

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET DE
L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

جامعة مولود معمري تيزي - وزو



Mémoire en vue d'obtention

Du diplôme de master II

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie électrique

SPECIALITE : Microélectronique

Thème :

Réalisation d'un chargeur solaire de batterie au plomb

Présenté par :

Mr: Mahroug Toufik

Melle : Kabeche Dihia

Encadré par :

Mme: Hatem djedjega

maitre de conférences classe A.

Jury de soutenance:

✓ *Mr : IDJRI bousad, président.*

Maitre de conférences class B, UMMTO.

✓ *Mr: SI BARHAIM Madjid, examinateur.*

Maitre de conférences class B, UMMTO.

****Promotion : 2017/2018****

Remerciements

Nous remercions **dieu** de nous avoir fourni la volonté nécessaire pour mener à terme ce modeste travail.

Ce mémoire de Master a été proposé et dirigé par Mme **HATEM.D**, maitre de conférences classe (A) à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO). Ce moment est pour nous l'occasion de vous témoigner notre plus grande estime, notre profond respect et notre immense reconnaissance.

Nous tenons à remercier tous les **membres de jury**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail et de leur présence en ce jury.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants et tout le personnel de la faculté de Génie Electrique et d'informatique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail...

*A la lumière de ma vie, ma **mère**. A mon très cher **père**...sans vos sacrifices et efforts, je ne serai guère là, à écrire ces mots qui décrivent et témoignent peu mes vrais sentiments pour vous, ma fierté de vous avoir à mes côtés durant toutes les étapes de ma modeste mais heureuse vie. J'espère que je saurai à la hauteur des valeurs que vous avez semées en moi...que vous serez fière de moi comme moi je le suis.*

A mes frères jugurtha, nassim, lyes, ghiles qui m'en encourage chaque jours.

A la famille melabe. Et la famille meghaz.

A ma binôme Dehia et toute sa famille

A mes ami(es)et camarades sans exceptions qui sont vraiment n'nombreux.

Et Sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, tous cycles confondus: primaire, secondaire, lycée et université. Je leurs serai éternellement reconnaissant.

Toufik

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur marina de m'avoir encouragement en permanence, et son soutien moral,

A mes chers frères, juba, massinissa, amghid et fraxel pour leurs appuis et leurs Encouragements,

A toute ma famille pour leurs soutiens tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien indéfectible.

Aux chers amis (es)

A mon binôme Toufik et toute sa famille

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études

Merci d'être toujours là pour moi.

Dihia

Liste des figures

Figure (II- 1). <i>Spectre d'irradiance solaire.</i>	3
Figure (II. 2). Structure PN sous éclairnement.	4
Figure (II. 3). Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque	5
Figure (II.4) .Schéma d'un regroupement de (N_s) cellule en série.	7
Figure (II.5). Caractéristique d'un regroupement de (N_p) cellule en parallèle.	8
Figure (II.6). Modèle de cellule photovoltaïque idéal.	8
Figure (II.7). Modèle de cellule photovoltaïque réelle	9
Figure (II.8). Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque	10
Figure (II.9). La caractéristique de $I=f(v)$ en fonction de la température	13
Figure (II.10). La caractéristique de $P=f(v)$ en fonction de la température	13
Figure (II.11). Caractéristique de $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	14
Figure (II.12). Caractéristique de $P = f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	14
Figure (II.13). Protection de panneau photovoltaïque avec diode anti retour.....	15
Figure (II.14). Composants d'un champ de module PV	16
Figure(II.15) Le convertisseur boost.....	18
Figure(II.16). Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.....	19
Figure (II.17). <i>Graphe rendement puissance MPPT</i>	20
Figure(III.1) Accumulateur nickel cadmium.	22
Figure(III.2) Accumulateur lithium ion.....	23
Figure(III.3) Accumulateur au plomb (PB).....	23
Figure(III.4). Batterie au plomb-acide.....	25
Figure(III.5). Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) [14].....	26

Figure (III.6). Vue éclatée d'une batterie de démarrage [14].....	27
Figure (III.7) Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb [15]	29
Figure (III.8). Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb [15] ...	30
Figure (III.9). <i>Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb [15]</i>	30
Figure (III.10). Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb [16].....	33
Figure(IV.1). Chaîne élémentaire de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un chargeur de batterie et d'une batterie au plomb-acide	39
Figure(IV.2). Circuit d'un chargeur à amplificateur magnétique	39
Figure(IV.3). Chargeur ferorésonance avec un CI MC34063	39
Figure(IV.4). Circuit d'un chargeur à pont thyristors relie à la batterie	40
Figure(IV.5). Installation d'un chargeur solaire hybride	41
Figure(IV.6). Circuit électrique d'un chargeur USB (power bank)	42
Figure(III.7). Circuit électrique d'un kit solaire d'une batterie au plomb	42
Figure(IV.8). Circuit électrique Le chargeur solaire enroulable.....	43
Figure (IV.9). Circuit électrique d'un chargeur solaire de batterie au plomb.....	47
Figure(IV.10). Le comparateur simple (gauche) et le comparateur à pont diviseur (droite).....	47
Figure (IV.11). Câblage logique de la bascule RS.....	49
Figure(IV.12). Câblage de circuit intégré NE555	49
Figure(IV.13). Schéma local de deux potentiomètres.....	50
Figure(IV.14). Tensions à la sortie des comparateurs n°1 (en bleu) et n°2 (en rouge) en Fonction du temps	52
Figure(IV.15). Tensions Q (en noir) et Q' (en bleu) a la sortie de la bascule RS en fonction du temps	52
Figure(IV.16). Tensions aux bornes des condensateurs en fonction du temps A gauche, le seuil bas et à droite, le seuil haut.....	53
Figure(IV.17). Implantation des composants	54
Figure(IV.18). Typon du chargeur solaire	54

Liste des tableaux

Tableau (II.1). Les avantages et les inconvénients	6
Tableau (IV.1). Table de vérité de la bascule RS	46

Sommaire

I. INTRODUCTION GENERALE	1
II-1. L'énergie solaire	3
II-2. La cellule solaire	4
II-2-1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	4
II-2-2. L'effet photovoltaïque	5
II-2-3. Les différents types des cellules photovoltaïques	5
❖ Cellule solaire à base de Silicium monocristallin	5
❖ Cellule solaire à base de Silicium poly cristallin	5
❖ Cellule solaire à base de Silicium amorphe	6
❖ Nouvelle technologie	6
Les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées	6
II-3. Regroupement des cellules	7
II-3-1. Association en série	7
II-3-2. Association en parallèle	7
II-4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	8
II-4-1. Cellule photovoltaïque idéale	8
II-4-2. Cellule photovoltaïque réelle	9
II-5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	10
II-5-1. Le courant de court-circuit(I_{cc})	11
II-5-2. Tension du circuit ouvert (V_{co})	11
II-5-3. Le facteur de forme (FF)	12
II-6. Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique du panneau solaire.....	12
II-6-1. Influence de la température	12
II-6-2. Influence de l'éclairement	13

II-7. Le module photovoltaïque	14
II-7-1. Protections des cellules photovoltaïques	15
II-7-2. Nombre de cellules par module	15
II-7-3. Le panneau solaire	16
II-8. Définition d'un régulateur d'un système photovoltaïque	16
II-9. La régulation avec MPPT	16
II-9-1. Définition d'un régulateur MPPT	16
II-9-2. Etage d'adaptation DC/DC	17
II-9-3. Les convertisseurs DC/DC (hacheur)	17
II-9-4. Convertisseur DC/DC à découpage (Booste)	18
Modélisation de hacheur survolteur	18
II-9-5. La commande MPPT des convertisseurs DC/DC	19
II-10. Représentation graphique du point maximum de puissance	19
II-11. Qu'entendons –nous par optimiser	20
III. L'ACCUMULATEUR AU PLOMB	21
III-1-1. Définition d'une batterie	21
III-1-2. Les caractéristiques de la batterie	21
III-1-3. Elément, d'accumulateur et batterie	21
III-1-4. Les différents types de batteries	22
III-1-4-1. Accumulateur nickel cadmium	22
III-1-4-2. Accumulateur Lithium-ion	22
III-1-4-3. Accumulateur au plomb (PB)	23
III-1-4-4. Les avantages et inconvénients	24

