées [33]. Il est à noter cependant que, mis à part les supercondensateurs et les inductances supraconductrices (SMES), il n'existe pas actuellement de moyens qui permettent un stockage direct de l'énergie électrique. Le plus souvent, cette dernière est transformée en d'autres formes d'énergie intermédiaires, lesquelles sont facilement stockables : mécanique, thermique ou chimique, essentiellement. On parle alors de stockage indirect. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), aussi connus sous l'acronyme anglo-saxon PHS, les volants d'inertie, les systèmes de stockage d'air comprimé (CAES), les systèmes de stockage de chaleur, les batteries électrochimiques et l'hydrogène en sont des exemples typiques. De ce qui précède, il est facile de déduire que les moyens de stockage sont classés selon le mode dont l'énergie électrique est stockée en deux catégories : les systèmes de stockage direct et les systèmes de stockage indirect, comme trouvé dans [34, 35] d'ailleurs. Il est aussi possible de classer les moyens de stockage selon l'application ou la forme du stockage [31, 36, 37]. Mais, d'un point de vue pratique, les moyens de stockage sont plutôt classés selon leurs caractéristiques spécifiques les plus pertinents pour les applications auxquelles ils sont destinés. Ainsi, selon



la durée de stockage ou temps de décharge, les moyens de stockage se répartissent en deux groupes : les systèmes de stockage à court terme, quelques heures à quelques jours, et les systèmes de stockage à long terme, plusieurs mois [22]. La capacité du stockage est également utilisée pour le classement des systèmes de stockage et on distingue alors les systèmes de stockage à grande échelle, dit aussi massif ou centralisé et les systèmes de stockage à petite échelle au sein du site de production ou décentralisé [38].



**Fig. 1.10** : Types de technologies de stockage d'électricité

Quoique plusieurs technologies de stockage de l'énergie électrique soient disponibles aujourd'hui, comme vu plus haut, il n'existe pas cependant une de technologie « miracle » solution-miracle qui peut convenir à toutes situations. En effet, de par ces caractéristiques, une technologie s'avère plus adaptée à une utilisation particulière qu'à une autre. Par exemple, sur la figure ci-dessus, il est facile de voir que les STEP et les CAES conviennent bien pour des applications nécessitant de grandes capacités de stockage, au dessus de 100MW, sur de longues durées. Les supercondensateurs d'une puissance ne dépassant pas les quelques dizaines de mégawatt-heures sont, par contre, particulièrement intéressantes pour les applications exigeant un temps de décharge de l'ordre de quelque secondes.



Le choix d'une technologie de stockage pour un usage donné nécessite donc une analyse précise qui prend en considération plusieurs paramètres d'ordre pratique. Le plus souvent ce choix est un compromis entre les paramètres les plus influents. Le coût est parfois considéré comme étant le facteur prépondérant, selon [34, 41]. En plus au coût, pour le stockage associé aux systèmes photovoltaïques autonomes notamment, d'autres paramètres importantes sont à considérer pour décider du type de stockage [40-43] :

- la capacité de stockage,
- le temps de réponse,
- la durée de vie,
- l'efficacité et le coût.

Autres caractéristiques telles que l'énergie massique (particulièrement importante dans les applications embarquées, elle revêt une moindre importance dans les applications stationnaires), l'énergie volumique, la sécurité (explosion, rejets...), etc.

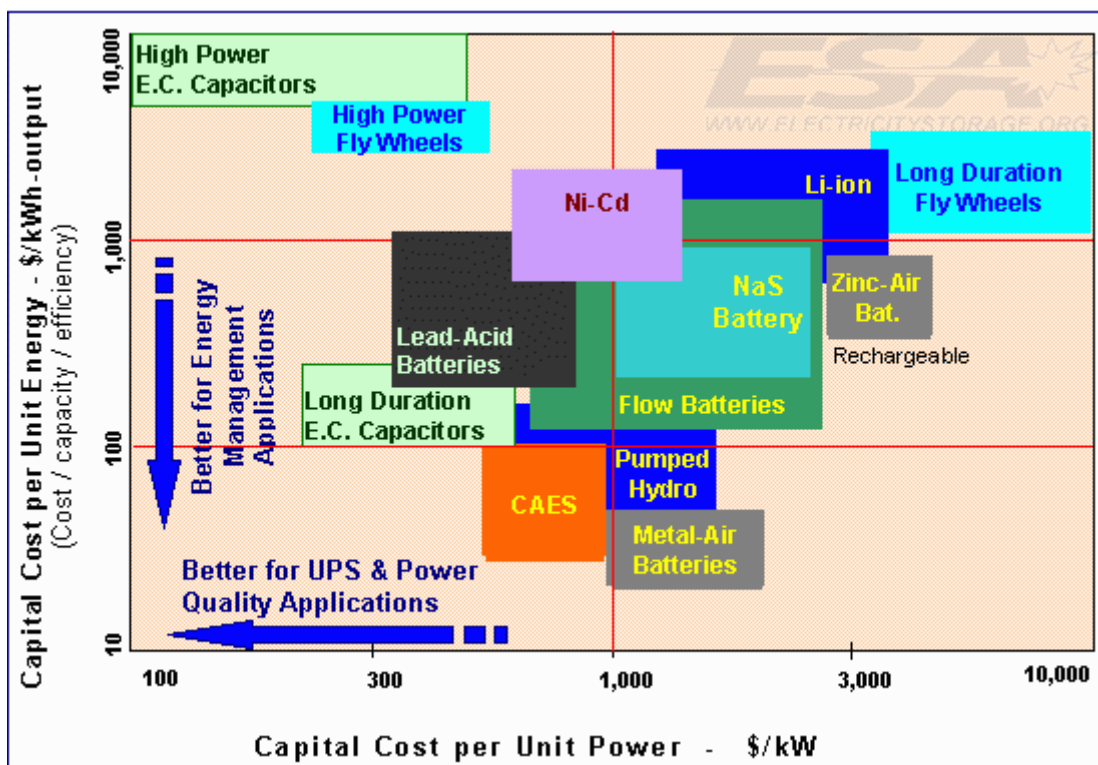


Fig. 1.13 : Coûts d'investissement pour différentes technologies de stockage d'électricité [39]

Dans les systèmes PV autonomes, objet de notre étude, les batteries électrochimiques sont le moyen le plus utilisé pour le stockage de l'énergie électrique [13, 18, 26, 44, 45]. C'est aussi le meilleur moyen de convertir l'énergie électrique photovoltaïque en énergie chimique

puisque toutes deux partagent le même vecteur qu'est l'électron [46]. Il existe de nombreuses technologies de batteries électrochimiques, voir [47, 48] pour plus d'information. Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons cependant à donner une description sommaire de quelques types couramment utilisés dans les systèmes PV, appelées communément « batteries solaires ». Dans le prochain chapitre nous verrons plus en détails la batterie au plomb qui est sans conteste la batterie la plus utilisée dans les systèmes photovoltaïques.

### 3 BATTERIES SOLAIRES

De nos jours, les termes tels que « batteries solaires », « batteries photovoltaïques » ou « batteries à usage solaire » sont assez fréquents dans le vocabulaire photovoltaïque. Autant de termes pour désigner ces batteries particulières, spécialement conçues pour être utilisées dans les applications photovoltaïques. De principe de fonctionnement identique à celui des batteries classiques, les batteries à usage solaires en diffèrent pourtant aussi bien par la forme et la composition de quelques constituants internes que par les contraintes de fonctionnement auxquelles elles sont soumises. En effet, si nous prenons à titre d'exemple une batterie au plomb à usage solaire et une batterie classique de démarrage et qui sont toutes deux le type de batteries le plus utilisé, chacune dans son domaine. Nous allons remarquer des dissimilarités entre les deux types. Tout à bord au niveau de la structure des plaques de l'électrode positive précisément. Alors que la batterie au plomb classique utilise des plaques planes pour l'électrode positive, la batterie à usage solaire utilise quant à elle, soit des plaques planes aussi, mais plus épaisses ou bien des plaques de géométrie complètement différente dites plaques tubulaires. Notons aussi que les alliages constituant les plaques de chaque type diffèrent également. Ensuite si nous prenons en considération le régime de fonctionnement : alors qu'une batterie au plomb de démarrage est conçue pour délivrer un fort courant en un laps de temps très court pour faire démarrer le moteur et est immédiatement rechargée par l'alternateur du véhicule, pour ce qui est de la batterie à usage solaire, elle est conçue pour se décharger lentement et supporter les décharges profondes et les états de charge incomplète. Il est clair donc que les deux types ne sont pas interchangeables.

Dans leur fonctionnement, les batteries à usage solaire doivent répondre à certaines exigences [15, 49] :

- grande cyclabilité;
- l'appréciation de grande capacité aux faibles taux de décharge;
- charge rapide et charge d'égalisation faible;
- faible taux d'auto-décharge;

- rendement faradique et rendement énergétique élevés à différents niveaux de l'état de charge;
- Une large plage de température de fonctionnement;
- très bon rapport qualité-prix;
- une longue durée de vie, une conception robuste et besoin en entretien faible;
- fabrication sous un contrôle de qualité strict.

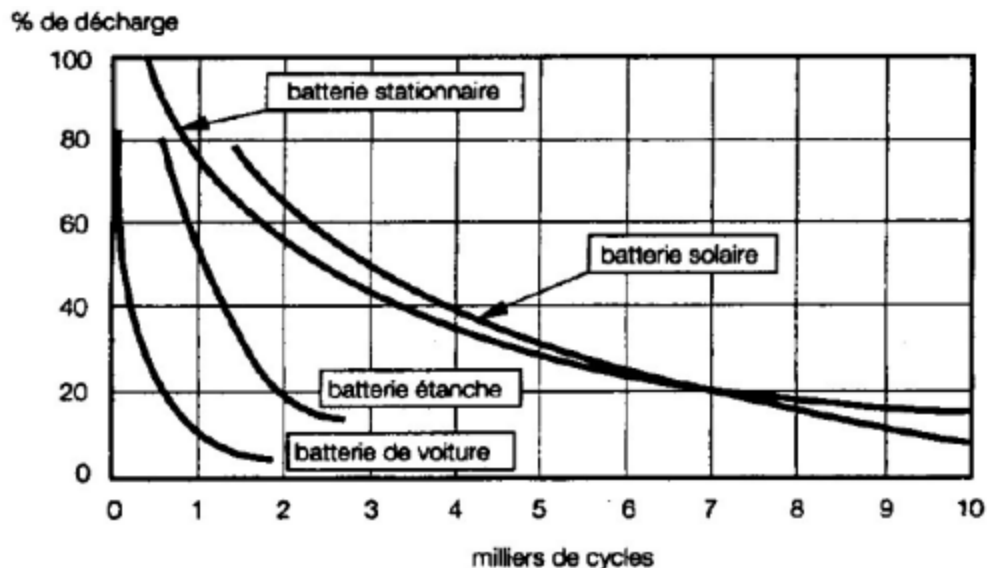
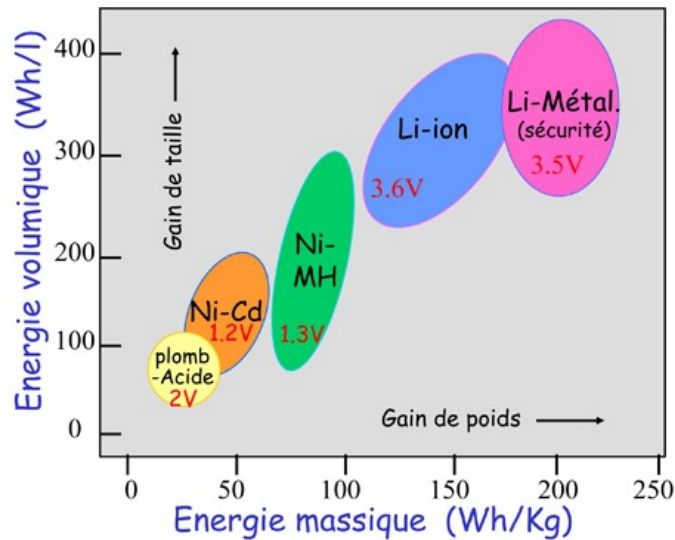


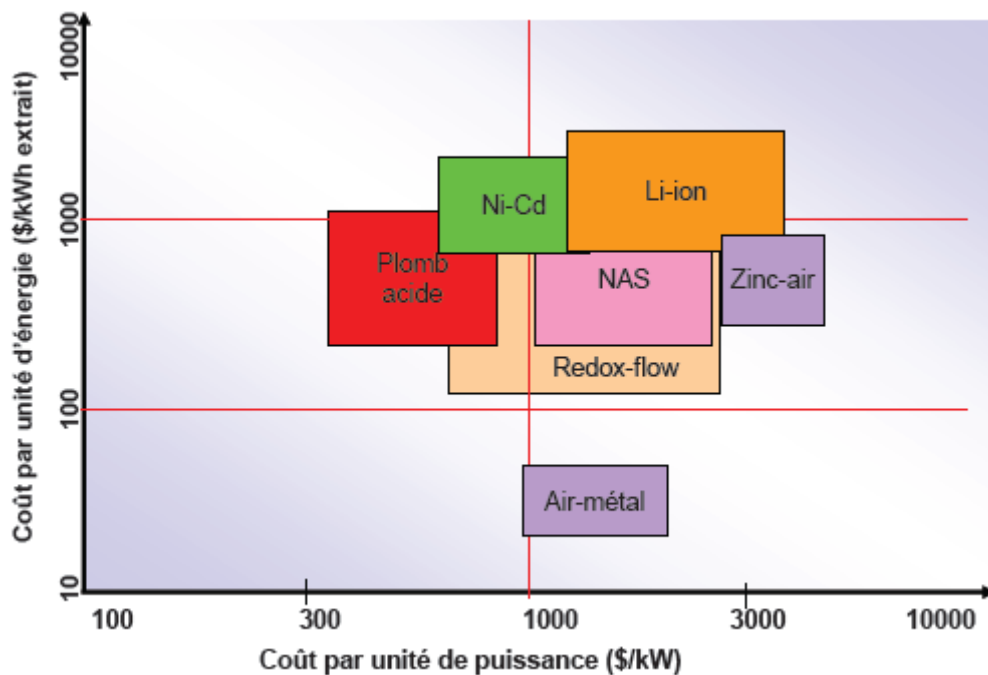
Fig. 1.14 : Durée de vie d'une batterie en fonction de la profondeur de décharge[49]

Il existe plusieurs technologies de batteries, cependant quelques unes seulement sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques, notamment les technologies Plomb-acide, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal hydride et Lithium-ion [18, 50].

Une simple comparaison de ces différentes technologies (Figure 1.9) montre que les technologies à base de lithium sont les plus performantes en termes de densité d'énergie. Alors que sur la figure 1.10 nous constatons que la technologie Plomb-Acide est la moins coûteuse. Cependant la batterie au plomb reste le moyen privilégié pour le stockage dans les systèmes photovoltaïques autonome. Ceci est dû au fait que lors du choix d'une technologie de stockage pour une application donnée, plusieurs paramètres sont à considérer comme nous l'avons évoqué précédemment. C'est ainsi que par exemple le paramètre « densité d'énergie » n'est pas de grande importance dans les applications stationnaires en générale et les systèmes photovoltaïques autonomes en particulier, alors qu'il est d'une très grande importance pour les applications mobiles, les véhicules électrique par exemple



**Fig. 1.15** : Comparaison des différentes technologies de batteries en termes de densité d'énergie massique et volumique [46]



**Fig. 1.16** : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques[50]

### 3.1 Batteries au Plomb-acide

La technologie de batteries la plus utilisée dans les systèmes photovoltaïques autonomes est la technologie Plomb-Acide (Pb). Les batteries au plomb sont principalement avantagées par leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées.

