

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Ecole Doctorale : Energies renouvelables

Option : Photovoltaïque

Mémoire de Magister

Présenté par :

Merrouche Walid

Ingénieur d'Etat en Electronique (ENP)

Thème

DEVELOPPEMENT D'UN REGULATEUR INTELLIGENT
POUR UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE
DE FAIBLE PUISSANCE

JURY

M.M.HADDADI	Professeur	ENP	Président
M.A. MALEK	Directeur de recherches	CDER	Rapporteur
M.C.LARBES	Professeur	ENP	Examineur
M.M.S AIT CHEIKH	Maitre de conférences	ENP	Examineur

Année universitaire 2010/2011

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon Dieu, de m'avoir aidé et de m'avoir donné la patience de finaliser ma thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur Ali MALEK, mon encadreur, pour sa patience et ses conseils.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur Mourad HADDADI, professeur au Labo de recherche de l'ENP, d'avoir accepté la présidence du jury, ainsi pour ses conseils fructueux et ses encouragements.

Je remercie aussi Monsieur Cherif LARBES, professeur à l'ENP, d'avoir répondu à notre invitation afin d'examiner ce travail.

J'adresse toute ma gratitude à Monsieur Mohamed Saleh AIT CHEIKH maître de conférence à l'ENP, d'avoir accepté de juger ce document.

Je remercie mes enseignants de notre grande école ENP, en particulier qui m'ont initié à assurer ma future tâche.

Je remercie tous les étudiants en post graduation avec qui j'ai pu échanger des points de vue sur ce travail.

Je remercie tous les amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces années de recherche.

Mes sincères gratitudes s'adressent à ma famille pour ses encouragements permanents et son soutien moral.

Walid

À mes chers parents
À tous mes frères et sœurs
À tous ceux qui me sont chères

الملخص:

في هذه المذكرة، قمنا باستعمال البرنامج الإلكتروني « PROTEUS 7 PROFESSIONAL » من أجل تطوير جهاز ذكي لمتابعة شحن و تفريغ البطارية في تطبيقات الطاقة الكهروضوئية. برنامج الجهاز يعتمد على تكنولوجيا MLI و تم تحميله على ميكروبروسيسور PIC16F877 . الذي يقوم بقراءة قيمة التوتر و التيار و درجة الحرارة، ثم يستعمل هذه المعطيات لتحديد مستوى الشحن و تعديل القيم الحدية للتوتر، ثم يستعمل المحول BUCK DC-DC من أجل التحكم في قيمة التيار الداخل على البطارية من جهة، و من جهة أخرى التحكم في MOSFET من أجل السماح بتفريغ البطارية أو منعه. هذه الطريقة نتمكن من حماية الجهاز من زيادة الشحن و سقوط مستوى البطارية و من العمل في درجات حرارة منخفضة.

الكلمات المفتاحية: منظم، بطارية، كهروضوئي، شحن، تفريغ، حرارة، محول، MLI، PIC16F877، PROTEUS.

Résumé

Dans ce travail nous avons développé sur le logiciel électronique « PROTEUS 7 PROFESSIONAL » un *Régulateur Intelligent pour un Système Photovoltaïque de Faible Puissance*, dont l'algorithme est basé sur la technique MLI. Le fichier numérique est implémenté dans le microcontrôleur Microchip8-bit PIC16F877. Le régulateur mesure la température, le courant et la tension aux bornes de la batterie, pour déterminer l'état de charge et les valeurs seuils de régulation compensées par la valeur de la température. Donc, contrôler la charge et protéger le système des surcharges en variant l'intervalle de courant qui passe à la batterie en utilisant un convertisseur BUCK DC-DC d'une part, et de l'autre part commander le transistor MOSFET à la sortie pour bloquer ou débloquer le récepteur dans le cas d'une décharge profonde ou des températures de congélation.

Mots clefs : Régulateur, série, batterie, accumulateur, Plomb acide, Photovoltaïque, charge, surcharges, entretien, décharge, compensation, température, congélation, convertisseur, Hacheur, Buck, MLI, PIC16F877, PROTEUS.

Abstract

In this work, we have developed in electrical software « PROTEUS 7 PROFESSIONAL » an « intelligent regulator for low power photovoltaic systems», with an algorithm using PWM command. The program is implemented in PIC16F877. It reads voltage, current and temperature values, to determine the charge state and regulate the regulation limits. So, it controls the current that charge battery by BUCK DC-DC inverter, and controls the MOSFET in output to allow or not the discharge. We can consequently protect the battery from overcharging and low discharge or temperature.

Key words: regulator, battery, lead, acid, photovoltaic, charge, overcharging, boost, floating, discharge, temperature, compensation, inverter, buck, PWM, PIC16F877, PROTEUS.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	4
1. COMPOSANTS DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME	7
1.1 Introduction.....	8
1.2 Module photovoltaïque.....	8
1.2.1 Cellule solaire (photopile).....	8
1.2.2 Modélisation du panneau photovoltaïque	11
1.2.3 Effet de la température sur le rendement	12
1.2.4 Effet de l'éclairement.....	13
1.3 Accumulateur (batterie).....	14
1.3.1 Introduction	14
1.3.2 Choix de la technologie Plomb de la batterie	15
1.3.3 Constitution et caractéristiques d'une batterie au plomb	16
1.3.4 Modélisation mathématique de la batterie.....	22
1.3.5 Comportement de l'accumulateur en Charge	24
1.3.6 Comportement de l'accumulateur en décharge.....	26
1.3.7 Influence de la température	29
1.3.8 Insertion de la batterie dans l'installation PV (parallèle)	31
1.4 Conclusion	32
2. REGULATEUR DE CHARGE/DECHARGE DE LA BATTERIE.....	33
2.1 Introduction.....	34
2.2 Contrôle de charge/décharge.....	35
2.2.1 Contrôle de la charge	35
2.2.2 Contrôle de la décharge	36
2.2.3 Compensation thermique.....	40
2.3 Modes de charge d'une batterie de Pb [16]	40
2.3.1 Charge en tout ou rien	41
2.3.2 Charge à tension constante	42
2.3.3 Charge à courant constant.....	44
2.3.4 Charge pulsée.....	44
2.3.5 Charge rapide.....	45
2.4 Valeurs limites de la régulation	45
2.4.1 Valeurs recommandées pour une batterie à Plomb	45
2.4.2 Tension de régulation et type de régulation	45
2.5 Technologies des régulateurs	45
2.5.1 Régulateur de type série.....	46
2.5.2 Régulateur de type shunt	47
2.5.3 Régulateur PWM.....	47
2.5.4 Régulateur MPPT.....	48
2.6 Choix du régulateur.....	49
2.7 Conclusion	50

3.	DESCRIPTION DE LA CONCEPTION DE NOTRE REGULATEUR INTELLIGENT.....	52
3.1	<i>Introduction.....</i>	53
3.2	<i>Notre régulateur 12V/5A avec PIC 16F877.....</i>	53
3.2.1	Parties à développer.....	53
3.2.2	Etude fonctionnelle du régulateur.....	53
3.3	<i>Mesure de courant et de la tension.....</i>	54
3.3.1	Mesure de courant de la batterie.....	54
3.3.2	Mesure de la tension de la batterie.....	55
3.4	<i>Hacheur et MOSFET de sortie.....</i>	55
3.4.1	Hacheur Buck à étudier.....	55
3.4.2	Module d'isolation (optocoupleur).....	63
3.4.3	Driver IR2111.....	63
3.4.4	MOSFET IRF840 de sortie.....	63
3.5	<i>Afficheur LCD et LEDs.....</i>	64
3.6	<i>Détecteur de température de la batterie.....</i>	65
3.6.1	Capteur de température LM335.....	65
3.7	<i>Partie commande PIC16F877.....</i>	65
3.8	<i>Conclusion.....</i>	66
4.	PROGRAMME DE REGULATION ET RESULTATS SUR PROTEUS.....	67
4.1	<i>Introduction.....</i>	68
4.2	<i>Méthode de charge/décharge et compensation thermique.....</i>	68
4.2.1	Méthode de la charge.....	68
4.2.2	Méthode de la décharge.....	69
4.2.3	Compensation thermique.....	69
4.3	<i>Programme de régulation intelligente.....</i>	70
4.3.1	Outil de développement.....	70
4.3.2	Organigrammes.....	70
4.3.3	Algorithme de la mesure.....	73
4.3.4	Algorithme de la compensation thermique des valeurs seuils.....	73
4.4	<i>Résultats sur PROTEUS : Contrôle de la décharge.....</i>	74
4.4.1	Vérification des températures basses.....	74
4.4.2	Vérification des décharges profondes.....	75
4.5	<i>Résultats sur PROTEUS : Contrôle de la charge.....</i>	76
4.5.1	Variation du rapport cyclique au cours de la charge.....	76
4.5.2	Vérification du courant de charge.....	76
4.5.3	Vérification du niveau de la tension en charge.....	76
4.5.4	Début de la phase d'absorption au premier dépassement de V_{max}	77
4.5.5	Chargeur en phase d'entretien (fin d'Absorption).....	78
4.6	<i>Courbes de tension/courant obtenues dans la simulation.....</i>	78
4.7	<i>Conclusion.....</i>	79
	CONCLUSION GENERALE.....	80

ANNEXES	82
<i>ANNEXE1 : Types des régulateurs disponibles dans le marché mondial</i>	<i>83</i>
<i>ANNEXE2 : Différents types des batteries selon leur composition</i>	<i>88</i>
TABLE DES FIGURES	90
TABLEAUX	93
BIBLIOGRAPHIE	95

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est apparue comme une alternative importante à la consommation croissante de l'énergie dans la planète. Sa quantité journalière arrivant à la surface de la terre est dix fois plus grande que la totalité de l'énergie consommée par toutes les populations de la planète pendant une année entière [2]. Les systèmes photovoltaïques ont offert la possibilité d'exploiter l'énergie solaire dans des différents domaines. Ces systèmes constituent une source d'électricité silencieuse, saine, non polluante, pas d'effet serre, renouvelable, de grande fiabilité et d'une maintenance très simple. Ces avantages qualifient ce type de système à être compétitive dans plusieurs applications: pompage, irrigation, communication, signaux lumineux. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque est considérée comme une ressource primordiale, pour plusieurs pays situés dans des régions tropicales et tempérées, où la densité solaire directe peut dépasser 1 kW/m^2 [4].

Historiquement, les générateurs photovoltaïques autonomes sont les plus anciens, ils sont apparus dans les années 1970 avec les panneaux solaires montés sur les satellites [1]. Ensuite ils ont très vite suivi les applications de pompage et d'électrification rurale dans les pays en voie de développement, et récemment des applications autonomes domestiques et techniques particulièrement dans les pays industrialisés. Cependant, un système solaire autonome n'est pas seulement un générateur photovoltaïque mais comporte aussi des éléments à savoir: stockage d'énergie, régulateurs et récepteurs souvent spécialement développés pour cet usage.

L'autonomie de ces systèmes exige des batteries pour stocker l'énergie électrique produite par le panneau photovoltaïque qu'il la restitue durant la nuit et les périodes de faible radiation solaire. Bien que la batterie Acide-plomb soit connue depuis plus d'un siècle, elle offre actuellement les meilleures réponses au sujet du prix, efficacité énergétique et durée de vie.

Le régulateur de charge-décharge est un dispositif qui se place entre la batterie, le panneau solaire et le récepteur pour satisfaire deux fonctions principales. La première, est pour avoir une charge complète de la batterie en évitant le risque de surcharge et de courant de charge trop élevé. La seconde est inversement pour empêcher la décharge rapide de la batterie et la protéger contre la décharge profonde et de retour du courant. Les deux phénomènes: surcharge et décharge profonde, causeront une diminution de la durée de vie de la batterie.

Les premiers 70% au 80% de la capacité de la batterie sont faciles à aboutir, mais les derniers 20% ou 30% requièrent plus d'attention et donc plus de complexité. Cette complexité est évitée en utilisant des techniques de régulation de charge conclus des caractéristiques et du comportement des batteries.

La problématique qui se pose est que:

- Le stockage de l'énergie présente 20 à 30% des investissements initiaux mais sur une durée d'exploitation de vingt ans, ce coût peut atteindre 70% des frais totaux ; il est donc important d'essayer de réduire ce prix en augmentant la durée de vie de ce composant. La température de la batterie est un paramètre important à considérer si on veut assurer une charge appropriée de cette dernière. Il est important de surveiller, à l'intermédiaire d'un bon régulateur, l'état de charge ou de décharge de la batterie suivant les conditions d'utilisation et surtout la température, afin de la conserver en bon état;
- Les deux régulateurs existant sur le marché, analogique et numérique, possèdent des caractéristiques un peu différentes. Dont celui de l'analogique est moins couteux mais, il utilise des composants consommant beaucoup d'énergie. Par contre, le numérique consomme

moins d'énergie dans son fonctionnement mais son coût est plus élevé par rapport au précédent.

Compte tenu de ce qui précède, nous essayons de travailler sous l'axe de recherche suivant :
« Quel est le système de régulation le plus approprié pour avoir un meilleur compromis entre coût de système, technologie, énergie et durée de vie des batteries ? »

Pour résoudre cette problématique, on a développé sur PROTEUS un « Régulateur Intelligent pour un Système Photovoltaïque de Faible Puissance », dont l'algorithme est basé sur la technique MLI pour assurer un contrôle efficace de l'état de charge de la batterie et réduire les pertes d'énergie. Le microcontrôleur utilisé est de type Microchip 8-bit PIC16F877, une technologie pas chère et fiable. Le régulateur mesure la température, la tension et le courant aux bornes de la batterie, pour déterminer l'état de charge et les valeurs seuils de régulations compensées par la valeur de la température. Donc, contrôler la charge et protéger le système des surcharges, en variant l'intervalle de courant qui passe à la batterie par l'intermédiaire du convertisseur BUCK (série) DC-DC d'une part, et commander le transistor MOSFET à la sortie pour bloquer ou débloquer le récepteur dans le cas d'une décharge profonde ou des températures de congélation de l'autre part. Ce système garantit davantage une durée de vie plus longue de la batterie, économie d'énergie et une technologie numérique et réduit les coûts de l'installation et de la maintenance.

1. COMPOSANTS DU SYSTÈME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME

1.1 Introduction

Dans ce chapitre un bref rappel des principales relations entre les diverses parties du système photovoltaïque autonome.

Nous allons parler du système photovoltaïque autonome, qui exige la présence d'un Accumulateur (batterie). Le montage électrique de la figure suivante présente les différents organes du système. Il est constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur de charge, d'une batterie et de l'ensemble des charges (utilisations).

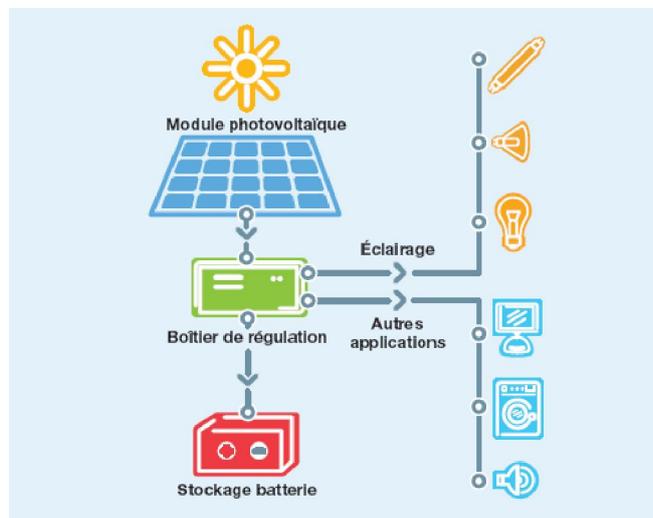


Figure 1-1 Différents organes du système photovoltaïque

1.2 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est tout d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition, le module est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile seule ne génère qu'une tension faible : de 0,5 à 1,5V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs photopiles en série pour pouvoir produire une tension exploitable.

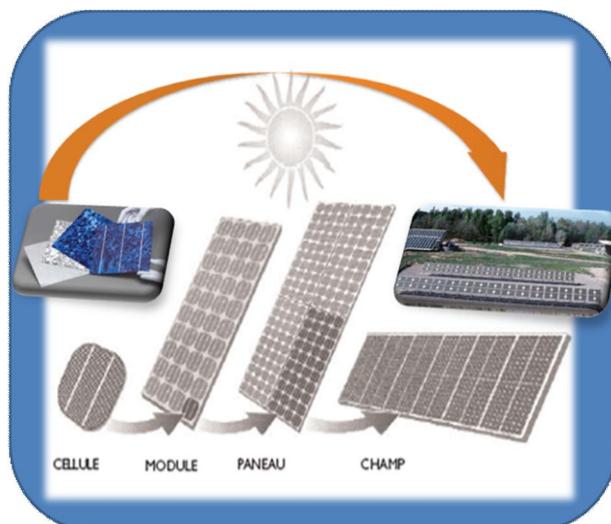


Figure 1-2 De la cellule au champ photovoltaïque

Pour augmenter la puissance on associe un ensemble de module pour avoir un panneau ou encore un ensemble de panneaux pour avoir un champ photovoltaïque.

1.2.1 Cellule solaire (photopile)

1.2.1.1 Fonctionnement des photopiles

Une cellule solaire, autrement appelée photopile, est un semi-conducteur généralement du silicium qui ne produit de l'électricité que si elle est exposée à la lumière. Ce phénomène est appelé «conversion photovoltaïque».



Figure 1-3 Cellule solaire (photopile)

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, a découvert la pile électrique.

La conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques :

- l'absorption de la lumière dans le matériau.
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- la collecte des charges.

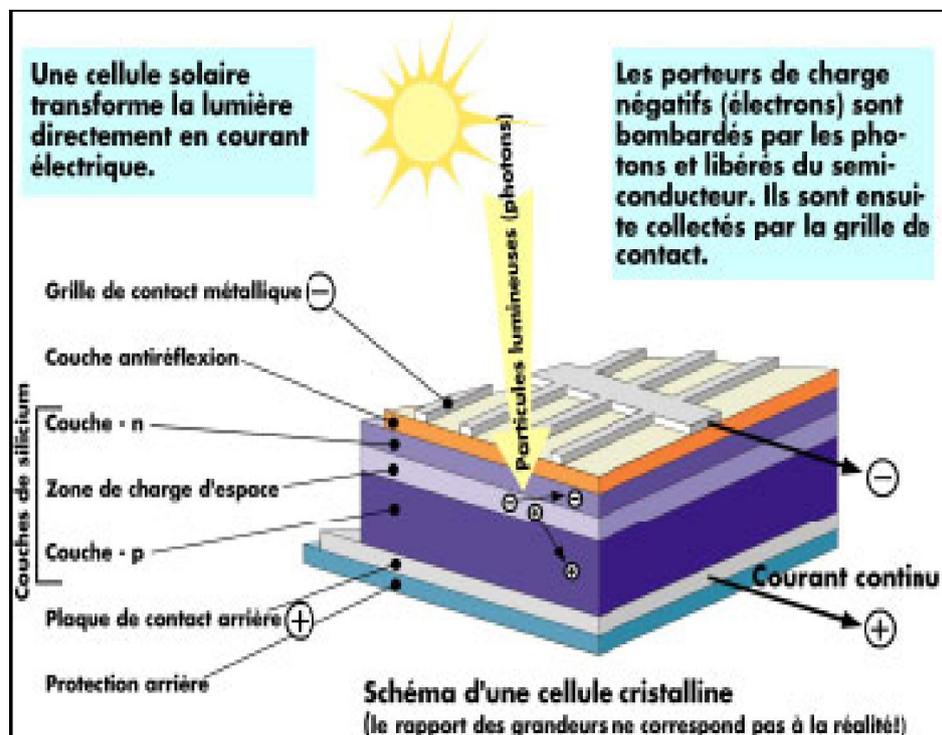


Figure 1-4 Effet photovoltaïque

1.2.1.2 Caractéristiques D'une Cellule Photovoltaïque

1.2.1.2.1 Tension en circuit ouvert

C'est la tension U_{co} produite par une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes. Pour élever la tension à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série.

1.2.1.2.2 Courant de court-circuit

Courant maximal I_{cc} à tension nulle débité par la photopile en court-circuit. Pour augmenter l'intensité en sortie du module, il faut associer les cellules en parallèle.

1.2.1.2.3 Rendement

Le rendement est le rapport entre la puissance P_m maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module « $E * S$ » :

$$\mu = \frac{P_m}{E \times S} \dots\dots\dots (1-1)$$

Avec :

« S »: surface du module. « E »: Eclaircement en W/m².

Les conditions normalisées « STC » (Standard Test Conditions) sont:

Ensoleillement : 1000 W/m²- Température: 25 °C - Spectre AM 1,5.

1.2.1.2.4 Puissance

La puissance optimale est le but recherché par tout utilisateur de générateur PV : (puissance = tension × intensité).

P_m : Point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m

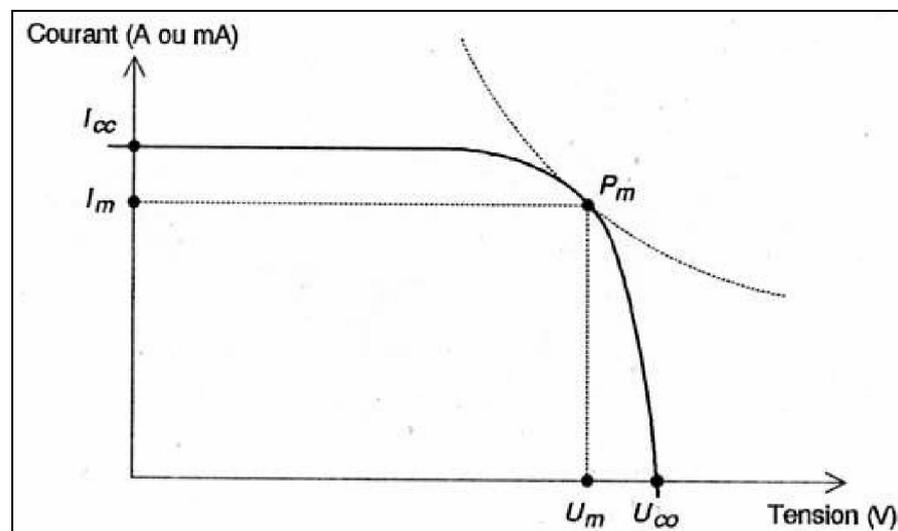


Figure 1-5 Caractéristique courant-tension d'une photopile

1.2.1.3 Différents types de cellules solaires et leur rendement

On peut, à l'heure actuelle, distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques utilisés dans des installations :

- les matériaux cristallisés, d'épaisseur de 0,15 à 0,4 mm.
- les couches minces, d'épaisseur faible de l'ordre du micron. [1]

Le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent. Les autres matériaux ne sont pas suffisamment développés et souvent onéreux. Le silicium est soit cristallin, soit amorphe :

• Silicium monocristallin:

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché : elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclaircement. Toutefois, leur prix reste élevé.

Les principales caractéristiques sont les suivantes:

- Rendement électrique des panneaux : 15% STC
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m²
- Usage : tout usage extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...) [2]

- **Silicium multicristallin:**

Il est le plus répandu actuellement et les caractéristiques électriques des cellules multicristallines sont similaires aux monocristallines. Toutefois, il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairements modérés, et également moins onéreux du fait d'une fabrication moins complexe.

Les principales caractéristiques sont les suivantes:

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 14% STC
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m²
- Usage : même usage que le silicium monocristallin [2]

- **Silicium amorphe:**

Malgré un gap optique plus élevé que le silicium cristallin et donc une tension plus forte, son courant est nettement plus faible à cause de sa moins bonne collecte et de sa faible épaisseur. Il est donc moins puissant que le silicium cristallin. Par contre, en couche très mince, il répond à tous les éclairements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est moins onéreuse et permet de réaliser de petits formats de panneaux.

Les principales caractéristiques sont les suivantes:

- Rendement électrique des panneaux : 5 à 7 % STC (jusqu'à 9 % pour les multi-jonctions)
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc
- Gamme d'éclairement : de 20 lux à 1000 W/m²
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices...), électronique de faible consommation en extérieur... [2] [4]

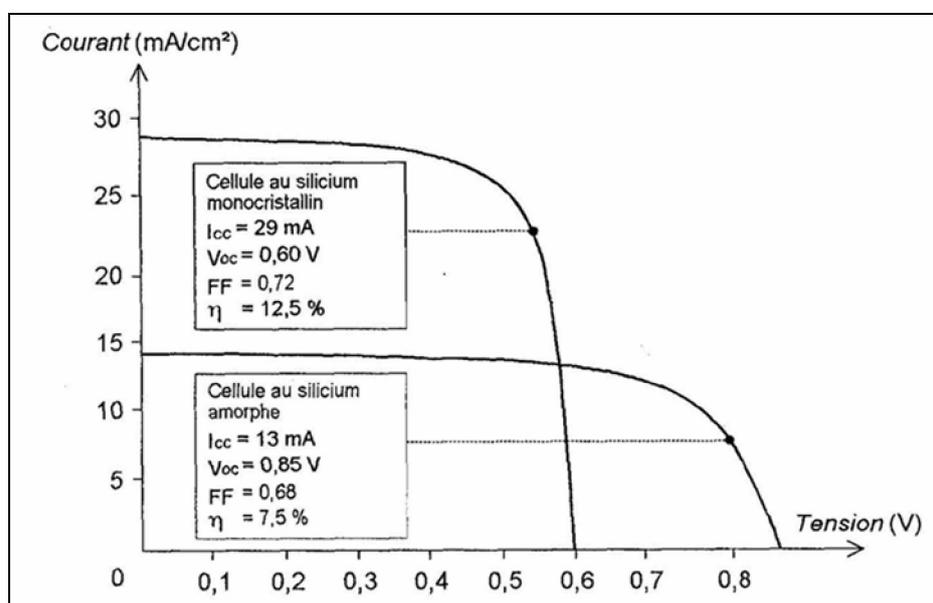


Figure 1-6 Différence de caractéristiques des cellules au silicium monocristallin et amorphe

1.2.2 Modélisation du panneau photovoltaïque

Nous avons choisi un modèle à une diode entre plusieurs modèles mathématiques du générateur photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes), dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte.

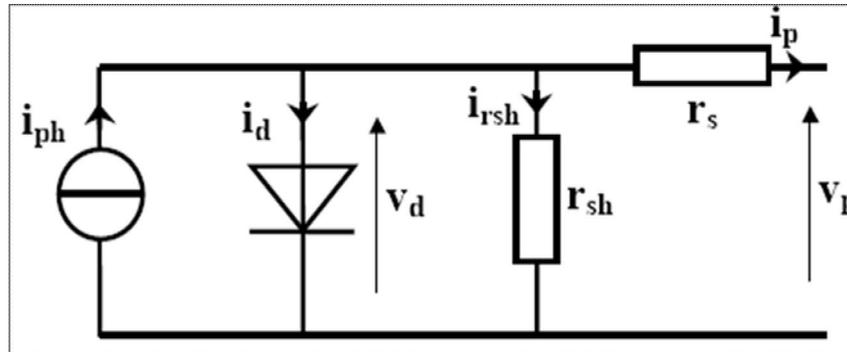


Figure 1-7 Modélisation du panneau photovoltaïque

Avec:

G_i : source de courant parfaite.

D : diode matérialisant le fait que le courant circule que dans un seul sens.

r_{sh} : résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

r_s : résistance série qui est due aux différentes résistances électrique que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).

1.2.3 Effet de la température sur le rendement

Cet effet est représenté sur la figure où l'on peut observer différentes caractéristiques courant-tension à des températures allant de -15°C à 65°C sous un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Un ordre de grandeur de cette chute est de 2 à $2,5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, ce qui donne un déficit d'environ 90mV entre 10 et 50°C . [5]

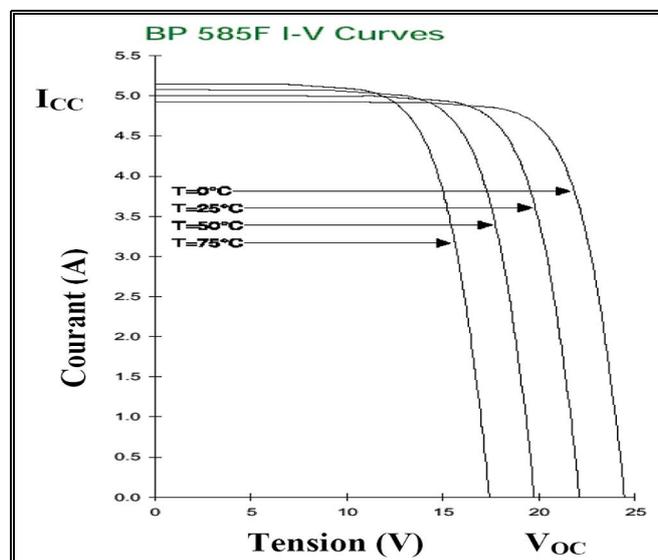


Figure 1-8 Caractéristiques courant- tension d'un panneau photovoltaïque réf. BP585F pour différentes températures à un éclairement de $1\text{kW}/\text{m}^2$ [13]

Pour connaître la courbe caractéristique d'une cellule solaire, on part de la caractéristique d'une diode au silicium (jonction P-N dans l'obscurité) et on prend ensuite en compte l'illumination. On obtient alors la relation suivante : [5]

$$I = I_P + I_S \left(e^{\frac{U}{U_t}} - 1 \right) \dots\dots\dots (1-2)$$

Avec :

I_s = courant de saturation de la diode

I_p = photocourant

U = tension imposée à la diode

$U_t = kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300 K

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ constante de Boltzmann $q = 1,602 \times 10^{-19}$ charge de l'électron

T = température absolue en Kelvin

Avec cette relation, on peut quantifier la tension de circuit ouvert : [5]

$$U_{co} = \frac{kT}{q} \text{Ln} \left(1 + \frac{I_P}{I_S} \right) \dots\dots\dots (1-3)$$

Contrairement à la tension, le courant de court-circuit, quant à lui, augmente avec une hausse de la température. Ceci s'explique par une meilleure absorption de la lumière, le gap optique baissant avec cette hausse. Toutefois, cet accroissement d'intensité étant très faible, il peut être négligé au point de puissance maximale.

Au bilan, la cellule subit une perte de 0,4 à 0,5 % par degré. [5] De plus, une haute montée en température est tout à fait envisageable en fonctionnement (jusqu'à 75 °C). En effet, la température réelle de marche d'une photopile est toujours supérieure à la température ambiante. A cela, plusieurs raisons : l'absorption non complète du rayonnement conduisant à un dégagement de chaleur, la couleur du revêtement environnant, Cependant, on peut compter sur le fait que les panneaux seront placés à l'extérieur du voilier et donc ventilés par l'air marin pour ne pas envisager ce cas extrême.

1.2.4 Effet de l'éclairement

La figure suivante représente la variation du courant par rapport à la tension pour différentes intensités lumineuses et les maximums de puissance pour chaque cas.

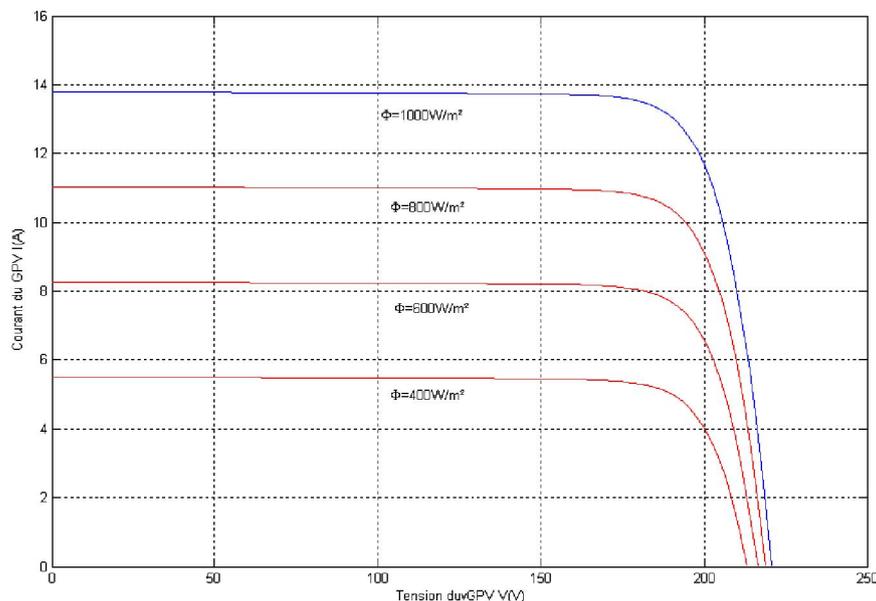


Figure 1-9 Influence de l'éclairement

On peut remarquer que les points de fonctionnement à puissance maximale se déplacent peu et se situent autour d'une valeur d'environ 0,48 V.

On peut aussi remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que la cellule peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage.

Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m^2 (à environ 10000 lux et a fortiori à l'intérieur de locaux), la tension de la photopile varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique). Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin. [2] Ceci va beaucoup contribuer dans notre choix de cellules.

En conclusion, La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, et l'étude de l'influence des paramètres température T et flux Φ sur la courbe $I=f(V)$ permettent de connaître son comportement pour un meilleur suivi de la poursuite du point de puissance récupérer (rendement) et pour une meilleure simulation du système photovoltaïque.

1.3 Accumulateur (batterie)

1.3.1 Introduction

Quand on veut une vraie autonomie sans autre apport énergétique, toute l'énergie doit être apportée en journée par le champ photovoltaïque, et le stockage est indispensable dès qu'il existe une consommation hors des périodes d'ensoleillement, contrairement au système photovoltaïque raccordé qui puise la nuit l'énergie sur le réseau. L'utilisation des batteries pour le stockage d'énergie est nécessaire pour garantir une énergie constante quelles que soient les conditions atmosphériques ou l'horaire du moment.