III-2-1. Définition d'une batterie au plomb-acide	25
III-2-2. Définition de plomb	26
III-2-3. Constitution de la batterie au plomb	26
III-2-4. Réactions chimiques	28
III-2-5. Principe De Fonctionnement D'accumulateur Au Plomb	29
III-2-5-1. En décharge	29
III-2-5-2. En charge	30
III-2-6. Caractéristique électrique d'accumulateur du plomb (Pb)	31
III-2-7. Les différents domaines des batteries au plomb	32
III-2-8. Précautions d'exploitation	33
III-2-9. Différentes causes de la défaillance des batteries	34
❖ Surcharge des batteries	34
❖ Décharges profondes	34
❖ Sulfatation	34
❖ Courts-circuits	34
❖ La température	35
❖ Autres causes de la diminution de la durée de vie des batteries	35
III-3. Performances	35
III-4. Choix de batteries d'accumulateurs	35
III-5. L'entretien de batteries d'accumulateurs	35
III-6. Mesures de sécurité	36
III-7. Aspects environnementaux et santé humaine	36
IV- Chargeur solaire	37
IV-1. Définition d'un chargeur solaire	37
IV-2. Principe de fonctionnement	37
IV-3. Différentes types des chargeurs électriques	38
IV-3- 1. Chargeurs à amplificateur magnétique	38

IV-3-2. Chargeurs à ferrorésonance	39
IV-3- 3. Chargeurs à pont thyristors	39
IV-3-4. Les chargeurs solaires	40
IV-3-4-1. Le chargeur solaire hybride	40
IV-3-4-2. le chargeur solaire USB (power bank)	41
IV-3-4-3. Les kits solaires44.....	42
IV-3-4-4. Le chargeur solaire enroulable	42
IV-4. Mode de charge	43
❖ Rendement	43
IV-5. Points forts de l'utilisation d'un chargeur solaire	44
IV-6. Points faibles du recours à un chargeur solaire	44
IV-7. Choisir un chargeur solaire	45
IV-8. Les avantages et les inconvénients des chargeurs solaires	46
IV-9. Etude du schéma de principe d'un chargeur solaire au plomb	46
• Le circuit électronique	47
IV-9-1. Les comparateurs	47
IV-9-1-1. Le comparateur simple	48
IV-9-1-2. Le comparateur à pont diviseur	48
IV-9-1-3. La bascule RS	48
IV-9-1-4. Le NE555	49
IV-9-1-5. Réglage des potentiomètres 5	50
➤ Potentiomètre A	51
➤ Potentiomètre B	51
IV-10. Réalisations d'un chargeur solaire de batterie au plomb	51
IV-10-1. Teste le bon fonctionnement de chaque bloc	51
IV-10-1-1. Teste le bloc A	51
IV-10-1-2. Teste le bloc B	52

IV-10-2. Réalisations du circuit imprimé	53
IV-10-3. Implantation des composants	53
CONCLUSION GENERAL	55
Références bibliographies	

I. INTRODUCTION GENERALE

Le but de ce travail est l'optimisation de la qualité électrique des chargeurs solaires des batteries au plomb utilisés dans différents domaines et aussi l'optimisation de l'énergie lors d'alimentation par l'énergie photovoltaïque avec un fonctionnement à puissance maximale pour une meilleure exploitation de cette énergie.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables, sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un panneau photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système est appelé système PV-Batteries. Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales.

L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leurs durées de vie.

Ainsi, l'intérêt de notre projet est de régler et d'utiliser un chargeur solaire afin de contrôler la charge et décharge de la batterie au plomb.

Enfin, nous expliquerons le fonctionnement logique du circuit électronique, son principe d'autorégulation, c'est-à-dire comment la charge de la batterie est régulée par sa propre tension. Afin de réaliser un chargeur solaire efficace.

Dans la première partie nous présentons des généralités sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement, Dans deuxième temps nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque, ensuite on va montrer l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement. Et nous finissons cette partie par la modélisation du notre panneau.

Nous avons achevé notre travail, en premier par les problèmes rencontrés, ensuite une conclusion et des perspectives.

II-1. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000k/h[1], les rayons du soleil mettent donc environs 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est porte par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation (II.1)

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (\text{II.1}) \quad \text{soit} \quad E = \frac{1.26}{\lambda}$$

h : La constant de Planck $h \approx 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

c : La vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie de photon est plus grande [2].

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique (figure 1) compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 microns (μm) [3]. l'énergie associée à ce rayonnement solaire se répartie approximativement comme suit :

- ✓ 09% dans la bande ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- ✓ 47% dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8\mu\text{m}$).
- ✓ 44% dans la bande des l'infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

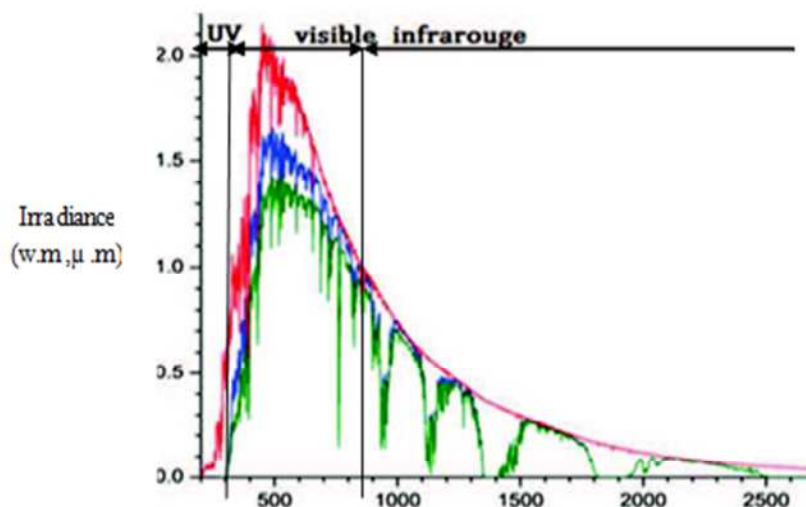


Figure (II- 1). Spectre d'irradiance solaire.

II-2. La cellule solaire

II-2-1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en l'énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création paire électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N d'autre structure, Comme les hétérojonctions et les structures Schottky sont également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques, est illustré sur la Figure (II.2).

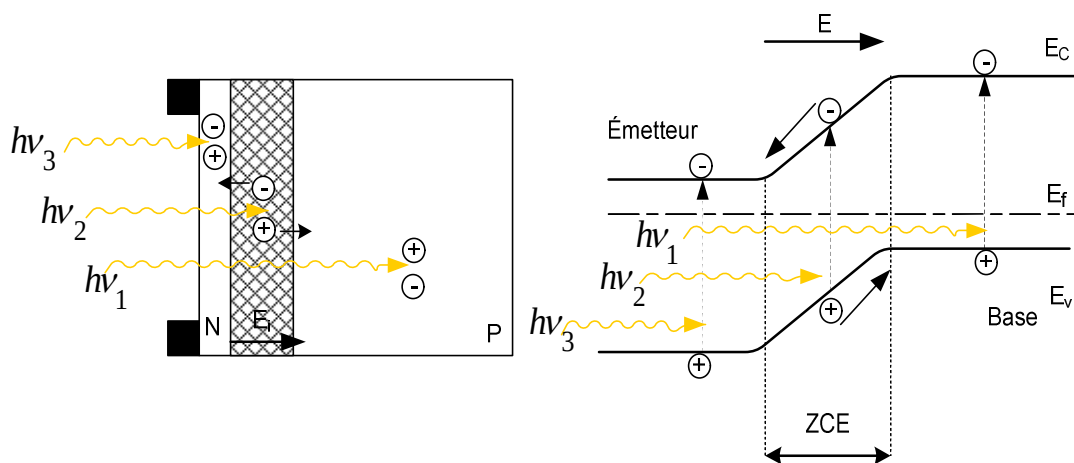


Figure (II. 2). Structure PN sous éclairage.

- Si la paire (e^- , h^+) est créée dans la région P, les électrons qui y sont des porteurs minoritaires traversent la jonction et vont du côté N.
- Si la paire (e^- , h^+) est créée dans la région N, les trous qui y sont minoritaires traversent la jonction et vont du côté P.