### **3.2 Batteries au Nickel-Cadmium**

Les batteries au cadmium-nickel (Ni-Cd) ne sont que rarement utilisées à cause de leur prix excessif et de leur rendement plus faible en plus de la toxicité avérée du cadmium.

### **3.3 Batteries au Nickel métal hydride**

Les batteries nickel-métal-hydrure (NiMH) sont intéressantes, leur emploi étant plus fréquent dans des les applications professionnelles haut de gamme, ou de très petite taille.

### **3.4 Batteries au Lithium-Ion**

La technologie Lithium-ion (Li-ion) s'annonce très prometteuse. Malgré son coût qui reste encore élevé par rapport à celui de la technologie Plomb-Acide, sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques.

A la fin de ce chapitre, nous donnons le tableau ci-dessous qui résume les différents avantages et inconvénients qui caractérisent les batteries éligibles à un usage solaire.

**Tableau 1.1:** Comparaison des différent types de batteries à usage solaire [51]

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy density (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Internal resistance <sup>1</sup> (mΩ)	<100 12V pack	100–200 6V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V	25–75 <sup>2</sup> per cell	25–50 <sup>2</sup> per cell
Cycle life <sup>4</sup> (80% discharge)	200–300	1000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Fast-charge time	8–16h	1h typical	2–4h	2–4h	1h or less	1h or less
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. Cannot tolerate trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<10% <sup>5</sup>		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V <sup>7</sup>	1.2V <sup>7</sup>	3.6V <sup>8</sup>	3.8V <sup>8</sup>	3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75	1.00		2.50 – 3.00		2.80
Peak load current Best result	5C <sup>9</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	>3C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>10</sup> (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months <sup>11</sup> (topping chg.)	30–60 days (discharge)	60–90 days (discharge)	Not required		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection common		Protection circuit mandatory <sup>12</sup>		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		



# **CHAPITRE 2**

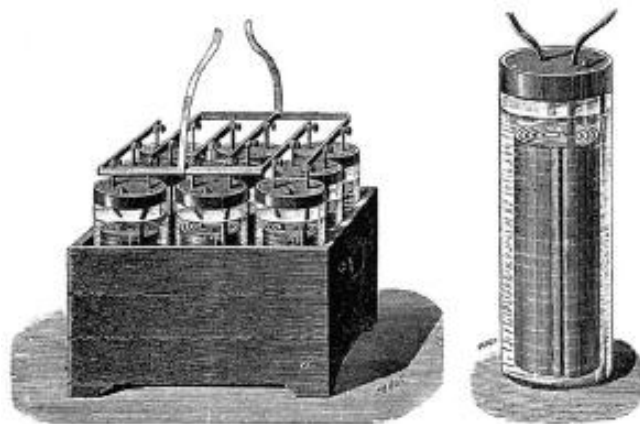
## **2. L'ACCUMULATEUR AU PLOMB**

## 1 INTRODUCTION

Au premier lieu, il convient de commencer par présenter un bref historique de l'évolution de la batterie au plomb qui date déjà de plus d'un siècle et demi.

En effet, C'est en 1859 que Gaston Plante, physicien français, inventa l'élément plomb-acide, c'était la première batterie rechargeable. Son premier modèle était constitué de deux feuilles de plomb pur enroulées en spirale, séparées par une toile de lin et plongées dans un bocal en verre qui contenait une solution d'acide sulfurique [36, 52]. Le 26 Mars 1860, Gaston Planté présenta devant l'Académie Française la première batterie au plomb rechargeable constituée de neuf cellules connectées en parallèle (voir figure 2.1) [53]. L'inconvénient de ce premier prototype est qu'il nécessitait une phase de formation longue et coûteuse.

La solution à ce problème fut apportée en 1881 par Camille Faure, ingénieur chimiste français, qui montra comment le niveau de charge électrique ou la «capacité» du système pourrait être largement augmenté par revêtement des plaques de plomb avec une pâte à base dioxyde de plomb et d'acide sulfurique maintenue par un sac de feutre fixé par des rivets de plomb. Ce processus (qu'il appela « la formation ») a également réduit le temps de formation de la plaque de quelques mois à quelques heures, et est ainsi devenu une partie de la technologie de base de l'industrie des batteries au plomb [36, 52]. Ce modèle développé par Faure avait des performances nettement améliorées comparé au modèle initial de Planté. Cependant, la batterie au plomb continua à être peu utilisée. A cet époque, l'intérêt était plutôt porté aux sources primaires, si ce n'était pas aux systèmes électromagnétiques, c'était certainement aux batteries primaires pour alimenter les lignes de télégraphe et d'autres systèmes spéciaux dans le milieu du XIXe siècle [41].



**Fig.2.1** : la première batterie au plomb constituée de neuf cellules [53]

Une autre étape aussi importante dans le développement de la batterie au plomb était en 1911, avec l'avènement du démarreur électrique, mis au point par l'américain Charles Kettering et installé pour la première fois sur la Cadillac modèle 1912 à des fins de test [36, 41, 54]. L'impact du démarreur électrique sur l'industrie automobile était si grand qu'au cours des deux années suivantes (1913 et 1914), 90% de toutes les voitures construites en étaient équipées [55]. L'équipement des automobiles à moteur à combustion interne de démarreurs électriques créa le besoin d'une source d'énergie électrique fiable, disponible et capable à fournir un fort courant. Comparée aux sources d'énergie électrique qui existaient à cette époque, les piles notamment, la batterie au plomb qui était jusque-là peu utilisée, était la meilleure candidate pour remplir ces conditions. En effet, elle était déjà, et elle l'est encore, un excellent moyen pour le stockage de l'énergie électrique sur de longues périodes de temps à des coûts relativement faibles. Dès lors la batterie au plomb est devenue partie intégrante et indispensable de toute nouvelle automobile, ce qui a ouvert largement la voie à sa fabrication à échelle industrielle.

Aujourd'hui, plus de 150 ans après l'invention de l'élément au plomb, la batterie au plomb est encore considérée comme le meilleur moyen pour le stockage de l'énergie électrique. Aussi est-elle largement utilisée dans divers domaines. En plus au domaine de l'automobile anciennement conquis, l'usage de la batterie au plomb s'est étendu à d'autres domaines des applications stationnaires et industrielles. Ainsi, la batterie au plomb est utilisée pour la traction (chariots de manutention), les alimentations de secours, énergies renouvelables...

Dans le domaine des énergies renouvelables caractérisées par leur intermittence, la batterie au plomb est le moyen privilégié pour le stockage de l'énergie électrique vu son rapport qualité-prix surtout.

## 2 CONCEPTS FONDAMENTAUX

Avant d'aborder l'étude de la batterie au plomb plus en détails, il convient de donner quelques définitions

### 2.1 La cellule électrochimique

Une **électrode** est un système constitué de deux phases en contact, un conducteur majoritairement électronique et un conducteur majoritairement ionique, dont l'interface est le lieu de transfert de charges entre les constituants des deux phases. L'association d'au moins deux électrodes dans un conteneur, chacune étant en contact avec un électrolyte, constitue une **cellule électrochimique**. Une cellule électrochimique est aussi appelée **élément**

**électrochimique.** L'électrode à laquelle a lieu une réaction d'oxydation (ou éventuellement plusieurs) est dite **anode**. C'est le pôle (+) dans un électrolyseur et le pôle (-) dans un générateur. L'autre électrode à laquelle se déroule une réaction de réduction (ou éventuellement plusieurs) est la **cathode**. La cellule comporte un ou plusieurs électrolyte(s), qui sont des conducteurs ioniques, le plus souvent liquides, quoique parfois peuvent être sous forme solide. Si l'électrolyte en contact avec l'anode (anolyte) a une composition différente de celui en contact avec la cathode (catholyte), un séparateur est nécessaire pour empêcher le mélange des électrolytes, tout en assurant l'écoulement du courant, essentiellement par migration ionique [56].

## 2.2 Piles et accumulateurs

Si, placée au sein d'un circuit électrique, une cellule électrochimique fonctionne en générateur d'énergie, on est alors en présence d'une **pile**. Une pile n'est pas rechargeable car les réactions chimiques qui y ont lieu sont irréversibles. Les réactifs présents dans une pile réagissent au cours de sa décharge, et l'énergie chimique de la réaction est convertie en énergie électrique. A l'épuisement de l'un des réactifs, la pile cessera de donner de l'énergie et il faut alors la remplacer.

Les générateurs rechargeables sont appelés **accumulateurs**. Un accumulateur est donc un générateur réversible : il peut stocker (accumuler) de l'énergie, en convertissant l'énergie électrique en forme chimique, puis la restituer à tout moment sur demande. Au cours des cycles de charge/décharge, un accumulateur joue alternativement les rôles de récepteur et de générateur. Un accumulateur est rarement constitué d'un seul élément électrochimique mais plutôt ce sont plusieurs éléments électrochimique identiques, réunis ensemble de manière permanente dans un même conteneur, qui constitue un accumulateur, d'où l'appellation de batterie d'accumulateurs. C'est pourquoi, il est d'usage d'employer le terme « batterie » pour désigner indifféremment un accumulateur ou une batterie d'accumulateurs. Notons toutefois que l'appellation batterie, d'un point de vue linguistique, reste impropre [52, 56, 57].

## 3 CONSTITUTION [57, 58]

Une batterie au plomb est constituée de plusieurs cellules. Selon la technologie de la batterie, plusieurs couples électrochimiques peuvent être utilisés. La batterie au plomb utilise le couple {PbO<sub>2</sub>/Pb}. De tension nominale d'environ 2V, un élément d'accumulateur au plomb n'est que rarement utilisé seul : en général, une mise en série et/ou en parallèle est effectuée pour

obtenir les tensions et capacités d'utilisation désirées. Généralement, on trouve des batteries avec des tensions typiques de 12V, 24V, 48V, etc.

Il se compose notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur microporeux et d'un électrolyte, le tout contenu dans un bac ou boîtier [57].

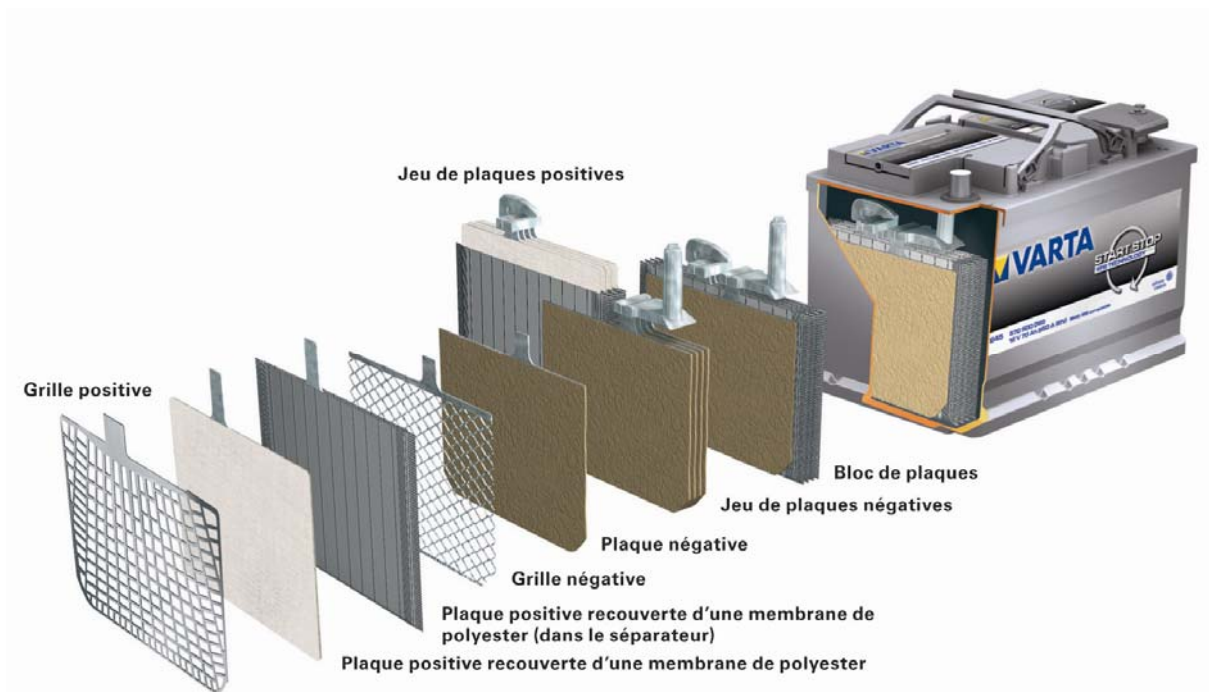


Fig. 2.2 : Constitution d'un accumulateur au plomb [59]

### 3.1 Électrodes

Dans un accumulateur, il existe deux électrodes : une électrode positive référencée par le signe (+) et une électrode négative référencée par le signe (-).

#### 3.1.1 Électrode positive

L'électrode positive, siège d'une réduction pendant la décharge, est constituée à l'état chargé, de dioxyde de plomb.

Les plaques de l'électrode positive peuvent être réalisées selon deux techniques : les plaques planes et les plaques tubulaires.

#### 3.1.2 Électrode négative

Ses plaques sont toujours réalisées selon la technologie "plaques planes". Comme précédemment, elle est constituée d'une grille empâtée. La matière active en plomb spongieux (Pb) est également préparée à partir d'acide sulfurique et d'une poudre constituée d'un

mélange d'oxyde de plomb et de plomb métallique. Pour que la porosité de la matière active se dégrade moins rapidement, d'autres produits, qualifiés d'expandeurs, lui sont ajoutés en faible quantité. La surface réactionnelle de la matière active négative est de l'ordre de 0,5m<sup>2</sup>/g.

### 3.2 Séparateurs

Les séparateurs sont des feuilles isolantes poreuses qui sont placés entre les électrodes de polarité opposée pour empêcher le contact et le court-circuit entre elles. Ils sont généralement fabriqués à partir de polymères synthétiques ou de fibres de verre

Pour isoler les plaques correctement, le séparateur doit avoir les propriétés suivantes :

- une résistance mécanique appropriée, pour supporter les contraintes dues aux variations de volume des matières actives pendant les cycles de charge et décharge,
- une résistance chimique suffisante pour sa tenue dans le temps (immergé dans une solution très corrosive)
- une structure micro poreuse (pores de la taille du nanomètre), pour permettre la diffusion des anions et cations de l'électrolyte, et éviter tout transport de matière d'une électrode sur l'autre.

### 3.3 Électrolyte

Selon le type de batterie, l'électrolyte est liquide, gélifié ou absorbé. Au sein de l'accumulateur au plomb, l'électrolyte assure à la fois le transport d'électricité par conduction ionique et participe également, en tant que réactif, aux réactions de charge et décharge.

Dans l'électrolyte, les déplacements ioniques sont dus à plusieurs phénomènes :

- la **migration** : effet du champ électrique sur les particules chargées,
- la **diffusion** : effet du gradient de concentration,
- la **convection** : effet des gradients de densité, dus par exemple aux effets thermiques dans l'accumulateur.