La maîtrise des batteries est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes. Dans ces systèmes, le stockage d'énergie présente 20 à 30% des investissements initiaux mais sur une durée d'exploitation de vingt ans, ce coût peut atteindre 70% des frais totaux ; il est donc primordial d'essayer de réduire ce prix en augmentant la durée de vie de ce composant. En effet cette durée de vie est toujours inférieure à celle des panneaux, il faut donc remplacer les batteries plusieurs fois au cours de la durée de service du système (tous les 2.5 ou 10 ans selon le cas) [1].

Avant d'entrer dans l'étude, on définit les principales caractéristiques des batteries: [2]

- La tension nominale: c'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé.
- La tension de charge: c'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur.
- La capacité nominale 'C': c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Elle est donnée dans des conditions de référence (durée de décharge de 10h et température de 25°C).
- Etat de charge 'E_{CH}' [1] : L'état de charge d'une batterie E_{CH} est la quantité d'énergie encore disponible en (Ah) divisé par la capacité nominale de la batterie, si E_{CH} = 1 la batterie est pleine, si E_{CH} = 0 la batterie est vide.
- La profondeur de décharge 'P_D': La profondeur de décharge est le complément de l'état de charge c'est-à-dire 'P_D = 1 - E_{CH}'. c'est le rapport entre la quantité d'électricité déchargée à un instant 't' et la capacité nominale 'C'.

1.3.2 Choix de la technologie Plomb de la batterie

1.3.2.1 Différents types des batteries

Il y a différents types de batterie. Celles-ci diffèrent de part leur utilisation et leur mode de construction.

Les 2 types de batteries, qui diffèrent selon leur utilisation, sont les batteries de démarrage et les batteries à cycles profonds. Une batterie de démarrage est utilisée dans la plupart des voitures et a pour but de produire un courant important pendant un temps très court. Une batterie à cycles profonds a la capacité de pouvoir se décharger complètement quelques centaines de fois. Elle a moins d'énergie instantanée mais une production d'énergie à long terme bien supérieure.

Les différents types de batteries selon leur construction sont détaillés dans le tableau suivant : (pour plus de détails voir ANNEXE1)

Type	Énergie massique	Tension d'un élément	Durée de vie (nombre de recharges)	Temps de charge	Auto-décharge par mois
Plomb	30-50 Wh/kg	2 V	200-300	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	1500	1h	20 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500	2h-4h	30 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	500-1000	2h-4h	10 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	300-500	2h-4h	10 %

Tableau 1-1 Tableau comparatif des différentes technologies des batteries [8]

1.3.2.2 Avantages de la technologie Plomb pour le photovoltaïque

La batterie au plomb (Pb) est développée depuis le XIX^e siècle. Ces accumulateurs représentent 90 % de la production mondiale vue leur adaptation à tout type d'application et leur coût comparativement aux batteries Nickel-cadmium (contiennent du cadmium toxique [1]). Malgré la concurrence de nombreux autres générateurs électrochimiques (par exemple, accumulateurs alcalins, piles à combustible), l'accumulateur au plomb, grâce à sa robustesse, sa simplicité et son prix faible, rajeuni par l'emploi des matières plastiques, perfectionné sans cesse dans sa technologie, reste compétitif, que ce soit dans le domaine du démarrage des moteurs à combustion, de la traction électrique ou de la batterie stationnaire.

La technologie des batteries la plus appropriée pour un système photovoltaïque autonome est la construction plomb-acide. Les avantages essentiels de la technologie Plomb pour le photovoltaïque sont :

- la longévité
- le rapport qualité/prix,
- un entretien faible ou nul
- une bonne tenue aux températures extrêmes, et la possibilité de charge à courant faible.

Cependant, il faut éviter les décharges profondes et les surcharges et il faut maintenir ces batteries chargées quand on les stocke.

La technologie choisie dans notre système est celle des accumulateurs au plomb « ouvert » (liquide): L'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. Cet élément Plomb-acide se compose de 2 électrodes de Plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué. La tension nominale est de 2V par élément.

L'accumulateur étanche (fermé) à soupape d'échappement VRLA¹ est une nouvelle amélioration: petite boîte fermée, sans bouchons, peut se loger n'importe où dans toutes les positions et fonctionner pendant plusieurs années sans exiger ni eau ni entretien. Son électrolyte gel est le plus durable, donc a un impact direct sur la durée de vie des batteries fermées.

1.3.3 Constitution et caractéristiques d'une batterie au plomb

1.3.3.1 Constitution [2]

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis de la restituer par la suite (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) au niveau des électrodes. Le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie. (Figure 1-10)

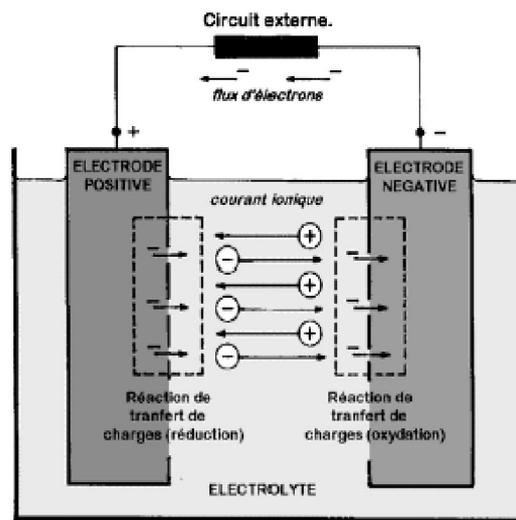
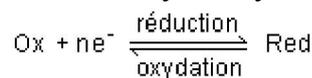


Figure 1-10 Le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit

Les batteries appartiennent à la famille des générateurs électrochimiques. Elles fournissent de l'électricité à partir de deux réactions électrochimiques réalisées sur deux électrodes baignant dans un électrolyte. D'une façon générale, sur l'une des électrodes, appelée cathode (négative), un oxydant est réduit grâce à un apport d'électrons de l'électrode tandis que simultanément sur l'autre électrode, l'anode (positive), un réducteur est oxydé en y libérant des électrons :



La valeur de chaque potentiel d'électrode est donnée par la loi de Nernst :

$$E_{eq} = E_0^1 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[\text{Ox}_1]^a}{[\text{Red}_1]^b} \right) \dots\dots\dots (1-4)$$

Avec :

[Ox₁] et [Red₁] sont les concentrations des espèces oxydées et réduites.

T : la température.

R : la constante des gaz parfaits (R=8.314 J.K⁻¹.mol⁻¹)

n : Nombre de l'apport électrons

¹ VRLA : Valve Regulated Lead-Acide

F : Constante de Faraday (F= 96485 C)

E_0^1 : le potentiel standard de l'équilibre à la température normale.

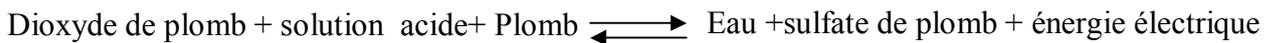
Cette formule traduit en fait l'égalité du potentiel chimique $\left\{ RT \ln \left(\frac{[Ox^1]^a}{[Red^1]^b} \right) \right\}$ et de l'énergie électrique $\{nFE\}$.

Lorsqu'on plonge une plaque positive (PbO₂) et une plaque négative (Pb spongieux) dans une solution d'acide sulfurique dilué (H₂SO₄), on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux pôles de l'élément ainsi constitué. Les transformations chimiques, au cours de la décharge et de la recharge, peuvent se résumer ainsi :

Décharge



Charge

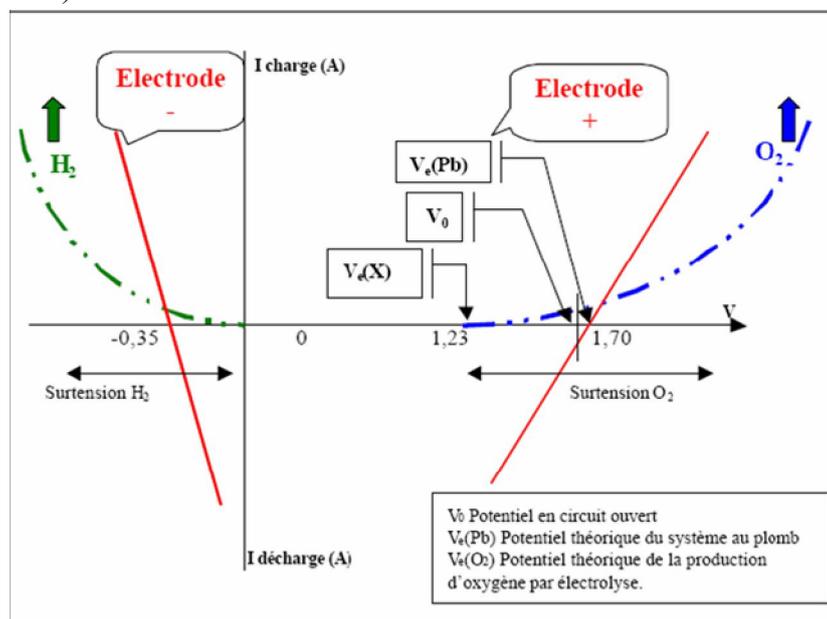


Ces transformations sont réversibles; c'est pourquoi la batterie peut être déchargée et rechargée un grand nombre de fois.

La Figure 1-11 suivante représente les courbes intensité/potentiel associées aux réactions de charge/décharge et aux dégagements gazeux pour les électrodes négatives et positives de l'accumulateur au plomb :

- La tension d'équilibre (fin de charge) dans l'anode (électrode positive) est : $E^+(PbSO_4/PbO_2)=1,7V$.
- La tension d'équilibre dans la cathode (électrode négative) est : $E^-(PbSO_4/Pb)= -0,3V$.
- La tension nominale de la batterie est la somme des deux tensions anode/cathode, soit : $V_0=E=2,0V$. [1]

En fin de charge (équilibre), une partie d'eau est électrolysée, et de l'hydrogène (H₂) et de l'oxygène (O₂) s'échappent : Il faut donc régulièrement rajouter de l'eau distillée (jamais rajouter d'acide dans une batterie).



La Constitution interne des accumulateurs au Plomb est basée sur : (Figure 1-12)

- L'électrode positive ou anode (dioxyde de plomb brun) : est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb brun. En décharge elle se transforme en sulfate de plomb, et retourne à l'état initial en charge PbO_2 .
- L'électrode négative ou cathode (plomb gris) : est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnies de plomb gris spongieux. En décharge elle se transforme en sulfate de plomb, et retourne à l'état initial en charge Pb .
- L'électrolyte (Acide sulfurique) : est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie. L'acide se dilue en décharge (baisse de densité) à cause de la formation de l'eau, et se concentre en charge (augmentation de densité).
- Séparateur d'élément (verre ou matière plastique) : L'énergie qu'on peut emmagasiner dans un accumulateur étant proportionnelle à la surface des électrodes, on a intérêt à augmenter leurs dimensions. Pour éviter un trop grand encombrement, on constitue deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives intercalées. L'ensemble des plaques est immergé dans l'électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (séparateur). Les séparateurs en plastiques poreux laissant passer l'acide mais empêchant un court-circuit des électrodes.

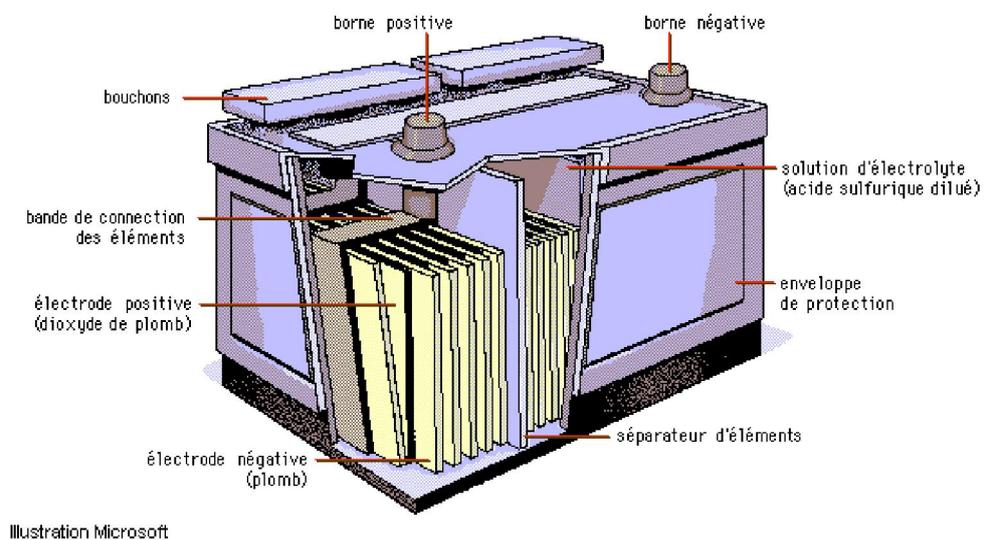


Figure 1-12 Constitution interne des accumulateurs aux Plomb

1.3.3.2 Tension

La tension nominale d'équilibre par élément, est la somme des équilibres au deux électrodes :

$E+(PbSO_4/PbO_2)=1,7V$ et $E-(PbSO_4/Pb)=-0,3V$, soit $E=2,0V$. [1]

La tension en circuit ouvert peut être déterminée empiriquement par la formule :

$$V_b = \rho_e + 0,84 \dots\dots\dots (1-5)$$

Où « ρ_e » représente la densité de l'électrolyte en g/cm^3 . Pour des batteries pleinement chargées, ρ_e est entre $1,20$ et $1,28g/cm^3$, ce qui donne pour V_b des valeurs entre $2,04$ et $2,12V$.

Donc la tension nominale d'un élément au plomb est de $2V$ à la température de $25^\circ C$. Mais cette tension varie en fonction de l'état de charge de l'accumulateur (Figure 1-13). Un élément

chargé présente une tension de 2,1V, et on peut le décharger jusqu'à une tension de 1,9V sans risque, le minimum absolu étant à 1,65V.

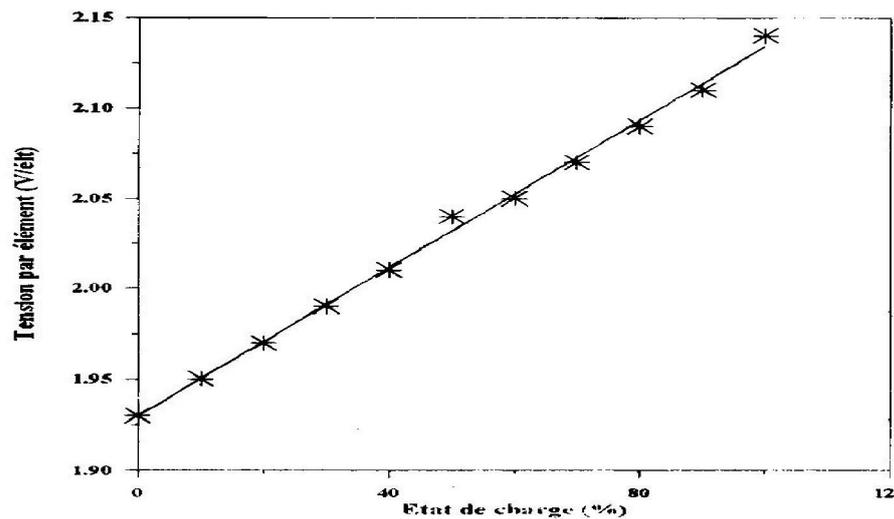


Figure 1-13 Variation de la tension nominale en fonction de l'état de charge

Une batterie est constituée d'un ensemble de cellules, branchées en série/parallèle afin d'obtenir la tension et le courant désirés en sortie. La version la plus courante est la batterie à 6 éléments, donc dite batterie 12V. La tension de ce type de batterie peut donc varier de 11,4V à 12,6V. Mais Attention, la tension d'une batterie au plomb 12V ne doit jamais descendre en dessous du seuil minimum de 10V (extrême limite).

1.3.3.3 Capacité

La capacité est le nombre d'ampères-heures que peut débiter une batterie pour un courant et une tension de fin de décharge bien définis. Cette capacité dépend essentiellement du volume de matière active¹ contenue dans la batterie. Plus un élément de batterie est important plus sa capacité est élevée.

Afin de caractériser la capacité (ou l'état de charge/décharge) on pourrait mesurer la densité de l'acide. Pour chaque Ah de décharge, 3,654 g d'acide se lient au plomb et 0,672 g d'eau est produit, la charge produisant les mêmes valeurs en retour. Cette variation de densité est facile à mesurer dans les batteries ouvertes. La densité de masse active par capacité emmagasinée est de 11,97g/Ah [1].

Avec 207 g de plomb (1 mole) et 239 g de PbO₂ (1 mole), on obtient une quantité² de courant de Q=53,6 Ah. Sous une tension moyenne de 2 V, on dispose de l'énergie : $E=Q \cdot V=53,6 \times 2 = 107,2$ Wh pour 642 g, soit environ 168 Wh/kg. En pratique, on est très loin de ce chiffre théorique, car les grilles au plomb, le et les meilleurs accumulateurs au plomb ne dépassent pas un rendement de 40 à 45 Wh/kg (pour une décharge complète en cinq heures). Les données thermodynamiques concernant l'accumulateur au plomb permettent de calculer la tension théorique et le coefficient de température de la batterie.

Les principaux facteurs influençant la capacité sont : la géométrie de la plaque, le contact entre la matière active et le support, l'épaisseur de la grille, la quantité des matières actives, le régime de décharge, la porosité de la plaque et la température. En effet aux faibles températures, les éléments de batterie perdent une partie importante de leurs capacités par suite de l'augmentation de la viscosité de l'électrolyte et de la résistivité de l'électrolyte.

¹ La matière active représente l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes

² $Q = 2 \cdot e \cdot N_{\text{avogadro}} / 3600$ (Ah), avec : $N = 6,023 \cdot 10^{23}$, $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ C, $1C = 1/3600$ Ah

La quantité de courant est mesurée en intégrant le courant entre les états de pleine charge et de décharge maximale. Dans les tests de contrôle, on pratique généralement des décharges à intensité de courant constante. Dans ce cas la quantité de courant (capacité) est :

$$Q = It \dots\dots\dots (1-6)$$

Où : « I » est le courant en ampères ou milliampères et « t » le temps en heures pour une capacité C en ampères-heures (Ah) ou en milliampères-heures (mAh). Le coulomb n'est pas une unité utilisée par les fabricants d'accumulateurs. L'ampère- heure vaut 3600 coulombs.

• **Capacité nominale (Cn)**

Elle est donnée, généralement, pour un régime de décharge en 10 h (C/10). Le courant de décharge est évalué en fractions de la capacité exprimée en Ah. Pour un régime de décharge plus élevé ($I > C/10$), la capacité nominale diminue. Pour un régime de décharge plus faible ($I < C/10$) la capacité nominale augmente.

La capacité disponible pour une décharge à un courant élevé est inférieure à celle qui peut être obtenue pour un faible courant (Figure 1-14). La diminution de la capacité pour les taux élevés de décharge est liée à la sulfatation de la surface des plaques, au gradient de concentration très élevé, la très grande résistance à la diffusion, à la fermeture rapide des pores et à la très forte perte de charge courant fois la résistance interne [25].

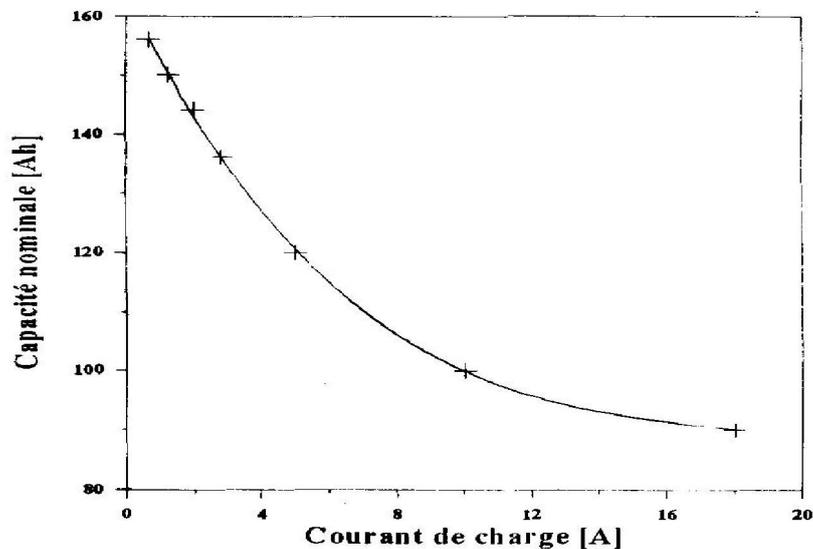


Figure 1-14 Capacité nominale en fonction du courant de charge à T=25°C

Exemple: Un accumulateur de 100 Ah à C/10 peut fournir un courant de 10 A pendant 10 h. Sa capacité nominale sera réduite à 80 Ah pour un régime de décharge à $I = C/5 = 20A$. Tandis que la capacité nominale pourra être augmentée à 140 Ah pour un régime de décharge à $I=C/10=1 A$. La capacité d'un élément varie dans le même sens que sa température.

La capacité des batteries au Plomb peut aller :

- de 1Ah à plus de 1000Ah pour les batteries à électrolyte stabilisé
- de 2Ah jusqu'à 4000Ah pour les batteries à électrolyte liquide.

Ce sont donc des batteries de forte capacité comparées aux accumulateurs au Nickel et plus encore au Lithium.

1.3.3.4 Rendement en quantité

Le rendement en ampères-heures ou faradique (un faraday vaut 96 500 C ou 26.8 Ah) est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge Q_d et la quantité d'électricité fournie lors de la charge Q_c :

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_c} \dots\dots\dots (1-7)$$

Le rendement à petits courants de charge/décharge est pratiquement constant. Pour une batterie neuve on prend une valeur de 0,9 Ah (90%).

Ce rendement dépend fortement de l'état de charge de la batterie : pour un état de charge «moyen » il est élevé, et baisse ensuite rapidement lorsque l'on atteint la fin de charge et que le courant n'est plus absorbé par la masse active mais commence à électrolyser l'eau.

1.3.3.5 Rendement en énergie

Le rendement en énergie est le rapport entre le nombre de wattheures restitués et le nombre de wattheures fournis.

$$\eta_E = \frac{E_d}{E_c} \dots\dots\dots (1-8)$$

Il est toujours inférieur au rendement faradique puisque, la tension en décharge est inférieure à la tension en charge par suite des différentes polarisations intervenant dans l'accumulateur au plomb. Il varie pratiquement entre 0,45 et 0,83 suivant l'état de charge. Pour un même rendement en quantité, le rendement en énergie augmente avec la concentration, et diminue lorsque croît la densité de courant.

1.3.3.6 Résistance interne

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible (de l'ordre de quelques centièmes d'ohm) et donc négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible résistance présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible ; l'intensité du courant débité est considérable, l'accumulateur mis ainsi en court-circuit, est rapidement hors d'usage.

La résistance des accumulateurs au plomb est négligeable dans le cas des fortes capacités. Ces accumulateurs sont capables de fournir des courants énormes >2000A sous 12V. Ce sont presque des générateurs parfaits. La résistance interne est inférieure au milli Ohms.

Cette valeur atteint au maximum 50 milli Ohms dans le cas des accumulateurs à électrolyte stabilisé des plus faibles capacités.

1.3.3.7 Autodécharge

Le taux d'autodécharge d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée. L'autodécharge est une caractéristique interne découlant de la technologie utilisée et est généralement donnée pour une température de 20 °C. Elle est de l'ordre de 10% par mois, pour les plaques aux plomb- antimoniaux. Cet alliage a pour but d'augmenter la tenue mécanique. Elle est de l'ordre de quelque % par mois pour le plomb doux (à faible teneur d'antimoine), ou le plomb-calcium, mais les éléments sont plus fragiles.

Les batteries modernes sont la plupart à faible autodécharge, c'est-à-dire qu'elles perdent moins de 3% de capacité par moins de 20°C. Cependant cette valeur triple à 30°C.

1.3.3.8 Autonomie « sans apport solaire »

C'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du générateur photovoltaïque. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photogénérateur. Incontournable

1.3.3.9 Cycles et durée de vie

Le nombre de cycles maximal et la durée de vie sont fortement dépendants de la technologie de fabrication et des conditions d'utilisation.

Par exemple, en utilisation dans les pays très chaud, où la température ambiante est supérieure à 35°C, si on fait l'hypothèse que les phénomènes de corrosion seront les premiers à limiter la durée de vie de la batterie car la corrosion est plus rapide quand il fait chaud [1], et que le nombre maximal de cycles ne sera pas atteint, on aura tendance à limiter la capacité et on choisira des cycles journaliers de charge/décharge de l'ordre de 80%.

En revanche, en pays tempérés, en utilisant un régulateur de qualité, les phénomènes de corrosion peuvent être limités, et le choix du dimensionnement de la batterie et de la profondeur de décharge dépendra de nombreux critères comme :

- L'autonomie désirée en tenant compte des variations d'ensoleillement,
- Les coûts de remplacement des batteries en fonction du transport, de la facilité d'accès au site, du coût de la main d'œuvre,
- Les capacités d'investissement au départ et les frais financiers d'amortissement,
- L'aspect environnemental, comment recycler localement les batteries.

Pour une utilisation en stockage tampon, la durée de vie dépend essentiellement du nombre et de l'amplitude des cycles charge/décharge. En limitant la profondeur de décharge journalière (< 15 % Cn) et la profondeur de décharge saisonnière (< 60 % Cn), on estime la durée de vie des accumulateurs à 6 ou 7 ans, lorsqu'ils sont protégés contre la surcharge.

En première approximation, le nombre de cycles sera inversement proportionnel à la profondeur de décharge : par exemple une batterie pouvant fournir 300 cycles à 100% de décharge, devrait fournir 600 cycles à 50% de décharge avec une bonne régulation.

De même en première approximation, une batterie plomb quelle que soit sa technologie, voit sa durée de vie diminuer d'un facteur 2 tous les 10°C, du fait de la corrosion. Ainsi, si la durée de vie d'une batterie est de 10 ans à 25°C, elle sera de 5 ans à 35°C (en supposant cette température permanente). [1]

1.3.4 Modélisation mathématique de la batterie

Cette modélisation est basée sur le fait que la batterie est considérée comme un générateur de tension E variable en série avec une résistance R_0 (Figure 1-15).

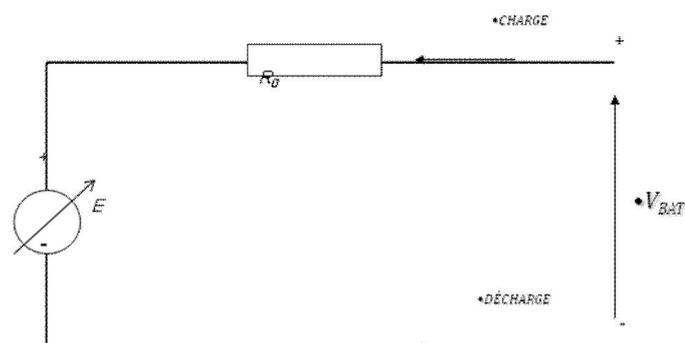


Figure 1-15 Schéma électrique équivalent d'une batterie

1.3.4.1 Equation de la tension aux bornes de la batterie

La tension aux bornes de la batterie V_{bat} est donnée par :

$$V_{bat} = E + I_{bat} R_0 \dots\dots\dots (1-9)$$

Avec :

- E : tension du générateur interne, variable en fonction de l'état de charge de la batterie.
- I_{bat} : Courant de batterie, positif pendant la charge et négatif pendant la décharge.
- R_0 : Résistance ohmique interne de la batterie.

$$R_0 = \frac{\Delta V_{bat}}{\Delta I_{bat}} \dots\dots\dots (1-10)$$

Où ΔV_{bat} et ΔI_{bat} représentent une faible variation de la tension et du courant de la batterie dans la zone linéaire de charge ou de décharge dans la zone où la tension E est pratiquement constante.

1.3.4.2 Equation de la tension interne E en fonction de l'état de charge de la batterie

La tension interne E en fonction de l'état de charge de la batterie est [26] :

$$E = E_0 + AX - \frac{BX}{C_1 - X} + \frac{B(C_2 - X)}{X} \dots\dots\dots (1-11)$$

Avec :

- E_0 : La tension en circuit ouvert lorsque la batterie est complètement chargée.
- A : Représente la variation linéaire de la tension de la batterie pendant la charge ou la décharge.
- B, C_1, C_2 : Ces paramètres reflètent la chute ou l'augmentation brutale de la tension pendant une décharge complète ou pendant une surcharge respectivement.
- $\frac{BX}{C_1 - X}$: Reflète le comportement de la batterie pendant la décharge complète.
- $\frac{B(C_2 - X)}{X}$: Reflète son comportement pendant une surcharge.
- X : La capacité normalisée extraite/ajoutée pour un courant de décharge/charge donné, est égale:

$$X = \frac{Q_{out}}{Q_{max}(I)} Q_{max} \dots\dots\dots (1-12)$$

Avec :

$Q_{max}(I)$: La capacité maximale pendant la charge/décharge en fonction du courant de charge ou de décharge respectivement .Par exemple, pour une batterie avec $Q_{max} = 45Ah$ et un courant de décharge de 1A, cette capacité chute de moitié, soit 22.5Ah pour un courant de décharge de 2A.

Q_{max} : La capacité maximale de la batterie en Ah.

Q_{out} : La somme des charges de la batterie extraites ou ajoutées pendant la décharge ou la charge. Elle est égale à :

$$Q_{out} = \int I_{bat} dt \dots\dots\dots (1-13)$$

1.3.4.3 Equation de l'état de charge E_{ch} (SOC)

On définit aussi l'état de charge SOC (*State of Charge*) de la batterie comme étant [22] :

$$E_{ch} = SOC = \frac{Q_{max} - Q_{out}}{Q_{max}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{max}} \dots\dots\dots (1-14)$$

E_{ch} varie entre *un (1)* (charge complète) et *zéro(0)* (décharge complète).

1.3.4.4 Simulation des courbes de charge et de décharge

La Figure 1-16 montre les courbes de charge et de décharge de la simulation pour une batterie au plomb de capacité égale à 125Ah à la tension de fonctionnement égale à 12V.

Les constantes A, B, C tirées de la référence [23] sont égales à :

$A = 0.0066$; $B = 134.1550$; $C = 0.3190$

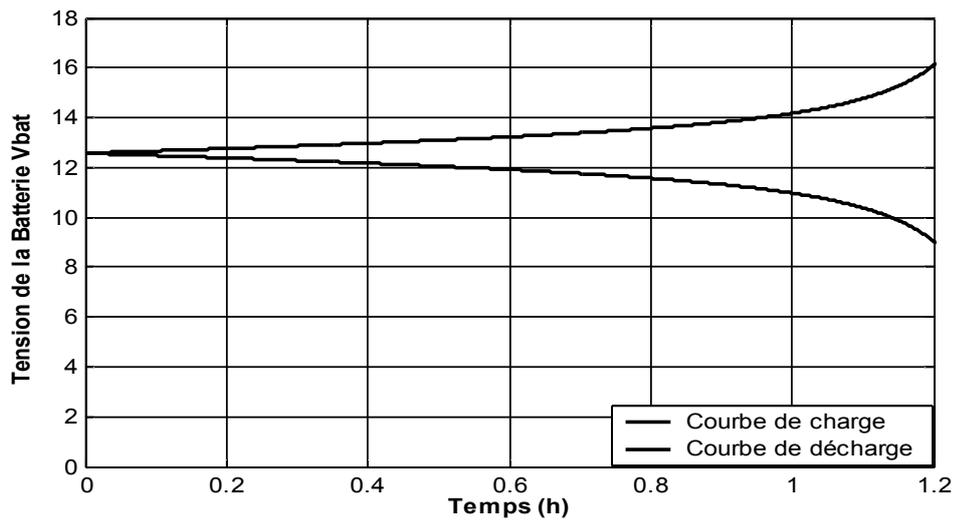


Figure 1-16 Courbes de charge/décharge simulées pour un courant de charge ou de décharge de 125AH

1.3.5 Comportement de l'accumulateur en Charge

1.3.5.1 Fonctionnement chimique de la batterie pendant la charge

La charge est l'opération qui consiste à entrer de l'énergie dans la batterie. C'est ce que fait le photogénérateur qui lui est couplé en débitant un courant de charge dans la batterie. Quand on recharge la batterie le résultat de la réaction est la formation de plomb et d'acide sulfurique et la densité de l'acide augmente.



1.3.5.2 La courbe de charge

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement (Figure 1-17) la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V /elt à 25°C. (13.2V tension BATTERIE). Dans cette période la densité d'ion augmente, ce qui fait baisser la résistance interne R_b , et augmenter la tension V_b . L'équation électrique de la charge est :

$$V_{bat} = E + I_{bat} R_o \dots\dots\dots (1-15)$$

En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées ne retiennent plus de courant, car la densité de matériel actif baisse. Ce courant tend alors à électrolyser l'eau, produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène est appelé GAZEIFICATION.

La fin de charge est atteinte à 2,6 V/elt (15.6V tension BATTERIE) en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément (13.8V tension BATTERIE).

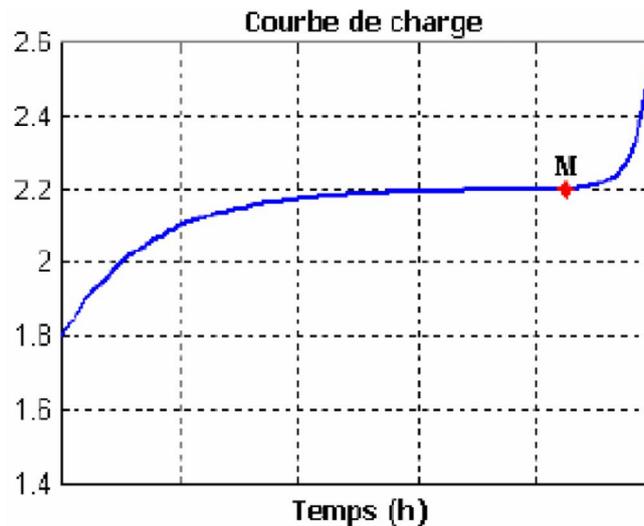


Figure 1-17 Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de charge

1.3.5.3 Tension de charge

La charge des accumulateurs au Plomb se fait à tension constante. La tension de charge est de 13,8 à 14,4 Volts pour une batterie de 12V (pour un élément est de 2,3 à 2,4 Volts). Cette tension est nécessaire pour que la charge s'effectue correctement. Une fois chargée (mais pas à 100%), la batterie présente une tension de 12,6V (2,1V pour un élément).