- c) Si la paire (e^- , t) est créée dans la ZCE, elle va être dissociée sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans cette zone où l'électron est propulsé vers la zone N et le trou vers la zone P.

II-2-2. L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la celle-ci [4]. (La figure (II.3) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe et films minces [5]. La photopile ou la cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [6].

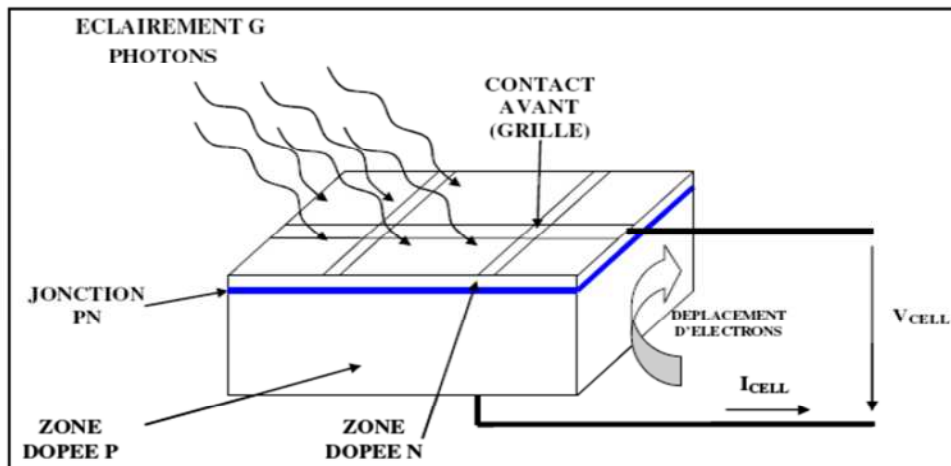


Figure (II. 3). Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

II-2-3. Les différents types des cellules photovoltaïques

❖ Cellule solaire à base de Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « *cristallin* » veut dire que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple ou il n'y a aucune perturbation dans l'arrangement des atomes.

❖ Cellule solaire à base de Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains

dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14%.

❖ **Cellule solaire à base de Silicium amorphe**

Le silicium est déposé en couches minces sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise conductivité. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique et recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire. Par exemple pour alimentations de montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles sont caractérisées par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre quelques microns. Par contre leur rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et elles ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [7].

❖ **Nouvelle technologie**

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voir moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diode électroluminescentes organique (OLED : organic light Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine de photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [8].

Les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées :

Type	Silicium monocristallin	silicium poly cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10ans
Les avantages	-Bon rendement en soleil direct.	-Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe).	-Souplesse très moine élevé que les cristallins. -Bon rendement en diffus.
Les inconvénients	-mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), Prix élevé.	-mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	-mauvais rendement en plein soleil.

Tableau (II.1). Les avantages et les inconvénients.

II-3. Regroupement des cellules

II-3-1. Association en série

Une association de (N_s) cellules en série Figure (II.4) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du regroupement série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (II.2) résume les caractéristiques électrique d'une association série de (N_s) cellule [8].

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (II.2)$$

$$I_{cc} = I_c \quad (II.3)$$

V_{coNs} : La somme des tensions des circuits ouverts de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court circuit de N_s cellules en série.

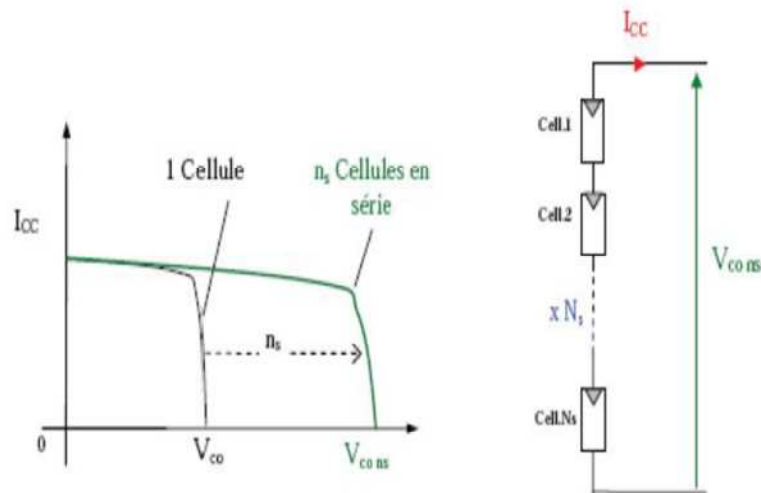


Figure (II.4) .Schéma d'un regroupement de (N_s) cellule en série.

II-3-2. Association en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule Figure (II.5) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [7].

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (II.4)$$

$$I_{cc} = I_c \quad (II.5)$$

V_{coNs} : La somme des tensions des circuits ouverts de N_p cellules en parallèle.
 I_{ccNs} : Courant de court circuit de N_p cellules en parallèle.

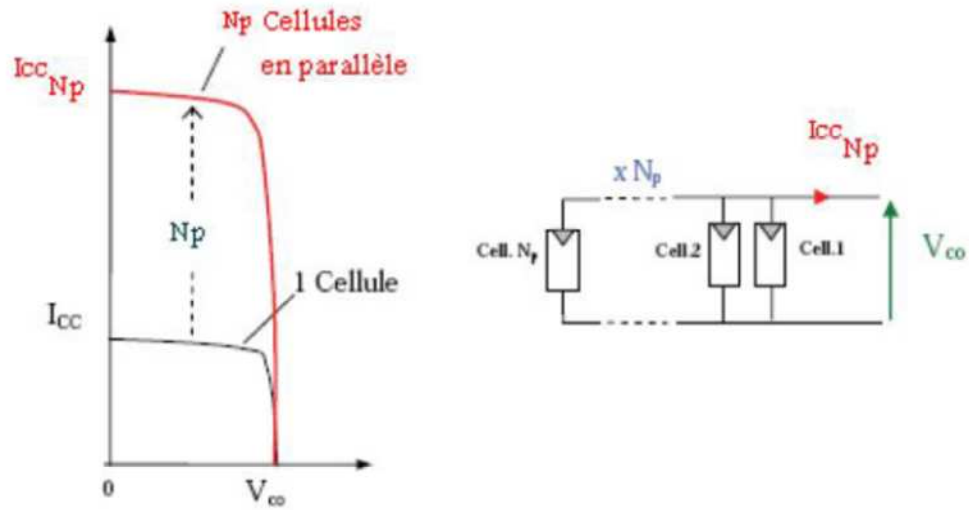


Figure (II.5). Caractéristique d'un regroupement de (N_p) cellule en parallèle.

II-4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II-4-1. Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en Parallèle avec une diode Figure (II.6) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.6)$$

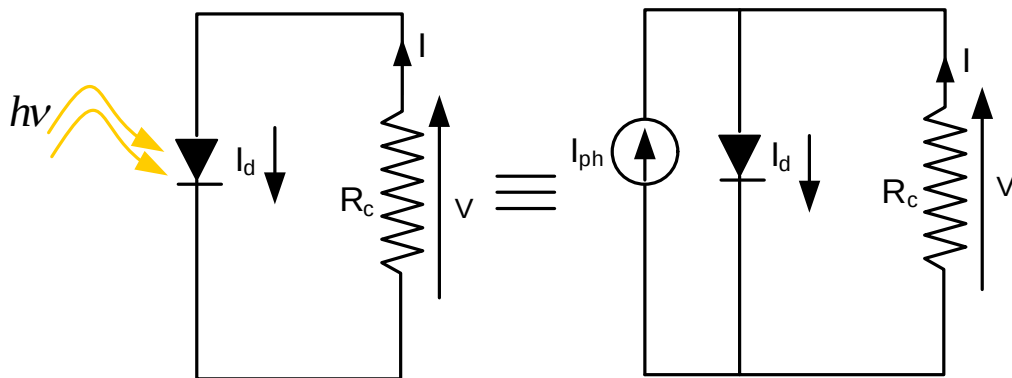


Figure (II.6). Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (\text{II.7})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Avec:

I_s : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension aux bornes de la diode.

$V_t = \frac{KT}{q}$ potentiel thermique.

Donc la relation (II.8) sera :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

II-4-2. Cellule photovoltaïque réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne prend pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série (R_s) et les courants de fuite par une résistance en parallèle (R_p)[8].