#### 3.3.1 Électrolyte liquide

L'électrolyte est une solution dont le solvant (composé en grande quantité) est de l'eau distillée, H<sub>2</sub>O, et le soluté (composé en petite quantité) est de l'acide sulfurique, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La proportion du mélange définit la **densité** de l'électrolyte. Un électrolyte ayant 33% (en masse) de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aura une densité de 1,25g.cm<sup>-3</sup>

À l'état liquide, la molécule d'eau se dissocie en ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{OH}^-$ . L'ion  $\text{H}^+$  n'existe pas seul, il est toujours associé à une molécule  $\text{H}_2\text{O}$ , pour former un  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

Dans l'eau, les molécules d'acide sulfurique se dissocient majoritairement en ions hydrogène  $\text{H}^+$  (qui deviennent  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) et en ions hydrogénosulfate  $\text{HSO}_4^-$  (anion solvaté, entouré de molécules  $\text{H}_2\text{O}$ ). Dans une plus faible proportion, il existe aussi des ions sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$ .

### 3.3.2 *Électrolyte gélifié ou absorbé*

L'électrolyte **gélifié** est produit à partir d'une poudre de silice colloïdale, coagulée par réaction avec l'acide contenu dans l'électrolyte. Le gel ainsi formé permet d'immobiliser l'électrolyte à l'intérieur des bacs. L'électrolyte **absorbé** est un électrolyte liquide imbibant un séparateur fibreux placé entre les plaques de polarité différente. Mis à part le fait qu'ils soient immobilisés, ces électrolytes restent une solution aqueuse d'acide sulfurique.

Le volume d'électrolyte et sa densité sont définis par les fabricants en fonction du type et de l'usage de la batterie. Ils résultent d'un compromis conciliant la capacité désirée, la durée de vie, l'intensité des courants à fournir, la tenue aux basses températures (la température agissant sur la viscosité et donc la conductivité de l'électrolyte).

## 3.4 Boîtier

Initialement fabriqué en verre, aujourd'hui le boîtier est conçu à partir de matières synthétiques, (généralement en propylène, PVC, ou ABS), muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits. Il est résistant aux chocs ainsi qu'à l'acide, retardant à la flamme. Il est conçu aussi pour résister à de grandes variations de la pression interne durant les différents cycles de fonctionnement, aux chocs ainsi qu'à l'acide et retardant à la flamme.

## 4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [57]

Considérons un élément de technologie "plomb ouvert". À ses bornes, apparaît une **f.e.m.** d'environ 2,1V : l'électrode en dioxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) correspond au pôle positif et celle en plomb ( $\text{Pb}$ ) au pôle négatif.

Système électrochimique réversible transformant l'énergie chimique en énergie électrique, l'accumulateur est le siège de réactions d'oxydoréduction (transferts d'électrons) qui se produisent à l'interface des électrodes avec l'électrolyte :



Le fonctionnement **en décharge** du générateur électrochimique PbO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Pb peut se schématiser de la façon simplifiée suivante :

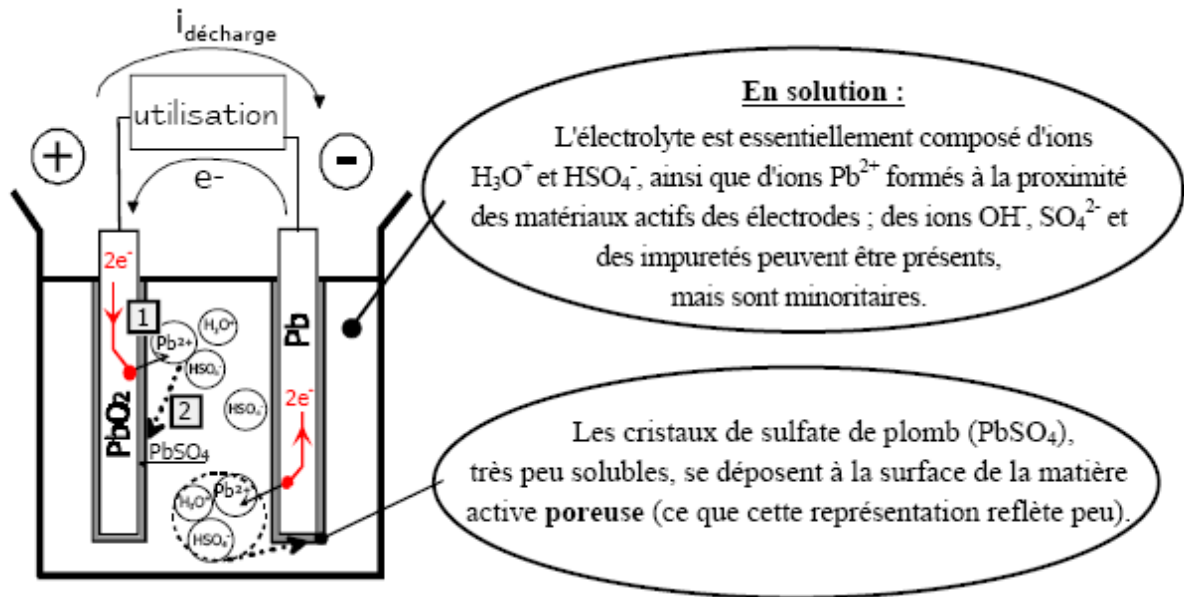
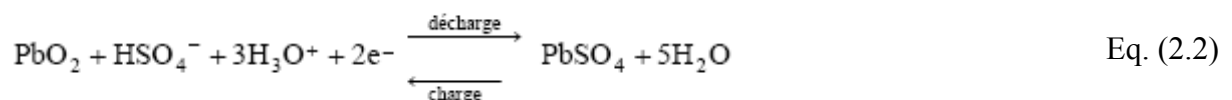


Fig.2.3 : Produits et réactifs d'un élément au plomb-acide, se formant en décharge

En décharge, les matériaux actifs positif et négatif produisent, respectivement par réduction et par oxydation, des ions Pb<sup>2+</sup> qui, en se combinant avec des ions sulfate contenus dans l'électrolyte, se fixent en cristaux sulfate de plomb

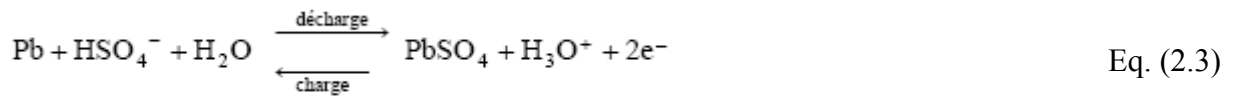
Cette transformation du dioxyde de plomb et du plomb spongieux porte le nom de "double sulfatation". L'électrode où a lieu l'**oxydation** est appelée **anode** et celle où a lieu la **réduction**, la **cathode**.

- L'électrode positive a un comportement de cathode en décharge car le PbO<sub>2</sub> est réduit en PbSO<sub>4</sub>, et devient anode en charge puisque le PbSO<sub>4</sub> s'oxyde en PbO<sub>2</sub> :

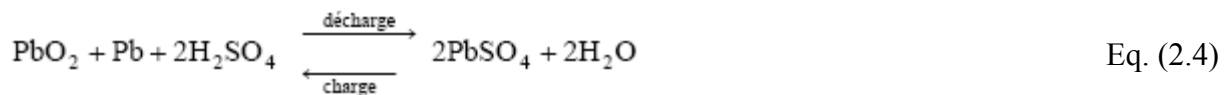




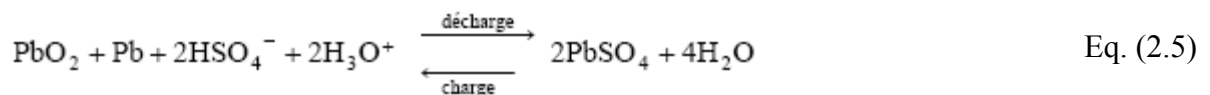
- L'électrode négative est anode en décharge (oxydation du Pb en PbSO<sub>4</sub>) et cathode en charge :



- Ces 2 réactions de charge et décharge peuvent se résumer en une seule réaction:



Et enfin l'équation de double sulfatation qui s'écrit aussi, de façon plus rigoureuse :



## 5 TECHNOLOGIE

Les accumulateurs au plomb utilisés dans les systèmes PV sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vented Batteries) et les batteries étanches ou scellées (Valve Regulated Lead Acid Batteries) [25].[44].

### 5.1 Batterie au plomb ouverte

Il s'agit de la technologie initiale, associée aujourd'hui par de nombreux utilisateurs à la batterie de démarrage des véhicules vu l'importance de ce marché, mais cette technologie s'emploie dans tous les domaines. En effet, la batterie au plomb ouverte est généralement considérée comme plus fiable et plus endurante que la batterie à recombinaison. Le dégagement de dihydrogène dans le lieu de stockage des batteries est source de danger, car son mélange avec l'air ambiant est potentiellement explosif à partir de 4% en volume. Dans le cadre du stationnaire de secours, une installation en locaux spécifiques ventilés est obligatoire

### 5.2 Batterie au plomb étanche

Ce type de batterie utilise un électrolyte gélifié qui offre plusieurs avantages :

- il permet la formation de chemins gazeux facilitant le transfert rapide du dioxygène, qui suit alors un cycle interne : produit à l'électrode positive, sa diffusion vers l'électrode négative est optimisée (105 fois plus rapide qu'en électrolyte liquide) et il atteint l'électrode négative où il y est réduit. Cette propriété se traduit par une très faible consommation en eau lors de surcharges de la batterie (avantage séduisant pour le domaine du stationnaire de secours).
- il supprime quasiment le phénomène de stratification de l'électrolyte.
- il autorise le placement des batteries dans des locaux quelconques, dans n'importe quelle position (souvent horizontale, ce qui facilite l'accès aux bornes).

L'électrolyte immobilisé est la clef du processus de recombinaison, dont le rendement est élevé. Toutefois, 2 à 3% des gaz produits ne sont pas recombinaison, et pour se prévenir de tout risque de surpression, une soupape d'aération régulée par pression est nécessaire. C'est pourquoi les batteries à recombinaison de gaz sont appelées aussi batteries VRLA (pour Valve-Regulated Lead-Acid) et parfois improprement batteries étanches. Cette technologie est par construction "sans maintenance", donc cette précision n'est jamais mentionnée, contrairement aux batteries ouvertes où ce qualificatif est employé lorsque la consommation d'eau est amoindrie en surcharge.

**Tableau 2.1 :** Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au plomb[57]

TYPE DE BATTERIE AU PLOMB	OUVERTE (I.1.5.1)	À RECOMBINAISON DE GAZ (I.1.5.2)	
ÉLECTROLYTE	liquide	gélifié	absorbé (par le séparateur)
APPELLATION ANGLLO-SAXONNE	flooded (ou vented) battery	Gel VRLA (ou sealed) battery	VRLA (ou sealed) AGM separator battery
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans)</li> <li>• technologie la moins chère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• recombinaison =&gt; pas de perte en eau (pas d'entretien)</li> <li>• très faible taux de dégagement de gaz (sécurité)</li> </ul>	
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation d'eau (maintenance)</li> <li>• installation en locaux spécifiques (dégagements gazeux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plus faible durée de vie (modes de défaillance spécifiques)</li> <li>• plus sensible à la température</li> </ul>	

## 6 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

### 6.1 La capacité

On appelle capacité d'un accumulateur ou d'une pile, la quantité maximale d'électricité que ce générateur peut fournir. Cette capacité est limitée par la consommation des électrodes (généralement la négative) ou de l'électrolyte. Pour un accumulateur, cette capacité est également limitée par les conditions de réversibilité des phénomènes électrochimiques. Cette quantité est de la forme :

$$Q = \int_0^T i \cdot dt$$

$t$  : Durée de passage du courant en seconde

$i$  : intensité en Ampères (constant)

$Q$  : exprimé en Coulombs ou Ampère-heure

La capacité est une grandeur non mesurable et difficilement représentable car sa définition oblige à fixer certains paramètres d'influence pour les tests. C'est pourquoi nous distinguerons 3 types de capacité.

#### 6.1.1 La capacité nominale en $n$ heures : $C_n$

La capacité nominale  $C_n$  représente l'énergie que peut délivrer la batterie à partir de son état de pleine charge et dans un environnement de référence pour terminer à la tension d'arrêt. Cette mesure s'effectue lors d'une décharge à courant constant à  $I=C_n/n$  à la température nominale  $\theta_n$  pendant  $n$  heures.

Les valeurs utilisées habituellement par les constructeurs sont  $n=20, 10, 5$  ou  $3$  heures et  $1,75V$  ou  $1,8V$  pour la tension d'arrêt. Chaque constructeur utilise des conditions de tests différentes.

*Exemple:*  $C_{10}=20Ah$  signifie que la batterie est capable de fournir un courant de  $2 A$  pendant  $10h$  à la température ambiante nominale  $\theta_n$ .

Si les conditions de température ou d'intensité de décharge change, la batterie ne restituera pas la même quantité d'énergie.

La capacité nominale est donnée par

$$C_n = \int_{t_0}^{t_a} I \cdot dt \text{ à } \theta_a = \theta_n$$

Avec

$t_a$  : temps pour atteindre la tension d'arrêt (généralement  $1.75V$  par élément)

$I$  : intensité constante de décharge  $I=C_n/n$

### 6.1.2 La capacité stockée : $Q_s$

Elle représente l'énergie que pourrait débiter la batterie à l'instant  $t$  si elle devait le faire dans les conditions de références. Elle est de la forme :

$$Q_s(t) = \int n_1(t).i(t).t.dt$$

avec  $i$  =courant batterie ( $i>0$  si charge et  $i<0$  si décharge)

La fonction  $n_1(t)$  représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant  $t$  pour évaluer l'efficacité de la charge.

$$n_1(t) = f(i(t), Q_s(t), \theta(t))$$

### 6.1.3 La capacité récupérable

Elle représente l'énergie que pourra restituer l'accumulateur dans les conditions actuelles si elles restent constantes. Elle est la transposition de la capacité stockée  $Q_s$  donnée pour un environnement de référence dans l'environnement actuel.

$$Q_r(t) = n_2(t).Q_s(t)$$

La fonction  $n_2(t)$  représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant  $t$  pour évaluer l'efficacité de la décharge.

$$n_2(t) = f(i(t), Q_s(t), \theta(t))$$

## 6.2 Le rendement énergétique

Lors de la charge, l'énergie  $W_c$  est fournie à l'accumulateur et l'énergie utile restituée à la décharge  $W_d$  pendant un temps  $T$  est donnée par :

$$W_d = \int_0^T ui.dt$$

Avec  $u$  différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur.

Il est possible de définir le rendement énergétique  $w$  comme le rapport de  $W_d$  et  $W_c$ .

$$w = \frac{W_d}{W_c}$$

Ce rendement est typiquement de 70 à 80% dans les meilleures conditions pour un accumulateur au plomb.

### 6.3 Le rendement en courant

Il est possible de définir le même type de rendement sur les quantités de courant. On notera  $q$  le rapport entre la quantité d'électricité restituée lors de la décharge  $Q_d$  et celle fournie lors de la charge  $Q_c$ .

$$q = \frac{Q_d}{Q_c}$$

Cette grandeur peut atteindre 90% pour les bons accumulateurs lorsque l'on respecte les valeurs normales des intensités de charge et de décharge.