1.3.5.4 Limitation de courant

Du fait de la faible résistance interne de la batterie, au début de la charge il faut limiter le courant. Sinon il y a un risque d'échauffement des plaques qui alors se détérioreraient. Un courant trop élevé peut même provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit. De plus le chargeur serait en butée de puissance et risquerait de se détruire.

La valeur normale de limitation de ce courant est égale à environ 1/4 à 1/5 de la capacité nominale pendant 20h. Systématiquement le courant et le temps de charge doivent être indiqués sur la batterie. [1]

1.3.5.5 Tension d'entretien (floating)

Lorsque la batterie est chargée, l'idéal est de continuer à lui fournir un petit courant d'entretien sous une tension plus faible, dite "tension de Floating". Cette tension aura une valeur environ 13,6V (entre 2,25V et 2,28V par élément). Ce courant d'entretien permet d'avoir toujours à disposition une batterie en pleine charge (100%).

Une batterie au plomb doit être stockée chargée, et être rechargée régulièrement. L'idéal étant de la laisser en charge d'entretien (Floating) permanente.

1.3.5.6 Risques de la surcharge

On atteint l'état de surcharge de la batterie lorsque sa matière active est presque complètement transformée et quand l'électrolyte commence à libérer des gaz (décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène).

Si on laisse durer ce phénomène, on risque de non seulement un gaspillage d'énergie mais des graves inconvénients comme:

- La batterie n'est jamais bien chargée car le courant intense qui produit le bouillonnement n'est employé qu'à détruire l'eau de l'électrolyte et non à désulfater.

- Le niveau de l'électrolyte baisse rapidement. En effet un ampère-heure de surcharge détruit un tiers de gramme d'eau. Avec un régime de surcharge double ou triple du régime normal le niveau du liquide baisse de plus d'un millimètre à l'heure ce qui fait qu'après dix heures de surcharge la partie supérieure des plaques commence à se découvrir et se désagrège (défragmente) rapidement.
- La concentration de l'électrolyte augmente du fait de la disparition de l'eau.
- L'élévation de la température qui résulte de la surcharge, aggrave l'usure (détérioration langue et progressive) des plaques en augmentant la solubilité du sulfate de plomb.
- Le violent dégagement gazeux qui accompagne la surcharge accélère par effet mécanique la désagrégation des plaques. Du matériel actif peut être délogé par les bulles de gaz [1].
- Accélérer la corrosion de la plaque négative (du plomb) par l'oxygène, perdre de l'eau et endommager les plaques de plomb.

Une légère gazéification est cependant nécessaire et recommandée. Les bulles de gaz brassent l'électrolyte et le rendent plus homogène. Si on n'atteint jamais ce stade final, l'électrolyte deviendra stratifié, la concentration d'acide sera plus importante au fond du bac, ce qui accélérera la corrosion des plaques et entraînera une sulfatation. [1]

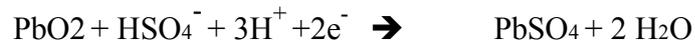
1.3.6 Comportement de l'accumulateur en décharge

1.3.6.1 Fonctionnement chimique de la batterie pendant la décharge

La décharge est l'opération qui consiste à sortir de l'énergie de la batterie. C'est ce que fait le récepteur, qui absorbe un courant de décharge issu de la batterie.

Si un consommateur est branché, une décharge de courant se produit entraînant une transformation du peroxyde de plomb PbO_2 et du plomb Pb (matériaux actifs), en $PbSO_4$ accompagnée par l'absorption d'acide sulfurique H_2SO_4 et formation d'eau H_2O .

Lors de la décharge, la réaction de réduction du PbO_2 (Figure 1-18) qui se produit à l'électrode positive est:



A l'électrode négative on a oxydation du Pb :



La réaction totale est donc :

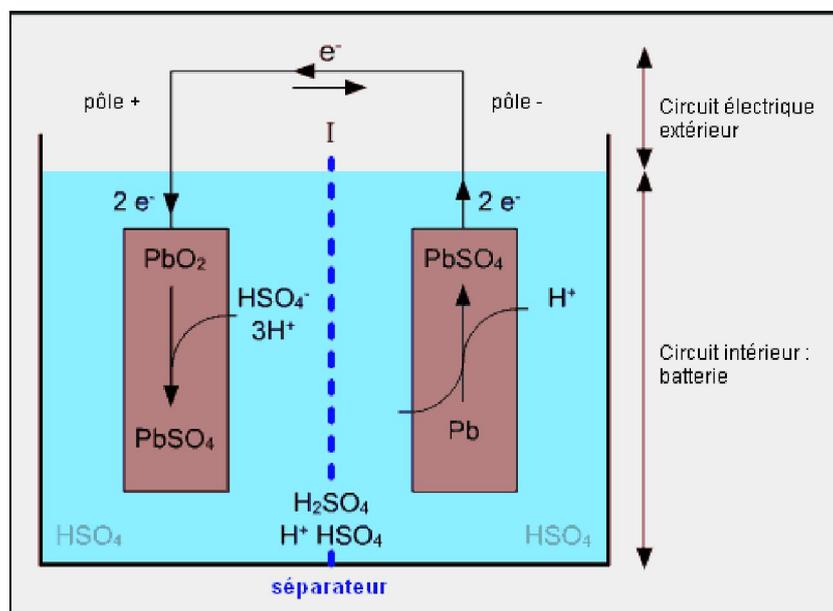


Figure 1-18 Réaction qui se produit lors de la décharge

1.3.6.2 Courbe théorique de décharge

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la Figure 1-19. Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. L'équation électrique de la décharge est :

$$V_{bat} = E - I_{bat} R_o \dots\dots\dots (1-16)$$

L'absorption de l'acide pendant la décharge abaisse la densité de l'acide et augmente R_o , ce qui contribue à faire baisser V_{bat} . Lorsque la batterie est fortement chargée, le matériel actif fortement gonflé, bloque les pores, ce qui empêche l'électrolyte d'atteindre en profondeur sa masse active [1]. A ce moment (à partir du point N) la tension chute brusquement à 1,8 V (10.8V en tension batterie), c'est le coup de fouet, il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

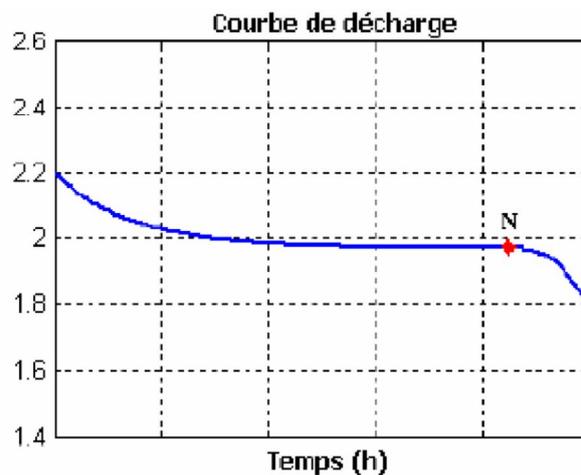


Figure 1-19 Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de décharge

Au cours de la décharge, la capacité augmente lorsque le courant baisse, ce que l'on retrouve bien expérimentalement.

1.3.6.3 Courbes expérimentales [21]

Les courbes suivantes montrent les caractéristiques de décharge de deux batteries placées en parallèle. Initialement les deux batteries sont complètement chargées à l'aide d'un générateur. Leur tension est alors de 13,6V. A l'aide d'un rhéostat, la résistance est placée sur 15 ohm, pour faire en sorte d'avoir une intensité en sortie de 800 mA environ car c'est la valeur moyenne qui sera consommée par les récepteurs.

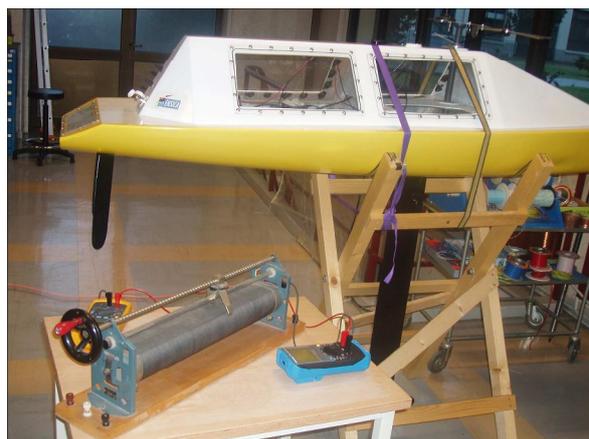


Figure 1-20 Photo du montage utilisé

On aura les courbes de mesure de la tension aux bornes des batteries en série, ainsi que l'intensité du courant qui les traverse à des intervalles réguliers.

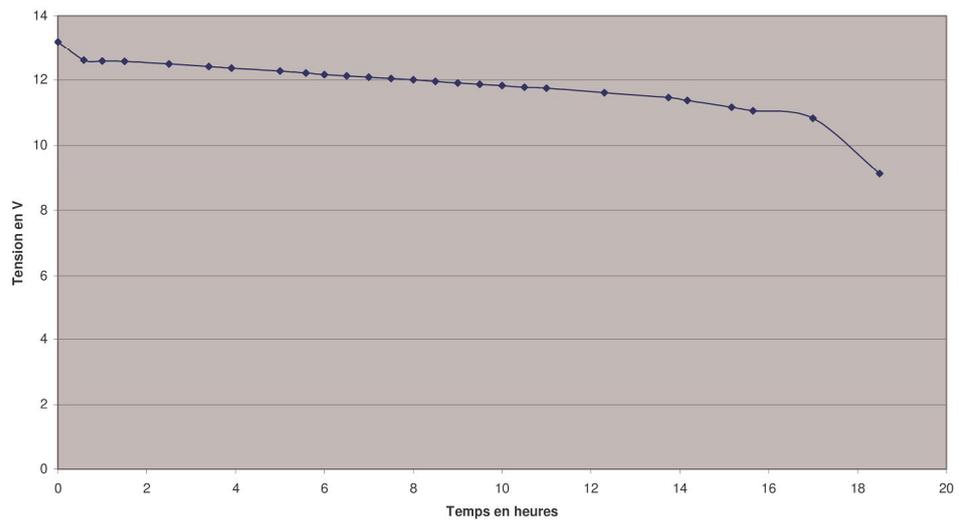


Figure 1-21 Courbe de l'évolution de la tension au cours de la décharge

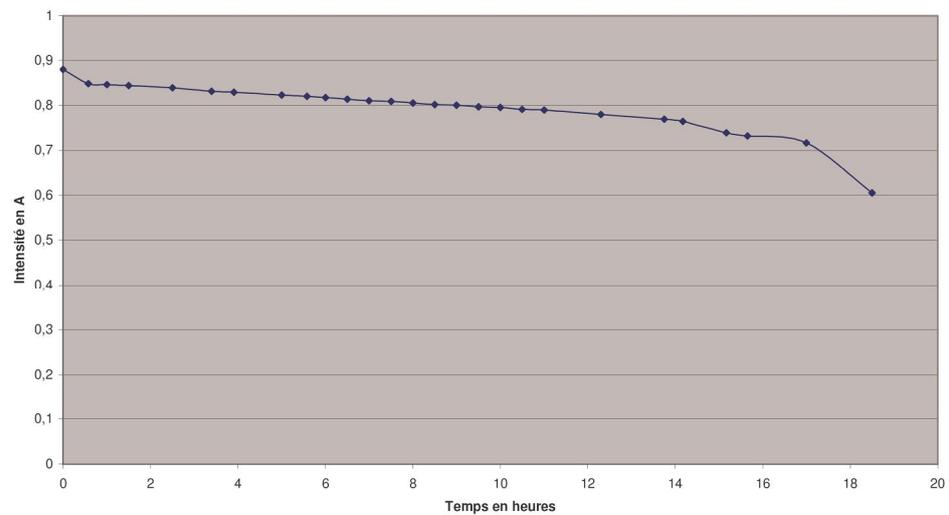


Figure 1-22 Courbe de l'évolution de l'intensité au cours de la décharge

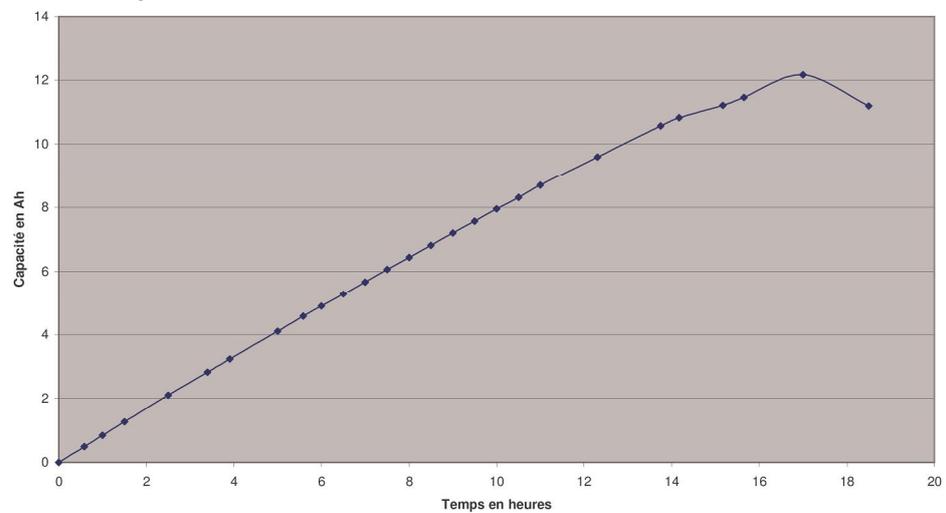


Figure 1-23 Courbe de l'évolution de la capacité au cours de la décharge

La batterie s'est donc complètement déchargée au bout de 18h. Comme il faut que le courant débité par la batterie reste proche de 800 mA avec des pics à 1.2A, on peut espérer avoir

une autonomie d'environ 14h et ce, sans que les batteries soient rechargées par les panneaux solaires. Cette autonomie est largement suffisante pour la durée d'une course.

1.3.6.4 *Risque de la décharge profonde*

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie. Attention, La tension d'une batterie au plomb 12V ne doit jamais descendre en dessous du seuil minimum de 10V (extrême limite). Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

Si la décharge est très profonde et si la batterie reste longtemps dans cet état, le sulfate des plaques tend à former de grands cristaux permanents qui empêcheront le courant de passer. Ce phénomène, s'il est partiel, va faire baisser la capacité de la batterie, mais s'il est important, peut alors complètement bloquer tout courant : on dit alors que la batterie est sulfatée [1].

1.3.7 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 les installations photovoltaïques, le régime de courant est très souvent faible et l'on peut considérer que la batterie reste à la température ambiante (la dissipation interne due à R_{bi} est faible) [1]. Les contrôleurs peuvent ainsi simplement mesurer la température ambiante pour respecter les conditions de charge.

1.3.7.1 *Sur la tension de la batterie*

Lorsque la température ambiante augmente, l'électrolyte se dilate, ce qui baisse la concentration d'acide. En conséquence, la densité et la tension de batterie V_b baissent. [1]

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 tension de la batterie varie fortement avec la température, et la correction de celle-ci par rapport à la température de 25°C est donnée par la relation empirique suivante :

$$V = V_{25} - 0.005 \times (T - 25) \dots\dots\dots (1-17)$$

Avec V_{25} la tension de la batterie à 25°C et V la tension par élément de la batterie à la température T .

La courbe de la Figure 1-24 , voir [19], illustre la dépendance de la tension de 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 ($-5\text{mV}/^\circ\text{C}$) par cellule devra être utilisé pour des températures éloignées de 25°C. Si on trace des courbes de charge pour différentes températures, on obtiendra des parallèles régulières. 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.

Quelques circuits intégrés qui sont par ailleurs des contrôleurs de charge de batterie présentent déjà la possibilité d'une variation de la tension de charge en fonction de la température [12]. Ainsi, certains chargeurs du commerce ont déjà en option. [ANNEXE1]

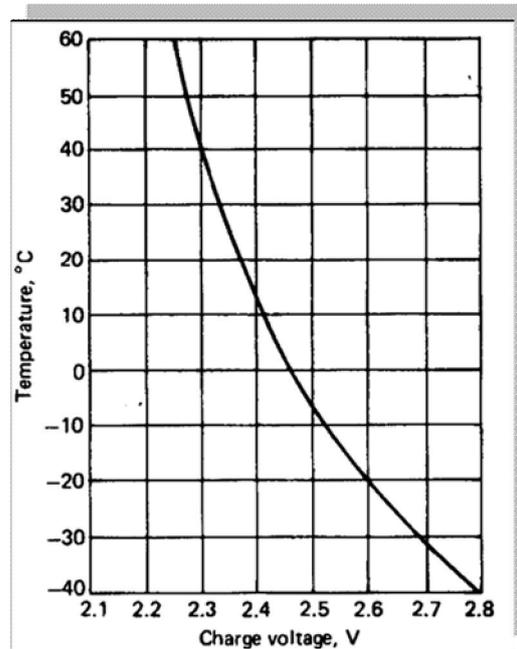


Figure 1-24 Tension de charge recommandée pour différents températures de batterie

1.3.7.2 Sur la résistance interne R_{bi}

L'augmentation de la température donne aux ions (H^+) une plus grande mobilité cet effet surpasse la dilatation, ce qui en définitive abaisse R_{bi} à haute température.

1.3.7.3 Sur la capacité

La température ambiante influence directement la capacité qui baisse lorsque la température décroît. Aux faibles températures, les éléments de batterie perdent une part importante de leurs capacités par suite de l'augmentation de la viscosité et la résistivité de l'électrolyte. On remarque qu'en dessous de $0^{\circ}C$, la capacité baisse rapidement : pour une utilisation à ces températures il faut limiter si possible l'usage de l'accumulateur ou augmenter fortement sa capacité pour éviter sa destruction par le gel. La température de congélation augmente lorsque la batterie est déchargée. On utilise dans ce cas un régulateur à tension de coupure ajustable qui permet de couper les utilisateurs au-dessous du point de congélation de l'électrolyte.

Pour les systèmes travaillant au-dessus de $0^{\circ}C$, on utilisera un régulateur qui compense la tension maximale de charge de $-5mV/^{\circ}C$. À température élevée ($>25^{\circ}C$), il faut également prévoir la compensation thermique pour éviter l'évaporation de l'électrolyte; à ces températures, on utilise souvent un électrolyte moins concentré (ρ_e entre 1,20 et 1,22) pour limiter la corrosion interne de la batterie.

Si la valeur de la température « T » des éléments est différente de la température de référence $25^{\circ}C$, la capacité mesurée « C » doit être corrigée à l'aide de l'équation suivante afin d'obtenir la capacité réelle:

$$C_{25^{\circ}} = \frac{C}{1 + 0.003 \times (T + 25^{\circ})} \dots\dots\dots (1-18)$$

1.3.7.4 Sur la durée de vie

Une batterie plomb quelle que soit sa technologie, voit sa durée de vie diminuer d'un facteur 2 tous les $10^{\circ}C$, du fait de la corrosion. Ainsi, si la durée de vie d'une batterie est de 10 ans à $25^{\circ}C$, elle sera de 5 ans à $35^{\circ}C$ (en supposant cette température permanente). [1]

1.3.7.5 Sur l'autodécharge

L'autodécharge varie très rapidement avec la température. Elle double de valeur tous les 10°C.

1.3.8 Insertion de la batterie dans l'installation PV (parallèle)

1.3.8.1 Photogénérateur, batterie et récepteur en parallèle

Il est inutile d'utiliser l'énergie issue directement du photogénérateur quand la lumière est présente et de «basculer» sur le stockage dans l'obscurité. Le plus rationnel est de monter le photogénérateur, la batterie et le récepteur en parallèle. Ainsi, la batterie sera le « réservoir d'énergie » que l'on remplira d'un côté par le photogénérateur et videra d'un autre par le récepteur.

1.3.8.2 Diode anti-retour [2]

Le courant circule naturellement du point de tension le plus fort vers le plus faible. Lorsque la batterie est en période de charge ou déjà chargée, la tension de la batterie a tendance à dépasser la tension délivrée par le photogénérateur. Le courant passerait alors de la batterie vers le photogénérateur et cela pourrait l'endommager. C'est pourquoi on met une diode qui bloque le passage du courant. Cette diode empêche la décharge de la batterie lorsque l'ensoleillement est faible. La diode est placée entre le panneau et la batterie comme on peut le voir sur la Figure 1-25. Les bandes sur la diode doivent être du côté de la batterie d'après la notice des panneaux solaires.

Les diodes anti-retour sont aussi utilisées lors de la mise en parallèle de plusieurs photogénérateurs pour éviter qu'ils débitent les uns dans les autres s'ils ont une puissance inégale.

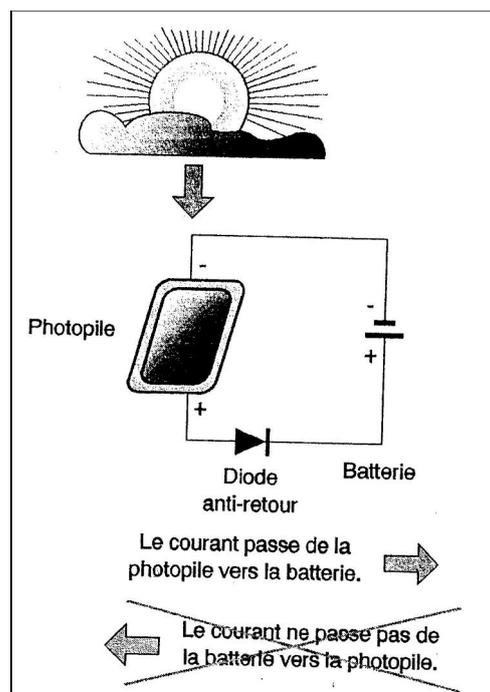


Figure 1-25 Principe d'une diode anti-retour

1.3.8.3 Condition de l'installation auto régulée

Dans certains cas, les panneaux solaires photovoltaïques peuvent fonctionner sans régulateur de charge, utilisant simplement une diode anti-retour pour empêcher le courant de circuler dans le sens inverse sous les conditions suivantes:

- Le courant de charge des batteries est égal au courant produit par les panneaux solaires photovoltaïques; La température est relativement constante.

- Les batteries ont une capacité au moins 30 fois plus grande que le courant de court-circuit pouvant être délivré par les panneaux solaires photovoltaïques.
- La tension ouverte des modules est de l'ordre de 18 Volts maximum; Une diode anti-retour de capacité suffisante empêche le courant inverse de retourner vers le panneau solaire photovoltaïque.

1.3.8.4 Diode Zéner

Avant, les systèmes photovoltaïques de taille relativement petite utilisaient des diodes Zéner comme shunt afin de court-circuiter les panneaux solaires photovoltaïques. Ces moyens de contrôle limitent les applications car les variations des performances des systèmes photovoltaïques sont énormément affectées à cause de la température et la difficulté de trouver la diode Zéner correspondant à la tension de charge des batteries.

1.3.8.5 Choix de la diode anti-retour

Cette diode introduit une chute de tension de 0,6 V (diode de redressement classique) ou de 0,2 V (diode Schottky).

Une diode Schottky est une diode qui a un seuil de tension directe très bas facilitant la détection des signaux HF faibles et hyperfréquences. Une diode Schottky fonctionne exactement de la même manière qu'une diode normale. Les différences se situent:

- Au niveau de la tension de seuil, qui n'est plus de 0.7V, mais de 0.3V, à 0.4V.
- Au niveau de la rapidité, les diodes Schottky sont beaucoup plus rapides.

La notice des panneaux solaires précise qu'il est suggéré d'utiliser une diode anti-retour pour chaque panneau solaire. [10]

1.4 Conclusion

Les accumulateurs plomb-acide sont actuellement les seuls acceptables du point de vue investissements et coût d'exploitation. On voit qu'il est important de surveiller l'état de charge ou décharge d'une batterie au plomb pour la conserver en bon état car son fonctionnement prolongé dans un sens ou dans l'autre aboutirait à sa destruction définitive.

2. REGULATEUR DE CHARGE/DECHARGE DE LA BATTERIE

2.1 Introduction

Puisque le régulateur est la partie ciblée dans notre projet, nous avons consacré un chapitre complet pour expliquer ses différentes caractéristiques et son fonctionnement.

Le régulateur est l'élément central (nœud) du système photovoltaïque autonome : il contrôle les flux d'énergie. Il représente moins de 5% du coût total mais influence fortement le prix du KWh final. C'est un appareil complètement autonome, qui réalise toutes les opérations de mesure et correction de la charge/décharge de manière automatique.

Il permet de protéger la batterie contre la surcharge (de la part du panneau photovoltaïque), et de la décharge profonde (de la part du récepteur). Cette protection assure une meilleure durée de vie, donc empêche le vieillissement prématuré de la batterie, ce qui est important puisque la batterie a une durée de vie inférieure au photogénérateur (5 ans au lieu de 20 ans). On peut garantir une autre fonction avec ces régulateurs au début de la charge, un courant trop élevé peut même provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit. Ces appareils sont dotés d'un limiteur de charge pour réduire l'intensité de courant à $C_n/4$ au maximum. Le régulateur doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, décharge profonde, température de congélation, alarme, fusibles, inversion de polarité). Dans certain cas il peut réaliser une adaptation d'impédance (MPPT). [1]

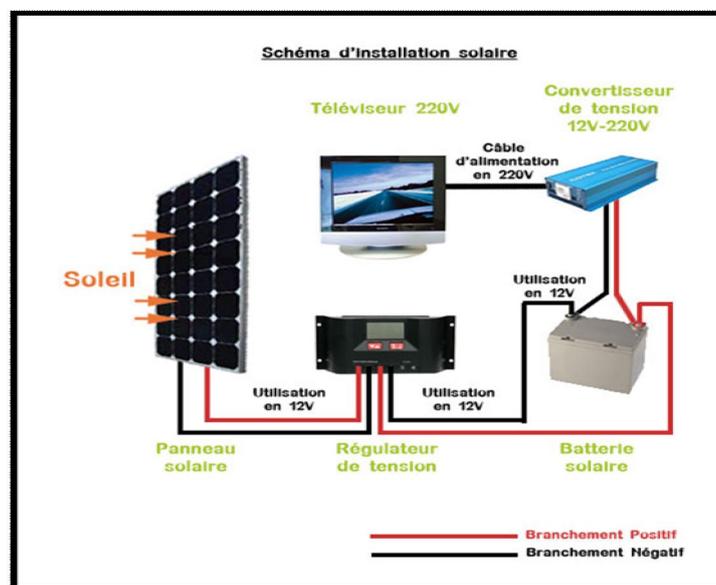


Figure 2-1 le régulateur dans le système photovoltaïque

Accessoirement, il affichera des indications concernant l'état de charge de la batterie et les paramètres de fonctionnement du système. Les régulateurs de charge de système PV autonome peuvent se caractériser en trois groupes principaux :

- Les régulateurs série incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur afin d'arrêter la charge.
- Les régulateurs shunt, l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge.
- Les régulateurs MPPT, recherchent le point de puissance maximum, utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteur sa puissance maximale.

A ces types de circuits, on ajoute en général un régulateur de décharge pour empêcher les décharges profondes de la batterie et l'utilisation au point de congélation. Les régulateurs sont généralement développés autour d'un composant spécialisé ou d'un microcontrôleur. En général leur fonctionnement est du type charge rapide, détection V_{BAT} et, ou charge permanente.

Dans notre projet, le régulateur contrôle la charge/décharge de la batterie en fonction de l'état de charge de l'accumulateur et de la température de la batterie. Nous allons dans ce chapitre faire une présentation des régulateurs. On explique d'abord la fonction principale de contrôle de charge/décharge. Ensuite, on décrit les modes de charge et les technologies les plus courantes avec quelques recommandations sur le choix le plus approprié en fonction du système envisagé. Enfin on mentionne notre choix du type de régulateur et les valeurs typiques recommandées dans les publications les plus récentes.

2.2 Contrôle de charge/décharge

Les systèmes de régulation de charge/décharge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de couper ou réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée ou déchargée. Le régulateur assure les fonctions principales suivantes:

- Assurer la charge complète de la batterie et prévenir de tout risque de surcharge.
- Ralentir la décharge par délestage de l'utilisation, et même l'arrêt total, afin d'éviter les décharges profondes risquant d'endommager les batteries.
- Optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation (MPPT).
- Compensation et protection thermique (sonde des batteries).
- Affichage du niveau de charge.
- Affichage des incidents (surcharge, décharge profonde, court-circuit).
- Protection contre les courts-circuits.
- Protection des panneaux solaires photovoltaïques (contre les retours de charges électriques).

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-réglés: seuil haut et seuil bas. [30]

Le schéma suivant illustre le principe du fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.

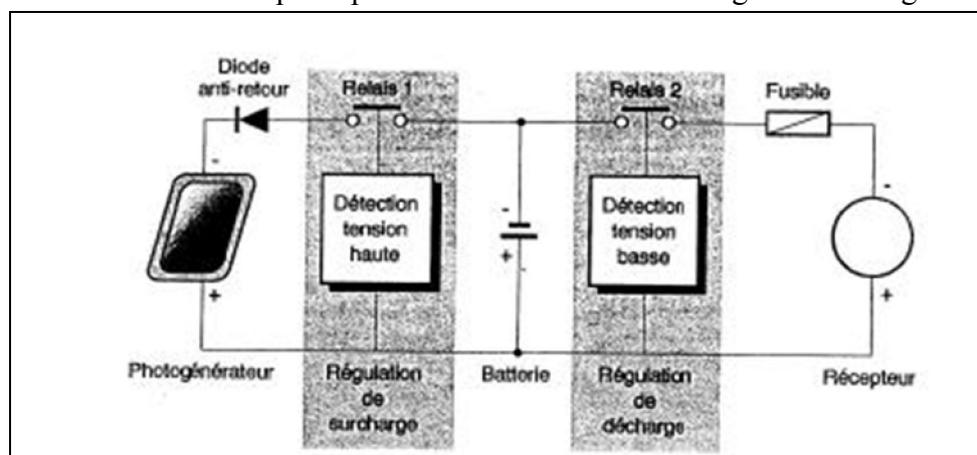


Figure 2-2 Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge [1]

2.2.1 Contrôle de la charge

La fonction de contrôle de la charge détermine la durée de vie de la batterie. Pour garantir une durée de vie élevée, il faudrait après chaque décharge pouvoir la recharger à 100%. Mais la nature aléatoire de la disposition de l'énergie solaire, rend difficile d'effectuer une recharge complète, et la batterie va souvent rester à l'état de charge « moyen ». A long terme, cela peut réduire la durée de vie de cet accumulateur [1]. Il existe plusieurs techniques de régulation utilisant la mesure de

courant et de la tension. Mais la majorité des régulateurs utilise la mesure de la tension à cause de sa simplicité.

2.2.1.1 Risque de laisser durer la surcharge

La tension d'une batterie chargée à courant constant augmente de façon linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne pratiquement la fin de charge où soudainement elle augmente beaucoup plus rapidement. C'est lorsque sa matière active est presque complètement transformée et quand l'électrolyte commence à libérer des gaz (décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène).

Si on laisse durer ce phénomène, la batterie deviendra surchargée, ce qui accélérera la corrosion du plomb, fera perdre de l'électrolyte et endommagera les plaques de plomb. La fonction principale du régulateur est d'empêcher cette surcharge. [1]

2.2.1.2 Nécessité d'une légère gazéification

Une légère gazéification est cependant nécessaire et recommandée, car lorsque la gazéification commence, une partie du courant entrant va permettre de terminer la charge, tandis que le reste produira l'électrolyse¹ et les gaz traversant l'électrolyte vont l'agiter et ainsi, homogénéiser son acidité. Si on n'atteint jamais ce stade final, l'électrolyte deviendra stratifié, la concentration d'acide sera plus importante au fond du bac, ce qui accélérera la corrosion des plaques et entraînera une sulfatation (La sulfatation est la transformation d'une partie du plomb actif en cristaux durs qui ne peuvent plus participer au stockage de l'énergie). [1]

Ces deux phénomènes (laisser durer la gazéification ou inversement ne jamais atteindre ce stade final) causeront une diminution de la durée de vie de la batterie.

2.2.1.3 Nécessité du limiteur de courant

Pour que le chargeur ne sera pas en excès de puissance et risquerait de se détruire, et du fait de la faible résistance interne de la batterie, il faut surveiller le courant circulant pour réagir en cas de courant trop important, et limiter le courant au début de la charge. Sinon, il y a un risque d'échauffement des plaques qui alors se détérioreraient. De plus, un courant trop élevé peut même provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

La valeur normale de limitation de ce courant est égale à environ 1/4 à 1/5 de la capacité nominale pendant 20h. Systématiquement le courant et le temps de charge doivent être indiqués sur la batterie. [1]

2.2.2 Contrôle de la décharge

Les régulateurs solaires contrôlent non seulement la charge de la batterie mais contrôlent également l'état de la batterie lorsqu'on lui soutire du courant.

2.2.2.1 Risque de la décharge profonde

Afin d'éviter une décharge profonde de la batterie qui est fortement nuisible pour sa durée de vie, on ajoute un circuit de délestage qui déconnecte les récepteurs lorsque la tension baisse d'un seuil critique.