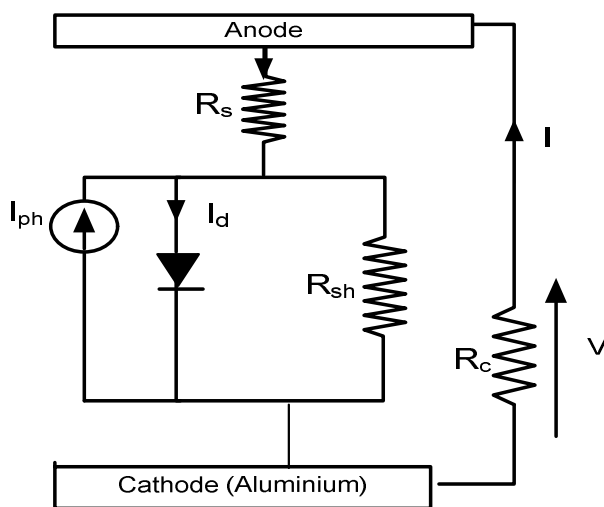


Figure (II.7). Modèle de cellule photovoltaïque réelle.

Donc en a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.10})$$

$$I_p = \left(\frac{V + R_s \times I}{R_p} \right) \quad (\text{II.11})$$

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

I : le courant fournit par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$: le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : La constante de Boltzmann ($3,381.10^{-23}$ joule/kelvin).

q : Charge d'électron $= 1,602.10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : Température de la diode en Kelvin.

Donc (II.13) sera :

$$I = I_{ph} - \left(\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s \times I}{R_p} \right) \quad (\text{II.13})$$

II-5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure(II.8) représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous éclairement typique d'une cellule photovoltaïque à jonction P-N. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont : le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

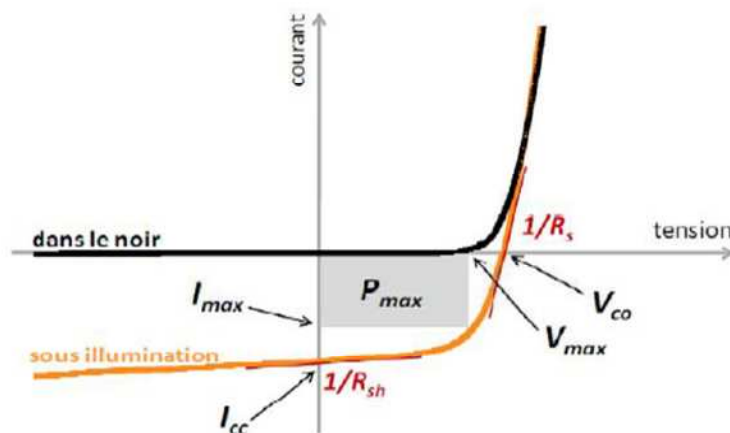


Figure (II.8). Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque.

II-5-1. Le courant de court-circuit(Icc)

On définit par (η_Q) le rendement quantique ou réponse spectrale qui peut être exprimé par la relation suivante :

$$nQ = \frac{J_{ph}}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (II.14)$$

J_{ph} : Densité du photo-courant fournie par la cellule.

$F(\lambda)$: Le flux de photons reçu par la cellule.

$F(\lambda)[1-R(\lambda)]$: Le flux de photons qui participent à l'effet photovoltaïque.

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface.

On appelle courant de court-circuit le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons $F(\lambda)$ sans application de tension. Il est donné par la relation suivante :

$$J_{sc} = q \int_0^\infty F(\lambda)[1-R(\lambda)]nQ \times d\lambda \quad (II.15)$$

On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

II-5-2. Tension du circuit ouvert (Vco)

Elle est obtenue en mesurant la tension aux bornes de la photopile placée sous une source lumineuse sans aucun récepteur. Elle est de l'ordre de (0.5) à (0.7 V) pour une cellule élémentaire et elle dépend des matériaux, des structures et des technologies d'élaboration de la cellule et varie avec l'éclairement et la température. On obtient cette tension en annulant le courant I dans l'expression de la caractéristique $I(V)$, soit :

$$I = 0 \Rightarrow Id - I_{ph} = 0 \Rightarrow V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} - 1 \right) \quad (II.16)$$

Pour

$$I_{ph} = ICC \text{ (à fort éclairement)}$$

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right)$$

En dessinant la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique des cellules photovoltaïques :

La densité du courant de court-circuit (J_{sc}), est obtenue sur la caractéristique pour une tension de 0V. Elle est proportionnelle à l'éclairement incident.

II-5-3. Le facteur de forme (FF)

Le Facteur de remplissage, ou facteur de forme (FF) est le rapport des aires de ces deux rectangles.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times J_{sc}} = \frac{V_{max} \times J_{max}}{v_{co} \times J_{sc}} \quad (II.17)$$

(J_{max}) et (V_{max}) désignent les coordonnées du courant et de la tension qui maximisent la puissance délivrée par la cellule, soit $P_{max} = J_{ma} \times V_{max}$. Plus cette zone rectangulaire est grande, plus la caractéristique ressemble à un rectangle d'aire $V_{oc} \times I_{sc}$

Le rendement de conversion photovoltaïque η s'exprime par le rapport :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{J_{sc} \times V_{co}}{P_i} \times FF \quad (II.18)$$

Où P_i est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement, souvent exprimé en pourcent, est un paramètre clef de productivité des cellules.

II-6. Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique du panneau solaire

II-6-1. Influence de la température

Dans des conditions de température très froides, le panneau de 120 watts est capable de produire des 130 watts car plus la température est basse plus la puissance produite est élevée.

D'un autre côté, dans des conditions de température très chaudes, plus la température augmente plus la puissance produite par le panneau diminue.

Par temps froid les panneaux solaires délivrent plus de puissance, mais sans l'emploi d'un régulateur MPPT, la quantité de puissance perdue est supérieure à celle récupérée en plus.

L'équation de Boltzmann donne $I_{sc} = I_0 \exp(\frac{q \times v}{KT})$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de température de la cellule. Nous présenterons ci-dessous les caractéristiques $I(v)$ et $P(v)$ d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné à différentes température ;

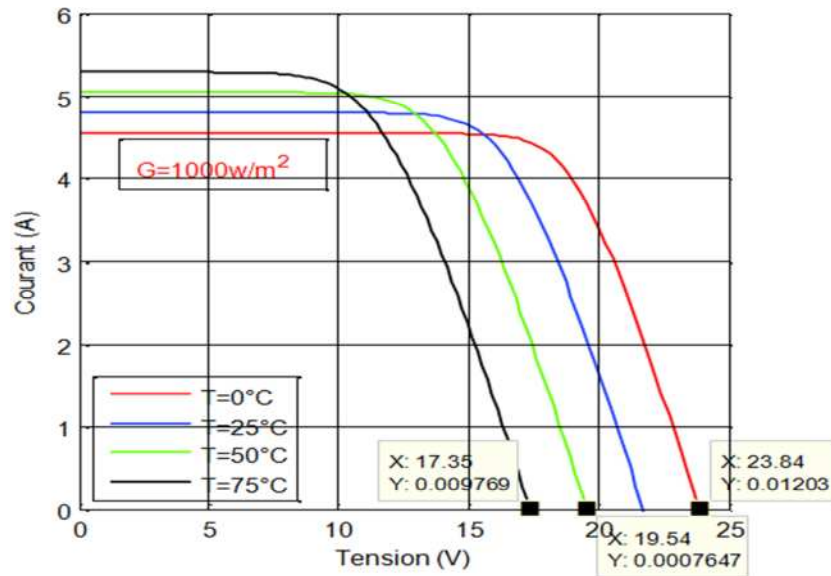


Figure (II.9). La caractéristique de $I=f(v)$ en fonction de la température.