## 7 MODES DE CHARGE DES ACCUMULATEURS AU PLOMB

La méthode élémentaire pour charger un accumulateur au plomb comporte deux étapes :

- une phase de charge à courant constant d'intensité au cours de laquelle la tension augmente progressivement jusqu'à un seuil fixé
- une phase à tension constante pendant laquelle le courant diminue progressivement

La charge est d'autant plus rapide que l'intensité de charge est élevée, mais il faut respecter le maximum autorisé par le fabricant de la batterie. Un régime de charge C/5 est souvent utilisé. La tension de seuil est fixée entre 2,30 V et 2,45 V par élément. Le choix résulte d'un compromis. Une valeur élevée permet d'obtenir la capacité maximale et d'éviter la sulfatation, mais elle favorise les dégagements gazeux résultant de l'électrolyse de l'eau et la corrosion de la plaque positive. Une valeur de 2,35 V par élément est souvent retenue. La charge est terminée lorsque l'intensité du courant atteint environ 3 % de sa valeur assignée. Avec les batteries ouvertes, il peut être intéressant de provoquer un dégagement gazeux afin d'homogénéiser la concentration de l'électrolyte en fin de charge et d'éviter la stratification. Les bouchons de la batterie doivent être retirés et le local correctement ventilé. Une période de repos de quelques heures est conseillée avant d'utiliser la batterie. Le courant n'est pas obligatoirement parfaitement continu, il peut être seulement unidirectionnel et ondulé, mais les performances de la charge sont alors inférieures. De même, il n'est pas indispensable que le courant soit constant dans la première phase, du moment qu'il ne dépasse pas le maximum autorisé.

Dans [60] un mode de charge à quatre étapes est proposé. Ce mode est en quelque sorte une combinaison des modes évoqués plus haut. Cependant ce mode est difficile à mettre en œuvre.

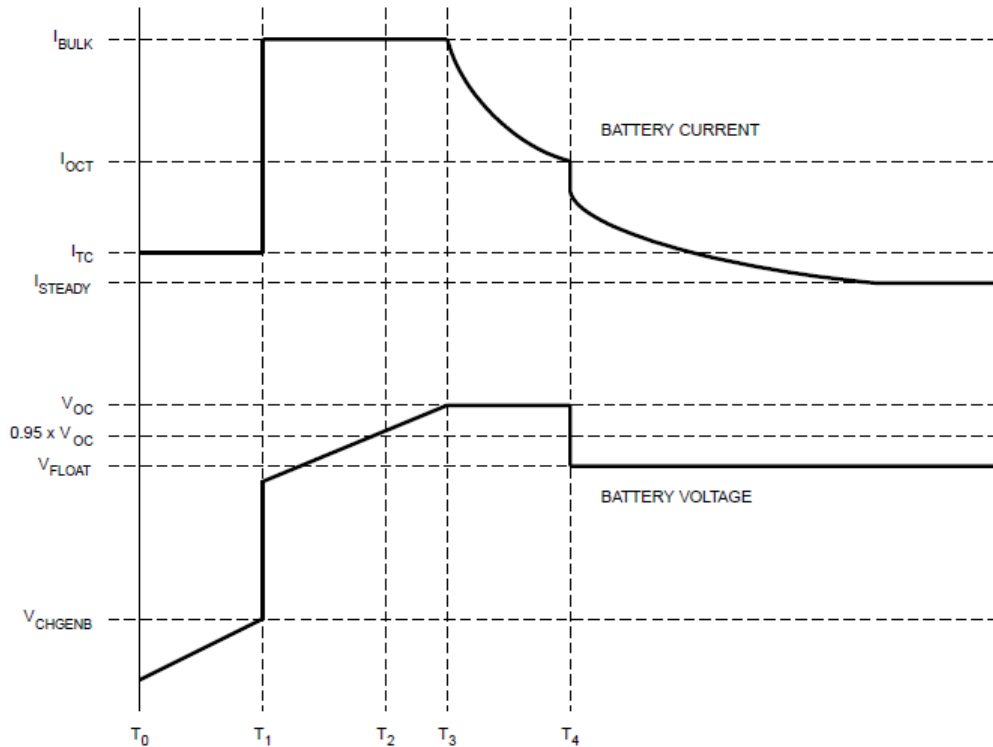


Fig. 2.4 : Mode de charge d'une batterie au plomb [60]

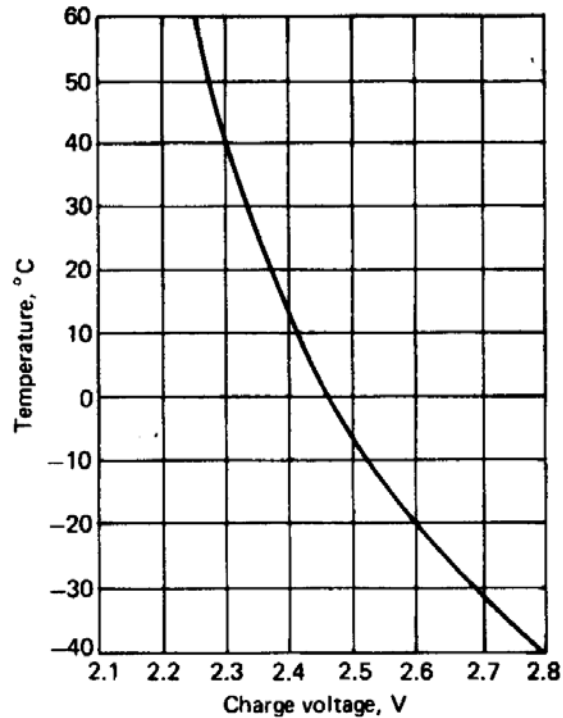
## 8 VULNÉRABILITÉ DE L'ACCUMULATEUR AU PLOMB

Les dommages observés sur des batteries de retour de terrain sont essentiellement la sulfatation dure, la décohésion de la matière active et, dans une moindre mesure, la corrosion des grilles [27, 36, 52, 58].

### 8.1 Influence de la température

La température de la batterie est un paramètre important à considérer si on veut assurer une charge appropriée de cette dernière. Pour des températures plus élevées, la tension nécessaire pour récupérer la totalité de la capacité d'une cellule en un temps donné est réduite à cause de la réduction du temps du cycle de la réaction interne de la batterie.

La courbe de la figure 5.1, voir [19], illustre la dépendance de la charge avec la température. Pour tenir compte de ce phénomène et maximiser la durée de vie de la batterie, un coefficient négatif de charge environ  $-2.5mV/^{\circ}C$  par cellule devra être utilisé pour des températures éloignées de  $25^{\circ}C$ . Ainsi la variation de la tension de charge en fonction de la température prévient les problèmes thermiques quand la batterie est chargée à haute température et assure une charge appropriée quand la température de la batterie est faible.



**Fig.2.5** : Tension de charge recommandée pour différents températures de batterie  
(Compensation de Température ) [47].

## 8.2 Corrosion des électrodes

Les électrodes, surtout positives, sont sensibles à la corrosion: le plomb de la grille se transforme en dioxyde de plomb  $PbO_2$ . La vitesse de corrosion augmente avec la concentration en acide sulfurique, la température et quand la batterie vieillit.

La corrosion provoque un gonflement des électrodes positives car le dioxyde de plomb est 37% plus volumineux que le plomb. Ceci induit des contraintes mécaniques qui déforment les électrodes et fragilisent la liaison entre la grille et les matériaux actifs : la capacité de la batterie diminue alors du fait de l'augmentation de la résistance interne.

Si la corrosion devient trop importante, les matériaux actifs tombent peu à peu au fond des accumulateurs, et l'ensemble des électrodes se désagrège. L'ensemble de ces débris peut alors créer des courts-circuits.

## 8.3 Sulfatation

La sulfatation est la principale cause de défaillance d'un accumulateur au plomb. Pendant la décharge, il se forme toujours du sulfate de plomb ( $PbSO_4$ ). Ce sulfate apparaît sous une forme granuleuse, qui se retransforme facilement lors de la charge, mais dans certains cas, le sulfate de plomb a tendance à former des cristaux sur les plaques. C'est cette transformation

qui est nommée sulfatation. Cette situation se produit lorsqu'un accumulateur est déchargé profondément de façon répétée ou quand il est laissé incomplètement chargé de manière prolongée. Quand l'accumulateur est sulfaté, il devient plus difficile à recharger. La sulfatation peut devenir irrémédiable si aucun remède n'y est apporté. Pour empêcher la sulfatation, il faut effectuer régulièrement une charge d'égalisation.

L'image ci-dessous montre 6 grilles à des degrés progressifs de sulfatation. Le plomb n'apparaît finalement plus.

#### **8.4 Stratification**

La stratification de l'électrolyte est un problème propre aux batteries ouvertes (à électrolyte liquide). La stratification est le mélange non uniforme de l'électrolyte, ce qui réduit le cycle de vie de l'accumulateur. L'acide a tendance à se concentrer en bas en laissant de l'eau qui a une densité plus faible au dessus. Cela conduit à un risque de congélation car la température pour laquelle l'acide commence à geler est plus élevée si la solution est plus diluée. Les accumulateurs ont tendance à se stratifier quand ils sont gardés sous charge faible et qu'ils ne reçoivent jamais une charge complète. Pour éviter ce phénomène, il faut effectuer une charge régulièrement avec un processus qui comporte une phase d'homogénéisation de l'électrolyte. C'est ce que font les chargeurs élaborés.



## **CHAPITRE 3**

### **3. ÉTAT DE L'ART DANS LES CONTRÔLEURS DE CHARGE**

## 1 INTRODUCTION

Chargeur de batterie, régulateur de charge ou contrôleur de charge est essentiellement un dispositif électronique destiné pour la charge d'une batterie quelconque.

Dans le marché, il existe trois types de chargeurs de batteries : les chargeurs classiques, les chargeurs solaires et les chargeurs éoliens.

Les chargeurs classiques puisent de l'énergie électrique dans le réseau de distribution et la transforme en courant continu constant pour alimenter la batterie à charger. Un chargeur classique est peu coûteux et prend plus de temps à charger une batterie pour éviter sa surcharge.

Les chargeurs solaires utilisent l'énergie électrique générée par les panneaux photovoltaïques pour charger les batteries. La plupart des chargeurs solaires sont encore dans leur phase pilote et les recherches sont en cours pour les rendre aussi efficaces que les chargeurs classiques.

Un chargeur éolien utilise l'énergie électrique issue d'un générateur éolien pour charger des batteries.

## 2 FONCTIONS D'UN RÉGULATEUR DE CHARGE

### 2.1 Contrôle de la charge

L'objectif de cette fonction est de recharger à 100% la batterie malgré le caractère intermittent de la source primaire qu'est l'énergie solaire, tout ceci avec le souci de garantir une durée de vie maximale. Des méthodes de charges spécifiques aux batteries plomb-acide doivent être adoptées pour une meilleure efficacité.

### 2.2 Contrôle de la décharge

Une décharge trop profonde d'une batterie nuit gravement à la durée de vie de cette dernière. Le régulateur solaire déléstera donc les récepteurs lorsqu'il considèrera que la batterie a atteint un seuil critique de décharge. Cependant le taux de décharge est une donnée difficile à déterminer. Il dépend entre autres du type de batterie, de la tension de la batterie, du niveau de courant de décharge, de la température ambiante et de l'âge de la batterie. Les contrôleurs du commerce délestent les récepteurs lorsque la tension batterie atteint un seuil dit tension de délestage.

### 2.3 Fonction de sécurité

Outre les contrôles de charge et de décharge qui sont déjà en soit des fonctions de sécurité car ils évitent toute surcharge et décharge profonde de la batterie, les contrôleurs solaires du commerce offrent d'autres fonctions de sécurité. Certaines sont gérées par l'électronique, d'autres par des fusibles de protection ou encore par une diode de protection dans le cas de l'inversion de polarité du panneau photovoltaïque, phénomène qui apparaît la nuit. La diode empêche alors le courant inverse mais augmente les pertes, c'est pourquoi la diode. Est souvent remplacé par un transistor MOSFET.

### 2.4 Fonction de convivialité

Il existe dans la plupart des contrôleurs solaires une communication entre le contrôleur et l'utilisateur, elle est soit unidirectionnelle soit bidirectionnelle. Typiquement, 4 dispositifs permettent cette communication : des diodes électroluminescentes, des boutons poussoirs, des switches de sélection ou un afficheur LCD.

Les Leds permettent d'indiquer l'état de la batterie : si elle est en charge, si elle est pleine ou si elle est délestée de ses consommateurs.

L'afficheur LCD est un moyen plus sophistiqué et offre un panel de possibilités aux contrôleurs. Il peut remplir les mêmes fonctionnalités que les Leds mais il est surtout utilisé pour indiquer les valeurs :

- de courant et de tension coté panneau photovoltaïque et côté batterie
- du courant consommé par les récepteurs
- de la production photovoltaïque.

Associé à des boutons poussoirs ou des switches de sélection, l'afficheur LCD peut permettre à l'utilisateur de sélectionner le type de batterie mais aussi d'ajuster les seuils nécessaires au contrôles de charge et de décharge suivant les recommandations du fabricant de batterie

## 3 STRUCTURE GÉNÉRALE D'UN CONTRÔLEUR DE CHARGE

Un contrôleur de charge solaire se compose normalement de :

- Un circuit de charge constitué principalement d'un convertisseur DC/DC pour le conditionnement de puissance.
- Un circuit de décharge, interface entre la batterie et la charge, il peut être constitué d'une simple diode de puissance.

- Un circuit de commande construit généralement autour d'un microcontrôleur pour les contrôleurs sophistiqués ou bien d'un simple circuit analogique à base d'amplificateurs opérationnels
- Un circuit d'affichage nécessaire pour indiquer l'état de la batterie.

#### 4 TYPES DE CONTRÔLEURS DE CHARGE

Il existe deux grandes familles [18] de contrôleurs si on s'intéresse particulièrement à leur structure, ceux où la connexion est directe entre le panneau photovoltaïque et la batterie, et ceux où la connexion comporte un étage intermédiaire d'adaptation d'impédance.

##### 4.1 Régulateurs à connexion directe

Ces sont les plus répandus. Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées plus haut. Il est donc indispensable de pouvoir déconnecter aussi bien le panneau, du moins faire en sorte qu'il ne fournisse plus d'énergie, et pouvoir déconnecter les consommateurs. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences : les régulateurs de type shunt et le régulateur de type série.