2.2.2.2 Seuil de délestage

La régulation de la décharge s'effectue par un comparateur de la tension de la batterie à un seuil de tension bas pré-réglé appelé seuil de délestage, et qui transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier coupe la décharge lorsque la tension de la batterie baisse au-dessous de la tension seuil. [30]

¹ Electrolyse : (CHIMIE) dissociation chimique (d'un composé) en molécules simples obtenue par l'action d'un courant électrique sur des ions en fusion ou en solution

Ce seuil sera choisi en fonction de plusieurs critères qui sont : la durée de vie espérée, la température ambiante et le niveau de courant de décharge. Si le seuil choisi est assez élevé, la batterie durera plus longtemps mais la capacité non utilisée de la batterie réduira sa capacité totale et pour une même autonomie, il faudra augmenter le niveau de charge de la batterie. Le seuil de délestage dépend également de l'âge de la batterie : en vieillissant, celle-ci perd un peu de tension et si le seuil choisi est élevé, après quelques années, la capacité utile aura diminuée, ce qui peut parfois poser des problèmes. Le régulateur idéal devrait également tenir compte de cet effet et abaisser les seuils en fonction des années. Il s'agira de trouver le meilleur compromis entre coût de système et durée de vie des batteries. Pour un système difficilement accessible, une grande batterie aura un sens dans la mesure où les coûts de transport et la main d'œuvre pour son remplacement seront importants. [1]

2.2.2.3 Paramètres de délestage [1]

En pays froid, le premier paramètre dont il faut tenir compte est le gel possible de l'électrolyte au dessous de « -7°C ». Le tableau suivant donne les valeurs limites à ne pas dépasser en fonction de la température et de l'électrolyte utilisé.

Etat de charge (SOC)	Densité de l'électrolyte	
0%	1.10	1.12
100%	1.30	1.20
Température ($^{\circ}\text{C}$)	Profondeur maximale de décharge admise (%)	
-5,0	100	100
-7,5	100	100
-10,0	93	100
-12,5	87	92
-15,0	81	77
-17,5	75	63
-20,0	70	50
-22,5	65	38
-25,0	61	27

Tableau 2-1 Profondeur de décharge maximale en fonction de la température et de la densité de l'électrolyte

Le deuxième paramètre est la durée de vie de la batterie. On peut en général faire une règle de trois pour prévoir le nombre de cycles possibles en fonction d'une profondeur de décharge. Par exemple, une batterie solaire « standard » dont on peut espérer 200 cycles à 90% de décharge et à température tempérée ($20-25^{\circ}\text{C}$) devrait durer 300 cycles à 60% de décharge, le paramètre « nombre de cycle \times profondeur de décharge » étant à peu près constant. Le choix de la profondeur de décharge dans ce cas est plutôt lié aux paramètres de coût d'accès et d'échange de la batterie. Ceci est valable pour les pays tempérés. Par contre dans un pays chaud, la durée de vie de la batterie sera en général limitée par la corrosion interne fortement accélérée par la température plus élevée ; dans ce cas, on aura tendance à fortement cycliser la batterie pour en extraire toute sa capacité dans le court laps de temps de durée de vie espérée.

Le troisième paramètre est le type de la batterie utilisé. Il ne faudra pas dépasser la valeur maximale de décharge que le fabricant préconise. Les alliages de plombs, la construction fermée ou non, les additifs dans l'électrolyte influence la robustesse et la faculté de la batterie à retrouver sa pleine capacité après une décharge profonde.

2.2.2.4 Tension de délestage

A partir des trois paramètres mentionnés ci-dessus et du type de système, on peut choisir une profondeur de décharge qui correspond à une tension de coupure de courant. Cependant cette tension n'est pas simple à déterminer car elle est influencée par le niveau du courant de décharge par rapport à la capacité, par la température ambiante et par l'état de la batterie (âge, sulfatation, corrosion). Le courant de décharge passant à travers la résistance interne de la batterie fait baisser la tension de sortie, donc plus ce courant est élevé, plus cette tension ne baisse sans que l'on puisse lier cet effet à l'état de charge réel de la batterie. Pour les systèmes à grande autonomie, le courant est en général inférieur à C/30, dans ce cas on peut négliger la chute de tension interne et régler son régulateur sur une valeur de courant plus faible, ce qui améliorera la fiabilité. L'âge de la batterie influence fortement la tension de sortie en faisant augmenter la résistance interne : en réglant la tension de délestage d'un régulateur à 11,8 Volts, ce qui correspond théoriquement à environ 70% de la profondeur de décharge, on a mesuré à C/10 pour une batterie neuve une capacité résiduelle de 40% alors que pour la même batterie après vieillissement, il ne restait que 30% de la capacité utile pour l'utilisateur. [1]

Profondeur de décharge (%)	Courant de décharge	
	C/100	C/10
	Tension Vdel	Tension Vdel
10	2.14V	2.08V
20	2.12	2.07
30	2.10	2.05
40	2.08	2.04
50	2.05	2.01
60	2.02	1.99
70	2.00	1.96
80	1.96	1.93
90	1.92	1.89
100	1.80V	1.80V

Tableau 2-2 Tension de délestage par élément de batterie en fonction de la profondeur de charge [1]

Il faut encore tenir compte du type du récepteur: les appareils utilisant des moteurs sont inductifs, ce qui augmente considérablement leur courant au démarrage. Pour éviter un délestage dû à un courant de démarrage de moteur, il faut temporiser la coupure et ne réagir que après quelques secondes à une tension au-dessous du seuil choisi [1]. En règle générale, la prudence recommande de choisir une tension de délestage à faible courant de décharge et à 25°C de température ambiante, ce qui augmente la fiabilité à faible température car la coupure intervenant plus tôt. Le tableau suivant donne quelques tensions de délestage «V_{dl}» en fonction de la profondeur de décharge : ces valeurs sont approximatives et correspondent à une batterie neuve à 25°C.

2.2.2.5 Tension de ré-enclenchement

Lorsque le régulateur est en délestage, la batterie a le temps de récupérer une certaine capacité, et pour le bien de système il faudrait attendre si possible que la batterie retrouve une charge complète avant de réenclencher l'utilisation : c'est le cycle d'hystérésis de décharge (voir Figure 2-3). Si le récepteur qui a provoqué le délestage est reconnecté rapidement, il est probable que la coupure interviendra rapidement, ce qui fera osciller le système à un niveau de charge faible et maintiendra la batterie dans un état peu favorable accélérant la sulfatation. Il est

recommandé de ne permettre une décharge que si la batterie a été chargée pendant plusieurs heures et qu'elle a récupéré un état sûr.

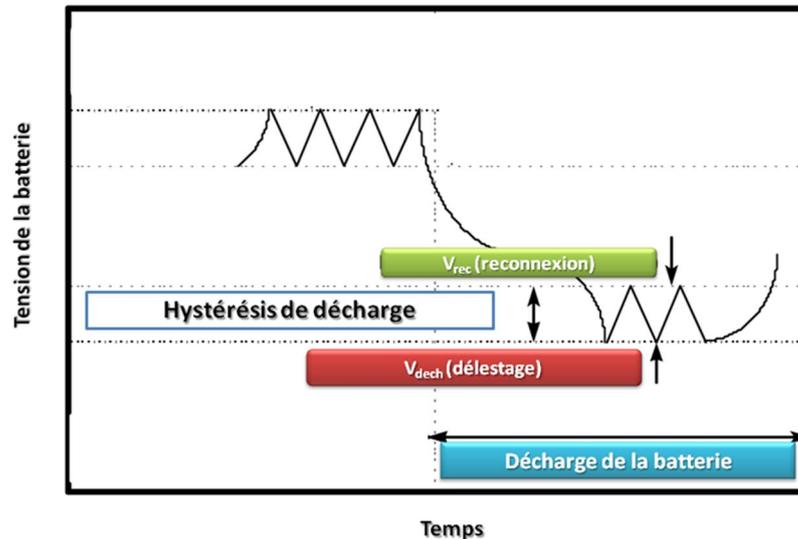


Figure 2-3 Régulation de la tension batterie (hystérésis) en décharge

Le tableau suivant indique les valeurs à appliquer en fonction du niveau de courant et de la capacité désirée pour la tension de ré-enclenchement (V_{rl}).

Etat de charge (%)	Profondeur de décharge (%)	Courant de charge	
		C/100	C/10
		Tension Vrec	Tension Vrec
90	10	2.46V	2.61V
80	20	2.32	2.43
70	30	2.26	2.34
60	40	2.2	2.27
50	50	2.16	2.23
40	60	2.13	2.19
30	70	2.09	2.15
20	80	2.06	2.12
10	90	2.02	2.09
0	100	1.99	2.08

Tableau 2-3 La tension de ré-enclenchement en fonction du niveau de courant et de la capacité désirée [1]

Pour simplifier on peut choisir un courant de charge faible et s'il est plus élevé, ce qui augmente plus rapidement la tension, et estimer qu'il pourra supporter une connexion plus rapide des récepteurs tout en continuant la charge. Pour plus de fiabilité, il est recommandé d'appliquer à ces valeurs la même compensation thermique que celle utilisée pour la charge de la batterie (-5mV/°C par cellule).

2.2.2.6 Recommandations pour une protection parfaite en décharge

Nous constatons que pour la protection parfaite de la batterie, il faudrait :

- Déconnecter les charges selon l'état de la batterie (au seuil bas 11V).
- Prévenir avant la déconnexion (à 11.8V par exemple).
- Reprendre la décharge lorsque la tension V_{bat} soit supérieure à 12.4V. (Figure 2-4)
- Protéger la batterie contre les courants trop forts, les surtensions et la température de congélation.

Déconseiller de décharger une batterie à plus de 50% de sa capacité. On peut aller jusqu'à 80%, mais si cette pratique se répète trop souvent, la batterie aura une durée de vie plus courte.

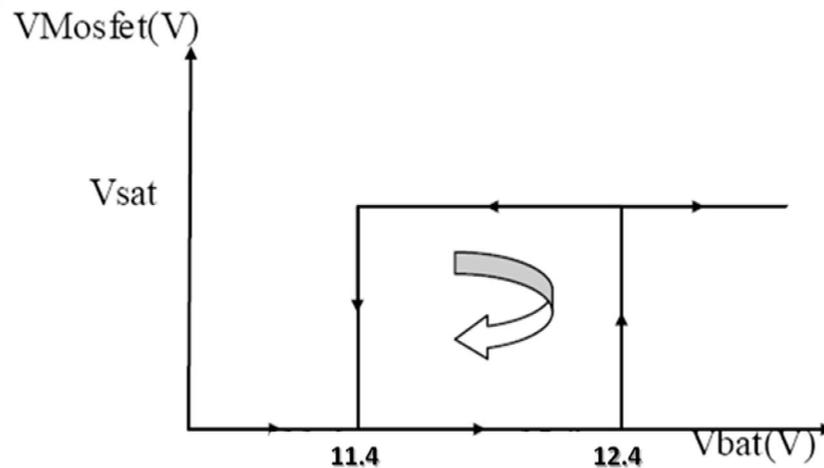


Figure 2-4 Cycle d'hystérésis pour la décharge

2.2.3 Compensation thermique

L'activité électrochimique de la batterie est fortement dépendante de la température. A haute température une batterie accepte facilement la charge et commence sa gazéification à plus basse tension. Si on utilise en pays chaud un régulateur réglé pour une température tempérée (20-25°C), la tension de coupure trop haute (par rapport à la tension de gazéification) va accélérer la corrosion et faire perdre l'électrolyte. Ce phénomène est spécialement important lorsque le courant de charge est élevé et que les pertes ohmiques de la batterie font augmenter sa température interne.

Au contraire pour les batteries utilisées dans un pays froid en hiver, les tensions fixes de la régulation vont empêcher la charge totale de la batterie (coupure avant d'atteindre la tension de charge maximale) qui vieillira prématurément car elle ne sera jamais totalement chargée. On remarque qu'en dessous de 0°C, la capacité baisse rapidement : pour une utilisation à ces températures il faut limiter si possible l'usage de l'accumulateur ou augmenter fortement son état de charge, pour éviter sa destruction par le gel. La température de congélation augmente lorsque la batterie est déchargée. On utilise dans ce cas un régulateur à tension de coupure ajustable qui permet de couper les utilisateurs au-dessous du point de congélation de l'électrolyte.

Pour les systèmes travaillant au-dessus de 0°C, on utilisera un régulateur qui compense la tension maximale de charge de $-5\text{mV}/^\circ\text{C}$ par élément, ce qui correspond à $-30\text{Mv}/^\circ\text{C}$ pour une batterie de 12V.

La régulation selon la mesure de la température permettra d'apporter des actions telles que :

- Déconnexion du générateur photovoltaïque lorsque la température limite de la batterie est atteinte.
- Refroidissement par ventilation.
- Changement des seuils de régulation.
- Des interventions par un opérateur pour un ajout d'eau distillée.

2.3 Modes de charge d'une batterie de Pb [16]

La recharge appropriée d'une batterie (dans notre cas de type plomb acide) devient prépondérante pour obtenir une durée de vie optimale quelles qu'en soient les conditions d'utilisation de cette batterie. Une recharge de la batterie plomb-acide qui permet d'augmenter sa

durée de vie et ses performances doit répondre à quelques normes générales comme celles décrites ci-dessous, [19] :

- 1- Pendant la phase de démarrage de la charge, le courant de charge doit être inférieur à la valeur qui produit une tension moyenne sur la cellule de la batterie inférieure à la tension de gazéification environ 14.4V (2.4 V par cellule).
- 2- Pendant la phase de recharge et jusqu'à ce que 100 % de la décharge précédente ait été récupérée le courant de charge doit être contrôlé pour maintenir la tension aux bornes de la cellule inférieure à la tension de gazéification.
- 3- Quand 100 % de la capacité déchargée a été récupéré sous le contrôle de la tension citée ci-dessus, l'index de charge doit chuter à une valeur d'environ à une vingtième part de la capacité en Ah de la batterie. Alors à partir de ce moment-là, la charge doit être effectuée à courant constant.

Plusieurs méthodes [19] de charge permettent de respecter les considérations précédentes. Nous pouvons citer celles les plus citées et dont la procédure est communément admise :

- Charge en tout ou rien
- Charge à tension constante
- Charge à courant constant
- Charge pulsée
- Charge rapide

Pour bien établir les critères de comparaisons des divers chargeurs de batteries du commerce utilisant chacun une partie de ces charges, nous rappelons les définitions exactes de ces charges.

Toutefois, certains chargeurs [17] enfin réalisent une charge avec une gazéification forcée sous contrôle [19]. Cette méthode sert à éliminer la stratification des électrolytes produite pendant les longues périodes de décharge de la batterie. Le contrôle de la stratification permet de préserver la capacité et la durée de vie des batteries. Cet aspect est très intéressant du point de vue de la durée de vie des batteries.

2.3.1 Charge en tout ou rien

Afin de paramétrer le régulateur de charge, il est nécessaire d'utiliser deux valeurs caractéristiques de la tension de la batterie:

- 1) Tension de fin de charge : $V_{fc} = 14,4V$, seuil haut typique pour une batterie de 12V nominale comme la notre. Une fois cet état de charge est atteint le régulateur coupe le courant.
- 2) Tension de recharge : $V_{re} = 13,6V$, valeur pour laquelle le processus de charge recommence.

Les régulateurs les plus simples travaillent en « tout ou rien » et utilisent ces deux tensions pour arrêter ou recommencer la charge. Pour interrompre le courant, on peut utiliser un relais, un transistor ou un MOSFET.

La charge en tout ou rien fonctionne assez bien pour les systèmes à grande capacité de stockage où le courant de charge est inférieur à $C/20$. Dans le cas d'une batterie chargée à un courant plus élevé, le courant important multiplié par la résistance interne générera une tension de charge plus élevée et les valeurs de tension de commutation ne seront plus adaptées, la charge s'arrêtant trop vite, ce qui conduira à une batterie n'atteignant jamais sa pleine charge. Si on augmente la tension de fin de charge, on obtiendra beaucoup de gaz avec les conséquences

défavorables mentionnées ci-dessus et la charge nécessaire qui demande des courants faibles ne sera pas réalisée. [1]

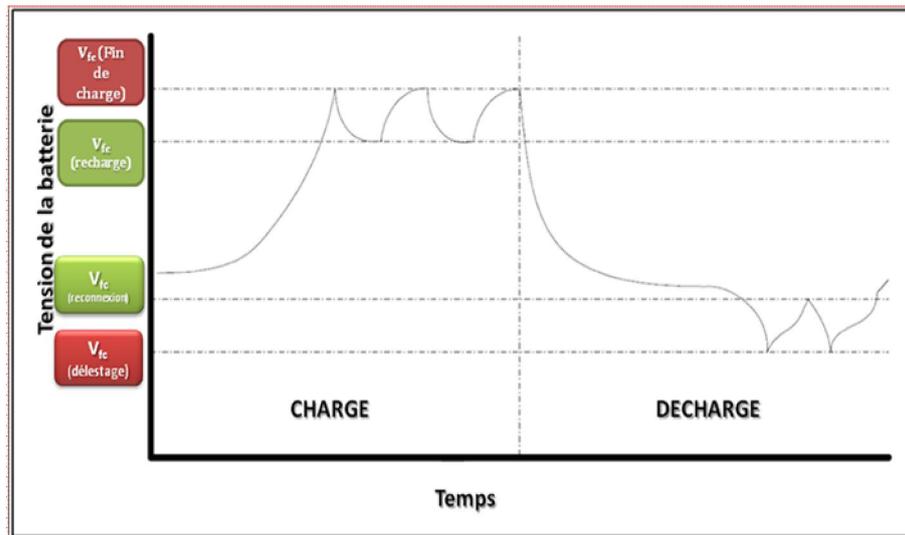


Figure 2-5 Régulation de la tension dans un régulateur "tout ou rien" [24]

2.3.2 Charge à tension constante

Le chargeur à tension constante maintient presque la même valeur de la tension d'entrée tout au long de la procédure de la charge. Il fournit un courant initial important vers la batterie à cause du grand décalage de tension entre la batterie déchargée et le régulateur. Ce type de chargeur peut augmenter la charge à plus de 70% dans les premières 30 minutes. [27]

Pour les systèmes à grand courant de charge par rapport à la capacité de stockage ($I > C/20$), il vaut mieux d'utiliser un régulateur à tension constante. Cependant la nature imprévisible du courant solaire oblige à réaliser ce qu'on appelle un régulateur modifié à tension constante. [1]

Différentes variations existent selon si on ajoute une limitation du courant de charge au début de la charge, à la fin de la charge, ou bien même au début et à la fin de celle-ci. Ces types de charge sont appelés respectivement :

- Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge.
- Charge modifiée à tension constante avec une phase finale à niveau de courant constant.
- Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge et une phase finale à niveau de courant constant.

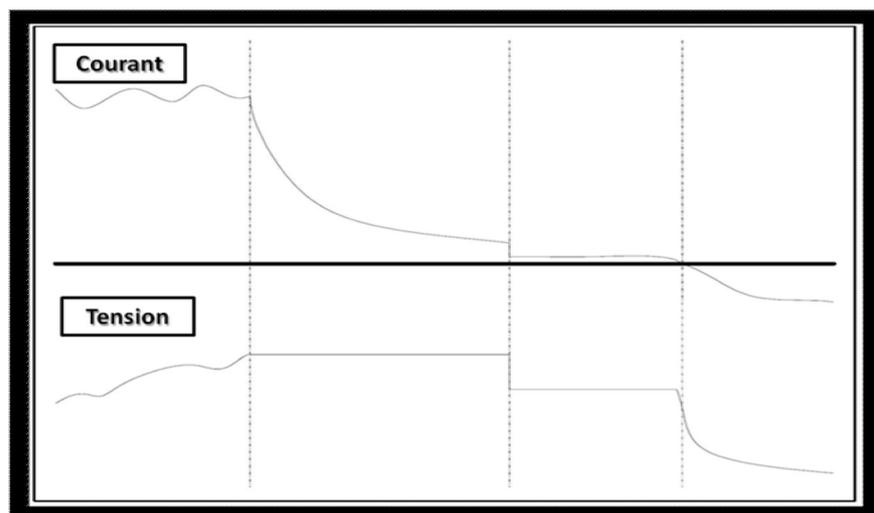


Figure 2-6 Régulateur modifié à tension constante [24]

Ce type de régulateur est plus sophistiqué que l'interrupteur « tout ou rien » à deux tension, et il coûte plus cher. Les anciens modèles devaient dissiper l'énergie non utilisée par la batterie durant sa phase à tension constante, ce qui implique des dissipateurs volumineux. Les technologies plus récentes utilisent en général des MOSFETs travaillant en modulation à largeur d'impulsion MLI (PWM en anglais), la dissipation est alors réduite aux pertes de commutations et à la perte ohmique produite par le courant de charge à travers les transistors. [1]

2.3.2.1 Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge et une phase finale à niveau de courant constant

Dans une première phase de charge, les panneaux fournissent tout ce qu'ils peuvent produire, mais le circuit de charge possède une limite de courant de charge, cette valeur limite est maintenue jusqu'à un niveau de tension donné. Ensuite, la tension est régulée autour d'une valeur constante pendant que le courant de charge diminue exponentiellement, ce qui permet de finaliser la charge mais pas à 100%. Enfin, une charge à courant très faible est conseillée pour minimiser la surcharge et les effets produits par celle-ci. Cette dernière partie de la charge sera faite avec une limitation de courant constant à une valeur très faible, pour maintenir la batterie à une tension de flottement.

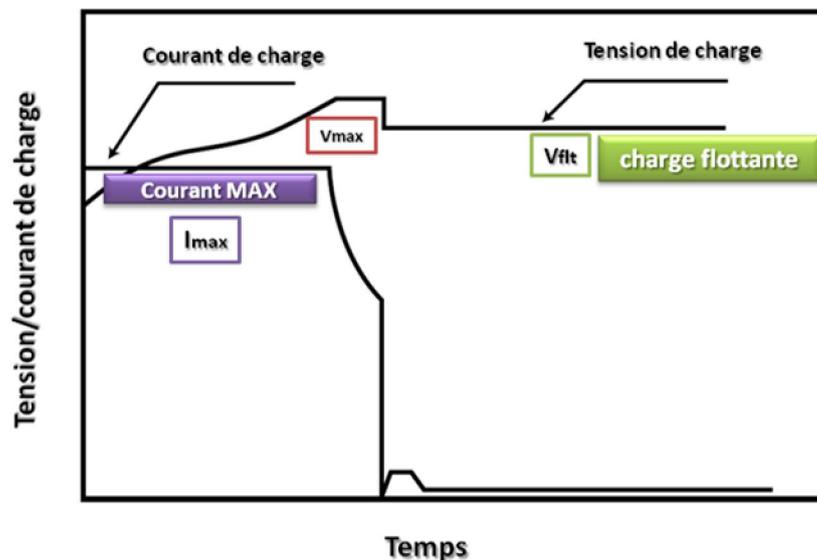


Figure 2-7 Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début et à la fin de la charge [28]

2.3.2.2 Charge flottante

La charge flottante est une faible charge du type « tension constante » qui est également utilisée pour maintenir la batterie en état de pleine charge.

2.3.2.3 Charge forcée (boost charge)

Déterminer quelle est la tension optimale de fin de charge est une chose difficile : pour contourner ce problème, les régulateurs modernes à microprocesseur utilisent en général une tension de fin de charge pas trop élevée pour éviter les effets de la surcharge (comme la corrosion et perte de l'eau).

Ensuite pour garantir une homogénéisation de l'acide, ils font régulièrement ce qu'on appelle une charge forcée qui laisse monter la tension de fin de charge plus haut pendant un temps limité pour les électrolytes liquides uniquement. La fréquence de cette décharge dépend des constructeurs de batterie, mais dans la littérature [24], on mentionne une charge forcée toute les deux à trois semaines pour les batteries cyclées, alors que pour les batteries à tension flottante, une fois par mois est suffisante. Il est également recommandé de repasser par cette charge forcée pour remonter complètement la batterie après que le délestage (décharge profonde) est détecté. [1]

2.3.2.4 Taper charging

Ce type de charge est une variante de la charge modifiée à tension constante en utilisant des circuits de charge plus simples pour diminuer le coût de l'équipement. Par contre, une réduction de la durée de vie de la batterie est à prévoir par rapport au mauvais contrôle de la surcharge de celle dernière. Entraînant un degré de gazéification difficile à quantifier ainsi qu'un incrément de température. En effet, ces deux paramètres qui sont plus ou moins maîtrisés selon le degré de complexité du circuit de charge sont les causes principales de la réduction de la durée de vie de la batterie.

2.3.3 Charge à courant constant

Cette méthode de charge s'applique au moyen d'un contrôle qui assure que le courant de charge délivré à la batterie reste fixe à une valeur déterminée. Il peut s'agir également de charges à différents niveaux de courant programmés à l'avance. Pour différents niveaux de courant de charge, la tension de la cellule augmente très brusquement lorsqu'on s'approche de la pleine charge. L'effet de l'incrément rapide de la tension peut se produire à des états de charge bas si le niveau de courant de charge est très élevé, et au contraire, si le niveau de courant de charge est bas au moment de l'incrément brusque de la tension, on peut considérer que l'état de charge est très près de 100%.

Une fois que ce phénomène est apparu, il est recommandé de finir la charge par charge à niveau de courant de charge de $C/100$, (où C désigne la capacité de la batterie en Ah).

Il est à remarquer qu'en plus de l'influence directe du niveau de courant, il existe également une influence de la température de la batterie au moment où se produit le front de tension, pour des températures plus élevées le front de tension sera un peu diminué.

2.3.3.1 Trickle charging

Ce type de charge qui peut être qualifié de « goutte à goutte » (trickle), est réalisé au moyen d'une charge à courant constant avec un index très bas (environ $C/100$). Cette méthode est utilisée pour maintenir la batterie en situation de pleine charge en rechargeant seulement l'énergie perdue au cours du temps de l'autodécharge ou pour restituer l'énergie délivrée par la batterie lors d'une connexion intermittente de la charge.

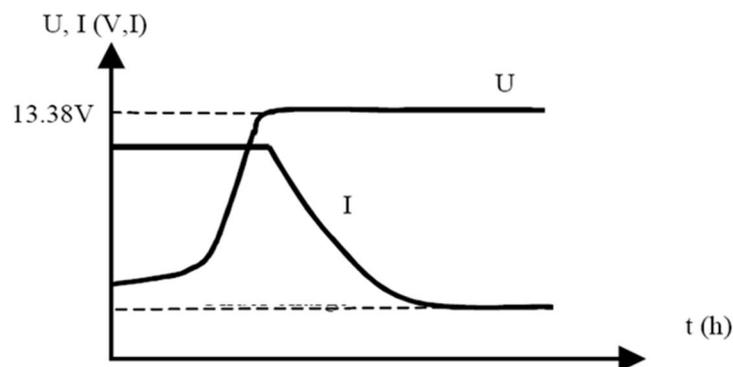


Figure 2-8 Charge à courant constant, tension constante [20]

2.3.4 Charge pulsée

Dans ce type de charge, le chargeur est périodiquement isolé des connexions de la batterie pour pouvoir effectuer la mesure de la tension en circuit ouvert. Si la tension en circuit ouvert est plus haute qu'une valeur préfixée, le chargeur ne délivre pas de l'énergie à la batterie. Dans le cas contraire ou si la tension chute, le chargeur délivre une impulsion dont la durée dépend du temps qu'il faut à la batterie pour atteindre à nouveau la valeur fixée de tension.

2.3.5 Charge rapide

La charge rapide consiste à fournir à la batterie la plupart de la charge en peu de temps (inférieur à une heure en dépendant de l'application). Le contrôle de la charge sous des conditions extrêmes devient très important pour prévenir des dégradations de la batterie liées à un changement de la morphologie de l'électrode, un incrément important de la température, une surcharge ou une phase de gazéification.

2.4 Valeurs limites de la régulation

Le régulateur coupe le générateur ou le récepteur lorsque l'état de charge/décharge de la batterie atteint l'une des valeurs limites correspondantes au déclenchement de la sécurité. Il existe plusieurs valeurs limites chacune est correspondante à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc.

2.4.1 Valeurs recommandées pour une batterie à Plomb

On présente au tableau suivant les valeurs recommandées de tensions de régulation de charge/décharge par élément des batteries plomb-acide. Un régulateur bien ajusté ne garantit pas que la batterie sera bien contrôlée que si la mesure de la tension soit fiable et précise. Si le courant de charge est élevé, il faut assurer que la chute de tension entre le régulateur et la batterie est négligeable (section du câble suffisante). Sinon il faut utiliser un régulateur avec une mesure séparé de la tension de batterie (câblage courant/tension séparé).

Type de régulateur	Tension /élément (V)	Type batterie ouverte	
		Sn-Pb	Ca-Pb
Tout/rien	V_{fc}	2,4	2,45
	V_{rc}	2,25	2,30
Modifié à tension constante	V_{fbo} (boost)	2,50	2,55
	V_{fc} (charge)	2,35	2,40
	V_{flt} (flottement)	2,25	2,25
	$V_{fég}$ (égalisation)	2,55	2,55

Tableau 2-4 Valeurs recommandées de la tension de régulation de charge d'une batterie ouverte [1]

2.4.2 Tension de régulation et type de régulation

Le choix de la tension de régulation dépend du type de l'application: autonome flottante, autonome cyclée ou hybride.

Un système à batterie pratiquement toujours en pleine charge (répéteur télécom, téléphone de secours...), à grande autonomie (> 2semaines) et à tension flottante, nécessite des valeurs plus basses de régulation, avec une égalisation seulement mensuelle ou après un cycle complet de décharge.

Un système à batterie cyclée (pour une résidence principale ou secondaire par exemple) et autonomie inférieure à deux semaine (< 2semaines) doit utiliser un régulateur à tension plus élevée et égalisation régulière pour éviter la stratification de l'électrolyte et la divergence des cellules.

Pour les applications hybrides où un autre producteur d'énergie comme par exemple un groupe diesel est connecté au système, les tensions de régulation peuvent être plus basses car le générateur auxiliaire pourra régulièrement charger complètement la batterie.

2.5 Technologies des régulateurs

Au début de l'usage du photovoltaïque, deux grandes familles de régulateurs étaient utilisées : les modèles Séries et les modèles Shunts. Avec l'utilisation de plus en plus courante des microprocesseurs, de nouvelles techniques apparaissent et chaque fabricant avance des arguments commerciaux qui sont en général très difficile à contrôler, les testes des batteries étant réservés aux laboratoires très spécialisés. La nouvelle technologie des régulateurs MPPT, permet de tirer les meilleures performances des panneaux solaires. Les régulateurs avec modulation de Largeur d'Impulsion MLI (PWM) est une méthode très rapide et efficace qui permet d'atteindre l'état de pleine charge d'une batterie solaire.

Les deux premières méthodes ont en commun qu'elles utilisent le niveau de tension des batteries pour déterminer quand réduire ou alors stopper complètement la charge des batteries. Avec les régulateurs de type Série, le courant de charge des batteries est occasionnellement coupé par l'ouverture d'un circuit entre les panneaux solaires photovoltaïques et les batteries. Avec les régulateurs de type Shunt, le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance et un court-circuit est effectué au niveau des panneaux solaires photovoltaïques. Contrairement à certains générateurs, les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être court-circuités ou peuvent voir leur circuit s'ouvrir sans dommage.

Remarque : Pour plus d'information sur les régulateurs qui existent sur le marché international on a présenté dans « l'annexe 1 » les différents types des régulateurs avec leurs prix et caractéristiques.

2.5.1 Régulateur de type série

Ce régulateur devient de plus en plus répandu et devrait à long terme supplanter le régulateur shunt. L'interrupteur de charge est ici incorporé en série avec la batterie et il s'ouvre lorsque la fin de la charge est atteinte. Les mêmes interrupteurs peuvent être utilisés que pour les shunts avec une différence pour le relais. Celui-ci peut être commutant et laisser passer le courant vers un autre récepteur lorsque la batterie est chargée.

Selon la taille de l'installation photovoltaïque, un régulateur simple ou à relais multiples peut être utilisé. Ces régulateurs ouvrent simplement un ou plusieurs relais selon la tension des batteries, afin de réduire la charge, ou de l'arrêter complètement. Les régulateurs contrôlent aussi les courants de l'ordre de 40 à 50 ampères provenant des panneaux solaires photovoltaïques. L'ouverture et la fermeture de ces relais est réalisée en fonction des seuils de tensions maximum et minimum prédéterminés. Pour des régulateurs à relais multiples, un relais peut rester fermé pour maintenir une charge complète, en alimentant les batteries via un circuit de puissance ou un circuit électronique linéaire.

Pour les systèmes dont les courants de sortie excèdent 50 ampères, les régulateurs doivent comporter plus d'un relais (au mercure de préférence), branché à un ensemble ou des régulateurs individuels, offrant l'avantage d'un système parallèle opérant indépendamment, avec une bonne fiabilité.

Dans le modèle linéaire, on ajoute une source de courant en parallèle avec l'interrupteur pour réaliser l'égalisation de la batterie par flottement ; cette source sera par exemple un transistor contrôlé ou une simple résistance en série avec une diode. La diode anti-retour peut faire partie ou non du régulateur. Le désavantage par rapport au type shunt est que l'interrupteur selon sa résistance de passage ajoute une chute de tension supplémentaire entre les panneaux et la batterie. Le principe du régulateur série est illustré sur la figure suivante :

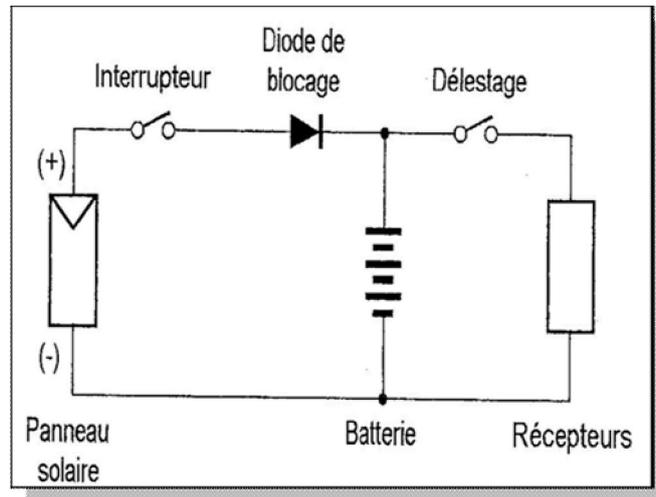


Figure 2-9 Schéma d'un régulateur de type série

2.5.2 Régulateur de type shunt

C'est le modèle le plus répandu car il est simple à réaliser. Le courant des panneaux solaires est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

Le principe du circuit est un simple aiguillage : Tout le courant des panneaux passe normalement dans la batterie et lorsque le seuil de coupure est atteint, tout le courant passe dans l'interrupteur. Il est donc nécessaire de rajouter une diode entre cet interrupteur et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode pourra servir de diode anti retour.