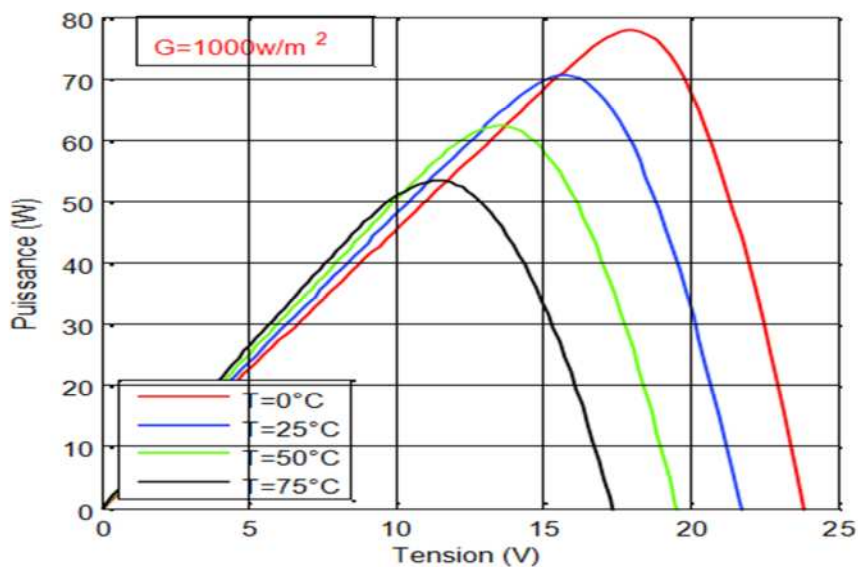


Figure (II.10). La caractéristique de $P=f(v)$ en fonction de la température.

Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente. Nous constatons que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, et par contre la puissance maximale de générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

II-6-2. Influence de l'éclairement

Après que nous avons fixé la température pour différents éclairement on remarque que pour l'éclairement de $G=1000 \text{ W/m}^2$, on peut voir que le courant subit une variation importante quand l'éclairement augmente; le courant de court-circuit est augmenté mais par contre la

tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance quand le courant augmente.

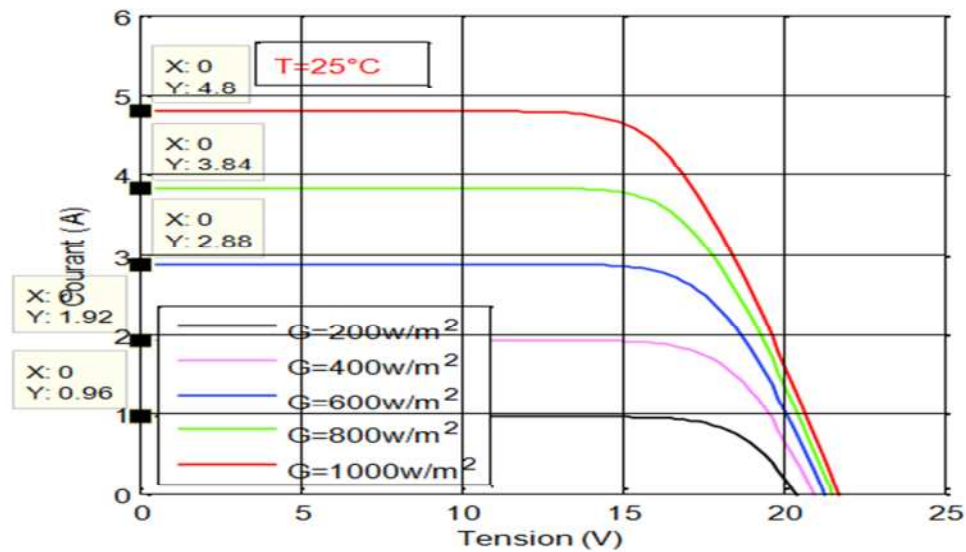


Figure (II.11). Caractéristique de $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement.

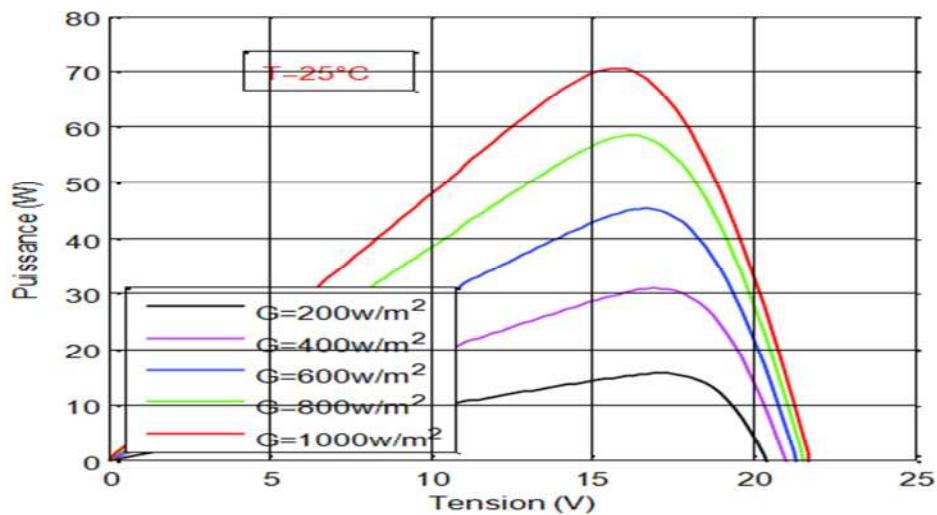


Figure (II.12). Caractéristique de $P = f(v)$ en fonction de l'éclairement.

II-7. Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergies lumineuse en l'électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir de rayonnement solaire.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

II-7-1. Protections des cellules photovoltaïques

Il arrive qu'un module au silicium cristallin ne soit pas exposé uniformément à la lumière, à cause des taches d'ombre. Puisque les cellules étant câblées en série, le courant total est nivelé par le bas (la cellule la plus faible impose son courant aux autres).

Alors lorsqu'une cellule ne débite plus parce qu'elle n'est plus exposée au rayonnement, le courant de l'ensemble de la chaîne tend vers zéro. La cellule ainsi masquée devient réceptrice de toutes les autres de la série et reçoit en tension inverse la somme de toutes leurs tensions. Elle se met donc à chauffer d'où le nom bien connu de *hot-spot* ou point chaud. Il est indispensable de protéger le module contre ce phénomène en plaçant une diode *by-pass* en parallèle par groupe de cellule (par séries de 18 cellules, soit 2 par panneau 36 cellules). On maintient ainsi la tension inverse appliquée à la cellule ombrée à moins de 10V, ce qui engendre un échauffement limité en cas de hot-spot. Ces diodes sont généralement placées dans la boîte de jonction en sortie de panneau.

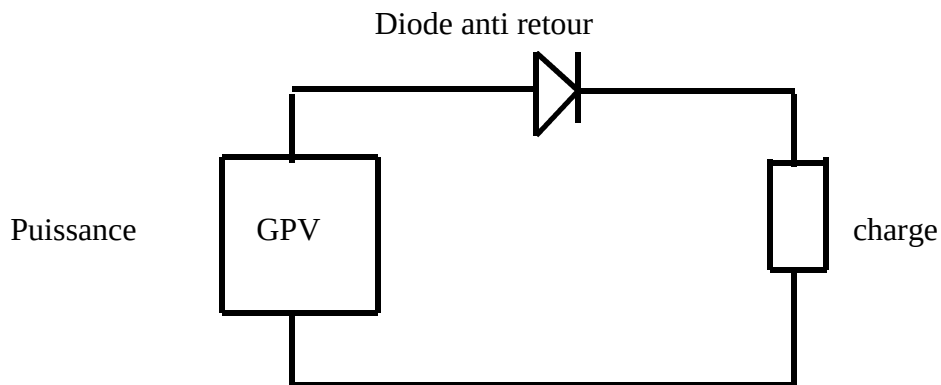


Figure (II.13). Protection de panneau photovoltaïque avec diode anti retour.

II-7-2. Nombre de cellules par module

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58V à 0.60V et un point de puissance maximale situé 0.46 V et 0.47 V. Considérant que notre panneau doit charger une batterie de 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on perd 2 à 3 V en câblage et du fait des élévateur de température, il faut disposer d'un panneau fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouvera le nombre arrondi de 36, valeur courante comme nombre de cellules en série des panneaux usuels de marché.

Cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangées de 9. En pratique, les modules les plus courants de 12V comportent 32 à 44 cellules, suivant la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisateur.