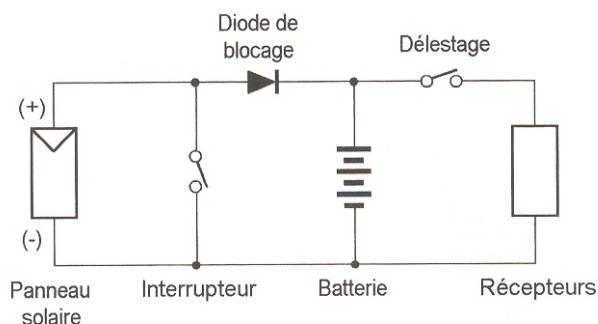


Fig.3. 1 : Régulateur de type shunt[18]

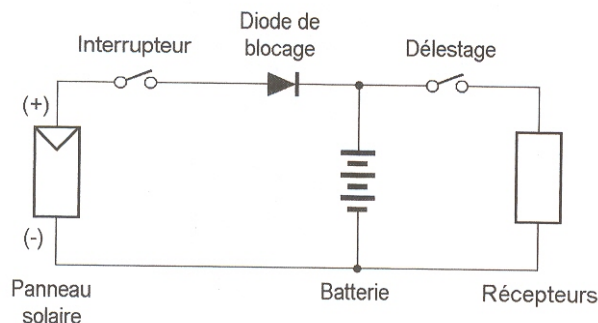


Fig.3. 2 : Régulateur de type série[18]

La différence majeure entre les deux structures est le moyen de déconnecter l'énergie produite par le panneau photovoltaïque de la batterie. Dans la majorité des régulateurs, les interrupteurs sont des MOSFET à faible  $R_{dson}$  afin de limiter les pertes par conduction, notamment au niveau de l'interrupteur de délestage qui est rarement ouvert. Quant à la diode de blocage, elle permet de bloquer l'inversion de polarité du panneau durant la nuit.

La commande des interrupteurs est réalisée selon les algorithmes de charge qui peuvent être gérés par des microcontrôleurs. Le fait d'être constitué uniquement de semi-conducteurs permet à ces régulateurs de faire transiter de fortes puissances.

#### 4.2 Régulateurs avec adaptation d'impédance

Ce type de régulateur, plus connu sous le nom de régulateur MPPT. Il permet d'extraire le maximum de puissance du panneau photovoltaïque par MPPT. L'idée est d'introduire un étage intermédiaire entre le panneau et la batterie qui sera constitué par un convertisseur DC/DC : un Buck, un Boost ou un Cûk. La figure 3.3 présente cette connexion.

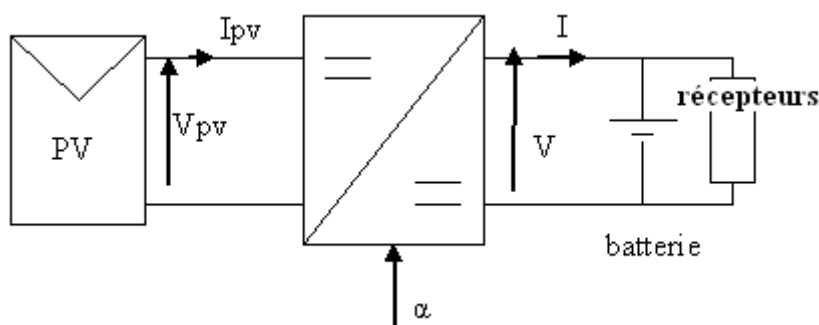


Fig. 3.3 : Structure avec étage d'adaptation d'impédance

### 5 STRUCTURE DU CONVERTISSEUR DC/DC

Deux types de convertisseurs DC/DC sont régulièrement utilisés dans les contrôleurs de charge pour batteries solaires : les convertisseurs BUCK et les convertisseurs BOOST

#### 5.1 Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck (figure 5.1) dénommé aussi hacheur dévolteur ou hacheur série. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = V_o/V_i$  varie avec le rapport cyclique  $d$  du commutateur.

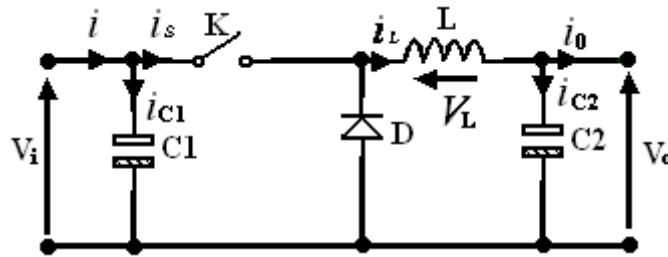


Fig. 3.4 : Circuit idéal du hacheur série

À l'état conducteur de l'interrupteur  $K$ , pendant la durée  $t_{ON}$  c.-à-d.  $d \in [0, d.T_s]$ , la diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance, cette dernière stocke une énergie :

$$W = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Lors des commutations successives de l'interrupteur  $K$ , le courant à l'intérieur de l'inductance aura deux composante l'une est constante égale à la valeur moyenne du courant sur une période du hachage, tandis que la composante variable est égale à :

- Lorsque  $K$  est fermé :

$$(\Delta I_L)_{ON} = \frac{V_e - V_S}{L} t_{ON} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

- Lorsque  $K$  est ouvert, la self se décharge dans la sortie pendant le temps  $t_{OFF}$  :

$$(\Delta I_L)_{OFF} = \frac{V_S}{L} t_{OFF} \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Ces variations du courant sur un cycle du hachage engendrent des ondulations donc des harmoniques, mais on peut écrire en régime permanent, pour dire qu'à une exactitude près les ondulations peuvent être négligées et le signal peut être rapproché à sa composante constante.

$$\left( I_S = \frac{V_S}{R_L} \right) \Rightarrow (\Delta I_{L_{ON}}) + (\Delta I_{L_{OFF}}) = 0 \quad \text{Eq. (3.4)}$$

On obtient alors l'expression fondamentale :

$$V_S = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} V_e \quad \text{Eq. (3.5)}$$

En appelant  $T$  la période de récurrence d'état de  $K$ , on peut écrire  $T = t_{ON} + t_{OFF}$  ce qui permet d'écrire :

$$V_S = \frac{t_{ON}}{T} V_e \quad (3.6)$$

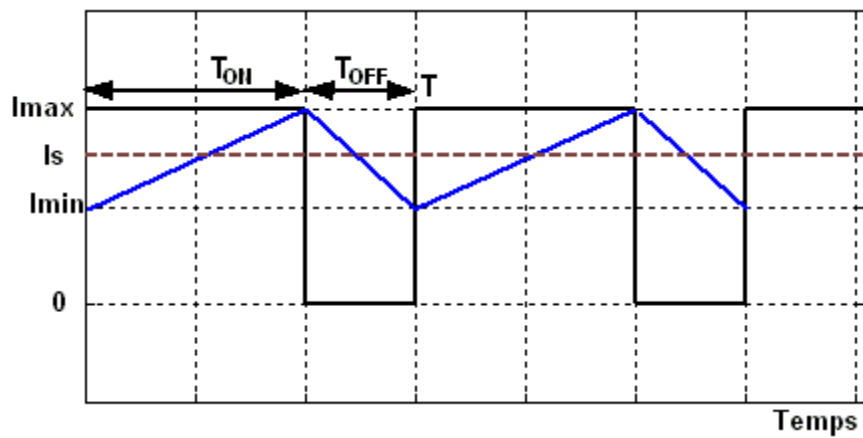


Fig. 3.5 : Courant dans la self du hacheur série

Ce régime de conduction de courant est appelé le régime continu.

Lorsque  $T > t_{ON} + t_{OFF}$ , le régime est appelé conduction discontinue (figure 2.4). Dans ce cas le courant de sortie vaut :

$$I_S = \frac{I_M}{2T} (t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{V_e - V_S}{2TL} t_{ON} (t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{V_S}{R_L} \quad (3.7)$$

Ainsi,

$$V_s = \frac{1}{1 + \frac{2LT}{t_{ON}^2} \frac{I_s}{V_e}} V_e \quad (3.8)$$

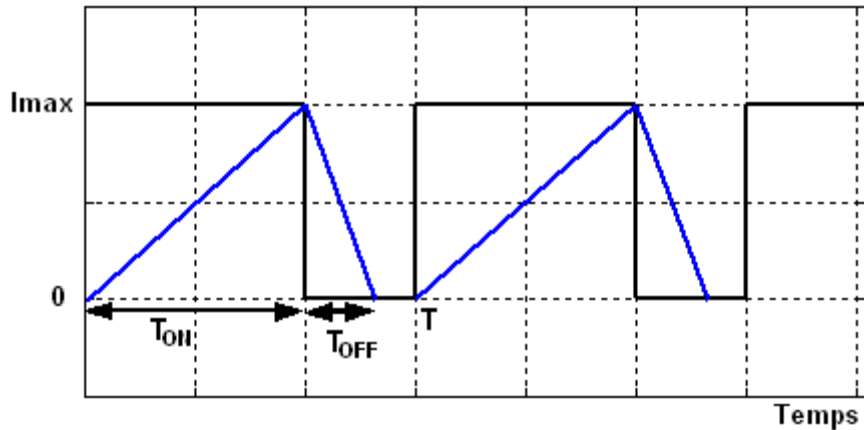


Fig. 3.6 : Courant en discontinuité dans la self du hacheur série

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure 2.5 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure 3.3 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant  $(1-d)T_s$ .

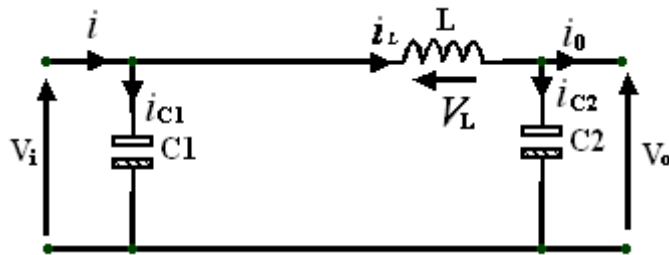


Fig. 3.7 : Schéma équivalent du hacheur série quand  $t \in [0, dT_s]$

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \quad (3.9)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t), \quad (3.10)$$



$$V_L(t) = L \frac{d i_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t), \quad (3.11)$$

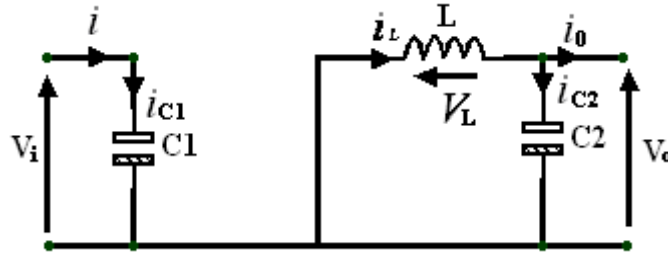


Fig. 3.8 : Schéma équivalent du hacheur série quand  $t \in [d.T_s, T_s]$

Les équations suivantes sont déduites de la figure ci-dessus.

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{d V_i(t)}{dt} = i(t) \quad (3.12)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{d V_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t), \quad (3.13)$$

$$V_L(t) = L \frac{d i_L(t)}{dt} = - V_o(t), \quad (3.14)$$

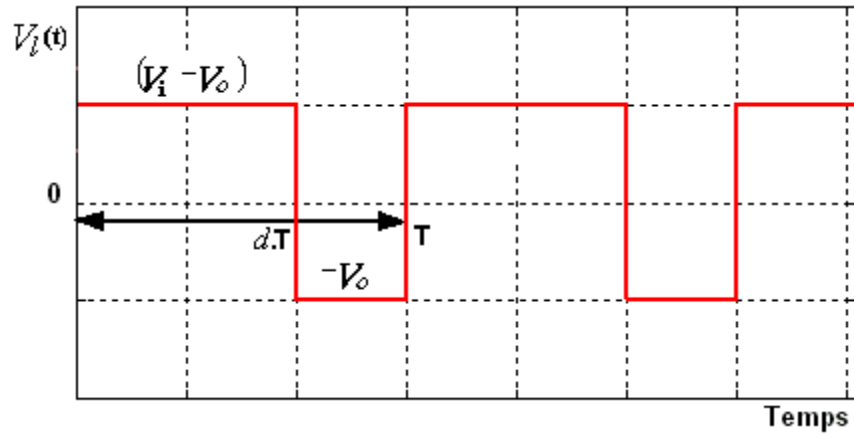
Les équations de (2.9) à (2.14) sont les équations de base du hacheur dévolteur.

Les valeurs moyennes de la tension et du courant sont données par :

$$V_{l,moy} = \langle V_l \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_l(t) dt = 0 \quad (3.15)$$

$$I_{C,moy} = \langle i_C \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt = 0 \quad (3.16)$$

L'expression de la tension d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la figure 3.9



**Fig. 3.9** : La caractéristique de la tension d'inductance  $V_L(t)$  pour un hacheur série

La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = d(V_i - V_o) + (1-d)(-V_o) = 0 \quad (3.17)$$

Les équations de base qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état d'équilibre d'un hacheur dévolteur sont :

$$d.V_i = V_o \quad (3.18)$$

$$I = d.I_L \quad (3.19)$$

$$I_i = I_o \quad (3.20)$$

On déduit donc de l'équation (3.18) que le rapport de conversion d'un hacheur dévolteur est donné par la relation (3.21) en considérant que le convertisseur est idéal (sans perte) :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = d \quad (3.21)$$

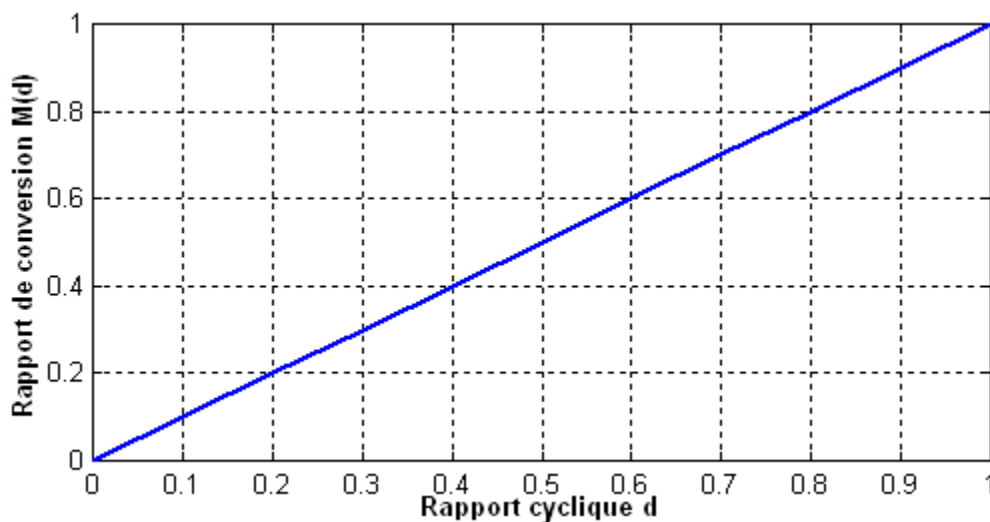


Fig. 3.10 : Le rapport de conversion  $M(d)$  pour un hacheur série

## 5.2 Convertisseur Boost

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom Boost ou hacheur parallèle, son circuit de base est celui de la figure 3.8

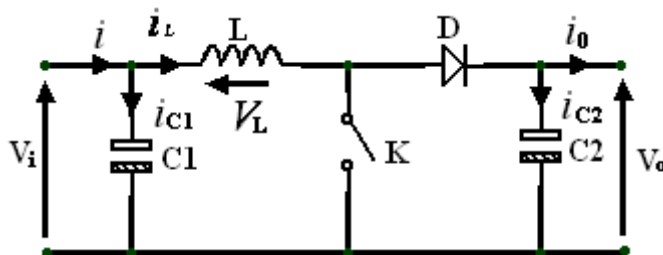


Fig. 3.11 : Schéma de principe d'un Boost

Son principe de fonctionnement est basé sur la position du commutateur  $K$  ouvert/fermé, lorsque ce dernier est fermé, pendant la durée  $t_{ON}$  c.-à-d.  $d \in [0, d.T_s]$ , dans cette phase le courant croît progressivement, ce qui laisse l'inductance stocker davantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de  $K$ . Puis le commutateur se bascule en ouverture c.-à-d. pendant la durée  $t_{OFF}$ ,  $d \in [d.T_s, T_s]$ , durant cette action de transition de la fermeture à l'ouverture l'inductance  $L$  s'oppose à la variation du courant  $I_L$  dans son circuit selon la loi de Lenz. Cette variation sollicite aussi la variation du flux magnétique dans son noyau, et donc elle génère une tension à ses bornes qui s'ajoute à la tension de source, le tout se trouve aux bornes du condensateur  $C_2$ . La grandeur du courant qui varie à l'intérieur de la self est donné par :

$$(\Delta I_L)_{OFF} = \frac{V_S - V_e}{L} t_{OFF} \quad (3.22)$$

On écrit alors en régime permanent, comme pour le BUCK :

$$(\Delta I_{L_{ON}}) + (\Delta I_{L_{OFF}}) = 0 \quad (3.23)$$

Ce qui conduit à l'expression fondamentale :

$$V_S = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{OFF}} V_e \quad (3.24)$$

Une conduction discontinue est définie par un  $T > t_{ON} + t_{OFF}$  :

$$V_S = \left( 1 + \frac{t_{ON}}{2L} \frac{T V_e}{I_S} \right) V_e \quad (3.25)$$

Dans une conduction continue on a :

$$\frac{2L}{R_L T} > \left( \frac{V_e}{V_S} \right)^2 \left( 1 - \frac{V_e}{V_S} \right) \quad (3.26)$$

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur  $K$ . celui de la figure 3.9 présente le circuit équivalent du Boost à  $K$  fermé c.-à-d.  $d \in [0, d.T_s]$ .