L'interrupteur utilisé est le plus souvent un MOSFET à faible résistance de passage « R_{dson} ». Il est plus intéressant qu'un transistor bipolaire puisqu'il dissipe moins d'énergie. Il est également plus intéressant qu'un relais car même que le relais présente une résistance de passage très faible mais il devra être temporisé pour ne pas atteindre rapidement sa durée de vie de commutation, ce qui pose des problèmes si le courant de charge pour une capacité de batterie donnée est important ; dans ce cas la charge sera difficile à atteindre.

Le principe du régulateur shunt est illustré sur la figure suivante.

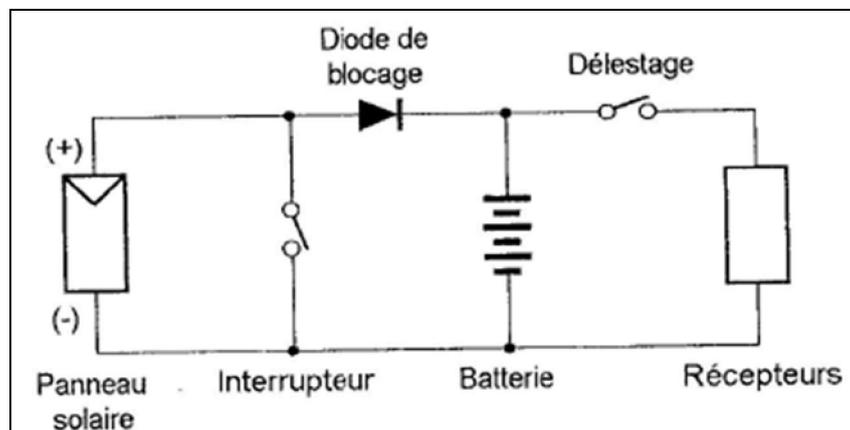


Figure 2-10 Schéma d'un régulateur de type shunt

Parmi les régulateurs shunt, il y a des régulateurs shunts linéaires. Ceux-ci maintiennent une tension constante aux bornes de la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

L'avantage est que la charge totale de la batterie est garantie, le désavantage est que la puissance non utilisée du panneau en fin de charge doit être dissipée par le transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants.

2.5.3 Régulateur PWM

Ce type de régulateur essaie de rassembler les avantages des deux techniques précédentes en utilisant un interrupteur actif modulé par impulsions de largeurs variables MLI (Pulse Width Modulation (PWM) en anglais). Ces régulateurs utilisent des MOSFET ou des transistors de puissance fonctionnant à des fréquences importantes, afin de générer des impulsions, pour maintenir les batteries à une tension constante. La durée d'un cycle d'impulsion utilisée dans les régulateurs types Séries ou Shunt, varie en fonction de la tension des batteries et du courant de charge. Ces régulateurs ont une excellente caractéristique de charge pour les systèmes photovoltaïques jusqu'à 40 ampères; cependant, à cause de leur grande commutation, ils peuvent générer des fréquences pouvant interférer avec les équipements de télécommunication.

Les relais utilisés dans les régulateurs ont quelques limites qui affectent leur durée de vie. Pour prolonger celle-ci, il faut allonger leur cycle d'ouverture et de fermeture, entravant par conséquent les performances des batteries. Lorsque le courant de charge est grand, ces relais nécessitent un circuit de dérivation pour supporter temporairement le courant pendant le cycle. Les circuits de commutation des régulateurs PWM feront indéfiniment des cycles d'impulsions sans dommage. Cependant, la chute de tension à leurs bornes génère de la chaleur.

La modulation de Largeur d'Impulsion (PWM) est une méthode très rapide et efficace qui permet d'atteindre l'état de pleine charge d'une batterie solaire. Contrairement aux contrôleurs les plus anciens qui n'agissaient sur le courant de charge que par ON ou OFF (ce qui est suffisant que pour restaurer l'état de charge d'une batterie à environ 70%). Le régulateur à technique PWM vérifie constamment l'état de charge de la batterie pour ajuster la durée et la fréquence des impulsions de courants à lui délivrer. Si la batterie est déchargée, les impulsions de courant sont longues et presque ininterrompues. Quand la batterie est presque entièrement chargée, les impulsions deviennent de plus en plus brèves et espacées.

Parmi les avantages est que l'on peut maintenir une tension constante aux bornes de la batterie pour terminer la charge tout en dissipant dans le transistor (MOSFET en général) uniquement les pertes dues à la résistance de passage. Les deux techniques shunts et série peuvent être utilisées dans ce cas mais la majorité des fabricants utilisent la technique série. La recharge de la batterie étant un processus relativement lent, cette technique doit être utilisée à fréquence assez basse (au maximum quelques centaines de hertz) pour que la charge fonctionne.

Par sa nature même, cette technique achève la dernière portion du processus de la recharge (la plus complexe) et diminue la sulfatation des plaques car le courant de charge de la batterie est pulsé à haute fréquence.

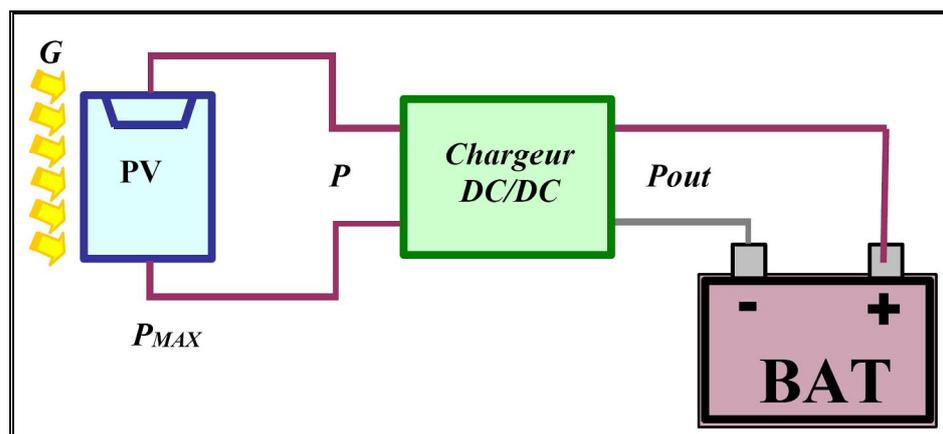


Figure 2-11 Chargeur DC-DC

2.5.4 Régulateur MPPT

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer l'énergie au point de puissance maximale (MPPT Max Power Point Tracker).

Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un régulateur solaire MPPT a une fonction de balayage, qui parcourt la tension du panneau solaire toutes les deux heures pour trouver le point de sortie de puissance maximal. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 17 à 18 V dans un système 12V.

Cette nouvelle technologie permet de tirer les meilleures performances des panneaux solaires photovoltaïques : de 15% à 30% d'énergie en plus.



Figure 2-12 Régulateur solaire MPPT

Ces régulateurs permettent non seulement d'augmenter la production d'énergie d'une installation photovoltaïque mais, en optimisant la charge des batteries, ils prolongent aussi significativement la durée de vie des batteries.

2.6 Choix du régulateur

Trois facteurs sont importants dans le choix d'un régulateur de charge: il s'agit de la tension du système, du courant maximal, et de la température d'opération.

La tension entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en général 12V, 24V ou 48V). Les régulateurs acceptent des plages de tension plus ou moins larges.

L'intensité maximale du régulateur : l'intensité du régulateur (exprimée en ampères) doit être supérieure à l'intensité de court circuit du ou des panneaux solaires auxquels il est relié. Cette donnée est indiquée sur la notice de chaque panneau. Il est recommandé de prendre en plus une marge de sécurité de 10% à 20%. Concernant le courant, il faut additionner tous les courants en court-circuit fournis par les panneaux solaires et multiplier par 1,30. Exemple: si on a un panneau solaire qui fournit 4,8 A en court-circuit, il suffit de multiplier 4,8 A par 1,30, ce qui est égal à 6,24 A. Dans ce cas le régulateur doit être en mesure de supporter 6,24 A.

La température: une compensation de température doit être requise à moins que les batteries et le régulateur de charge soient sous des conditions normales de température près de 25°C. Principalement, la compensation de température varie de l'ordre de 5 mV/cellule/°C.

La méthode de charge des accumulateurs au Plomb choisie dans notre mémoire est de type tension constante. La tension de charge est de 13,8 à 14,4 Volts pour une batterie de 12V. Cette tension est nécessaire pour que la charge s'effectue correctement. Une fois chargée, la batterie

présente une tension de 12,6V (2,1V pour un élément). Du fait de la faible résistance interne de la batterie, au début de la charge il faut limiter le courant, sinon il y a un risque d'échauffement des plaques qui alors se détérioreraient. De plus le chargeur serait en excès de puissance et risquerait de se détruire. La valeur normale de limitation de ce courant est égale à environ 1/4 à 1/5 de la capacité nominale pendant 20h.

Lorsque la batterie est chargée, l'idéal est de continuer à lui fournir un petit courant d'entretien sous une tension plus faible, dite "tension de floating". Cette tension aura une valeur environ 13,6V (entre 2,25V et 2,28V par élément). Ce courant d'entretien permet d'avoir toujours à disposition une batterie en pleine charge.

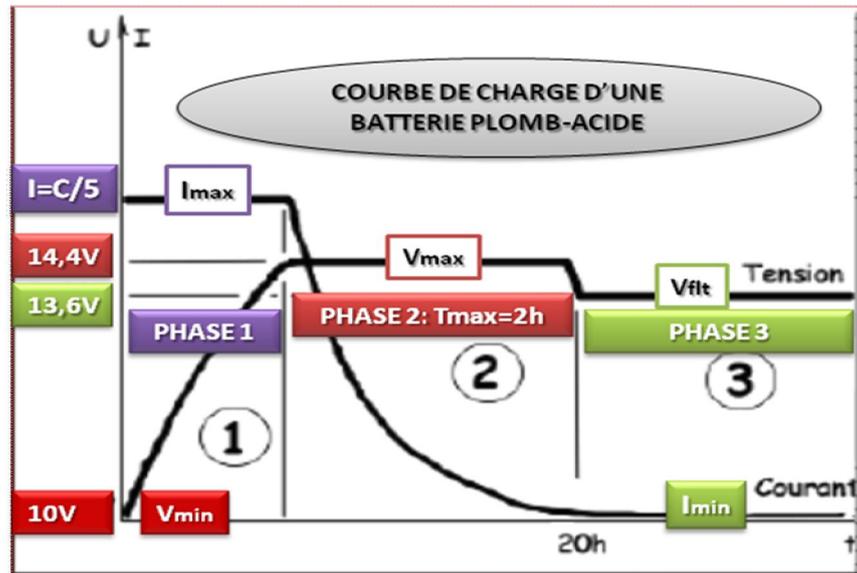


Figure 2-13 Courbe de charge de la batterie plomb-acide 12V [G]

Les batteries sont chargées idéalement en 3 différentes phases : (Voir la Figure 2-13)

- Phase 1 : Le courant est limité à un tau d'environ 1/5 de la capacité nominale. La tension augmente progressivement jusqu'à atteindre son seuil maximal réglé 14,4 Volts (2,4V/elt).
- Phase 2 : La tension de charge est réglée à 14,4 Volts (2,4V/elt), le courant de charge diminue alors jusqu'à devenir inférieure à C/100. Cette phase doit durer maximum 2heures, la tension ne doit pas rester au dessus de 14,4V plus longtemps. La batterie est chargée à l'issue de cette phase.
- Phase 3 : Une fois la batterie est chargée (après environ 20h de charge) on passe au mode de charge d'entretien (Floating) pour la maintenir à 100% de charge. La tension appliquée à la batterie sera autour de 13,6V (entre 2,25V et 2,28V par élément).

2.7 Conclusion

La plupart de ces régulateurs sont équipés de voyants ou témoins lumineux destinés à fournir un ensemble d'indications telles que : l'état de charge de la batterie, l'état de fonctionnement du générateur, le mode de fonctionnement en cours, l'état des différentes protections, etc. Les nouvelles générations de régulateurs "haut de gamme", quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

Certains régulateurs solaires plus performants proposent des "fonctions avancées" intégrées ou en option :

- Écran d'information digital (à la place des Leds de signalisation).

- Connexion par fil ou à distance (WIFI par exemple) à un PC ou un réseau informatique.
- Déclenchement d'alarmes programmées de façon automatique (signal sonore, e-mail, SMS).
- Enregistrement pour analyse de données issues du régulateur.
- Possibilité de plusieurs modes de charges : charge rapide, état de veille, etc. ...
- Déclenchement automatique de sources d'énergie complémentaires aux panneaux solaires photovoltaïques (groupe électrogène ou réseau électrique EDF notamment).



Figure 2-14 Enregistreur de données Steca

Il existe des régulateurs équipés avec des modules de visualisation qui permettent à l'utilisateur de voir l'état de fonctionnement instantané de la batterie comme l'état de charge/décharge, la tension, le courant et la température. Il peut afficher en permanence l'état de fonctionnement du module photovoltaïque. Cet affichage se fait soit au travers des LEDs, soit par l'intermédiaire d'un écran digital.



Figure 2-15 Régulateur "Aeca" équipé avec un écran de visualisation

On peut utiliser des diodes lumineuses (LEDS) pour vérifier les connexions de la batterie, le panneau photovoltaïque et le récepteur. Ces LEDS peuvent être utilisées également pour nous signaler un risque de surcharge, décharge profonde ou température élevée.

3. DESCRIPTION DE LA CONCEPTION DE NOTRE REGULATEUR INTELLIGENT

3.1 Introduction

Nous allons développer sur le logiciel « PROTEUS » un régulateur intelligent de charge/décharge de la batterie, pour un système PV de faible puissance ($I < 5A$, avec un PIC 16F877 qui est équipé par 2PWM et 8 entrée analogique) que nous le connaissons bien car on l'utilise dans plusieurs de nos modules.

3.2 Notre régulateur 12V/5A avec PIC 16F877

Le courant de charge est de 5mA à 5A, et la tension est réglable de 10 V à 15V. Par sécurité, on limitera le courant de charge à « $I_{max}=5A$ » programmé. Les seuils de tension seront calculés automatiquement en fonction de la mesure de la température. Avant de charger/décharger, la tension et la température de la batterie seront mesurées pour diagnostiquer une décharge profonde ou des températures très basse. La fin de la charge sera pour une tension de « 14.4V » et un courant de « 200mA », mais le chargeur continue toujours de charger avec une tension d'entretien V_{float} (Floating). Dans le cas d'une décharge profonde ou des températures de congélation, le PIC vas commander le transistor MOSFET à la sortie pour bloquer le récepteur.(Voir Figure 3-1)

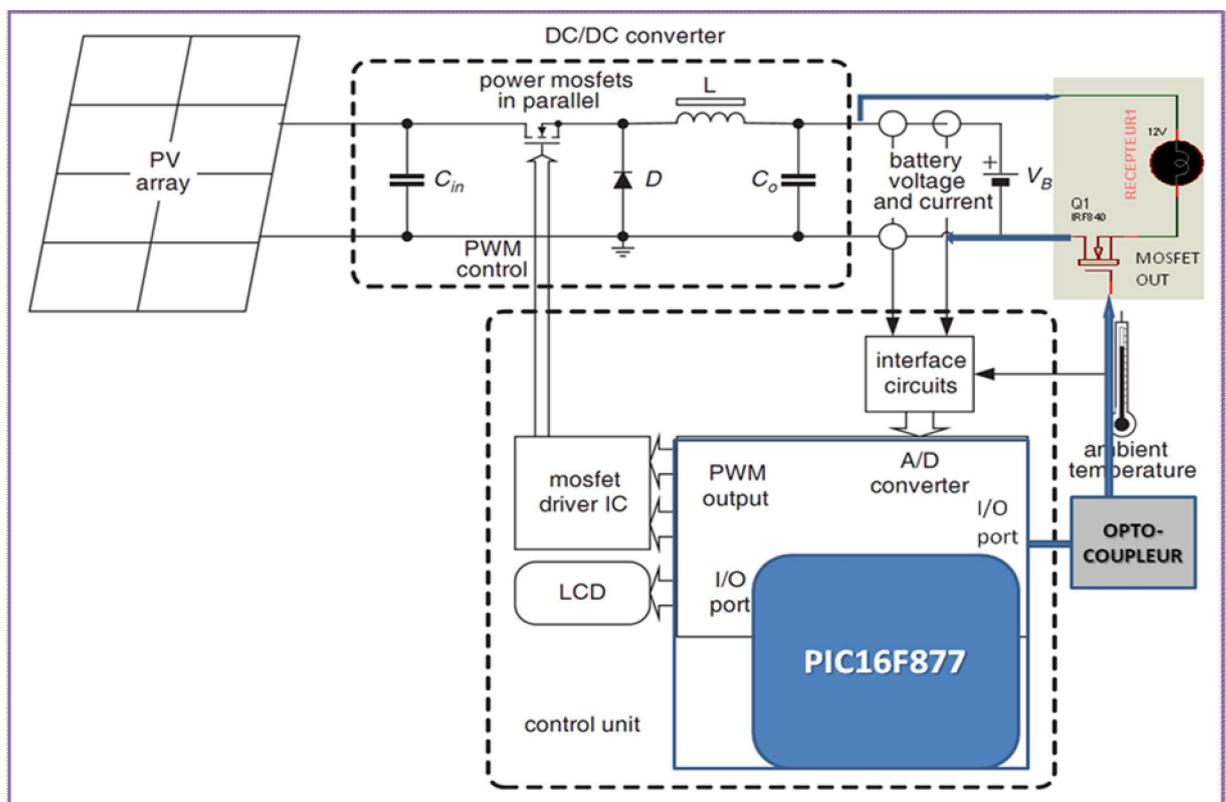


Figure 3-1 Schéma de base de notre régulateur

3.2.1 Parties à développer

Nous avons 5 parties à développer:

- Partie mesure de courant et de la tension
- Partie hacheur et MOSFET de sortie
- Partie afficheur
- Partie mesure de la température
- Partie commande : PIC

3.2.2 Etude fonctionnelle du régulateur

Pour notre régulateur nous avons besoin d'un afficheur LCD. Le hacheur permet de faire varier la tension et le courant au niveau de la batterie. Le MOSFET de sortie permet de connecter ou reconnecter le récepteur. On peut voir sur la figure suivante le schéma de notre régulateur. (Voir Figure 3-2)

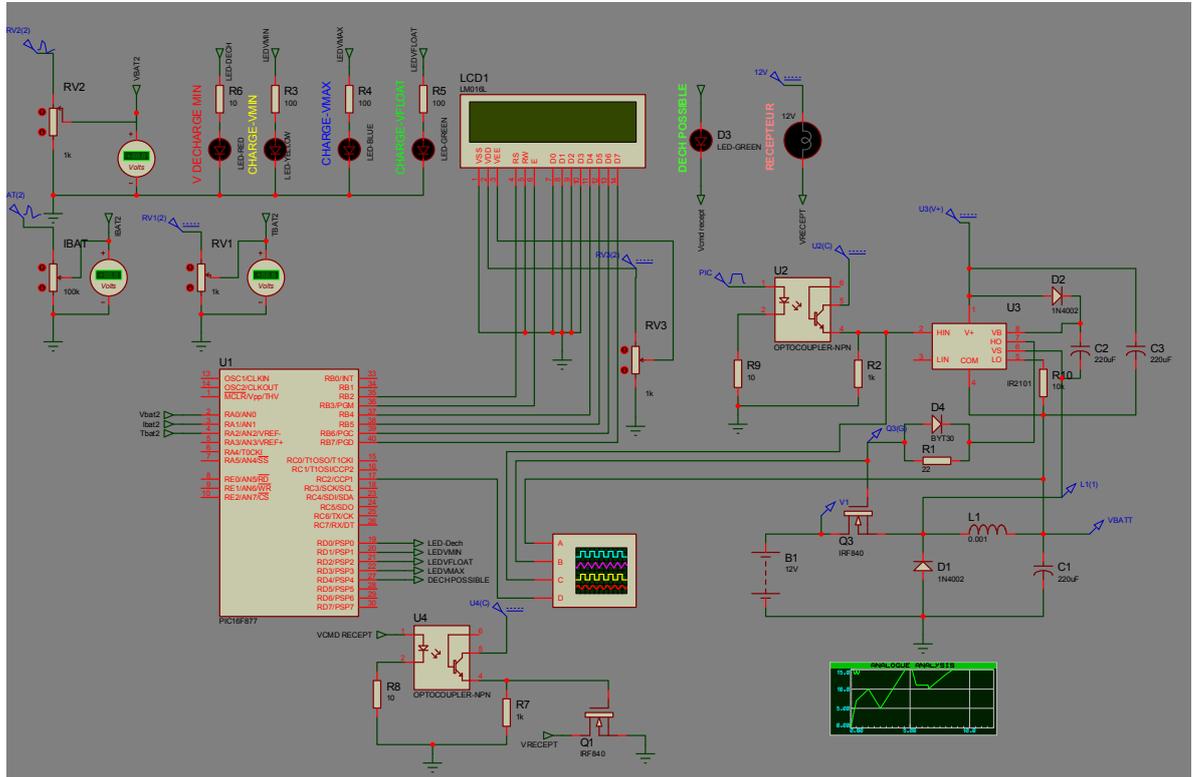


Figure 3-2 Schémas sur PROTEUS du régulateur

3.3 Mesure de courant et de la tension

3.3.1 Mesure de courant de la batterie

Le courant de charge ou de décharge de la batterie, doit avoir une intensité de valeur absolue inférieure à 10 A. la valeur de ce courant doit être mesurée, sous forme de tension comprise entre 0 et 5V, par une résistance shunt mise en série avec la batterie. Pour éviter de dissiper une énergie élevée en pure perte, on prendra un shunt de valeur 100mΩ. De ce fait, la tension aux bornes du shunt sera faible, soit 100mV pour un courant de 10 A, et 1 mV pour un courant de 100 mA, aussi il est nécessaire d'ajouter un étage amplificateur entre le shunt et le convertisseur analogique numérique qui correspond à une entrée du PIC16F876.

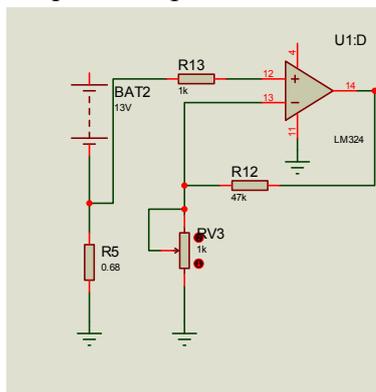


Figure 3-3 Schéma électrique de Mesure de courant

Le gain vaut $(1 + \frac{R_{12}}{R_{V3}})$. Pour avoir 5V à 10A, il faut un gain de 50, cela est possible

lorsque $R_{12}=47K\Omega$ (valeur standard), R_{V3} est une résistance variable entre $0.3K\Omega$ et $1K\Omega$.

3.3.2 Mesure de la tension de la batterie

Son principe consiste à comparer la valeur de la tension de la batterie à une tension de consigne. Comme le régulateur proposé est destiné pour des batteries avec une tension nominale de 12 V (valeur constructeur), les valeurs de tensions admissibles seront comprises entre 11 V (batterie à plat) et 14,5 V (pleine charge). Pour la commodité des calculs, on prendra l'intervalle de 10 V à 15 V. Ainsi, au lieu de convertir de 0 à 14,5 ou 15 V, on s'astreindra à convertir uniquement les valeurs nominales. Ceci donnera des erreurs de conversion trois fois moindres. Pour ce faire, on retranche une tension fixe de 10 V, qui doit être stable, à la tension de batterie. Ainsi pour une valeur tension mesurer 13 V, on aura en sortie 3 V. La Figure 3-4 indique le schéma de mesure de la tension de batterie.

Ce schéma comporte deux blocs :

- le premier, la tension de référence, doit fournir une tension fixe de 10V (Figure 3.2). La tension de sortie est donnée par :

$$V_R = V_Z \left(1 + \frac{R_{V1}}{R_9} \right) \dots\dots\dots (3-1)$$

Avec : $V_Z = 7.5 \text{ V}$, $R_9 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{V1} = 2\text{k}\Omega$.

La tension de 10 V s'obtient par ajustement du potentiomètre R_{V1} .

- le deuxième bloc, l'amplificateur différentiel, définit par

$$V_S = \frac{R_4}{R_1} (V^{+}_{Bat} - 10) \dots\dots\dots (3-2)$$

Avec : $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = 10\text{k}\Omega$.

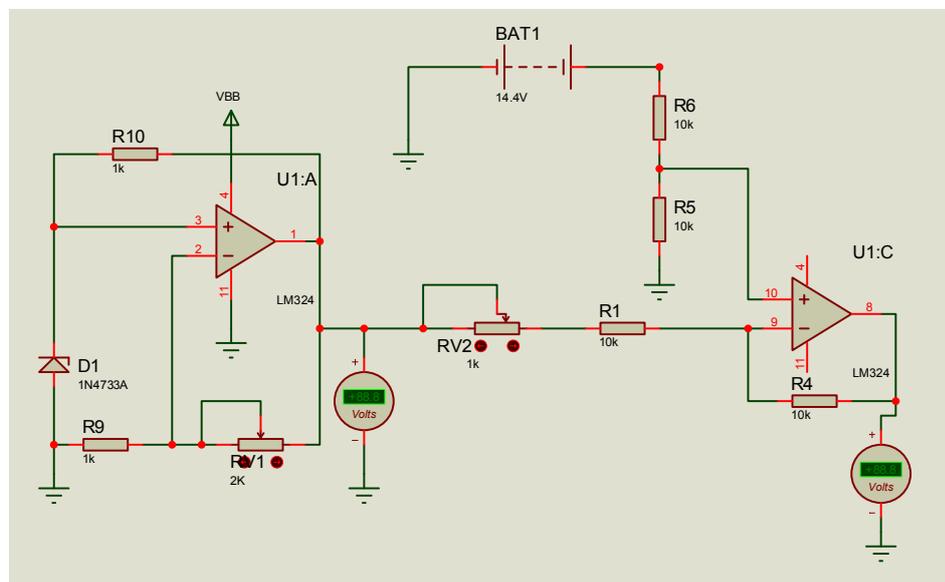


Figure 3-4 Détecteur du courant de la batterie

3.4 Hacheur et MOSFET de sortie

3.4.1 Hacheur Buck à étudier

Les hacheurs sont des convertisseurs continus – continus qui ont un rendement de 95%. En effet, il y a très peu de pertes dans les transistors et les diodes, car en électronique de puissance les semi conducteurs fonctionnent en commutation (bloqué ou saturé), et dans ces deux cas ils ne dissipent pas de puissance. L'inductance « L1 » permet de lisser le courant dans l'accumulateur pour avoir un courant continu. La capacité de sortie « C1 » est indispensable, son rôle étant de minimiser l'ondulation de sortie et les surtensions transitoires. Donc, le chargeur est constitué de l'inductance « L1 », la diode « D1 », le transistor de commutation « Q3 » commandé par l'intermédiaire de l'optocoupleur et du driver. Le schéma électrique du hacheur est représenté à la figure suivante.

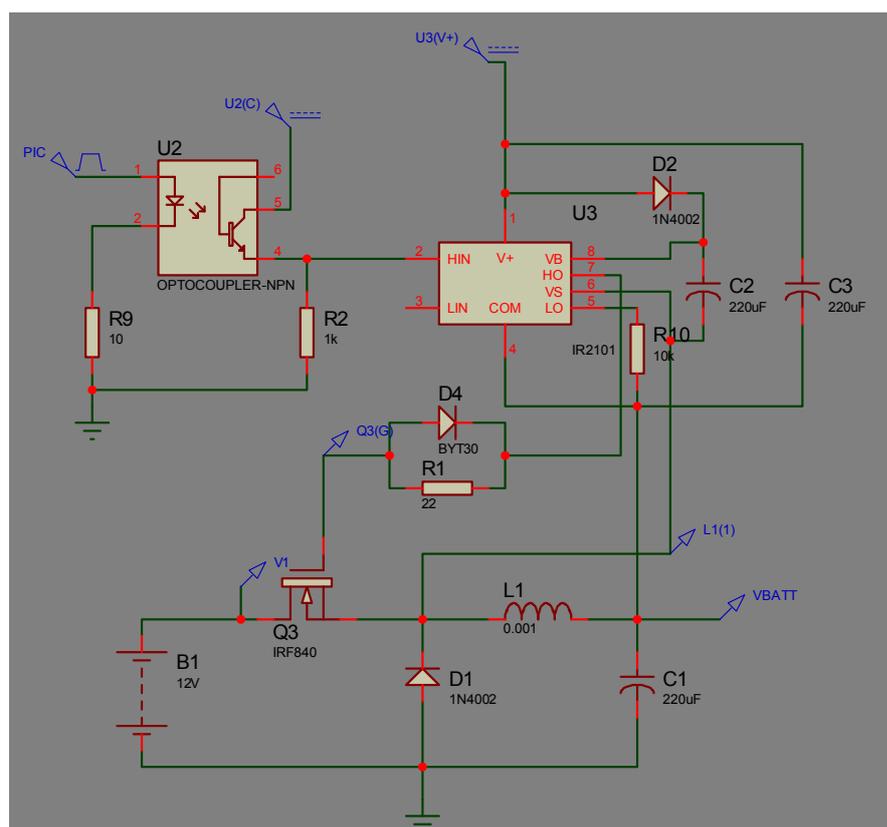


Figure 3-5 Schéma électrique du hacheur

Le transistor Q3 est commandé par le micro contrôleur qui fournit une PWM (Pulse Width Modulation = MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion). La fréquence a été choisie arbitrairement à 50KHz avec un PWM sur 8 bits par le pic 16F877.

3.4.1.1 Choix du Hacheur type Buck

Le convertisseur continu-continu (*DC-DC converter*) est un convertisseur de courant (ou de tension) continu, statique, qui permet d'obtenir à partir d'une source de courant (ou de tension) continu de valeur fixe une tension continûment variable. Le Tableau 3-1 donne les différents types des convertisseurs DC-DC. Les trois premiers sont les plus fondamentaux, ils sont largement utilisés à cause de leur faible complexité [31].

Type	Fonction	Inductance	Interrupteur de puissance	Diode	Transformateur	Complexité
<i>Buck</i>	Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Boost</i>	Élévateur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Buck-boost</i>	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Flyback</i>	Élévateur Abaisseur	Non	1	1	Oui	Moyenne
<i>Half forward</i>	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Oui	Moyenne
<i>Push pull</i>	Élévateur Abaisseur	Oui	2	2	Oui	Forte
<i>Demi pont</i>	Élévateur Abaisseur	Oui	2	4	Oui	Forte
<i>pont</i>	Élévateur Abaisseur	Oui	4	4	Oui	Très forte

Tableau 3-1 Différent types des convertisseurs DC-DC

Lors de l'élaboration de notre projet, et selon les panneaux disponibles au labo de recherche à notre école ENP, le générateur photovoltaïque est constitué d'un seul module PV de tension à vide : $V_{co} = 21.7V$ et de courant de court-circuit $I_{cc} = 3.4A$, destiné à charger une batterie d'accumulateurs (Source de tension réversible en courant) avec une tension nominale de 12V. Ainsi le choix d'un convertisseur série «buck» (abaisseur) s'impose.

Le rôle du convertisseur série est de diminuer une tension d'entrée vue à la sortie du panneau photovoltaïque. Il se compose des éléments suivants:

- Interrupteur Semi-conducteur de puissance
- Diode de roue libre
- Filtre passif de type passe-bas

Le placement de ces éléments influe sur la tache du convertisseur : « abaisseur, élévateur, élévateur -abaisseur ».

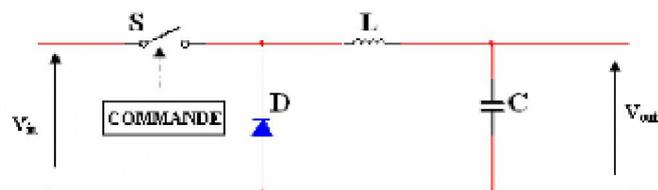


Figure 3-6 Schéma de principe d'un convertisseur série abaisseur

3.4.1.2 Interrupteur Semi-conducteur de puissance MOSFET IRF840

Généralement, cet interrupteur est un dispositif électronique commandé à la fermeture et/ou à l'ouverture (ex: Transistors, Mosfets, GTO,...). Il s'ouvre et se ferme par un signal rectangulaire à largeur réglable. La commutation entre l'état de fermeture et d'ouverture se fait souvent à des

fréquences élevées pour augmenter les performances dynamiques de la réponse. En outre, pour réduire la taille des éléments de stockage (inductifs et capacitifs) [31]

Les temps de fermeture et d'ouverture présente le fameux rapport de réglage appelé rapport cyclique (*Duty Cycle*), tel que :

$$T_{on} = D \times T \dots\dots\dots (3-3)$$

$$T_{off} = (1-D) \times T \dots\dots\dots (3-4)$$

Où :

D : Le rapport cyclique (sans unité)

T : La période de commutation (en sec)

Pour une commutation des tensions élevées à des hautes fréquences, les transistors de type MOSFET représentent un bon choix, car à l'état passant leur résistance série R_{DSON} est très faible alors qu'à l'état bloqué, ils se comportent comme un circuit ouvert, ils impliquent aussi une bonne isolation de la partie commande de la partie puissance [32].