Par exemple, dans le désert de certain pays chauds où la température ambiante monte jusqu'à 50 C°, on peut être amené à l'installer des panneaux 12 V à 40 cellules. A raison de - 2mV/C°, chaque cellule perd 50mV entre 25 et 50 C°, et la tension de fonctionnement d'un

panneau 36 cellules de 1.8 V. il faut donc théoriquement 4 cellules supplémentaire pour y remédier($\frac{1.8}{0.46} = 3.9$).

II-7-3. Le panneau solaire

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Le composant le plus crucial de toute installation photovoltaïque est le module, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champ) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la Figure (II.14).

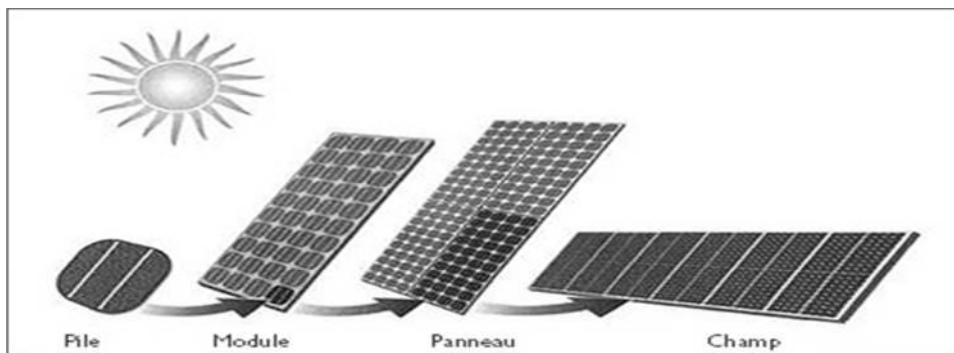


Figure (II.14). Composants d'un champ de module PV.

II-8. Définition d'un régulateur d'un système photovoltaïque

Le régulateur d'un système photovoltaïque est un dispositif électronique qui gère les échanges d'énergie entre les panneaux photovoltaïques et les accumulateurs, cette fonction est essentielle pour prévenir les dégradations des accumulateurs, en effet une décharge ou une surcharge trop importante ou répétée peut entraîner un vieillissement rapide de la batterie. Les modes de régulations sont fondés sur une mesure de la tension ou de la quantité d'ampères heure injectés dans l'accumulateur.

II-9. La régulation avec MPPT :

II-9-1. Définition d'un régulateur MPPT

Un régulateur MPPT ou Maximum power point tracking(traduction française= « **recherche du point de puissance maximum** ») est un convertisseur électrique DC/DC, sans aucun dispositif ou système mécanique, qui optimise en permanence les paramètres électrique de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- ✓ Le système photovoltaïque (constitué de un ou plusieurs panneaux solaires)

- ✓ Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- ✓ Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe éclairage, etc.)

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

- 1) Le panneau peut délivrer à la batterie
- 2) La batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension (voltage) la plus adaptée afin d'avoir le maximum d'ampères dans la batterie.

Les régulateurs MPPT modernes permettent d'obtenir des rendements entre 92% et 97%. Est son emploi permet d'obtenir généralement de 20% à 45% de puissance supplémentaire en hiver et de 10% à 15% en été par rapport un régulateur classique.

Les gains réelles peuvent varier largement en fonction de la météo, de la température, de l'état de charge de la batterie net d'autres facteurs.

II-9-2. Etage d'adaptation DC/DC

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaire ainsi que de la température. Elle peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant de l'ensoleillement et de la température et de charge. Pour qu'elle fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

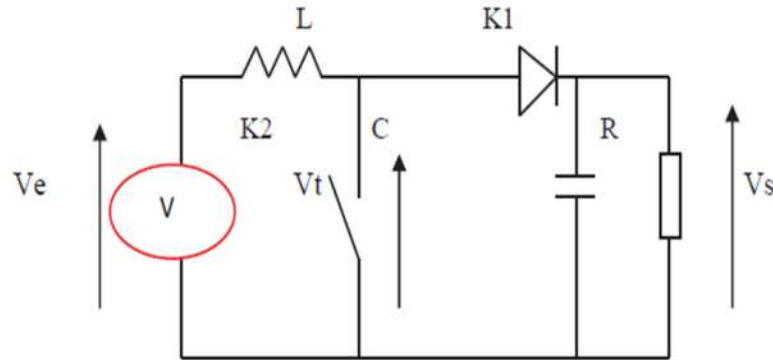
Cette adaptation pour être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôle par un mécanisme de poursuite : MPPT (Maximum power point tracking) les régulateurs MPPT sont plus efficaces sous certaines conditions.

II-9-3. Les convertisseurs DC/DC (hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type **continu-continu** permettant de contrôler. La puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé elles sont composées de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. La technique du découpage, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage, la tension d'entrée est «hachée» à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir une tension continue.

II-9-4. Convertisseur DC/DC à découpage (Booste)

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de << boost >> ou hacheur parallèle; son schéma de principe de base est celui de la Figure (II.15). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.



Figure(II.15) Le convertisseur boost

Les équations de fonctionnement de hacheur survolteur :

$$V_i \times t_{on} + (V_i - V_0) \times t_{off} = 0$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{II.1.a})$$

➤ **Modélisation de hacheur survolteur**

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique d ($0 < d < 1$)

Les grandeurs électrique de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

Dans le système d'équations, on peut déduire la résistance à la sortie du panneau photovoltaïque (R_{pv}) en fonction de D et R_s .

Alors le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s puisque le rapport D est vérifié l'inégalité $0 < D < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante : $R_s > R_{pv}$.

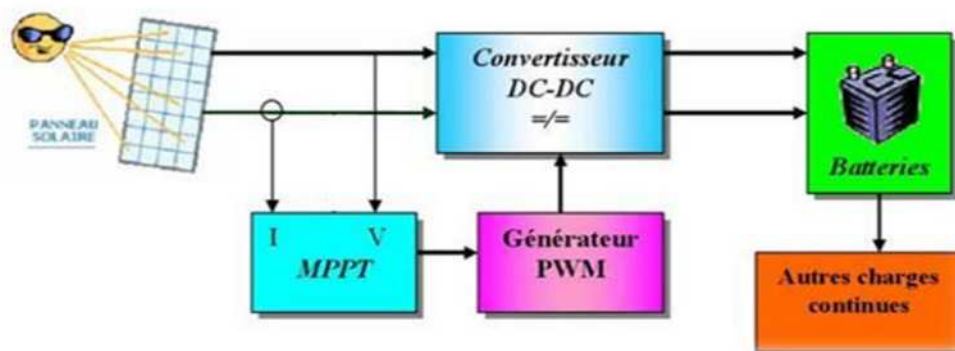
Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique (D_{opt}) obéissent donc

$$\text{à l'équation } R_{opt} = (1 - D_{opt})^2 \quad (\text{II.2.b})$$

La relation montre aussi que pour une puissance incidente P , la puissance optimale (point PPM) transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (D_{opt}).

II-9-5. La commande MPPT des convertisseurs DC/DC

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixe. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT, (**La Figure(II.16)** montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire



Figure(II.16). Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

II-10. Représentation graphique du point maximum de puissance

- La courbe verte (régulation MPPT) comporte une crête qui correspond au point maximum de puissance.
- La courbe rouge (sans régulation MPPT) comporte une crête classique.

Un régulateur MPPT recherche le point de puissance maximum, dont la valeur diffère de la valeur STC (Standard Test Conditions) dans presque toutes les situations.

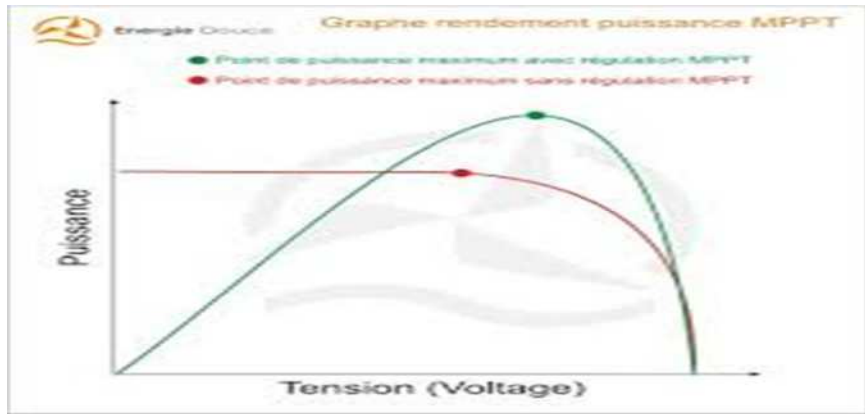


Figure (II.17). *Grphe rendement puissance MPPT*

II-11. Qu’entendons –nous par optimiser

Une cellule solaire, comme une batterie n’est pas par nature « intelligente ».