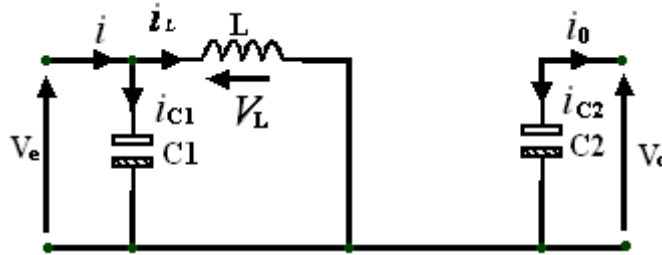


Fig. 3.12 : Schéma équivalent du hacheur survolteur à  $t \in [0, d.T_s]$

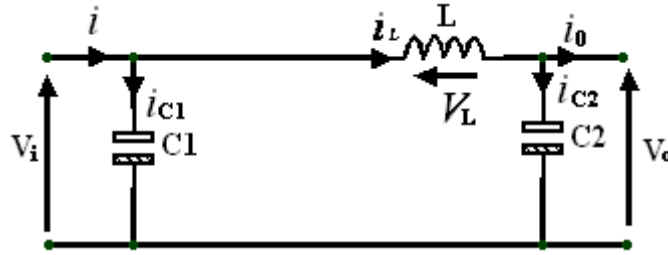
La loi de Kirchhoff nous amène à synthétiser les équations qui régissent le fonctionnement actuel :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_{i_1}(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \quad (3.27)$$

$$i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t), \quad (3.28)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_L(t), \quad (3.29)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur  $K$ , le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :



**Fig. 3.13** Circuit équivalent d'un hacheur survolteur à  $t \in [d.T_s, T_s]$

$$i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \quad (3.30)$$

$$i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t), \quad (3.31)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_L(t) - V_o(t), \quad (3.32)$$

En négligeant les ondulations créées par l'effet de commutation de l'interrupteur  $K$  au niveau du courant et de la tension, généralement par une approximation de ces grandeurs à leurs valeurs moyennes, on obtient une forme simplifiée des équations (3.27) à (3.29) comme suit :

$$i_{C_1} = I - I_L \quad (3.33)$$

$$i_{C_2} = -I_O \quad (3.34)$$

$$V_L = V_i \quad (3.35)$$

Tandis que les équations (3.30) à (3.32) donnent naissance aux équations simplifiées suivantes :

$$i_{C_1} = I - I_L \quad (3.36)$$

$$i_{C_2} = I_L - I_O \quad (3.37)$$

$$V_L = V_i - V_o \quad (3.38)$$

Les équations précédentes sont obtenues directement de l'équation suivante :

$$x(t) = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} x(\tau) d\tau = \frac{1}{T_S} \left[ \int_t^{t+\alpha T_S} x|_{[0, \alpha T_S]}(\tau) d\tau + \int_{t+\alpha T_S}^{t+T_S} x|_{[\alpha T_S, T_S]}(\tau) d\tau \right] \quad (3.39)$$

En régime permanent  $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$  et  $V_L$  sont approchés à leurs valeurs moyennes donc :

$$d \cdot i_{C1, ON} = (1-d) i_{C1, OFF} \Rightarrow d \cdot i_{C1, ON} + (1-d) i_{C1, OFF} = 0, \quad (3.40)$$

$$d \cdot i_{C2, ON} = (1-d) i_{C2, OFF} \Rightarrow d \cdot i_{C2, ON} + (1-d) i_{C2, OFF} = 0, \quad (3.41)$$

$$d \cdot V_{L, ON} = (1-d) V_{L, OFF} \Rightarrow d \cdot V_{L, ON} + (1-d) V_{L, OFF} = 0, \quad (3.42)$$

De l'équation (3.40) :

$$d (I - I_L) + (1-d) \cdot (I - I_L) = 0 \Rightarrow I = I_L \quad (3.43)$$

De l'équation (2.41) :

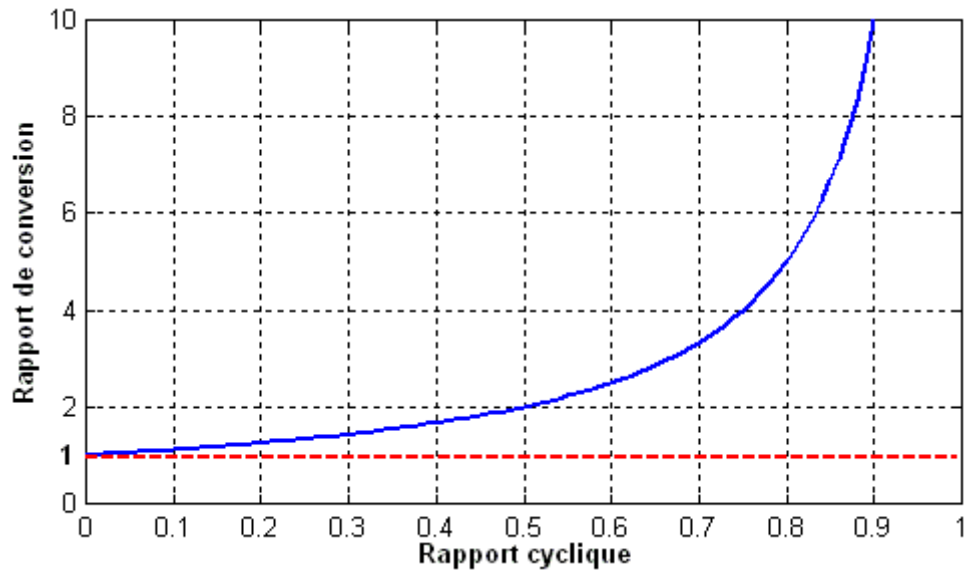
$$d (-I_o) + (1-d) (I_L - I_o) = 0 \Rightarrow I_o = (1-d) I_L \quad (3.44)$$

De l'équation (2.42) :

$$dV_i + (1-d) \cdot (V_i - V_o) = 0 \Rightarrow V_i = (1-d) V_o \quad (3.45)$$

Le rapport de conversion est déduit de l'équation :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-d)} \quad (3.46)$$



**Fig. 3.14** : L'allure du rapport de conversion en fonction du rapport

## **CHAPITRE 4**

### **4. CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE**



## 1 INTRODUCTION

L'objectif principal de cette étude est la mise en œuvre d'un contrôleur de charge pour batterie solaires. Nous nous sommes fixés pour ce contrôleur les exigences suivantes :

- Exploitation optimale de l'énergie solaire disponible :
- Écourter le temps de charge de la batterie :
- Gestion optimale de la charge et décharge de la batterie :

## 2 CAHIER DES CHARGES

Pour la mise en œuvre de ce système, nous nous sommes imposé un cahier des charges qui soit le plus possible identique au contrôleurs de charge du commerce, dans le but d' aboutir à un prototype de contrôleur de batteries solaire que nous pouvons par la suite développer et le rendre conforme avec les standards internationaux.

**Tableau 4.1 : Cahier des charges**

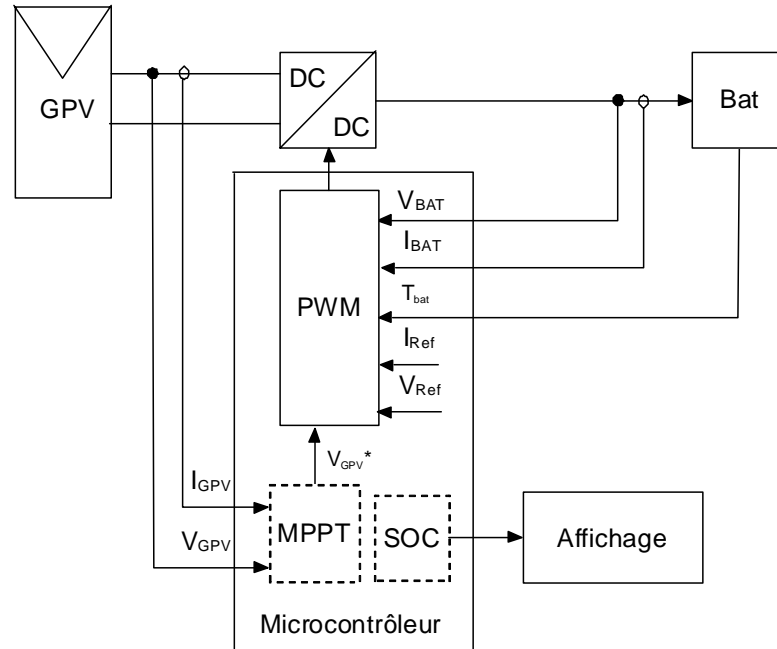
Puissance nominale	300W
Tension nominale	12V
Courant nominal	25A
Tension d'entrée (max)	25V
Tension de sortie (max)	15,3V
Courant de sortie (max)	30A
Ondulation de tension	1%
Ondulation de courant	1%
Fréquence de découpage	100 KHz

## 3 STRUCTURE GENERALE DU CONTROLEUR DE CHARGE

Pour satisfaire à ces exigences, nous proposons dans ce travail un contrôleur de charge à base de microcontrôleur constitué d'un convertisseur abaisseur-élevateur positif synchrone à commande MPPT et à trois modes de fonctionnement.

Cette étude nous a permis d'adopter pour satisfaire les exigences citées ci-dessus une « stratégie » qui repose sur deux points essentiels à savoir :

- une optimisation au niveau des composants ainsi que la structure choisie pour le convertisseur DC/DC ;
- Optimisation de la stratégie de commande qui représente le côté software de notre travail.

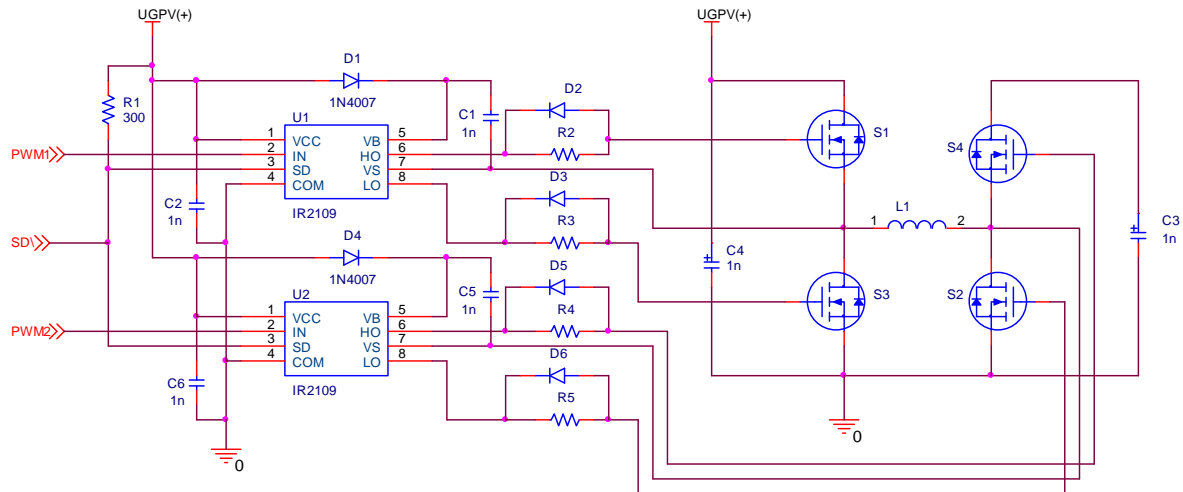


**Fig.4.1** : schéma synoptique du contrôleur

Comme le montre la figure ci-dessus, le contrôleur conçu se compose d'un étage de puissance, d'un étage contrôle et d'acquisition et d'un étage affichage.