Nous avons choisi le MOSFET IRF840, un interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Pour faire passer le MOSFET à l'état conducteur il suffit d'appliquer à la grille une tension positive, plus que la grille est positive, plus le canal est large et plus le courant est important lorsque aucune tension n'est appliquée sur la grille le composant est à l'état bloqué. Les caractéristiques de l'IRF840 sont:

$V_{DSS} = 500V$; $I_D = 8A$; $R_{DS} = 0.85\Omega$; $T(on-off) = 20ns$; Diode de commutation interne ; Boîtier TO220

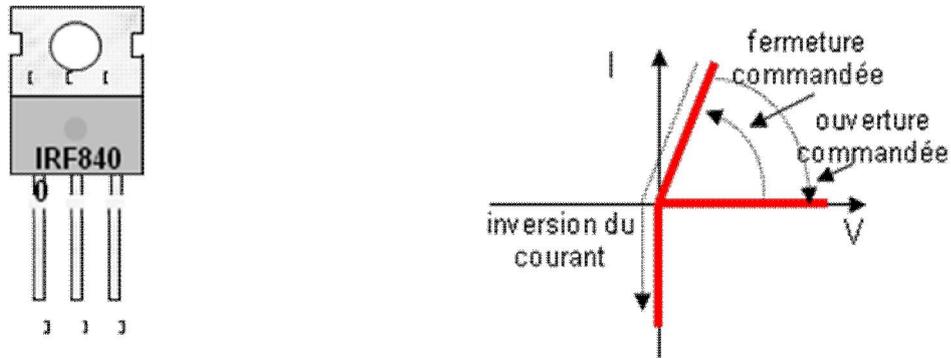


Figure 3-7 Schéma et représentation de l'IRF840 sous forme d'un interrupteur

3.4.1.3 Diode de roue libre

Cette diode assure la continuité du courant inductif pendant l'absence du courant fourni par la source. Généralement, on utilise une diode rapide (type Schottky) à cause de la fréquence élevée de commutation. Cette catégorie des diodes présente une chute de tension directe faible (l'ordre de 0.4V). [33]

3.4.1.4 Filtre passif de type passe-bas

Ce filtre est constitué d'une inductance et d'un condensateur. Le choix de l'inductance influe sur le taux d'ondulation et sur le mode de conduction du convertisseur (mode continu ou discontinu). Le condensateur assure l'action de filtrage de la tension de sortie. Sa capacité est choisie de sorte que l'ondulation de tension soit très faible, pratiquement moins de 5%.

3.4.1.5 Principe de fonctionnement

La Figure 3-8 montre le schéma de principe d'un convertisseur série :

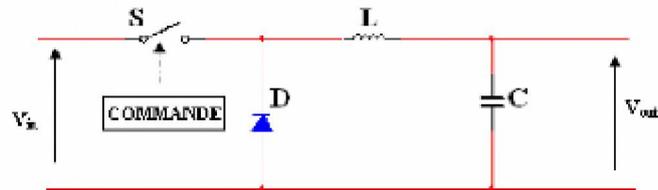


Figure 3-8 Schéma de principe d'un convertisseur série

Le fonctionnement de ce convertisseur se déduit du comportement de l'interrupteur de puissance commandé « S ». On distingue deux phases de fonctionnement :

3.4.1.5.1 Première phase de fonctionnement

Quand l'impulsion de commande est au niveau haut (état on), l'interrupteur « S » est fermé, ce qui polarise la diode « D » en inverse. Le courant d'entrée « I_{in} » recharge la bobine « L » par une énergie inductive qui vaut E :

$$E = \frac{1}{2} L \times I^2 \dots\dots\dots (3-5)$$

Tant que l'interrupteur est fermé, la tension de la bobine possède les polarités indiquées sur la Figure 3-9 et le courant « I_L » recharge au même temps le condensateur « C » et fournit le courant « I_{out} » à la batterie d'accumulateur.

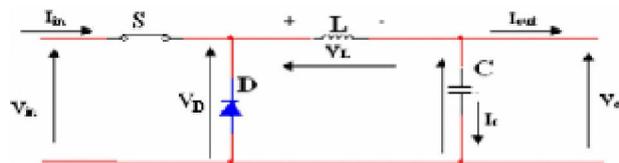


Figure 3-9 Circuit équivalent du premier mode de fonctionnement

Pendant l'intervalle : $0 < t < T_{on}$

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad \& \quad V_L = L di_L / dt \quad \rightarrow \quad di_L / dt = (V_{in} - V_{out}) / L > 0 \text{ (Hacheur abaisseur)}$$

$V_{in} > V_{out}$)

$$\text{Donc : } i_L(t) = (V_{in} - V_{out}) t / L$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum à l'instant : $T = T_{on} = D \cdot T$

$$\text{Ondulation du courant: } \Delta I_L = I_{max} - I_{min} = (V_{in} - V_{out}) \times \frac{D}{L \times f} \dots\dots\dots (3-6)$$

Cette relation montre que l'ondulation du courant est d'autant plus faible que la fréquence de hachage est grande (ou L est grande). Mais une forte augmentation de cette fréquence nécessiterait l'emploi des composants à commutation rapide.

3.4.1.5.2 Deuxième phase de fonctionnement

Quand l'impulsion passe au niveau bas (état off), l'interrupteur s'ouvre, à ce moment le champ magnétique commence à disparaître en induisant une tension inverse sur l'inductance, cette tension inverse qui s'appelle tension induite. À cause d'elle la diode sera polarisée en directe Figure 3-10.

Dans ce mode l'inductance rend son énergie stockée, elle se comporte comme une source continue pour fournir le courant de charge à la batterie. Donc, le courant traverse l'inductance jusqu'à ce qu'elle ait redonnée toute son énergie au circuit extérieur (mode discontinu), ou jusqu'à ce que l'interrupteur se ferme de nouveau (mode continu).

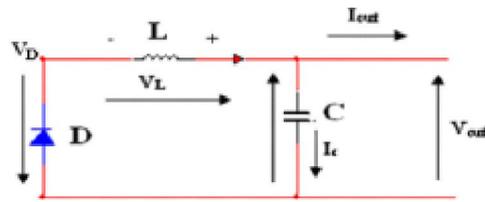


Figure 3-10 Circuit équivalent du deuxième mode de fonctionnement Pendant l'intervalle : $T_{ON} < t < T$

On a : $(V_L = -V_d - V_{out} = L di_L/dt) \rightarrow di_L/dt = -(V_d + V_{out})/L$

On a : $i_L(t) = -(V_d + V_{out})t / L$

Le courant i_L diminue linéairement de la valeur I_{MAX} à une valeur minimale I_{min}

$I_{min} = -(V_d + V_{out})T_{off}/L + I_{max}$, avec : $T_{off} = T - T_{on} = (1-D) \times T$

$$\text{Alors : } \Delta I = I_{max} - I_{min} = (V_d - V_{out}) \times \frac{1-D}{L \times f} \dots\dots\dots (3-7)$$

L'ondulation de la phase « 1 » est : $\Delta I = I_{max} - I_{min} = (V_{in} - V_{out}) \times D / Lf$

Dans une période T : $\Delta I = I_{max} - I_{min} = (V_{in} - V_{out}) \times D / Lf = (V_d + V_{out}) \times (1-D) / (Lf)$

Donc : $V_{out} = D \times V_{in} - (1-D) \times V_d$

Pour : $V_d \approx 0 \rightarrow V_{out} = D \times V_{in} \rightarrow V_{out}/V_{in} = D$

3.4.1.6 Détermination de L, C

3.4.1.6.1 Détermination de L

L'inductance « L1 » permet de lisser le courant dans l'accumulateur pour avoir un courant continu. La forme du courant à travers l'inductance est illustrée par la figure :

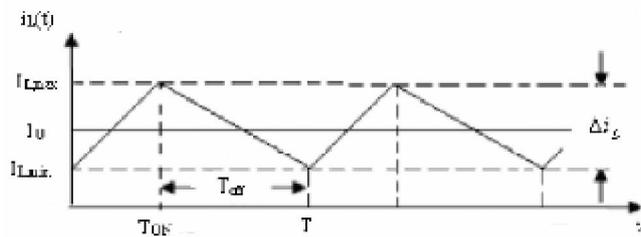


Figure 3-11 Courant à travers l'inductance

Selon la Figure 3-11, la conduction continu est limitée par : $I_{min} = 0$, donc : $I_{max} = 2I_0$

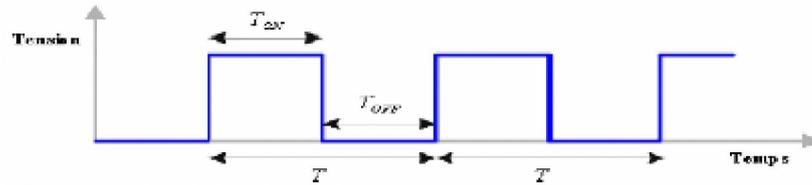
Alors, le convertisseur fonctionne toujours dans le mode de conduction continue si :

$$\Delta I < I_{max} \rightarrow (V_{in} - V_{out}) \times D / Lf < I_{max} \rightarrow L > (V_{in} - V_{out}) \times D / (f I_{max})$$

Donc on peut déterminer « L » avec : $L > L_{LIMIT}$, et : $L_{LIMIT} = (V_{in} - V_{out}) \times D / (f I_{max})$

Nous allons maintenant chercher $L_{LIMIT,MAX}$ pour ne pas choisir « L » au dessous de cette dernière.

L'ondulation du courant « ΔI_L » est maximale pour $D = 0.5$:

Figure 3-12 Pour $D=0.5$, on a: $T_{ON}=T_{OFF}=T/2$

$$\Delta I_{L,MAX} = (V_{in} - V_{out}) \times (2 L_{MAX} f) \quad \text{et} \quad V_{OUT} = V_{IN}/2$$

$$\text{Donc : } \Delta I_{L,MAX} = V_{in}/(4 L_{MAX} f)$$

A la limite de la conduction continue : $\Delta I_{L,LIM} = 2I_0$

$$\text{Donc : } L_{LIMIT,MAX} = V_{in}/(8 I_0 f)$$

Alors on doit choisir : $L > L_{LIMIT,MAX}$ ou : $L > V_{in}/(8 I_0 f)$

L_{LIMIT} : est la valeur de L à la limite de la conduction continue.

$\Delta I_{L,MAX}$: correspond à l'ondulation du courant pour $D = 0.5$

L_{MAX} : correspond à la valeur de l'inductance pour « $D = 0.5$ »

3.4.1.6.2 Détermination de C

A partir de la Figure 3-9 on a: $I_C = I_L - I_O$

Donc, la capacité se charge pour $I_L > I_O$ ($I_C > 0$), et se décharge pour $I_L < I_O$ ($I_C < 0$), voir la Figure 3-13 :

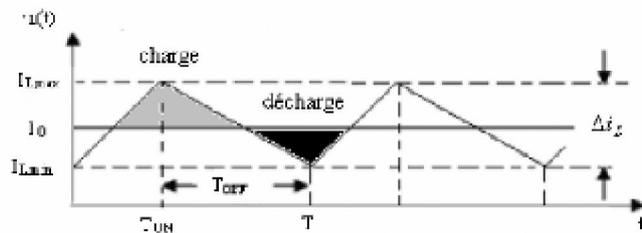


Figure 3-13 Charge et décharge du condensateur

La valeur moyenne du courant à travers le condensateur est nulle, alors sa forme illustrée dans la Figure 3-14 peut nous aider à déterminer « ΔV_0 » :

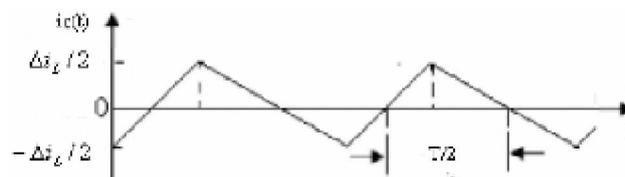


Figure 3-14 le courant à travers le condensateur

Chaque section de charge ou de décharge qui dure $T/2$ représente la variation de la charge « ΔQ » Figure 3-14:

$$\Delta Q = I_C \Delta t = C \Delta V_0 \quad \text{donc : } \Delta Q = (\Delta I/2) \times (T/2) = \Delta I \times T/4 \quad \& \quad \Delta I = (\Delta V \times D)/(L \times f)$$

$$\text{Alors : } \Delta Q = (\Delta V \times D \times T)/(2 \times L \times f) = C \times \Delta V_0$$

$$\bullet C = TD/4LF \implies C = D/(4Lf^2) \quad , \quad \text{à } D=1/2 \text{ on aura : } C = 1/(8Lf^2)$$

• **Technique de commande PWM**

PWM signifie «Pulse Width Modulation», ce qu'on pourrait traduire par modulation en largeur d'impulsion, c'est une technique de commande par un signal rectangulaire d'une fréquence (période) constante et d'un rapport cyclique variable.

Le rapport cyclique « D » est défini comme étant le temps T_{ON} pendant lequel l'interrupteur est fermé (transistor saturé-passant) divisé par la période de fonctionnement T , soit :

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \text{ donc : } 0 < D < 1$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est ouvert par : $T_{OFF} = T - T_{ON}$

Où :

T_{ON} : durée de l'état haut (temps de fermeture)

T_{OFF} : Durée de l'état bas, (temps d'ouverture)

T : Durée d'un cycle (période)

D : Le rapport cyclique « *duty-cycle* »

En binaire, le rapport cyclique d'un signal à fréquence fixe peut être défini comme étant le rapport entre le temps où il se trouve à l'état «1» et le temps total du cycle.

Donc, il y a deux paramètres qui définissent un signal « PWM » :

- Le temps d'un cycle.
- Le rapport cyclique.

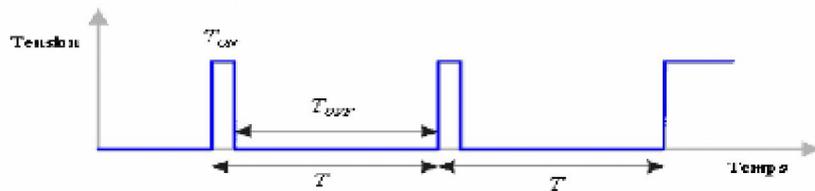


Figure 3-15 Signal PWM avec un rapport cyclique de 10%

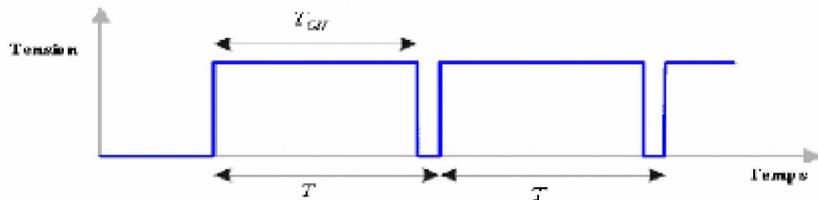


Figure 3-16 Signal PWM avec un rapport cyclique de 90%

La valeur moyenne de la tension U_1 sera égale à :

$$U_1 = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} U_{ah} dt + \int_{\alpha T}^T 0 dt \right] = \alpha \cdot U_{ah}$$

← Bilan sur une période
← Transistor Q bloqué
← Transistor Q saturé
..... (3-8)

Donc, la tension moyenne U_1 varie en fonction du rapport cyclique.

La fréquence a été choisie arbitrairement à 50KHz avec un PWM sur 8 bits par le pic 16F877.

3.4.2 Module d'isolation (optocoupleur)

Un optocoupleur est un composant qui permet le transfert de l'information entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre électriquement. La première partie est un émetteur et la seconde partie est un récepteur. On peut l'assimiler à un composant qui a une entrée (émetteur) et une sortie (récepteur). On parle d'émission, parce qu'il s'agit d'une émission de lumière d'où le préfixe « **opto** » de l'optocoupleur. L'émetteur produit donc de la lumière (qui peut être visible ou invisible), et le récepteur qui est sensible à la lumière émise (sensibilité maximale à la longueur d'onde utilisée pour la partie émission). L'optocoupleur utilisé dans notre circuit est le 4N25 de type phototransistor.

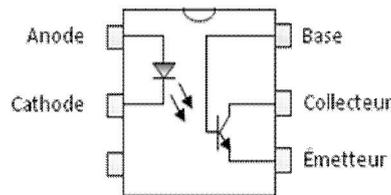


Figure 3-17 Schéma de l'optocoupleur 4N25

3.4.3 Driver IR2111

C'est un circuit intégré qui permet le pilotage en haute fréquence de 2 MOSFET ou de 2 IGBT, sous des tensions pouvant atteindre jusqu'à 600V. Dans ce montage, les condensateurs C_1 , C_2 assurent le filtrage pour les alimentations V_{CC} et V_B . La tension V_{CC} doit être comprise entre 10V et 20V. L'alimentation V_B est obtenue à partir de V_{CC} , par la charge de C_2 à travers la diode D et Load, lorsque T_2 est saturé. Le driver IR2111 possède un temps mort entre ses deux sorties logique HO et LO afin d'éviter un court-circuit de la tension d'alimentation à travers les deux MOSFET, donc ces derniers ne seront jamais dans la même état, soit fermées ou ouvertes.

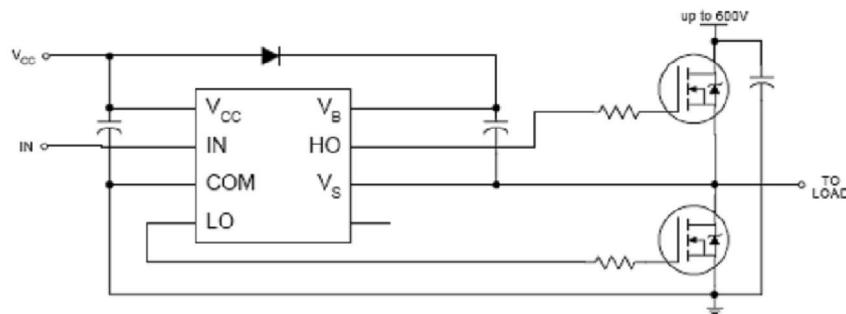


Figure 3-18 Connexion typique du circuit IR2111

3.4.4 MOSFET IRF840 de sortie

Le transistor à la sortie joue le rôle d'un interrupteur de bloquer ou débloquer le récepteur. Il est de type MOSFET IRF840 utilisé déjà dans le hacheur. Dans le cas d'une décharge profonde ou des températures de congélation, le PIC commande le MOSFET de sortie pour bloquer le récepteur. Cette commande est faite à travers une LED de signalisation, et un optocoupleur pour avoir une bonne isolation de PIC. (Figure 3-19 & Figure 3-20)

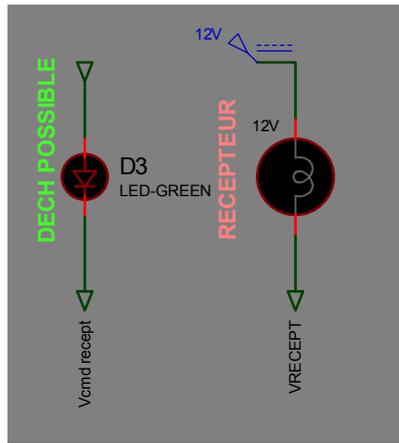


Figure 3-19 Diode de signalisation (Verte) et Récepteur

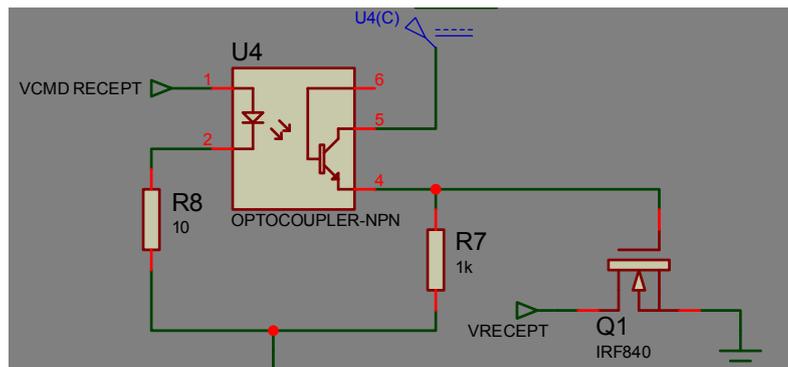


Figure 3-20 MOSFET de sortie et Optocoupleur

3.5 Afficheur LCD et LEDs

L’afficheur LCD et LEDs permettent la lecture et la signalisation des différents niveaux de la batterie et de la température, et de signaler l’état de connexion du récepteur.

caractéristiques Signalisation	Couleur ou type	Fonction
LED RD0	Rouge	Vdech Décharge Profonde
LED RD1	Jaune	Vmin Retour à la Phase1
LED RD2	Verte	Vfloat Floating(Phase3)
LED RD3	Bleu	Vmax Absorption (Phase2)
LED RD4	Verte	Reconnexion/ Clignoter avant Déconnexion récepteur
LAMP	-	Récepteur
Afficheur LM016L	16×2Alphanumérique LCD	Visualisation Différents états Batt/Recept

Tableau 3-2 Différentes signalisations et leurs fonctions

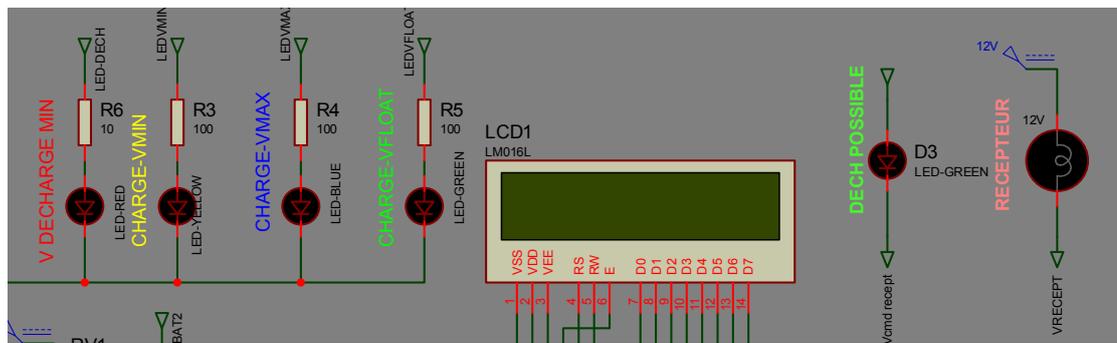


Figure 3-21 Afficheur LCD et LEDs de visualisation états Batt/Recept

3.6 Détecteur de température de la batterie

3.6.1 Capteur de température LM335

La gamme de température le capteur LM335 comprise entre -40 °C et 100 °C , le rend adéquat pour notre application. Il délivre une tension proportionnelle à la température absolue. Pour cela, il doit être traversé par un courant dont l'intensité est comprise entre $400\text{ }\mu\text{A}$ et 5 mA . On a alors:

$$U = a \times T \dots\dots\dots (3-9)$$

Avec $a = 10\text{ mV.K}^{-1}$

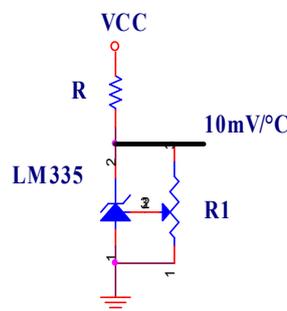


Figure 3-22 Capteur de température LM335

3.7 Partie commande PIC16F877

On travail avec un PIC 16F877 caractérisé par : 2 PWM et 8 entrées analogiques, mais que nous connaissons bien car on l'utilise dans plusieurs de nos modules. Pour plus de détail.

Le PIC 16F877 de microchip, donc il appartient à la famille Mid-Range (16) : sa mémoire est de type Flash (F), sa référence (877), sa fréquence d'horloge est de (20MHz). L'horloge fournie au PIC est pré-divisée par 4 au niveau de celle-ci. C'est cette base de temps qui donne le temps d'un cycle. Nous avons utilisé un quartz de 20MHz, donc 5000000 de cycles/seconde, or, comme le PIC exécute pratiquement une instruction par cycle, hormis les sauts, cela donne une puissance de l'ordre de 5MIPS (5 Million d'Instructions Par Seconde). C'est une vitesse de traitement très satisfaisante.

La tension de fonctionnement du PIC varie entre 2 à 5 volts et sa consommation est très faible :

- $<2\text{ mA}$ à 5V pour une fréquence du Quartz=4Mhz.
- $20\text{ }\mu\text{A}$ à 3V pour une fréquence du Quartz à 32Khz.
- $<1\text{ }\mu\text{A}$ en mode sommeil.

Les broches du PIC et leurs différentes fonctions sont montrées par la Figure 3-23 et le Tableau

3-3 .

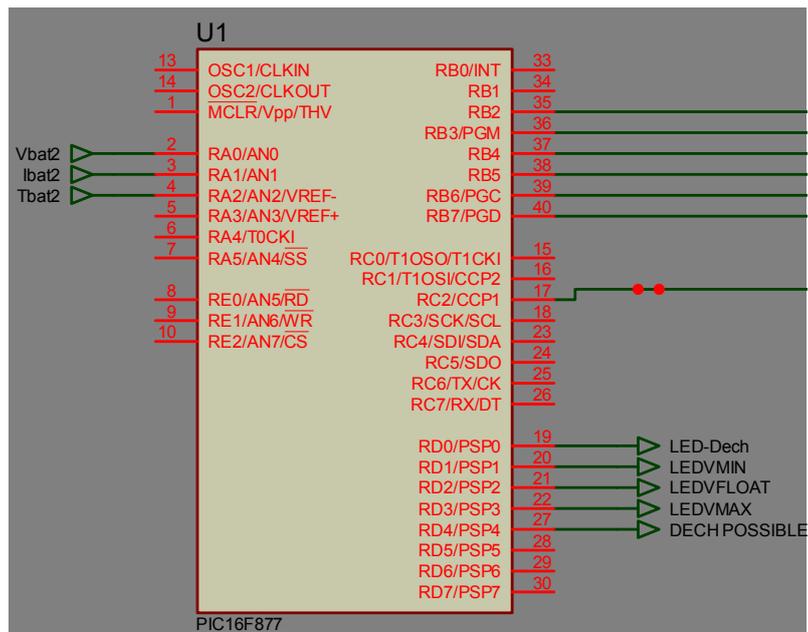


Figure 3-23 Les broches du PIC16F877et leurs différentes fonctions

caractéristiques Signalisation	Fonction	Détails
Ports RA	Entrées analogiques de Mesure	RA0 :Vbat RA1 : Ibat RA2 : Tbat
Ports RB	Commandes Afficheur	-
Ports RD	Commandes Diodes de Signalisation et MOSFET de sortie	RD0 :Vdech RD1 : Vmin RD2 : Vfloat RD3 :Vmax RD4 : Vrec (Dech possible)& Commande MOSFET de sortie
RC2/CCP1	Générer signal MLI	50KHz
OSC1/OSC2	Branchement Oscillateur 20MHz	-
Pins 12/32	VDD	-
Pins 11/33	VSS	-

Tableau 3-3 Broches du PIC et leurs différentes fonctions

3.8 Conclusion

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la partie programme avec les différents algorithmes, les résultats affichés et les courbes de charge/décharge.

4. PROGRAMME DE REGULATION ET RESULTATS SUR PROTEUS

4.1 Introduction

Nous allons voir l'organigramme la méthode de charge/décharge, l'organigramme, le programme sur miKroc et les résultats de l'affichage avec les courbes obtenues sur PROTEUS.

4.2 Méthode de charge/décharge et compensation thermique

4.2.1 Méthode de la charge

C'est la méthode de Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge et une phase final à niveau de courant constant (Voir Figure 2-13).

Donc, la batterie est chargée idéalement en 3 différentes phases :

➤ Phase 1 : Le courant est limité à un tau d'environ $5A : 1/5$ de la capacité nominale (donc l'idéale d'utiliser une batterie de capacité=25Ah). La tension augmente progressivement jusqu'à atteindre son seuil maximum régulé à $V_{max}=14,4$ Volts (2,4V/elt). Pour faire augmenter la tension on augmente la valeur du rapport cyclique.

➤ Phase 2 : La tension de charge est régulée à $V_{max}=14,4$ Volts (2,4V/elt), le courant de charge diminue alors jusqu'à devenir inférieure à $I_{min}=C/100$. La tension ne doit pas rester au dessus de 14,4V plus longtemps (Cette phase doit durer maximum 2heures). La batterie est chargée à l'issue de cette phase. Cette tension est régulée en variant le rapport cyclique (abaisser et augmenter).

➤ Phase 3 : Une fois la batterie est chargée (après environ 20h de charge ou $I < I_{min}$), on passera en mode charge d'entretien(Floating) pour la maintenir à 100% de charge. La tension alors appliquée à la batterie sera autour de $V_{float}=13,6V$ (entre 2,25V et 2,28V par élément). Tension de floating est régulée en variant le rapport cyclique (abaisser et augmenter).

On ne revient à la Phase1 que lorsque V_{bat} descend au-dessous de $V_{min}=12.6V$. (Voir Tableau 4-1).

Seuils \ Phase	Phase 1 (I_{max})	Phase 2 (V_{max})	Phase 3 (V_{float})
Début Phase	« $V < V_{min}$ » ou « $Charg=1$ »	Première atteinte « $V > V_{max}$ »	« $V > V_{max}$ » & « $I < I_{min}$ »
Fin Phase	Première atteinte $V > V_{max}$	« $V > V_{max}$ & $I < I_{min}$ »	« $V < V_{min}$ »
$I_{max}=C/5=5A$	$I < I_{max}$	$I < I_{max}$	$I < I_{max}$
$I_{min}=C/100=50mA$	-	-	-
$V_{min}=12.6V$	-	$V > V_{min}$	$V > V_{min}$
$V_{max}=14.4V$	$V < V_{max}$	$V < V_{max}$	-
$V_{float}=13.6V$	-	-	$V < V_{float}$
Indice de Phase: Charg	« 1 » pour : « $V < V_{min}$ » ou « Initialisation »	1	0

Tableau 4-1 Phases de charge et Seuils

Les variations du rapport cyclique « D » sont obtenus d'après le type du panneau utilisé pour avoir une puissance maximale et des valeurs mesurées aux bornes de la batterie.

Le module PV choisi est le SM55, on a :

- $V_{co}= 21.7V$; $I_{cc} = 3.4A$
- $P_{SM55MAX}=55W$; $I_{SM55MAX}=3.4A$; $V_{SM55MAX}=17.4V$

Donc pour avoir une puissance maximale envoyée à la batterie on doit avoir des rapports cyclique : $D=V_{batt}/V_{SM55MAX}$, dans le tableau suivant on constate que le rapport « D » varie entre « $D_{min}=63\%$ » aux basses valeurs de V_{batt} , et 85% aux hautes valeurs de V_{batt} . Même l'intensité est toujours inférieur à son maximum $5A=C/5$.

Phase V_{SEUIL}	$V_{in}=V_{SM55MAX}$	$P_{SM55MAX}$	$V_{out}=V_{batt}$	$I_{out,max}=I_{batt,max}=P_{SM55MAX}/V_{out}$
11V	17.4V	55W	63%	5A
$V_{dec}=11.4V$	17.4V	55W	65%	-
$V_{dec}=11.6V$	17.4V	55W	66%	-
12V	17.4V	55W	69%	4.58A
$V_{rec}=12.4V$	17.4V	55W	71%	-
$V_{min}=12.6V$	17.4V	55W	72%	-
13V	17.4V	55W	74%	4.23A
$V_{float}=13.6V$	17.4V	55W	78%	-
14V	17.4V	55W	80%	3.92A
$V_{max}=14.4V$	17.4V	55W	82%	-
$V_{max}=15V$	17.4V	55W	85%	3.66A

Tableau 4-2 Valeurs du rapport cyclique pour une intensité du courant maximale aux bornes de la batterie

4.2.2 Méthode de la décharge

Lorsque la tension-batterie baisse jusqu'à la valeur minimale : $V_{dech}=11,4V$, et afin d'éviter une décharge profonde tous les récepteurs sont déconnectés de la batterie en commandant le MOSFET de sortie. Les charges sont reconnectées à nouveau lorsque la tension de la batterie remonte au-delà de la valeur de $V_{rec}=12.4V$.

« Prévenir avant la déconnexion » est une indication importante pour le récepteur. On prévient à $V_{clig}=11,8V$. (Voir Tableau 4-3)

Seuils	Phase	Déconnecter Récepteur	Connecter Récepteur	Clignotement avant déconnexion
Début Commande		« Température de Congélation: $T < T_{min}$ » ou « Décharge Profonde $V < V_{dech}$ »	Fin Déconnexion	« $V < V_{clig}$ » & « Déch=0 »
Fin Commande		« Pas de congélation: $T > T_{min}$ » & « [Pas détection de décharge Profonde : Déch=0] ou [$V > V_{rec}$] »	Début Déconnexion	« $V > V_{clig}$ » ou « Déconnexion »
$V_{dec}=11.4V$		Décharge profonde : $V < V_{max}$	$V > V_{dec}$	$V > V_{dec}$
$V_{clig}=11.6V$		-	-	$V < V_{clig}$
$V_{rec}=12.4V$		-	$V > V_{rec}$	-
$T_{min} = -7^{\circ}C$		Congélation : $T < T_{min}$	$T > T_{min}$	$T > T_{min}$
Indice détection de décharge Profonde: Dech		« Déch=1 » à « la première atteinte de $V < V_{dec}$ »	0	0

Tableau 4-3 Seuils de connexion/déconnexion récepteur et clignotement

4.2.3 Compensation thermique

Le régulateur permet de couper les utilisateurs au-dessous du point de congélation de l'électrolyte « $T_{min} = -7^{\circ}C$ » (Voir Tableau 4-3). Au-dessus de « $-7^{\circ}C$ », Le régulateur utilise des seuils de tensions ajustables compensées de $-5mV/^{\circ}C$ par élément, ce qui correspond à $-30mV/^{\circ}C$ pour une batterie de 12V.

$$V = V_{25} - 0.030 \times (T - 25) \dots\dots\dots (4-1)$$

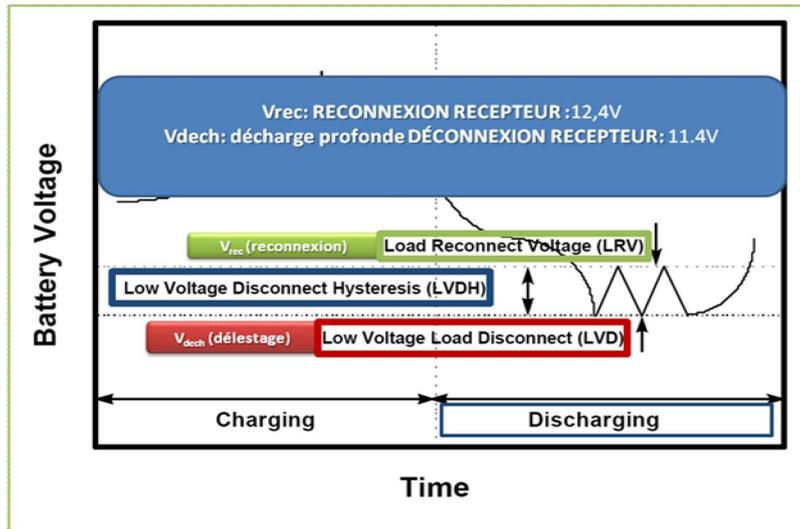


Figure 4-1 Méthode de décharge

4.3 Programme de régulation intelligente

4.3.1 Outil de développement

Pour développer une application autour d'un microcontrôleur on a besoin d'un système de développement. Un système de développement est au minimum un assembleur et parfois un ou des compilateurs adaptés aux langages évolués selon le besoin de l'application à réaliser. Lors de notre projet nous avons utilisé le compilateur « miKro-C ».