La majorité des panneaux solaire sont conçus pour produire, en théorie un courant ayant une tension nominale fixe ou bien un courant dont la tension variable.

Une batterie fonctionne généralement avec une tension nominale en fonction de son état de charge. Lorsqu’elle est en charge, à besoin d’une tension bien supérieure pour pouvoir se recharger complétement.

Ces valeurs de tension sont sensiblement différentes des valeurs nominales produites par la plupart des panneaux solaire photovoltaïque. Pour ca on doit bien designer le régulateur pour avoir un rendement optimal.

III. L'ACCUMULATEUR AU PLOMB

III-1-1. Définition d'une batterie

La batterie est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques placées en série capables de convertir l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement. On appelle respectivement ces opérations ; charge et décharge. Lorsque l'on parle d'élément rechargeable on utilise le terme « accumulateur ».

Un **accumulateur** est un appareil accumulant de l'énergie électrique sous forme électrochimique pour la restituer ensuite suivant les besoins. Chaque accumulateur est constitué d'éléments associés pour former des blocs (par **exemple**, un accumulateur au plomb est composé de 3 ou 6 éléments de 2 V, soit un bloc de 6 ou 12 V).

III-1-2. Les caractéristiques de la batterie

Une batterie se caractérise par sa capacité en Ah (ampère par heure), sa tension et son courant de décharge. Pour une batterie au plomb de 12V, 30A, 0.8Ah, peut débiter 12V sous 0.8A pendant une heure. Les batteries préviennent les variations de tension dérivant de la source d'alimentations, pouvant être dommageable pour certains appareils, et fournissent une réserve disponible pour les grands courants, selon leur besoin. Lorsqu'elle n'est pas branchée à une charge ou un chargeur, la tension à circuit ouvert d'une batterie représente son taux de charge. Quand elle sera complètement chargée, sa tension diffère dépendamment de type de batterie, par exemple : chaque élément d'une batterie acide plomb a une tension à circuit ouvert de 2.10V, alors qu'un Nickel cadmium a 1.25V par cellule à 25°C.

III-1-3. Élément, d'accumulateur et batterie

Un **élément** est un couple électrochimique (i.e. 2 électrodes) plongé dans une solution.

Selon les technologies, ce couple peut être le {NiOOH/Cd} pour les batteries nickel-cadmium, le {Li/oxyde métallique} pour les batteries lithium-ion, le {PbO₂/Pb} pour les batteries au plomb, et présente une force électromotrice différente. Le terme demi-élément désigne une électrode.

Le terme "**accumulateur**" est employé pour un élément rechargeable, le distinguant¹ ainsi de la pile (élément non rechargeable). Un accumulateur est donc un générateur réversible : il peut stocker (accumuler) de l'énergie, en convertissant l'énergie électrique en forme chimique, puis la restituer à tout moment sur demande.

De tension nominale d'environ 2 Volts, un accumulateur au plomb est rarement utilisé seul : en général, une mise en série et/ou en parallèle est effectuée pour obtenir les tensions et capacités d'utilisation désirées, ce qui constitue une batterie d'accumulateurs². Par exemple, la

¹ Cette nuance de vocabulaire est faite en France mais beaucoup moins dans la littérature anglo-saxonne, dans laquelle le terme "battery" désigne indifféremment une pile ou un accumulateur.

² Les termes piles et accumulateur étant définie sans ambiguïté, il peut être précisé que le substantif batterie désigne plutôt un ensemble de piles ou d'accumulateurs identiques installés de façon définitive dans le même bac.

batterie démarrage d'un véhicule thermique est annoncée de "12V" pour signifier qu'elle comprend six accumulateurs, même si sa f.é.m. réelle se situe plutôt dans l'intervalle {12,5 ; 13V}. Pour les systèmes de secours, un standard de batterie 48V tend à s'imposer.

III-1-4. Les différents types de batteries

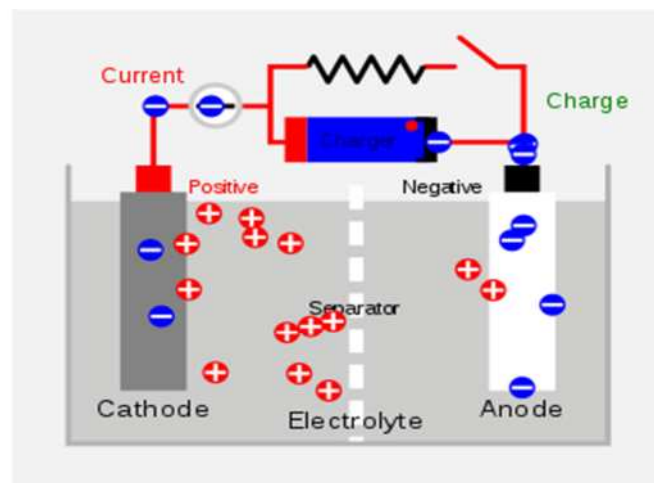
On distingue trois types de batteries d'accumulateurs :

III-1-4-1. Accumulateur nickel cadmium

Ces accumulateurs sont les plus employés parmi les autres modèles, il en existe de nombreux types, chacun ayant des caractéristiques différentes. Ils sont constitués d'une électrode en cadmium et l'autre en nickel baignant dans un électrolyte alcalin. On rencontre des accumulateurs ayant une résistance interne plus élevée destinée à des utilisations moins brutales comme l'alimentation des émetteurs et récepteurs.

Ce type de batterie possède un effet de mémoire, ce qui impose leur stockage dans un état décharge de 0,6V. Il peut supporter des pointes de courant en décharge plus importantes et sa décharge est très lente.

Un élément possède une f.e.m nominale de 1,2V, alors 4 élément = 4,8V.

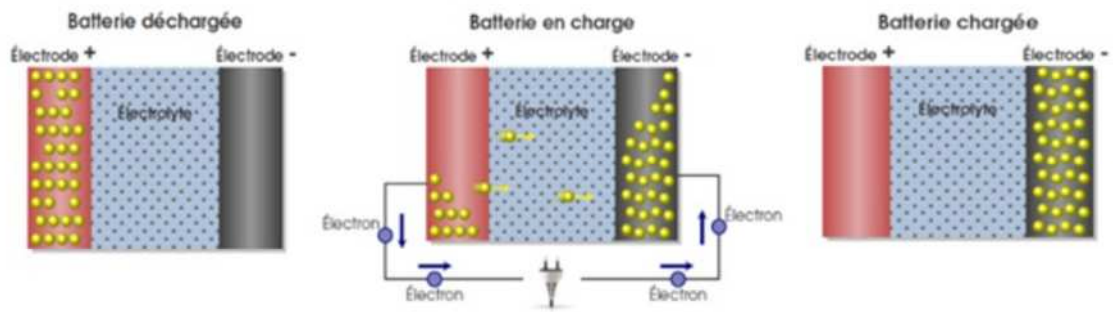


Figure(III.1) Accumulateur nickel cadmium

III-1-4-2. Accumulateur Lithium-ion

La batterie lithium ion fonctionne sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithie, et une électrode négative en graphite. La tension d'un élément lithium-ion est de 3,6V.

Notons qu'il existe des accumulateurs lithium-ion industriels de grande puissance, ces éléments peuvent fonctionner jusqu'à 15 ans. Cependant l'utilisation de la technologie lithium-ion à ces échelles de puissance n'en est qu'à ses débuts.