### 3.1 Étage de puissance

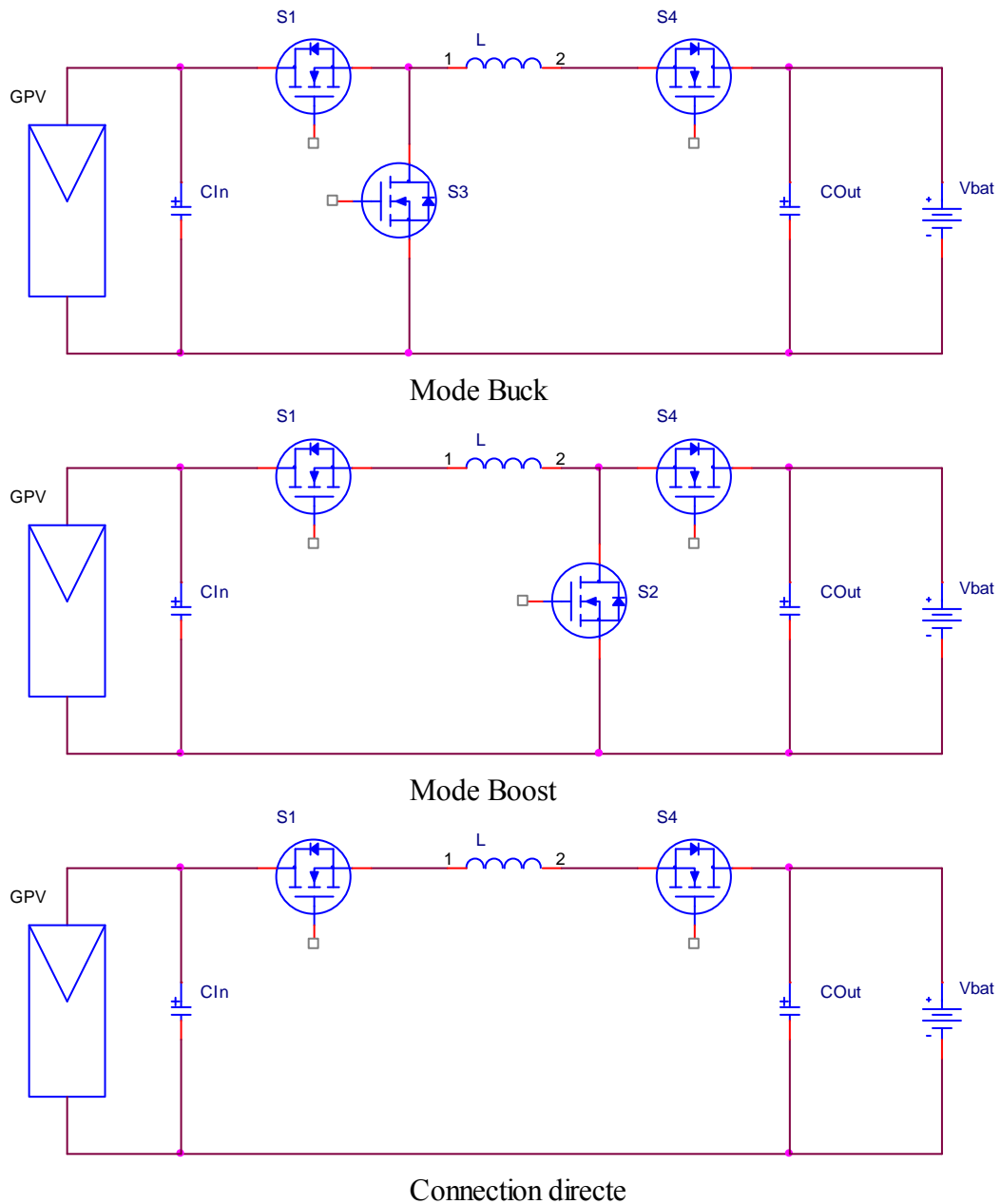
L'étage de puissance est constitué d'un convertisseur Buck-boost non-inverseur ou positif (figure) et un étage d'adaptation d'impédance entre l'étage de puissance (le convertisseur Buck-boost proprement dit) et l'étage de commande (microcontrôleur).



**Fig.4.2 : Étage de puissance**

Le convertisseur Buck-Boost est un convertisseur synchrone donc constitué uniquement de transistors pour limiter les pertes de puissances. Nous avons utilisé des transistors N-MOS de puissance, des IRFB 4710. Nous avons choisi l'IRFB4710 vu son  $R_{DS(ON)}$  faible  $0.014\Omega$  et sa disponibilité. Pour le pilotage des transistors MOSFETs nous avons utilisé des IR2109, le critère de choix étant leur disponibilité sur le marché et leur adaptation au montage.

La particularité de ce convertisseur que nous proposons est qu'il a trois modes de fonctionnement comme illustré ci-dessous :



**Fig.4.3 :** Les trois modes de fonctionnement du convertisseur proposé

- **Mode Buck :** Le convertisseur fonctionne en mode Buck si la tension exigée par la charge (la batterie en l'occurrence) est inférieure à celle du générateur PV.
- **Mode Boost :** dans le cas où la tension au niveau du générateur est inférieure à celle exigée par la charge.
- **Mode connexion directe :** quand la tension exigée par la charge est égale à celle du générateur, dans ce cas, il n'y a pas de conversion de puissance, les transistors travaillent comme de simples interrupteurs.



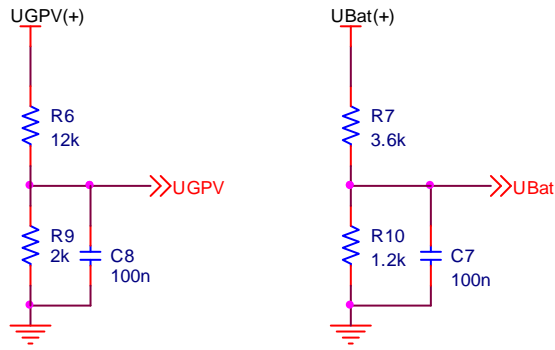


Fig.4.5 : Mesure des tensions

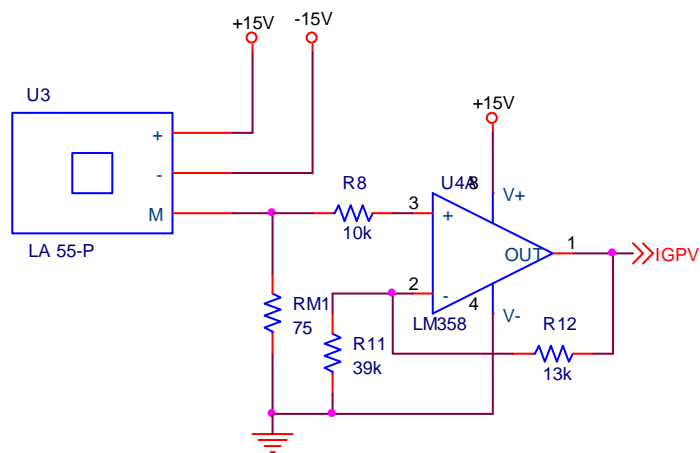


Fig.4.6 : Mesure du courant du générateur PV

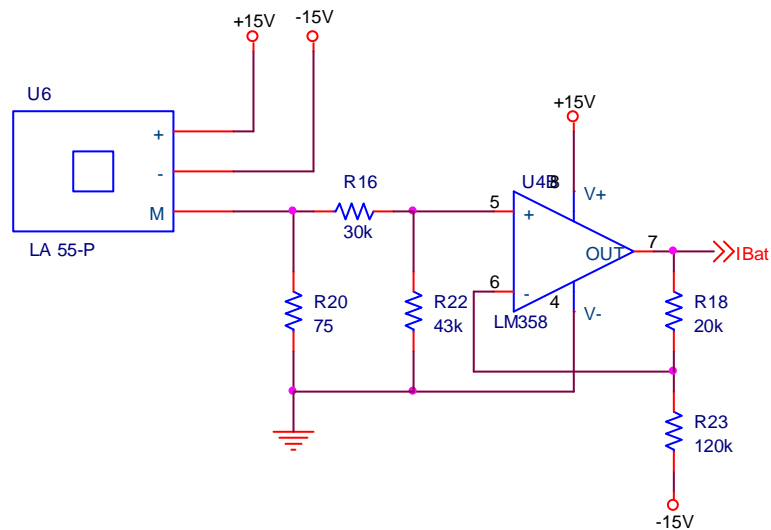


Fig.4.7 : Mesure du courant de la batterie



la batterie bien entendu, et dans ce cas il est en mode de consommation minimale pour économiser l'énergie de la batterie.

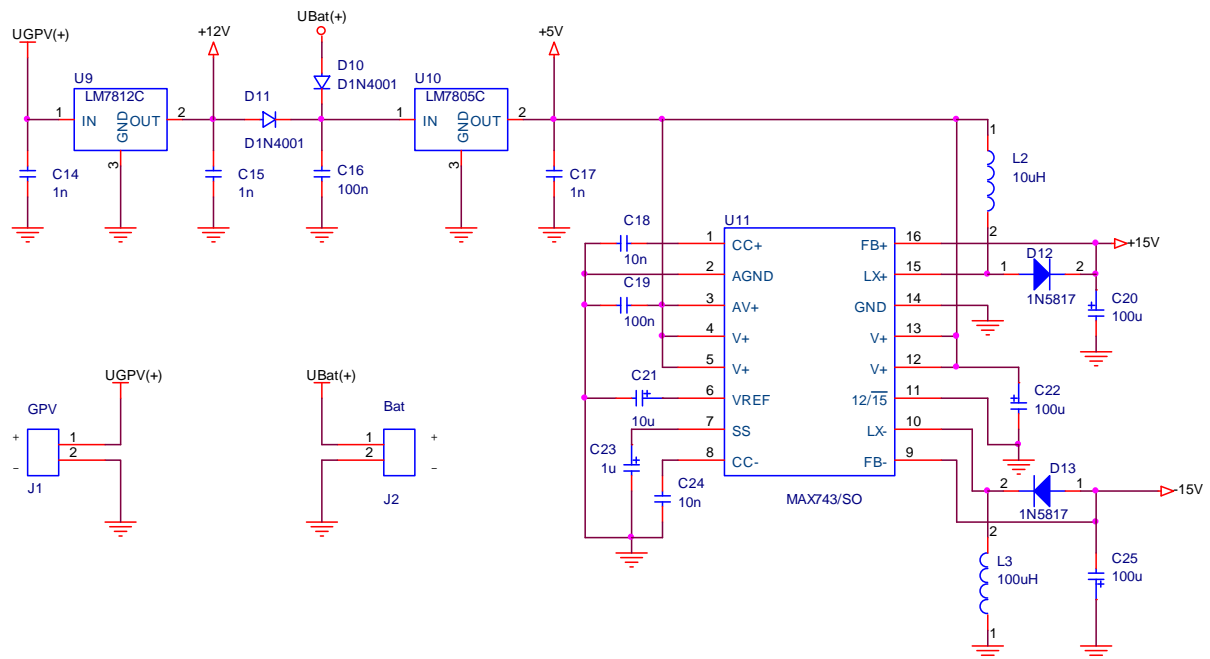


Fig.4.10 : Carte d'alimentation

#### 4 STRATÉGIE DE COMMANDE

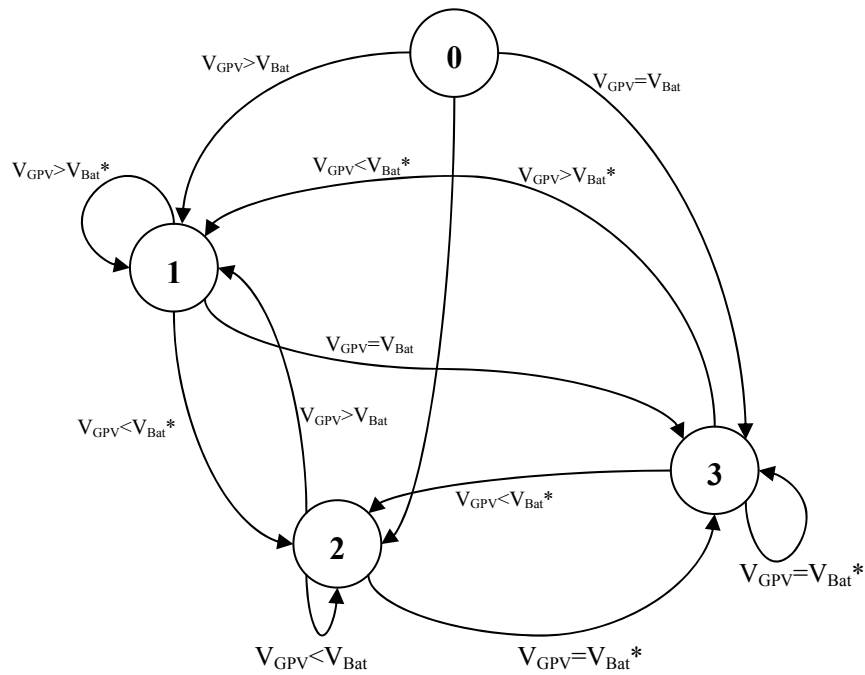
La stratégie de commande proposée, illustrée par la figure 4.11, comporte trois étapes à savoir

- Détermination de l'état de charge de la batterie
- La validation du mode de fonctionnement approprié
- Et en fin la charge de la batterie

Ce séquençage est cependant conditionné par l'état de charge de la batterie.

Pour assurer ces modes de fonctionnement, nous avons mis au point un algorithme de commande illustré par l'organigramme ci-dessous. C'est à partir de l'état de charge de la batterie SOC et après avoir mesuré la tension de la batterie  $V_{Bat}$ , la tension du générateur  $U_{GPV}$ , et la température de la batterie  $T_{Bat}$  qu'il sera décidé de choisir le mode de fonctionnement à valider. Cet algorithme a été implémenté en langage C dédié pour microcontrôleurs PIC. L'algorithme de commande est géré par la machine d'états illustrée par le graphe ci-dessous. Cette machine est constituée de quatre états :





**Fig.4.11** : Machine d'états du système

Etat 0 : c'est l'état initial du système après démarrage. Quand le système est dans cet état le convertisseur est au repos, tous les transistors sont ouverts.

Etat 1 : cet état intervient lorsque la tension du générateur PV est supérieure à la tension de la batterie qu'elle soit imposée par la batterie elle-même ou bien imposée à la batterie par le système. Dans cet état, le convertisseur est en mode Buck.

Etat 2 : cet état est validé lorsque la tension de la batterie est supérieure à celle du générateur. Dans cet état le convertisseur est en mode Boost.

Etat 3 : cet état est atteint lorsque la tension du générateur PV est égale à la tension de la batterie. Dans ce cas, le convertisseur est en mode de connexion directe.

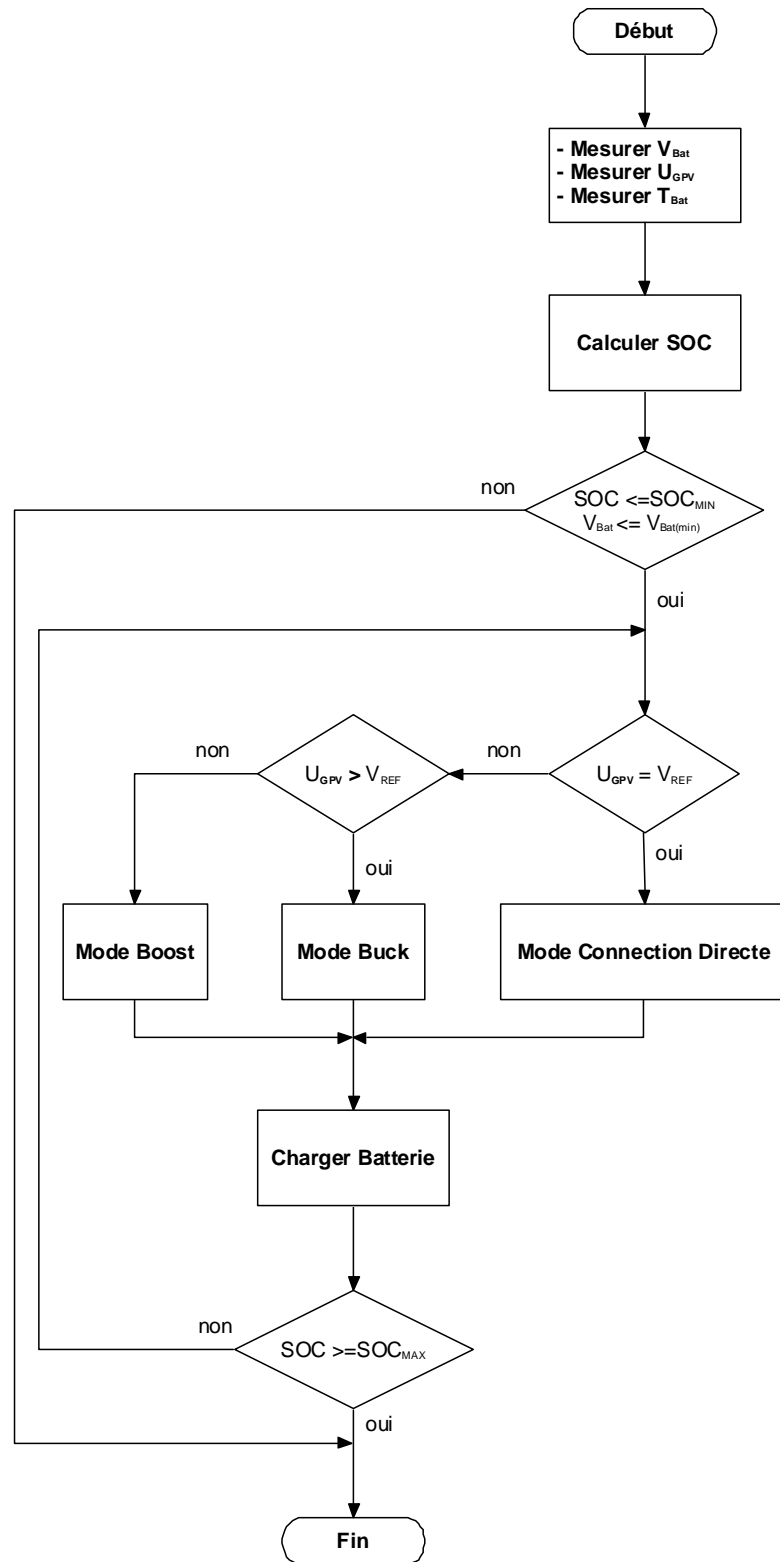


Fig. 4.12 : Organigramme du choix du mode de fonctionnement

## **CONCLUSION**

## CONCLUSION

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Cependant le caractère intermittent et aléatoire de ces sources d'énergie impose le recours à des moyens de stockage adéquats pour assurer la continuité du service. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, les batteries au plomb sont largement utilisées pour le stockage de l'énergie produite. Malgré qu'elle ait le meilleur rapport qualité-prix comparée aux autres technologies existantes, la batterie au plomb est vulnérable et constitue le maillon faible d'un système photovoltaïque.