4.3.2 Organigrammes

4.3.2.1 Organigramme général

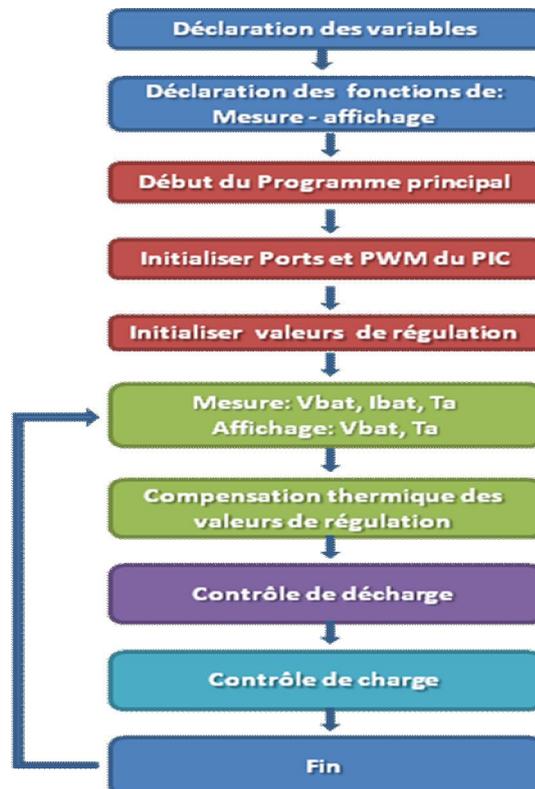


Figure 4-2 Organigramme général

4.3.2.2 Organigramme de décharge

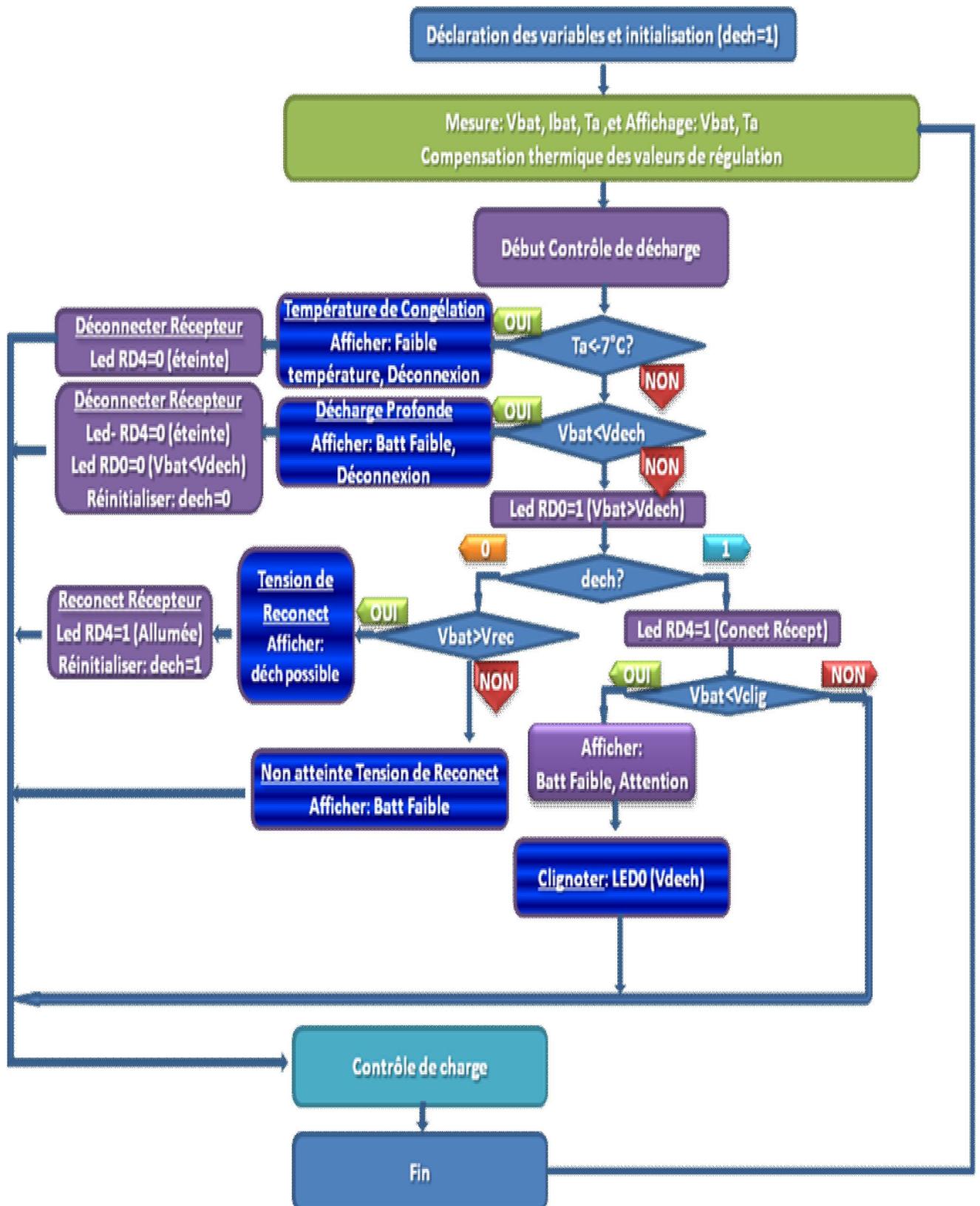


Figure 4-3 Organigramme de décharge

4.3.2.3 Organigramme de charge

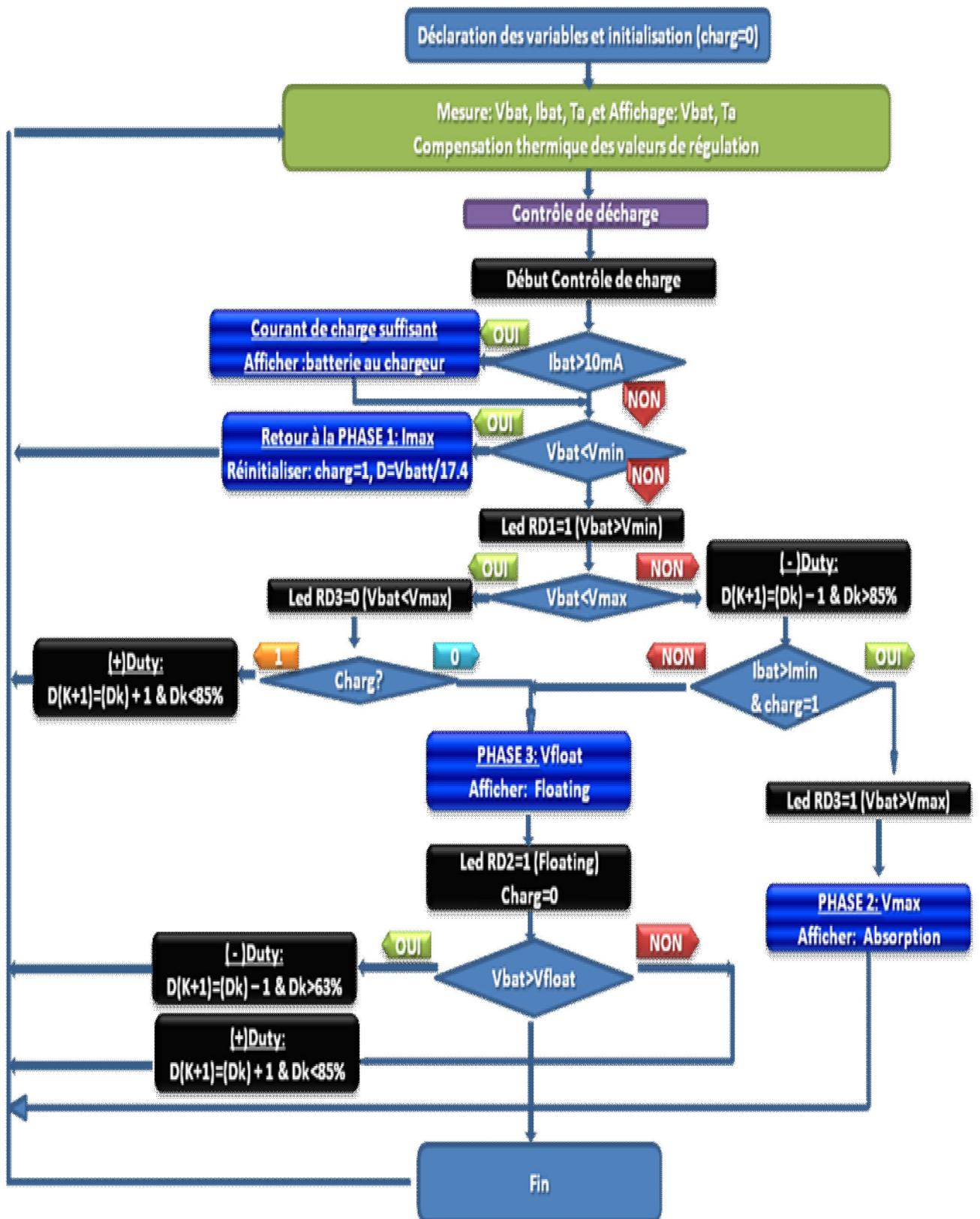


Figure 4-4 Organigramme de charge

4.3.3 Algorithme de la mesure

Par conséquence, avant chaque période de correction du rapport cyclique, le μ contrôleur devra exécuter l'algorithme de mesure de la tension V_{bat} , du courant de charge I_{bat} et de la température ambiante T_a , et de la compensation thermique des seuils de régulation.

Nous ajoutons un petit retard après chaque mesure, pour effectuer la conversion A/N. L'algorithme de mesure et de l'affichage est le suivant :

```

// mesure //
//=====
//=====
mesure:           // étiquette de mesure
    mesure (0);   // read Vbat real * 1000
Delay_ms(100);   // Attendre 100ms pour faire la conversion ADC
    mesure (1);   // read Ibat real * 1000
Delay_ms(100);   // Attendre 100ms pour faire la conversion ADC
    mesure (2);   // read Ta real *1000
Delay_ms(100);   // Attendre 100ms pour faire la conversion ADC

// Afficher mesure de tension et température
//=====
//=====

Lcd_Cmd (Lcd_CLEAR); // Clear display
Lcd_Out (1, 1,tension); //text écrire "tension "ligne 1 colonne 1
LCDPROG (0);         // écrire VALEUR DE la tension
                    //ds ligne 2 colonne 11
Delay_ms(300);      // 1000ms pause

Lcd_Cmd (Lcd_CLEAR); // Clear display
Lcd_Out (1, 1,Temp); // écrire "Température(°C) "ligne 1 colonne 1
LCDPROG (2);         // écrire VALEUR DE la Temperature
                    //ds ligne 2 colonne 1
Delay_ms(300);      // 1000ms pause

```

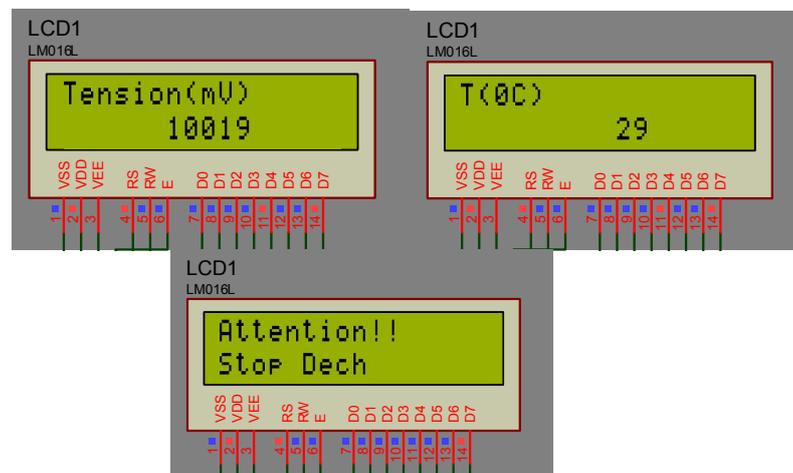


Figure 4-5 Affichage: tension-température-état de charge

4.3.4 Algorithme de la compensation thermique des valeurs seuils

Le régulateur utilise un coefficient de compensation de : $-30\text{mV}/^\circ\text{C}$ pour une batterie de 12V.

```

// compensation thermique des tensions de régulation
//=====
//=====
// coefficient négatif de compensation thermique: (-5mv/°C)*6Cel=-30mV/°C

// les valeurs de régulation de charge
//=====
Vmax = 14400-(Ta-25000)*30/1000 ; // Vmax is real * 1000
Vmin = 12600-(Ta-25000)*30/1000 ; // Vmin is real * 1000
Vflt = 13600-(Ta-25000)*30/1000 ; // Vflt is real * 1000

// les valeurs de régulation de décharge
//=====
Vdech = 11400-(Ta-25000)*30/1000 ; /* Vdech is real * 1000
valeur minimale de décharge,déconnecter le récepteur */
Vrec = 12400-(Ta-25000)*30/1000 ; /* Vrec is real * 1000
Valeur de reconnexion du récepteur */
Vclig = 11800-(Ta-25000)*30/1000 ; /* Vclig is real * 1000
danger, clignoter avant déconnexion */
    
```

4.4 Résultats sur PROTEUS : Contrôle de la décharge

4.4.1 Vérification des températures basses

Pour des températures au-dessous de la température de congélation (-7°C), le récepteur sera déconnecté, voir les captures de simulation suivantes :

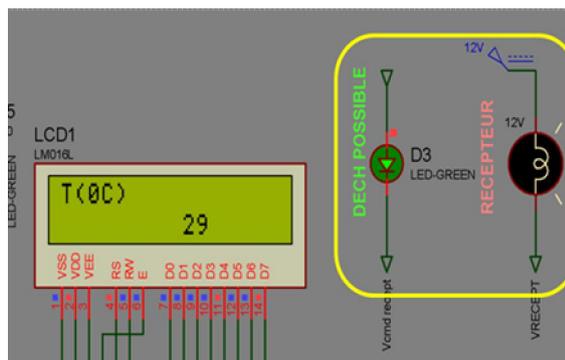


Figure 4-6 Récepteur connecté à « Ta=29°C > -7°C », LED verte allumée

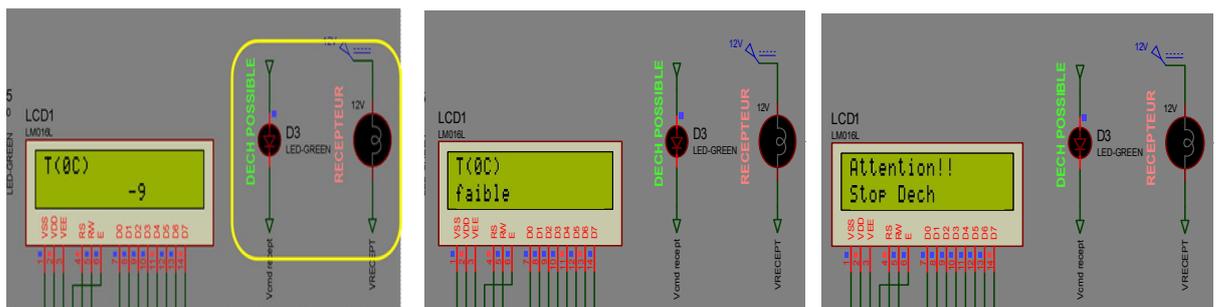


Figure 4-7 Récepteur déconnecté à « Ta= -9°C < -7°C », LED verte éteinte

4.4.2 Vérification des décharges profondes

4.4.2.1 Clignoter avant que le récepteur soit déconnecté : $V_{dec} < V_{bat} < V_{clig}$

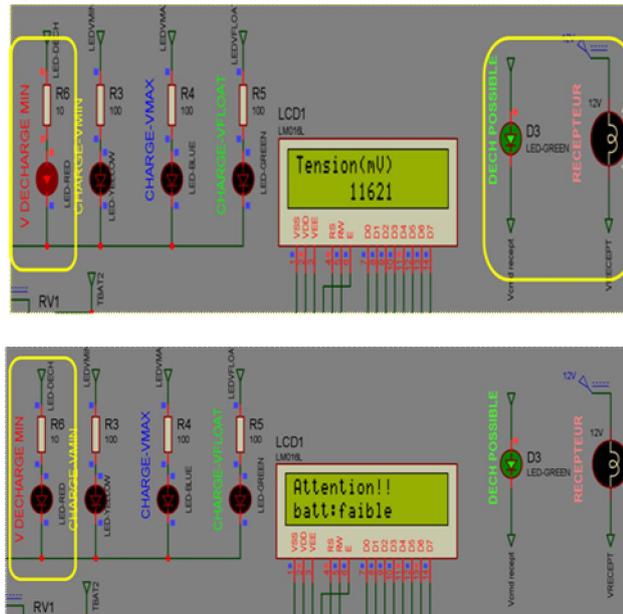


Figure 4-8 Clignoter « LED rouge » avant que le récepteur sera déconnecté : $V_{dec} < V_{bat} < V_{clig}$

4.4.2.2 Déconnecter le récepteur à : $V_{bat} < V_{dec}$

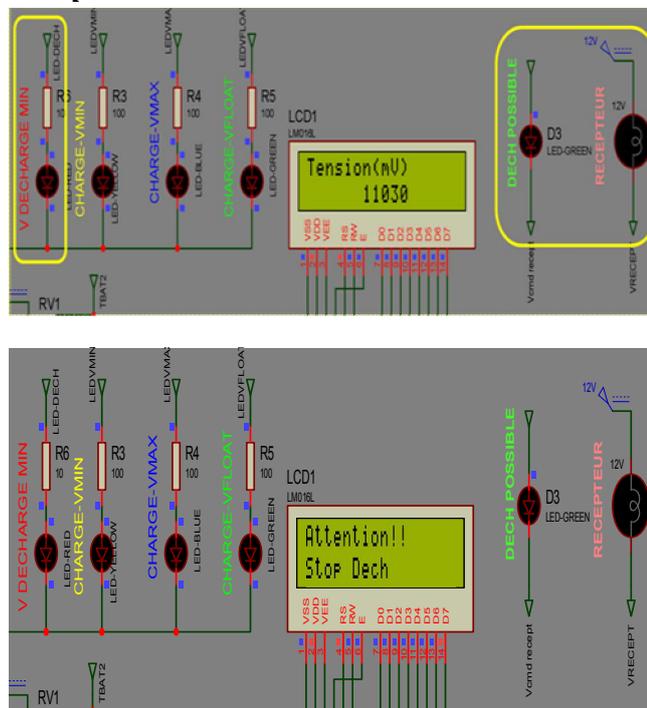


Figure 4-9 Déconnecter le récepteur à : $V_{bat} < V_{dec}$

4.4.2.3 Ne pas reconnecter le récepteur jusqu'à : $V_{bat} > V_{rec}$

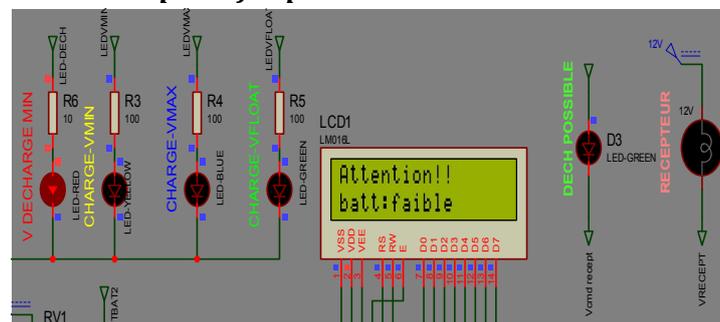


Figure 4-10 récepteur déconnecté à : $V_{bat} < V_{rec}$

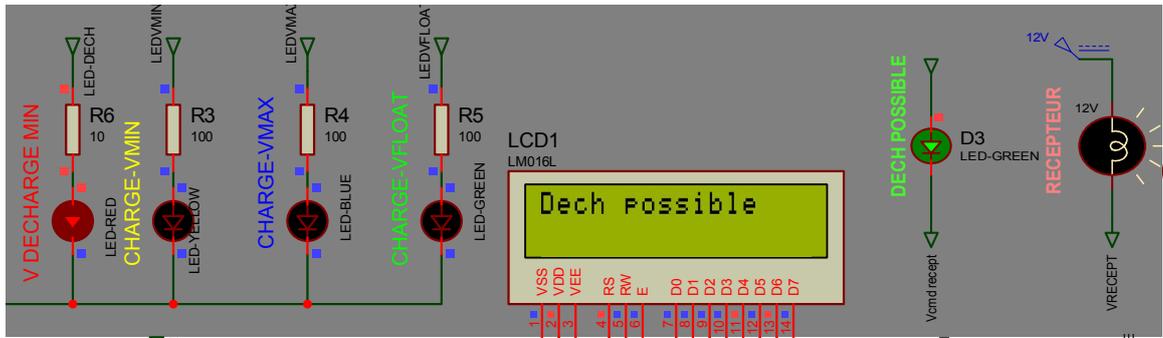


Figure 4-11 reconnecter le récepteur à :Vbat> Vrec

4.5 Résultats sur PROTEUS : Contrôle de la charge

4.5.1 Variation du rapport cyclique au cours de la charge

Une régulation doit comparer la valeur désirée (consigne) à la valeur mesurée (sortie). Cette comparaison s'appelle l'erreur. En fonction de l'erreur, un correcteur va commander le rapport cyclique pour que l'erreur devienne nulle suivant une certaine loi. L'objectif de la régulation est que la sortie soit égale à la consigne, donc que l'erreur soit nulle. Le correcteur pour réguler la tension et le courant correspond à l'algorithme suivant : (Voir Tableau 4-2)

- Si l'erreur est négative $(V_{bat} < V_{seuil})$ alors (+)Duty: $D(K+1) = (D_k) + 1$ & $D_k < 85\%$ (fonction récursive). En effet, lorsque l'erreur est négative, il faut que le rapport cyclique augmente pour que la tension de sortie augmente et que le courant augmente.
- Inversement si l'erreur est positive $(V_{bat} > V_{seuil})$ alors (+)Duty: $D(K-1) = (D_k) - 1$ & $D_k < 63\%$.

Pour charger des batteries, une période d'échantillonnage de 100ms est très rapide. Donc la correction sera effectuée chaque 1 seconde environ.

4.5.2 Vérification du courant de charge

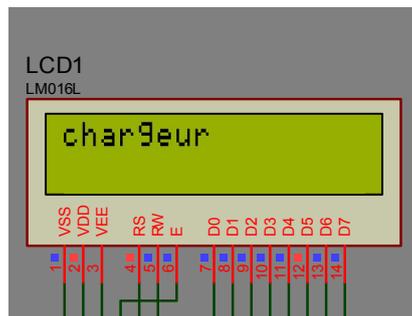
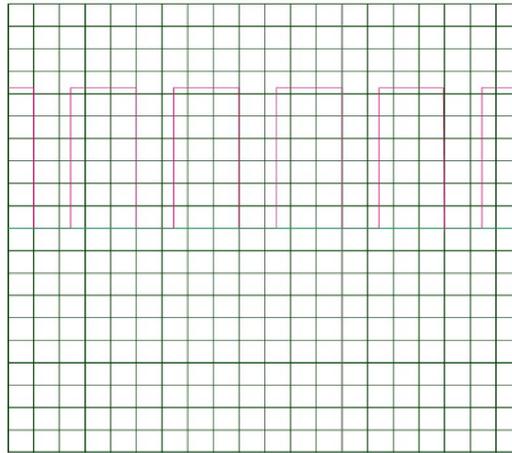


Figure 4-12 Courant $I > 10mA$: courant de charge suffisant - afficher « chargeur »

4.5.3 Vérification du niveau de la tension en charge

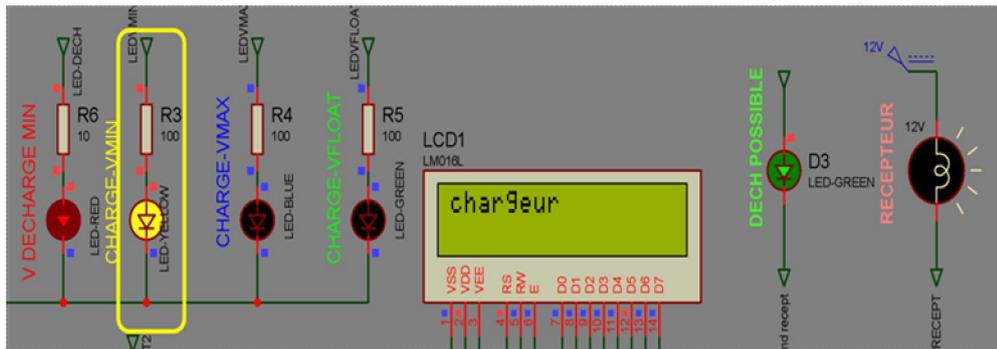
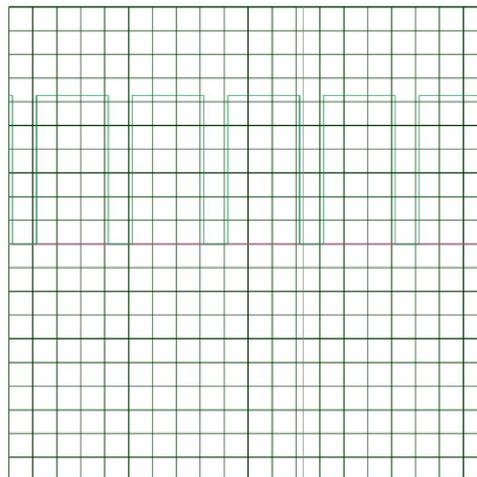
4.5.3.1 Si « $V < V_{min}$ »

Après l'initialisation du rapport cyclique à « $D=63\%$ », et de l'indice « $CHARGE=1$ » et réinitialiser « $D=V_{batt}/17.5$ », pour indiquer un régime de charge vers V_{max} (PHASE1), et augmenter le rapport cyclique $\alpha_{n+1} = \alpha_n + 1$.

Figure 4-13 MLI à $D=\alpha=63\%$

4.5.3.2 Si « $V > V_{min}$ »

Allumer « LED Jaune » si $V > V_{min}$.

Figure 4-14 $V > V_{min}$: Led Jaune alluméeFigure 4-15 MLI à $D=\alpha=75\%$

4.5.4 Début de la phase d'absorption au premier dépassement de V_{max}

4.5.4.1 Basculement autour de V_{max} :

La phase d'absorption coùence au premier dépassement de V_{max} :

- $V_{bat} > V_{max}$: LED bleu allumée, et $(\alpha_{n+1} = \alpha_n - 1)$.
- $V_{bat} < V_{max}$: LED bleu éteinte, et $(\alpha_{n+1} = \alpha_n + 1)$.

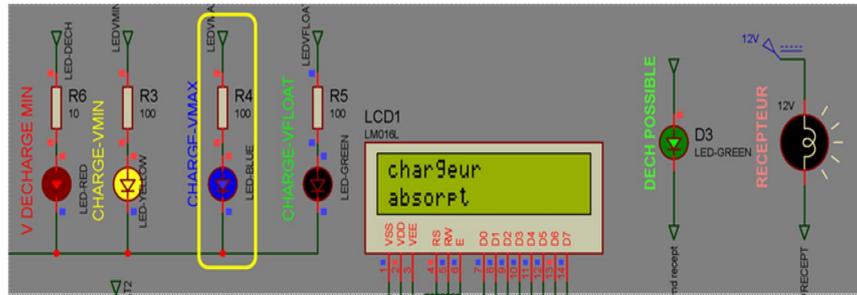


Figure 4-16 $V_{bat} > V_{max}$: Départ phase d'absorption, LED bleu allumée

4.5.5 Chargeur en phase d'entretien (fin d'Absorption)

4.5.5.1 Abaisser la tension à V_{float} (LED Verte allumée)

Si $I_{bat} < I_{min}$, basculement autour de V_{float} :

- $V_{bat} > V_{float}$: LED Verte allumée, et $(\alpha_{n+1} = \alpha_n - 1)$
- $V_{bat} < V_{float}$: LED Verte éteinte, et $(\alpha_{n+1} = \alpha_n + 1)$

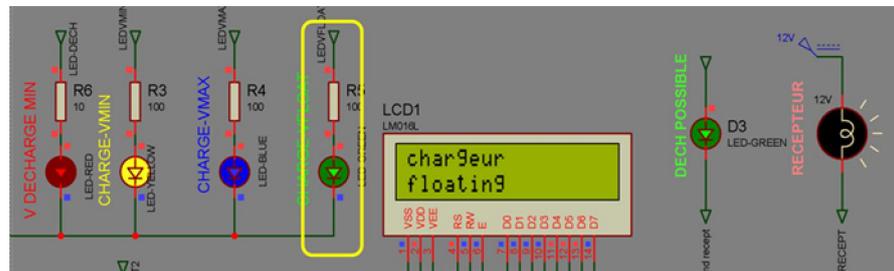


Figure 4-17 Charge en phase de d'entretien (LED Verte allumée)

4.6 Courbes de tension/courant obtenues dans la simulation

Après la visualisation animé de chaque phase de charge de la batterie sur l'afficheur et LEDs simulés, nous allons voir l'allure des courbes de tension-courant en charge, en utilisant l'option : ANALOGUE ANALYSIS de PROTEUS (La température est fixée à 29°C).

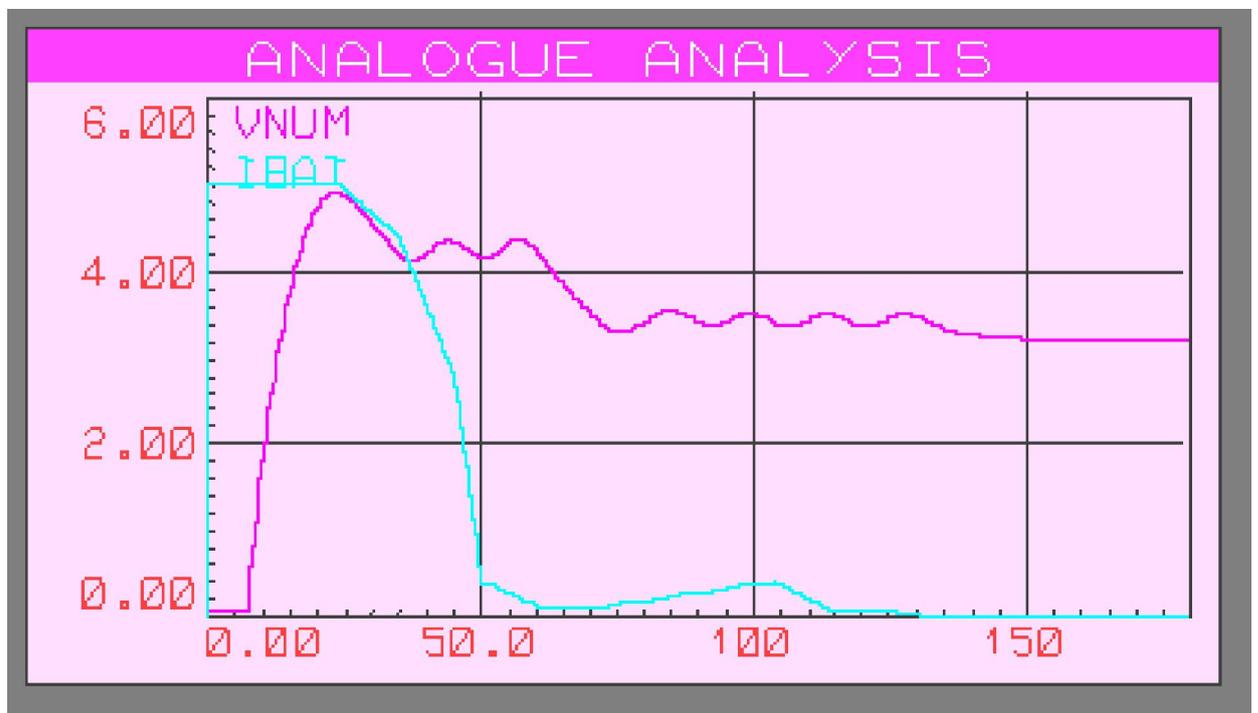


Figure 4-18 Courbes V_{bat} , I_{bat} à 29°C

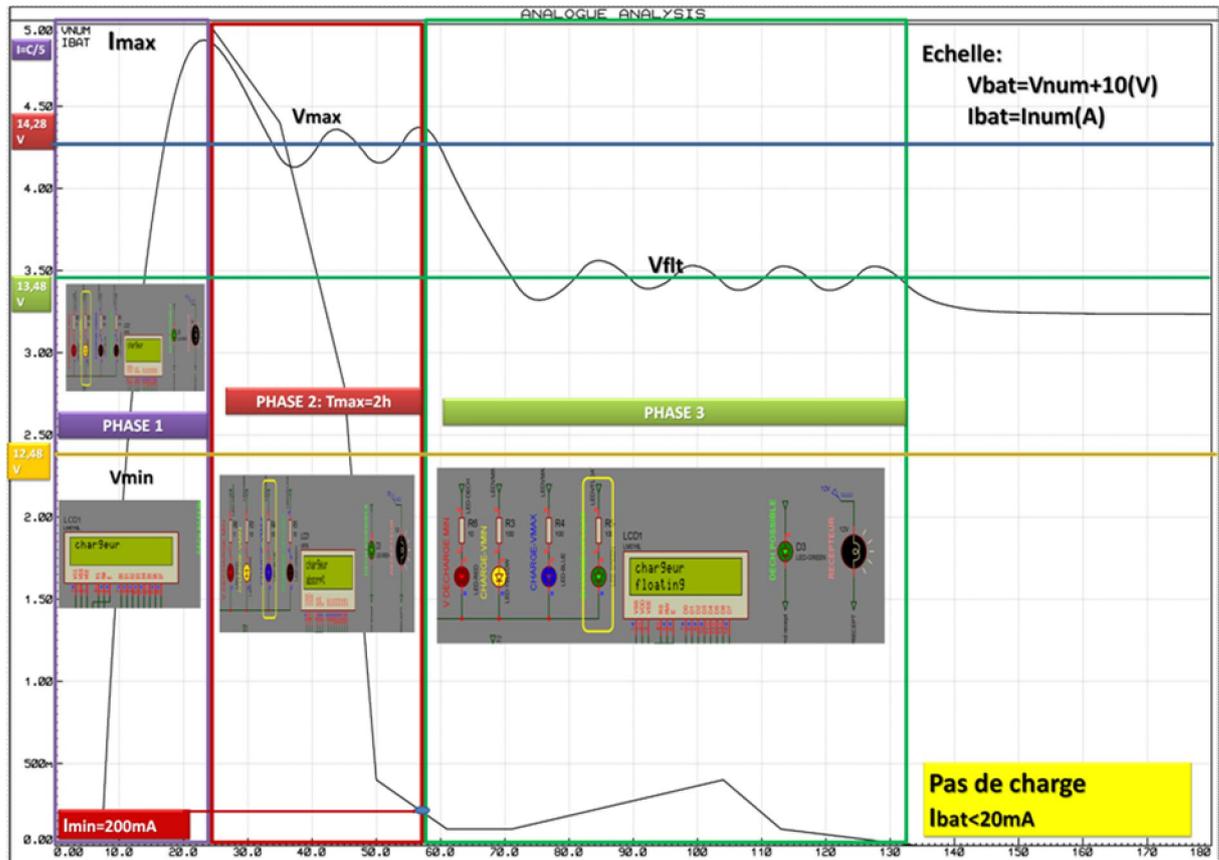


Figure 4-19 Courbes Vbat, Ibat à 29°C avec Afficheur et signalisation LEDs

Les résultats obtenus montrent une similitude entre la courbe de repère (voir Figure 2-13) et les courbes obtenues après la simulation. Les trois phases de charge apparaissent clairement comme suit :

- Phase 1 : Le courant maximal est limité à $I_{max}=5A$, environ 1/5 de la capacité nominale. La tension augmente progressivement jusqu'au dépassement du seuil maximum régulé après la compensation thermique à : $V_{max}=14,4-(29-25)*30/1000=14,28$ Volts .
- Phase 2(absorption): La tension de charge est réduite et fixée pour basculer autour de $V_{max}=14,28$ Volts, le courant de charge diminue alors jusqu'à $I_{min}=C/100$. La batterie est chargée à l'issue de cette phase.
- Phase 3(floating) : Une fois la batterie est chargée ($I<I_{min}$), on passe au mode charge d'entretien(Floating) pour la maintenir à 100% de charge. La tension alors appliquée à la batterie sera autour de $V_{float}=13,6-(29-25)*30/1000=13,48V$.