L'objectif de ce travail est de concevoir un contrôleur de batteries solaire dans le but de prémunir la batterie contre tous les préjudices probables, assurant de la sorte la fiabilité du système entier

Ce travail, nous l'avons divisé en deux parties. La première partie est une étude théorique où nous avons commencé par une présentation sommaire des systèmes photovoltaïques suivi par une étude de la batterie au plomb et enfin un état de l'art sur les contrôleurs de charge solaire. La seconde partie constitue le volet pratique de notre travail. Nous y avons présenté les solutions à la problématique du sujet.

Sur le plan théorique, cette étude nous a permis de connaître la complexité des accumulateurs au plomb en particulier et des systèmes électrochimiques en général. Nous avons mis en évidence les facteurs affectant le bon fonctionnement d'un accumulateur au plomb dans un système photovoltaïque et les contraintes auxquelles il est soumis.

Sur le plan pratique, ce travail nous a permis d'identifier les difficultés liées à la réalisation pratique du système proposé, la réalisation des convertisseurs DC/DC synchrones notamment, ainsi que l'élaboration software de la stratégie de commande proposée.

A l'issue de ce travail, nous pouvons dire qu'il a été très bénéfique pour nous vu les thèmes que nous avons abordé : système électrochimiques, détermination de l'état de charge d'une batterie, régulation MPPT, convertisseurs synchrones,...

En perspective, nous envisageons la continuation de ce travail en résolvant les inconvénients du système étudié.

---

## RÉFÉRENCES

REFERENCES

- [1] BP (British Petroleum), "BP Statistical Review of World Energy June 2011," BP, Inc., London 2011.
- [2] BP (British Petroleum), "BP Energy Outlook 2030," London: BP January 2011 2011.
- [3] OECD Publishing and International Energy Agency (IEA). (2010). *World Energy Outlook 2010*. Available: <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=615983>
- [4] United States. Energy Information Administration., "International energy outlook 2011," Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Dept. of Energy., Washington, D.C. 2011.
- [5] Organization of the Petroleum Exporting Countries. (2011). *World Oil Outlook 2011*. Available: [http://www.opec.org/opec\\_web/en/publications/340.htm](http://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm)
- [6] E. Meierding. (2011, 11 décembre 2011). La sécurité énergétique et l'Afrique subsaharienne. *Revue internationale de politique de développement* (2), 55-73. Available: <http://poldev.revues.org/692>
- [7] Ministère de L'Energie et des Mines - Algérie. (2011, 3 décembre 2011). *Potentiels des Énergies renouvelables*. Available: <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=potentiels>
- [8] SolarGis, "Irradiation globale horizontale - Afrique et Moyen-Orient," ed.
- [9] SONELGAZ. (2011, 3 décembre). *Trois décennies d'électrification* Available: [http://www.sonelgaz.dz/article.php3?id\\_article=178](http://www.sonelgaz.dz/article.php3?id_article=178)
- [10] (30 janvier). *La demande d'énergie*. Available: <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/les-cles-pour-comprendre/economie-de-l-energie/la-demande-d-energie#1>
- [11] F. Nodé-Langlois. (2009, 04 juin). *Réchauffement : quel scénario pour 2030 ?* Available: <http://www.lefigaro.fr/environnement/2009/12/07/01029-20091207ARTFIG00370-rechauffement-quel-scenario-pour-2030-.php>
- [12] M. D. Archer and R. Hill, *Clean Electricity from Photovoltaics*. London: Imperial College Press, 2001.
- [13] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy : renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press, 2010.

- [14] R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic systems engineering*, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [15] G. N. Tiwari and S. Dubey, *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2010.
- [16] J.-M. Cottier, J. Graf, and S. B. f. Konjunkturfragen, *Centrales photovoltaïques : guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs*. Berne, Lausanne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1996.
- [17] P. A. Lynn, *Electricity from sunlight : an introduction to photovoltaics*. Chichester: Wiley, 2010.
- [18] A. Labouret and M. Viloz, *Énergie solaire photovoltaïque*, 4 ed. Paris: Dunod, 2009.
- [19] S. R. Wenham, *Applied photovoltaics*, 2 ed. London: Earthscan, 2007.
- [20] J.-C. Sabonnadière, *Renewable energies*. Hoboken, NJ: ISTE Ltd/John Wiley & Sons, 2009.
- [21] V. Quaschnig, *Renewable energy and climate change*. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, N.J.: Wiley, 2010.
- [22] V. Quaschnig, *Understanding renewable energy systems*. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2005.
- [23] International Energy Agency, *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*: OECD Publishing, 2010.
- [24] *Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque*, 5 ed. Paris, France: ETSF, Éd. techniques et scientifiques françaises, 2010.
- [25] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie., *Planning and installing photovoltaic systems : a guide for installers, architects and engineers*, 2 ed. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2008.
- [26] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chichester: Wiley, 2003.
- [27] M. Florence. (2004) Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque. *CLEFS CEA*. 2.
- [28] V. Quaschnig. (2006) Photovoltaic systems. *RENEWABLE ENERGY WORLD*. 143-148.
- [29] M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, *Renewable energy : technology, economics, and environment*. Berlin ; New York: Springer, 2007.

- [30] FONDATION D'ENTREPRISE ALCEN POUR LA CONNAISSANCE DES ÉNERGIES. (2012, 20 mai 2012). *Stockage de l'énergie*. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie#>
- [31] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291-312, 2009.
- [32] F. Antony, C. Dürschner, and K.-H. Remmers, *Le photovoltaïque pour tous : conception et réalisation d'installations*, 1 ed. Paris; Berlin: Observ'er ; Solarpraxis, 2006.
- [33] B. Multon and H. Ben Ahmed, "Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?," *Revue 3EI*, pp. 6-16, mars 2007.
- [34] Z. Yang, J. Zhang, M. C. W. Kintner-Meyer, X. Lu, D. Choi, J. P. Lemmon, and J. Liu, "Electrochemical Energy Storage for Green Grid," *Chemical Reviews*, vol. 111, pp. 3577-3613, 2011/05/11 2011.
- [35] G. Robin, M. Ruellan, B. Multon, H. Ben Ahmed, and P.-Y. Glorennec, "Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable," in *Actes Colloque SeaTechWeek 04*, Brest, FRANCE, p. 9.
- [36] R. Dell, D. A. J. Rand, and Royal Society of Chemistry (Great Britain), *Understanding batteries*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2001.
- [37] International Electric Commission (IEC), "Electrical Energy Storage," White paper, décembre 2011.
- [38] A. MARQUET, C. LEVILLAIN, A. DAVRIU, S. LAURENT, and P. JAUD, "Stockage d'électricité dans les systèmes électriques," *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. 8, pp. D4030. 1-D4030. 29, 1998.
- [39] Electricity Storage Association (ESA). (2009, 25 mai). *Technology Comparison*. Available: [http://www.electricitystorage.org/technology/storage\\_technologies/technology\\_comparison](http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/technology_comparison)
- [40] ENEA Consulting, "Le Stockage d'énergie: Enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation," Paris2012.
- [41] R. Zito, *Energy storage : a new approach*. Hoboken, N.J. ; Salem, MA: Wiley-Blackwell ; Scrivener, 2010.
- [42] IRENA, "ELECTRICITY STORAGE," International Renewable Energy Agency2012.
- [43] V. Nelson, *Introduction to renewable energy*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.



- [44] M. Broussely and G. Pistoia, *Industrial applications of batteries : from cars to aerospace and energy storage*. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2007.
- [45] S. C. W. Krauter, *Solar electric power generation - photovoltaic energy systems : modeling of optical and thermal performance, electrical yield, energy balance, effect on reduction of greenhouse gas emissions*. Berlin: Springer, 2006.
- [46] J. M. Tarascon. (2011, 7 juin 2012). L'énergie : stockage électrochimique et développement durable. *Leçons inaugurales du Collège de France (216)*. Available: <http://lecons-cdf.revues.org/408>
- [47] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of batteries*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [48] T. R. Crompton, *Battery reference book*, 3 ed. Oxford, England; Boston, United States: Newnes, 2000.
- [49] L. Chancelier and É. Laurent, *L' électricité photovoltaïque*. Paris, France: Gret Ministère de la coopération, 1996.
- [50] Y. Riffonneau, S. Bacha, and F. Barruel, "Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – Application à l'habitat," Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2009.
- [51] I. Buchmann. (2011, 15 juillet 2011). *Secondary Batteries* [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)
- [52] P. Mayé, *Générateurs électrochimiques piles, accumulateurs et piles à combustibles*. Paris: Dunod, 2010.
- [53] D. Pavlov, *Lead-acid batteries science and technology : a handbook of lead-acid battery technology and its influence on the product*, 1<sup>er</sup> ed. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2011.
- [54] A. Emadi, *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [55] A. Emadi, M. Ehsani, and J. M. Miller, *Vehicular electric power systems : land, sea, air, and space vehicles*. New York: Marcel Dekker ; London : Momenta [distributeur], 2004.
- [56] D. Devilliers and E. Mahé, "Cellules électrochimiques: aspects thermodynamiques et cinétiques," *L'actualité chimique*, pp. 31-40, janvier 2003.
- [57] G. Dillenseger, "Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours," Doctorat, Université de Montpellier 2, Montpellier, France, 2004.

- [58] J. ROBERT and J. ALZIEU, "Accumulateurs: Accumulateurs au plomb," *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. 5, 2004.
- [59] (2011, 4 septembre). *Conception de la batterie VARTA Start-Stop à technologie EFB*. Available: <http://www.varta-automotive.fr/index.php?id=489&L=7>
- [60] K. Hesse, "AN OFF-LINE LEAD ACID CHARGER BASED ON THE UC3909," ed. United States: Texas Instruments, 1999.

**ANNEXE**

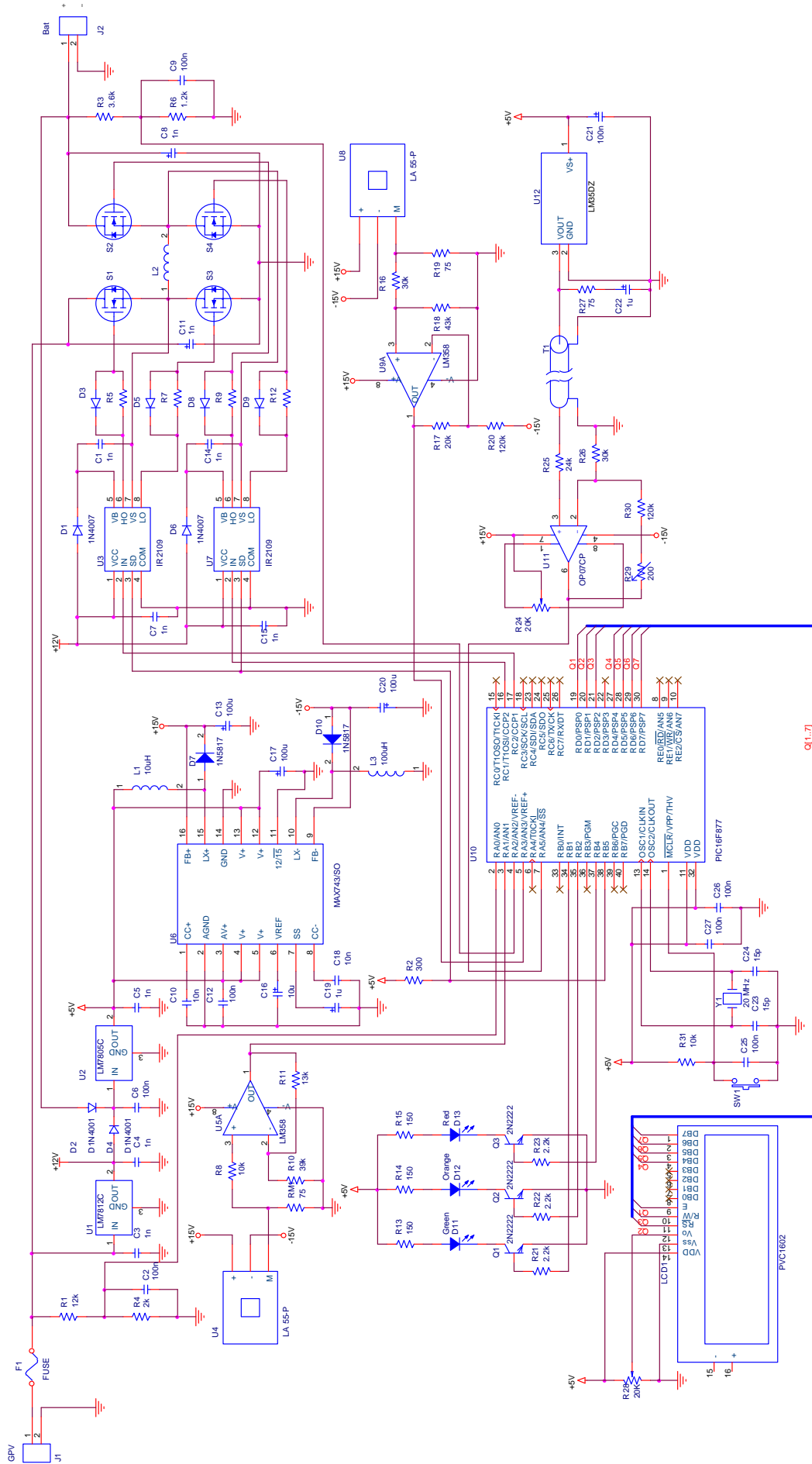


Fig. A.1 : Schéma du contrôleur à réaliser