4.7 Conclusion

Cette simulation nous a permis de vérifier notre programme avant son implémentation réelle. Les résultats de la simulation ont été bonnes, mais avec des modifications comme le hacheur, la batterie et le panneau photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce modeste travail est la contribution pour développer l'utilisation de l'énergie photovoltaïque, notamment dans les domaines nécessitant l'utilisation des accumulateurs qui sont très coûteux et demandant un contrôle continu de leur état de charge.

Les buts soulignés au début de notre projet de recherche ont été atteints, comme la protection de la batterie contre les surcharges en utilisant la méthode de charge à trois phase, la protection contre les décharges profondes, déconnexion des récepteurs à la température minimale, compensation thermique des valeurs seuils, application de la technique MLI avec un hacheur BUCK et surtout la régulation numérique avec un PIC pas coûteux et fiable.

Si le principe de réaliser un régulateur apparaît facile à comprendre, il n'est pas évident de réaliser un régulateur efficace. On note que pendant l'élaboration de notre travail, nous avons rencontré plusieurs difficultés surtout dans la partie programmation qui requiert plus de rigueur et d'attention. La simulation du programme sous ISIS nous aide beaucoup, mais le hachage demande beaucoup de ressources au PC. Donc, on a du modifier les temps d'échantillonnage et des compteurs entre la simulation et le programme réel.

Cependant, on peut dire que notre travail nous a permis d'améliorer nos capacités en programmation et simulation, de même il nous a permis d'enrichir nos connaissances dans le domaine des circuits intégrés et des circuits programmables.

Malgré les problèmes rencontrés, nous sommes satisfaits des résultats obtenus puisqu'ils répondent adéquatement aux objectifs fixés au départ. Nous sommes tout de même conscient que, comme dans tout projet, il y'aurait place à l'amélioration. Par plus de recherches et investigations, il serait intéressant comme perspectives de:

1. Faire une étude sur la sécurité du régulateur et du bilan énergétique du chargeur de batterie.
2. Ajouter des protections de polarité inversée et prendre en considération le paramètre de l'âge de la batterie.
3. Adapter l'appareil de façons à ce qu'il soit universel, c'est à dire valable pour tout type de batteries (12V, 14V, 48V) et pour toute capacité.
4. Ajouter le SOC à l'affichage.
5. Avoir un système réellement abouti et finaliser proprement avec observateur d'état en temps réel.
6. Introduire dans le système un dispositif de poursuite du soleil dont le rôle est de garder constamment le rayonnement solaire perpendiculaire au panneau photovoltaïque.
7. Élargir le rôle de notre dispositif pour qu'il puisse poursuivre le point de puissance maximale (MPPT).
8. Optimiser l'utilisation des microcontrôleurs pic, en profitant de leurs caractéristiques.
9. Élargir l'utilisation de notre projet pour d'autres applications (charges alternatives), en introduisant dans le système un onduleur « convertisseur DC/AC ».

ANNEXES

ANNEXE1 : Types des régulateurs disponibles dans le marché mondial

1. MATRIX ENERGY

SOLYTE

SOLYTE

by Matrix Energy Inc



Un régulateur solaire simple et fiable pour des petits systèmes. Grâce à son filtre contre les bruits RF, ce régulateur est aussi idéal pour des applications de télécommunication ou de télémétrie. Le régulateur solaire se monte rapidement sur la boîte de jonction en arrière du module solaire laissant seulement les fils pour le branchement aux batteries! Les caractéristiques incluent la compensation de température, la tension de charge réglable, un large intervalle de température, un très faible courant d'autoconsommation, des indicateurs DELs optionnel pour l'état des batteries. Garantie de trois ans.

Description	# Produit / Product #	Description
5 amp, 12 V	04-30-001	5 amp, 12 V
10 amp, 12 V	04-30-002	10 amp, 12 V
20 amp, 12 V	04-30-003	20 amp, 12 V

SUNSAVER

Cette ligne de régulateurs de charge solaires SunSaver fiables convient aux petites applications solaires photovoltaïques. Le pictogramme simple et clair (illustration des branchements) sur ces séries SS et SL facilite l'installation. Disponibles aussi avec une déconnexion à basse tension des batteries. Garantie 5 ans.



Product #	Model	Maximum Current (A)	Voltage (V)	Temperature Compensation	Low Voltage Disconnect	Metering
04-27-006	SG-4	4	12	Yes / Oui	No / Non	No / Non
04-27-012	SS-6	6	12	Yes / Oui	No / Non	No / Non
04-27-013	SS-6L	6	12	Yes / Oui	Yes / Oui	No / Non
04-27-007	SS-10	10	12	Yes / Oui	No / Non	No / Non
04-27-008	SS-10L	10	12	Yes / Oui	Yes / Oui	No / Non
04-27-009	SS-10L-24	10	24	Yes / Oui	Yes / Oui	No / Non
04-27-010	SS-20L	20	12	Yes / Oui	Yes / Oui	No / Non
04-27-011	SS-20L-24	20	24	Yes / Oui	Yes / Oui	No / Non
# Produit	Modèle	Courant maximal	Tension d'opération	Compensation de température	Déconnexion à basse tension	Affichage

PROSTAR

Ces régulateurs utilisent un circuit électronique de charge PWM et tolèrent des températures comprises entre -40 et 850 C. Le dispositif d'égalisation automatique après des décharges profondes répétées, compensation de température (une sonde de température optionnelle pour installation distante des batteries), le sélecteur de batterie selon la tension de charge, et la déconnexion des charges à basse tension des batteries, font partie des caractéristiques de la série ProStar. Consomme seulement 10 mA. La série M inclut un affichage numérique courant/tension. Garantie de cinq ans.

Product #	Model	Maximum Current (A)	Operating Voltage (V)	Remote Temperature Compensation	Low Voltage Disconnect	Adjustable Voltage	Metering
04-27-002	PSTAR-15M	15	12, 24	Option	15	Yes / Oui	Yes / Oui
04-27-004	PSTAR-30M	30	12, 24	Option	30	Yes / Oui	Yes / Oui
# Produits	Modèle	Courant maximal	Tension d'opération	Sonde de température	Déconnexion à basse tension	Tension ajustable	Affichage

MPPT250

Vous pouvez maintenant recharger une batterie 12 volts à partir d'un module solaire haute tension. Le modèle MPPT250 est un sur-alimentateur de courant 25 ampères de haute gamme. À l'aide d'un microprocesseur et de convertisseur de puissance haute efficacité, la puissance qui était auparavant perdue dans les anciens régulateurs MLI ou (PWM en anglais) permet maintenant de fournir un courant plus élevé. Un multimètre digital de haute précision permet d'afficher la tension et le courant de charge des batteries. Une sortie auxiliaire de 100 mA et 13.8V est présente pour assurer que les batteries sont toujours à pleine capacité. Un coupe-circuit de 15 A est également fourni pour protéger les batteries contre les décharges profondes. La décharge des batteries la nuit est éliminée grâce à la présence d'une diode Schottky.



PRODUIT N° : # 04-69-001

REGULATEUR PERSONNALISE

Notre régulateur de charge dernier cri, testé et conçu grâce à la technologie de microcontrôleur offre une meilleure fiabilité dans les sites isolés (sites de télécommunication par exemple). Cette technologie combine, commande intelligente de charge avec flexibilité inégalée. Il permet de contrôler la charge des batteries et peut être conçu pour les systèmes solaires pouvant fournir 120 Ampères. Ce régulateur peut être personnalisé de façon à intégrer des contacteurs au mercure, des disjoncteurs, un dispositif de délestage en cas de basse tension des batteries, des contacts de démarrage de génératrice ou d'alarme, un boîtier en fibre de verre NEMA 4, un afficheur, une sonde de température, un blindage du circuit électronique contre la corrosion, un dispositif anti-foudre etc.



Description	# Produit / Product #	Description
Régulateur PV, 60 A, 12-48 V, NEMA 4X	04-70-001	Industrial PV controller, 180 A, 12-48 V, NEMA 4X
Régulateur PV de 300 A 12-48 V, NEMA 4X	04-70-002	Large Industrial PV controller, 300 A, 12-48 V, NEMA 4X
Dispositif d'entrée additionnel de 30 ou 60 PV	04-70-003	Additional 30 or 60 A PV input channel
Contrôleur additionnel de 30 ou 60 A	04-70-004	Additional 30 or 60 A load control
Shunt additionnel de 200 A	04-70-005	Additional 100 A PV input channel
Contrôleur additionnel de 100 A	04-70-006	Additional 100 A load control
Modem	04-70-007	Modem
Data logging	04-70-008	Data logging
Dispositif anti surtensions 100 A	04-70-009	100 A Battery breaker
Dispositif anti-surtensions 150-250 A	04-70-010	150 -250 A Battery breaker

2. MORNINGSTAR



TRISTAR

La série TriStar de Morningstar est un régulateur de charge muni d'un circuit PWM (modulation d'impulsions) pour des applications industrielles, commerciales et peut être mis avec d'autres régulateurs en parallèle jusqu'à 300 A à 12, 24 ou 48 V. Disponible en 45 et 60 ampères et à trois modes de fonctionnement qui sont, les modes de : charge solaire, commande des charges ou dérivation. La modulation PWM peut être activée/désactivée afin de minimiser les interférences RF. Certification UL et CSA. Garantie de 5 ans.

- # 04-27-014 45 A
- # 04-27-015 60 A

Option

- # 04-27-01 6 Affichage numérique optionnelle
- # 04-27-017 Télécommande optionnelle
- # 04-27-005 Sonde de température optionnelle, 10 mètres



OUTBACK MX60

Ces régulateurs de charge optimiseurs de puissance ou régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracker) permettent à votre système photovoltaïque de fournir le meilleur rendement possible. Le régulateur de charge Outback MX60 a une plage de tension admissible très large donc idéal pour les configurations de modules photovoltaïques ayant des tensions élevées et des batteries de tension faible – il est tout à fait possible de charger des batteries de 24 Volt à partir d'une configuration des modules photovoltaïques en 48 volts CC. Ceci réduit la perte dans le câble et diminue le calibre du câble tout en maximisant la performance du système PV. Conçu pour des courants en sortie allant jusqu'à 60 ampères, le Outback MX60 peut être utilisé pour des batteries configurées entre 12 VCC et 60 VCC avec une tension de circuit ouvert des modules PV (photovoltaïques) aussi élevée que 140 VCC. Les paramètres sont entièrement réglables pour permettre l'utilisation avec pratiquement n'importe quel type de batterie. Le Outback MX60 standard est offert avec un afficheur aux cristaux liquides facile à utiliser. Quatre lignes de lecture soient 80 caractères permettent d'afficher les paramètres programmables et les lectures enregistrées par le système d'acquisition de données qui a une capacité de mémoire de 64 jours.



- # 04-53-036 Contrôleur, 60 A
- Options:
- # 08-53-042 Sonde de température à distance

3. XANTREX



Cette ligne de régulateurs est très polyvalente. Résistant et performant, ces régulateurs solaires peuvent aussi fonctionner en mode de régulateurs de charges consommatrices. Chacun offre un dispositif de réglage de la tension; en option, un afficheur numérique et un dispositif de compensation de température. Pour les batteries assujetties aux températures au-dessus et en dessous de 25°C, utilisez une sonde de température à distance pour ajuster automatiquement la tension de charge et garder les batteries plus performantes tout en augmentant leur durée de vie.



- OPTION**
- # 04-16-001: Sonde de température, 15 pieds
 - # 04-16-002: Sonde de température, 25 pieds
 - # 04-16-003: Sonde de température, 35 pieds

Product #	Model	Maximum	Operating	Low Voltage	Adjustable
		(A)	(V)	(A)	
04-16-004	C-35	35	12, 24	35	Yes / Oui
04-16-005	C-40	40	12, 24, 48	40	Yes / Oui
04-16-007	C-60	60	12, 24, 48	60	Yes / Oui
# Produit	Modèle	Courant	Tension	Déconnexion à basse	Tension

4. BLUE SKY

La technologie brevetée MPPT permet d'augmenter le rendement du courant de charge jusqu'à de 30% ou plus comparativement aux régulateurs de charge conventionnels particulièrement lorsque les températures sont faibles ou lorsque les batteries subissent des décharges plus profondes. Les modèles de 25 ampères offrent une meilleure précision de charge par modulation PWM, en plus jusqu'à huit régulateurs de charge peuvent être gérés ensemble en réseau.

- Option:
- 04-63-006 Afficheur à distance IPN
 - 04-63-013 Sonde de température, 20 pi



Product	Model	Maximum Current	Voltage	Temperature Compensation	Metering	Aux. Load Control/ Dual Battery	Equalize	Warranty
04-63-001	SB2000E	25	12	Optional	Yes	No	Auto	3
04-63-002	SB2512i	25	12	Optional	Yes	No	Auto	3
04-63-003	SB2512ix	25	12	Optional	Yes	No	Auto	3
04-63-007	SB3024I	30	12/24	Optional	Optional	20A	Auto/Manual	2
04-63-008	SB3024Di	30	12/24	Optional	Optional	20A	Auto/Manual	2
04-63-009	SB50DL	50	12/24	Optional	Optional	No	Auto/Manual	2
Produit	Modèle	Courant Maximal	Tension d'operation	Température de compensation	Affichage	Sortie Aux./Batterie auxilliaire	Égalisation	Garantie

ANNEXE2 : Différents types des batteries selon leur composition

- **Accumulateurs au plomb « ouvert »**

L'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. Cet élément Plomb-acide se compose de 2 électrodes de Plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué. La tension nominale est de 2V par élément.

- **Accumulateurs au plomb étanche**

Ils ont les mêmes caractéristiques que les Plomb « ouverts » mais ils sont étanches, c'est-à-dire qu'ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien.

Les avantages essentiels de la technologie Plomb pour le photovoltaïque sont : la longévité, le rapport qualité/prix, un entretien faible ou nul, une bonne tenue aux températures extrêmes, et la possibilité de charge à courant faible.

Cependant, il faut éviter les décharges profondes et les surcharges et il faut maintenir ces batteries chargées quand on les stocke.

- **Accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd)**

La tension nominale est de 1,2V par élément. Ces accumulateurs sont plus intéressants pour le solaire, du fait de leur meilleure efficacité de charge à faible courant et de leur bonne tenue aux basses températures. Ils sont surtout utiles pour des capacités de stockage inférieures à 2 Ah. Cependant, leur prix est élevé et le cadmium est toxique pour l'environnement.

- **Accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH)**

Ces accumulateurs sont dérivés des NiCd et ont été développés pour augmenter la capacité par unité de volume, favoriser les charges rapides et éliminer le cadmium. Ils sont plus compacts que les NiCd.

Les avantages des accumulateurs NiCd et NiMH pour le photovoltaïque surtout dans les applications professionnelles haut de gamme, sont : de petites capacités disponibles sous de multiples formes de 30 à 2000 Ah, leur compacité, une excellente tenue à la chaleur et une gamme de tensions disponible plus grande du fait de la valeur de 1,2V par élément.

Cependant, ils présentent de nombreux inconvénients comme l'autodécharge, une charge difficile pour les NiMH à moins de 0°C, et un effet mémoire quand les accumulateurs sont peu sollicités.

- **Accumulateurs Lithium Ion**

Les batteries lithium-ion acceptent des charges électriques plus importantes que les batteries au nickel cadmium. Le lithium étant le métal le plus léger, ces batteries permettent une autonomie plus longue dans un boîtier moins lourd et compact. La batterie Li-ion nécessite peu d'entretien, ce qui constitue un avantage qu'aucune autre composition chimique ne peut égaler.

Il n'y a pas de mémoire et aucun recyclage périodique n'est requis pour prolonger la durée de vie de la batterie. En plus de sa densité d'énergie élevée et de son poids léger, le degré d'autodécharge de la Li-ion est deux fois moins élevé que celui de la NiCd et de la NiMH, ce qui fait de la Li-ion un produit qui convient très bien aux applications modernes utilisant des jauges à essence.

Par contre, la Li-ion est encore cher, fragile et requiert un circuit de protection pour assurer un fonctionnement sécuritaire. Le courant de charge est modéré, et la charge de la batterie doit être effectuée en respectant des normes rigoureuses. En outre, la Li-ion est sujette au vieillissement, qu'elle soit utilisée ou non.

- **Accumulateurs Lithium Ion Polymère**

Apparues en 1999, les batteries Lithium ion polymère sont une variante de la technologie Lithium ion. Les performances sont sensiblement les mêmes, mais l'électrolyte est remplacée par un polymère gélifié, qui permet de donner toutes les formes possibles à la batterie. Encore chère aujourd'hui, cette technologie est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins chère que le lithium-ion classique.

- **Batteries en développement**

D'autres batteries sont en développement principalement chez les constructeurs s'intéressant aux voitures électriques. On peut citer également un développement qui utilise de l'air comprimé, l'intérêt potentiel de ce procédé étant la grande durée de vie prévue et l'absence de composants chimiques à recycler.

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1 Différents organes du système photovoltaïque _____	8
Figure 1-2 De la cellule au champ photovoltaïque _____	8
Figure 1-3 Cellule solaire (photopile) _____	9
Figure 1-4 Effet photovoltaïque _____	9
Figure 1-5 Caractéristique courant-tension d'une photopile _____	10
Figure 1-6 Différence de caractéristiques des cellules au silicium monocristallin et amorphe _____	11
Figure 1-7 Modélisation du panneau photovoltaïque _____	12
Figure 1-8 Caractéristiques courant- tension d'un panneau photovoltaïque réf. BP585F pour différentes températures à un éclairement de 1kW/m2 [13] _____	12
Figure 1-9 Influence de l'éclairement _____	13
Figure 1-10 Le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit _____	16
Figure 1-11 Courbes intensité/potentiel associées aux réactions de charge/décharge _____	17
Figure 1-12 Constitution interne des accumulateurs aux Plomb _____	18
Figure 1-13 Variation de la tension nominale en fonction de l'état de charge _____	19
Figure 1-14 Capacité nominale en fonction du courant de charge à T =25°C _____	20
Figure 1-15 Schéma électrique équivalent d'une batterie _____	22
Figure 1-16 Courbes de charge/décharge simulées pour un courant de charge ou de décharge de 125AH _____	24
Figure 1-17 Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de charge _____	25
Figure 1-18 Réaction qui se produit lors de la décharge _____	26
Figure 1-19 Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de décharge _____	27
Figure 1-20 Photo du montage utilisé _____	27
Figure 1-21 Courbe de l'évolution de la tension au cours de la décharge _____	28
Figure 1-22 Courbe de l'évolution de l'intensité au cours de la décharge _____	28
Figure 1-23 Courbe de l'évolution de la capacité au cours de la décharge _____	28
Figure 1-24 Tension de charge recommandée pour différents températures de batterie _____	30
Figure 1-25 Principe d'une diode anti-retour _____	31
Figure 2-1 le régulateur dans le système photovoltaïque _____	34
Figure 2-2 Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge [1] _____	35
Figure 2-3 Régulation de la tension batterie (hystérésis) en décharge _____	39
Figure 2-4 Cycle d'hystérésis pour la décharge _____	40
Figure 2-5 Régulation de la tension dans un régulateur "tout ou rien" [24] _____	42
Figure 2-6 Régulateur modifié à tension constante [24] _____	42
Figure 2-7 Charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début et à la fin de la charge [28] _____	43
Figure 2-8 Charge à courant constant, tension constante [20] _____	44
Figure 2-9 Schéma d'un régulateur de type série _____	47
Figure 2-10 Schéma d'un régulateur de type shunt _____	47
Figure 2-11 Chargeur DC-DC _____	48
Figure 2-12 Régulateur solaire MPPT _____	49
Figure 2-13 Courbe de charge de la batterie plomb-acide 12V [G] _____	50
Figure 2-14 Enregistreur de données Steca _____	51
Figure 2-15 Régulateur "Aeca" équipé avec un écran de visualisation _____	51
Figure 3-1 Schéma de base de notre régulateur _____	53
Figure 3-2 Schémas sur PROTEUS du régulateur _____	54
Figure 3-3 Schéma électrique de Mesure de courant _____	54
Figure 3-4 Détecteur du courant de la batterie _____	55

Figure 3-5 Schéma électrique du hacheur	56
Figure 3-6 Schéma de principe d'un convertisseur série abaisseur	57
Figure 3-7 Schéma et représentation de l'IRF840 sous forme d'un interrupteur	58
Figure 3-8 Schéma de principe d'un convertisseur série	59
Figure 3-9 Circuit équivalent du premier mode de fonctionnement	59
Figure 3-10 Circuit équivalent du deuxième mode de fonctionnement Pendant l'intervalle : $T_{ON} < t < T$	60
Figure 3-11 Courant à travers l'inductance	60
Figure 3-12 Pour $D=0.5$, on a: $T_{ON}=T_{OFF}=T/2$	61
Figure 3-13 Charge et décharge du condensateur	61
Figure 3-14 le courant à travers le condensateur	61
Figure 3-15 Signal PWM avec un rapport cyclique de 10%	62
Figure 3-16 Signal P WM avec un rapport cyclique de 90%	62
Figure 3-17 Schéma de l'optocoupleur 4N25	63
Figure 3-18 Connexion typique du circuit IR2111	63
Figure 3-19 Diode de signalisation (Verte) et Récepteur	64
Figure 3-20 MOSFET de sortie et Optocoupleur	64
Figure 3-21 Afficheur LCD et LEDs de visualisation états Batt/Recept	65
Figure 3-22 Capteur de température LM335	65
Figure 3-23 Les broches du PIC16F877et leurs différentes fonctions	66
Figure 4-1 Méthode de décharge	70
Figure 4-2 Organigramme général	70
Figure 4-3 Organigramme de décharge	71
Figure 4-4 Organigramme de charge	72
Figure 4-5 Affichage: tension-température-état de charge	73
Figure 4-6 Récepteur connecté à « $T_a=29^{\circ}\text{C} > -7^{\circ}\text{C}$ », LED verte allumée	74
Figure 4-7 Récepteur déconnecté à « $T_a= -9^{\circ}\text{C} < -7^{\circ}\text{C}$ », LED verte éteinte	74
Figure 4-8 Clignoter « LED rouge » avant que le récepteur sera déconnecté : $V_{dec} < V_{bat} < V_{clig}$	75
Figure 4-9 Déconnecter le récepteur à : $V_{bat} < V_{dec}$	75
Figure 4-10 récepteur déconnecté à : $V_{bat} < V_{rec}$	75
Figure 4-11 reconnecter le récepteur à : $V_{bat} > V_{rec}$	76
Figure 4-12 Courant $I > 10\text{mA}$: courant de charge suffisant - afficher « chargeur »	76
Figure 4-13 MLI à $D=\alpha=63\%$	77
Figure 4-14 $V > V_{min}$: Led Jaune allumée	77
Figure 4-15 MLI à $D=\alpha=75\%$	77
Figure 4-16 $V_{bat} > V_{max}$: Départ phase d'absorption, LED bleu allumée	78
Figure 4-17 Charge en phase de d'entretien (LED Verte allumée)	78
Figure 4-18 Courbes V_{bat} , I_{bat} à 29°C	78
Figure 4-19 Courbes V_{bat} , I_{bat} à 29°C avec Afficheur et signalisation LEDs	79

TABLEAUX

<i>Tableau 1-1 Tableau comparatif des différentes technologies des batteries [8]</i>	15
<i>Tableau 2-1 Profondeur de décharge maximale en fonction de la température et de la densité de l'électrolyte</i>	37
<i>Tableau 2-2 Tension de délestage par élément de batterie en fonction de la profondeur de charge [1]</i>	38
<i>Tableau 2-3 La tension de ré-enclenchement en fonction du niveau de courant et de la capacité désirée [1]</i>	39
<i>Tableau 2-4 Valeurs recommandées de la tension de régulation de charge d'une batterie ouverte [1]</i>	45
<i>Tableau 3-1 Différent types des convertisseurs DC-DC</i>	57
<i>Tableau 3-2 Différentes signalisations et leurs fonctions</i>	64
<i>Tableau 3-3 Broches du PIC et leurs différentes fonctions</i>	66
<i>Tableau 4-1 Phases de charge et Seuils</i>	68
<i>Tableau 4-2 Valeurs du rapport cyclique pour une intensité du courant maximale aux bornes de la batterie</i>	69
<i>Tableau 4-3 Seuils de connexion/déconnexion récepteur et clignotement</i>	69

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

- [1] Anne Labouret, Michel Viloz, “ *Energie solaire photovoltaïque*” 4^{ème} édition, DUNOD, Paris, 2009.
- [2] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi « *Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque* », édition ETSF.
- [3] Luc Chancellier, Eric Laurent « *L'électricité photovoltaïque* », collection Le point sur, 1995.
- [4] Alain Ricaud « *Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés* », édition Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [5] Jacques Bernard « *Energie solaire, calculs et optimisation* », édition Ellipses.
- [6] Bernard Equer « *Energie solaire photovoltaïque, vol 1 et 2* », édition Ellipses.
- [7] JOHN CLARKE “*A charger for deep-cycle 12V batteries*”, revue everyday practical electronics, vol. 36. no. 1 January 2007.
- [8] E.Koutroulis, K. Kalaitzakis “*Novel battery charging regulation system for photovoltaic application*”, IEE, 2004.
- [9] Jérémy Duny, Paul Chaubet, Nicolas Leclert, Pierre Duval « *Voiture solaire radiocommandée* », année 2004-2005.
- [10] A. F Boehinger "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, AES-4, n°1, pp 102-111.
- [11] James P. Dunlop, P.E. “*Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems Fundamentals and Application*”, Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Applications Dept. PO Box 5800 Albuquerque, NM 87185-0752, January 15, 1997.
- [12] Unitrode Corporation, ' *Improved Methods for Charging Lead-Acid Batteries Using the UC3906, U-104 Application Note* ', Unitrode Applications Handbook, 1997, pp.3-78 - 3-88. (Texas Instruments Inc.)
- [13] BP 585F High-Efficiency Monocrystalline PV Module Data Sheet, BP SOLAR.
- [14] Professeur M. A.SIVERT « *4 chargeurs unitaires 12V/20A* », I.U.T GEII de Soisson, Cuffies Aisne 02, Année 2009/2010.
- [15] Solar Lighting Controller Model LS-2, Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. <http://www.solarconverters.com/>
- [16] Angel Cid Pastor « *Evaluation Comparative de Chargeurs de Batteries pour Systèmes Photovoltaïques* », Rapport de Stage Projet Fin d'Etudes, LAAS Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Toulouse, Septembre 2002.
- [17] Manuel d'utilisation du régulateur SUNLINE PSC 15/25, ECOSOL SARL.

- [18] SOLAR BOOSTTM 2000 Installation and operation Manual, *RV POWER PRODUCTS Inc.* <http://www.rvpowerproducts.com>.
- [19] D. Linden, '*Handbook of Batteries*' 2nd Edition. Ed. McGraw-Hill, INC New York 1995.
- [20] A. Daoud- A. Midoun " *Fuzzy Control of a Lead Acid Battery Charger*", J. Electrical Systems 1-1 (2005): 62-72 Regular paper.
- [21] Laura Baxerres « *Etude de la partie énergétique et électronique du Projet Microtransat* », Projet d'Initiative Personnelle, tuteur Yves Brière, ENSICA, NANTE, 2005-2006.
- [22] M.Firas Shraif, C.Alonso, A.Martinez, "A simple and robust maximum power point control (mppc) for ground photovoltaic generators" , LAAS report 00621, April 2000
- [23] F. Delfosse « *Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique* ». PFE, Université de Liège, Année académique 1997-1998.
- [24] Eric P. Usher and Michael M. D. Ross "Recommended Practices for Charge Controllers", International Energy Agency PVPS Task 3, www.iea-pvps.org, Report IEA PVPS T3-05:August 1998.
- [25] Bechtel national "Handbook for battery energy storage photovoltaic power systems". Inc. San Francisco , California.116p ,1979.
- [26] N.Achaibou. Thèse de magistère , « *Introduction à l'étude du système de stockage dans un système photovoltaïque* » ,Université ,Blida ,2001.
- [27] The Department of Energy (DOE) "Primer On Lead-Acid Storage batteries", U.S. Department of Energy FSC-6910, Washington, D.C. 20585, September 1995.
- [28] Matsushita Battery Industrial "PANASONIC Sealed Lead-Acid Batteries Technical Handbook 2000", Matsushita Battery Industrial Co, Ltd. January 2000.
- [29] Jürgen Schmid and Heribert Schmidt "Power Conditioning for Photovoltaic Power Systems », Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Edited by A. Luque and S. Hegedus, 2003 John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49196-9.
- [30] Belhadj Mohammed « *Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome* », Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008.
- [31] Albert Paul Malvino « Principe d'électronique, cours et exercices corrigés » 6ème édition Dunod, Paris, 2002.
- [32] J.P. Ferrieux, F.Forest « Alimentation à découpage, Convertisseurs à résonance, principes, composants, modélisation » Edition Dunod. 1999, ISBN 2 10 004137 1.
- [33] L .Timothy. Skvarenina « The Power Electronics Handbook », Edition J. David Irwin, Auburn University, CRC Press 2002, chap. 8.
- [34] Bigonoff « La Programmation Des Pic® »Seconde Partie – Révision 15,La Gamme Mid-Range Par L'étude Des 16f87x (16f876-16f877), Révision 15 : 18/03/2008.

Sites internet

Panneaux solaires

[A] <http://www.pv-forum.net/fhtml/fze03.htm>

[B] <http://www.planete-sciences.org/midi-pyrenees/solaire/ProjetType/ProjetType.php>

[C] <http://www.sunware.de/>

Régulateurs :

[A] <http://www.energiesdouce.com>

Batteries :

[D] <http://wiki.generationmp3.com/index.php/Batterie>

[E] <http://www.linternaute.com/hightech/batteries/types-batteries.shtml>

[F] http://perso.wanadoo.fr/pl65/dossiers_techniq/solaire/batterie.htm

[G] <http://www.ni-cd.net/accusphp/accueil/baba/plomb/charge.php>

[H] <http://www.yuasa.fr/environnement.htm>

MOSFET :

[I] <http://www.eudil.fr/eudil/bbse/unip/unip800.htm> (le plus pertinent)

[J] http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/elec/chap_tr3.htm

Programmation en C :

[K] <http://www.microchip.com>

[L] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/pat/program/tpc.htm> (site très accessible !)

[M] <http://www.accreteil.fr/Lycees/94/larmandnogent/enseigne/ressources/techno/bourse%20cours/COURS/EI%E9ments%20constitutifs%20et%20synth%E8se%20des%20cvs.PDF>