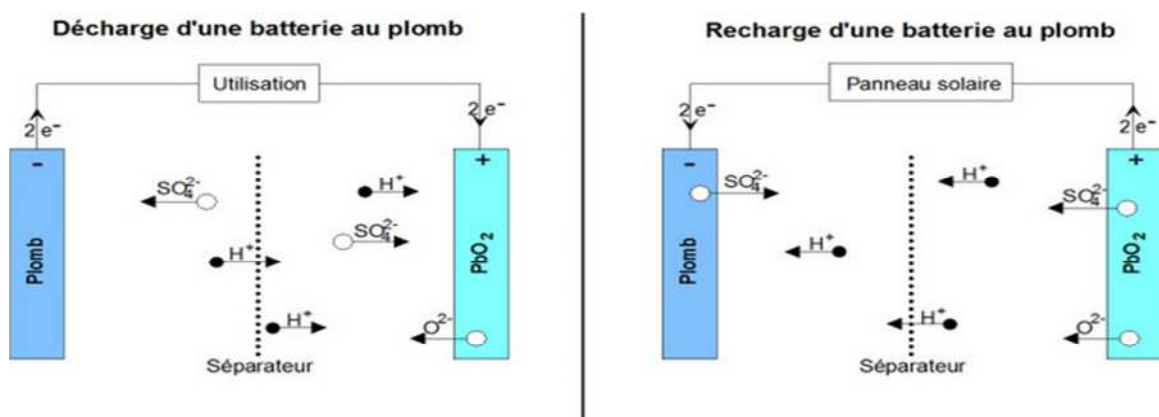
Figure(III.2) Accumulateur lithium ion.

III-1-4-3. Accumulateur au plomb (PB)

Ce sont des batteries à électrolyte liquide, qui se composent de deux électrodes, positive, baignant dans l'acide sulfurique dilué. Ce sont des batteries conçues pour délivrer une puissance instantanée (batteries de démarrage moteur pour automobile). Une batterie au plomb est composée de plusieurs éléments d'accumulateurs montés en série.

La tension normale d'un élément au plomb de 2V environ, par exemple, la batterie d'un véhicule comporte six éléments, elle a donc une tension électrique de 12V. Mais atteint facilement 2,3V quand l'accumulateur est bien chargé. En réalité, une batterie 12V chargée affichera une tension de 12,8V à 13, 2V si la tension d'une batterie chargée est inférieure à 11,4V, elle sera en fin de vie.

Même non branchée, une batterie au plomb se décharge lentement du fait de diverses réactions chimiques qui peuvent conduire à la « sulfatation » de la borne positive (poudre blanche).



Figure(III.3) Accumulateur au plomb (PB).

III-1-4-4. Les avantages et inconvénients

Type de batterie d'accumulateur	Avantage	Inconvénients
Accumulateur au plomb	✓ Le fonctionnement de ces batteries ne disperse pas de plomb ✓ Le plomb est plus économique ✓ Elles n'ont pas d'effet de mémoire, c'est-à-dire qu'on peut les recharger n'importe quand sans les abîmer. ✓ Elles ont de grosses capacités et solides. ✓ Auto-décharge faible 5% par mois. ✓ Nombre de cycles de charge/décharge variant de 600 à 900 sur un banc d'essai : cette valeur importante est réduite de moitié en condition d'utilisation réelle, ce qui donne par exemple, sur un véhicule, environ 300 cycles. ✓ Insensibilité aux traitements mécaniques et électriques. ✓ Éléments recyclables à 99,96 %. ✓ Coût à l'achat le plus faible, fiables et ne posant aucun problème de sécurité. ✓ Facilité à charger et à gérer énergétiquement, surtout en mode tampon (charge permanente). ✓ Opérations de maintenance simplifiées.	✓ Le plomb est un métal toxique et polluant. ✓ Elles sont lourdes. ✓ Elles se déchargent lentement du fait de diverses réactions chimiques qui peuvent conduire à la sulfatation de la borne positive. ✓ Énergie spécifique, ou énergie massique, faible, de 30 Wh/kg pour les éléments étanches à 40 Wh/kg pour les éléments ouverts. ✓ Mauvaise tenue aux décharges profondes ; les éléments les plus faibles subissent une inversion électrochimique en fin de charge, la puissance spécifique disponible baissant avec l'état de charge. ✓ Décharge profonde non acceptée. ✓ Réduction des performances pour des températures inférieures à 0 °C.
Accumulateur nickel cadmium	✓ Charge simple et rapide même après une longue période de stockage. ✓ Se recharge facilement même à basse température. ✓ Grande durée de vie en nombre de cycles de charge et de décharge (nombre de recharge 1500 et le temps de charge 1 heure). ✓ Résistance interne faible. ✓ Stockage et transport simple. ✓ Faible coût.	✓ Faible densité énergétique. ✓ Auto-décharge assez rapide (20%/mois). ✓ Sensibilité à l'effet mémoire. ✓ Polluant.

Accumulateur lithium-ion	✓ Ne présente aucun effet mémoire, contrairement au l'accumulateur à base de nickel. ✓ Auto-décharge faible (10%/mois). ✓ Possède une haute densité d'énergie pour un poids très faible.	✓ Leur courant de charge et de décharge est faible qu'avec d'autre technologie. ✓ Il peut se produire un court-circuit les deux électrodes par croissance dendritique de lithium. ✓ Cette technologie mal utilisée présente des dangers potentiels .Elles peuvent se décharger en chauffant au-delà de 80°C en une réaction brutale et dangereuse
--	--	---

III-2-1. Définition d'une batterie au plomb-acide

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance.

Ces plaques sont recouvertes de matières actives-bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface, ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges d'une batterie) sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour une batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères heure, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies) [13].



Figure(III.4). Batterie au plomb-acide.

III-2-2. Définition de plomb

Le plomb est un métal de couleur bleu-gris, très malléable, qui peut être modelé et laminé en feuilles très minces. Il existe dans la nature sous forme de sulfure PbS , la galène... Elle se rencontre également dans des sols pollués. [13][14] Il bout à $1740^{\circ}C$. Dès $550^{\circ}C$, il existe une tension de vapeur.

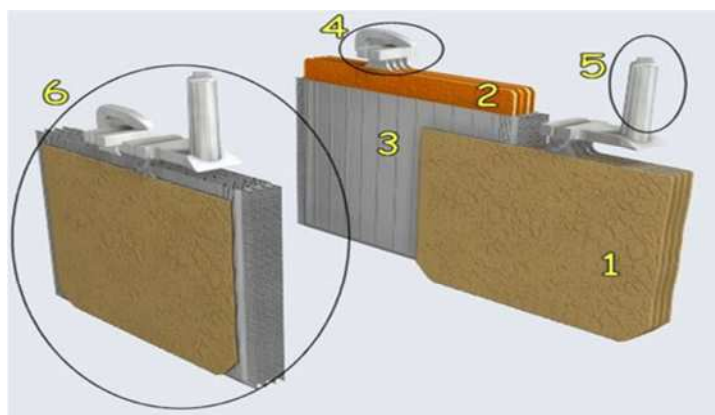
III-2-3. Constitution de la batterie au plomb

Un accumulateur de 2V est l'unité de base d'une batterie au plomb. Il se compose notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur micro poreux et d'un électrolyte.

Un élément de batterie de démarrage (technologie "plomb ouvert") comprend des plaques planes positives (2) et négatives (1) assemblées en alternance (**Figure(III.5)**). Le nombre de plaques pour chaque polarité et leur surface sont des paramètres qui définissent la **capacité** de l'élément. Par exemple, l'électrode positive comporte ici 4 plaques en parallèle, reliées par un connecteur (4). Pour éviter les court-circuit entre les plaques de polarité différente, un séparateur microporeux isolant est placé entre ces plaques lors du montage (3).

Les plaques positives et négatives sont assemblées en faisceaux (6) et plongées dans une solution d'acide sulfurique et d'eau distillée. Chaque faisceau constitue ainsi un élément.

- 1 - Électrode négative, composée de 4 plaques en plomb spongieux (Pb).
- 2 - Électrode positive, composée de 4 plaques de dioxyde de plomb (PbO_2).
- 3 - Séparateur microporeux (pochette en Polyéthylène).
- 4 - Pontet de connexion en plomb.
- 5 - Borne terminale négative.
- 6 - Un élément Pb/ PbO_2 .



Figure(III.5). Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) [14].

L'ensemble est contenu dans un bac (en polypropylène, PVC ou ABS) muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits **Figure (III.6)**. Les deux bornes en plomb raccordées aux faisceaux de plaques de chaque polarité, permettent le raccordement de la batterie au circuit extérieur.

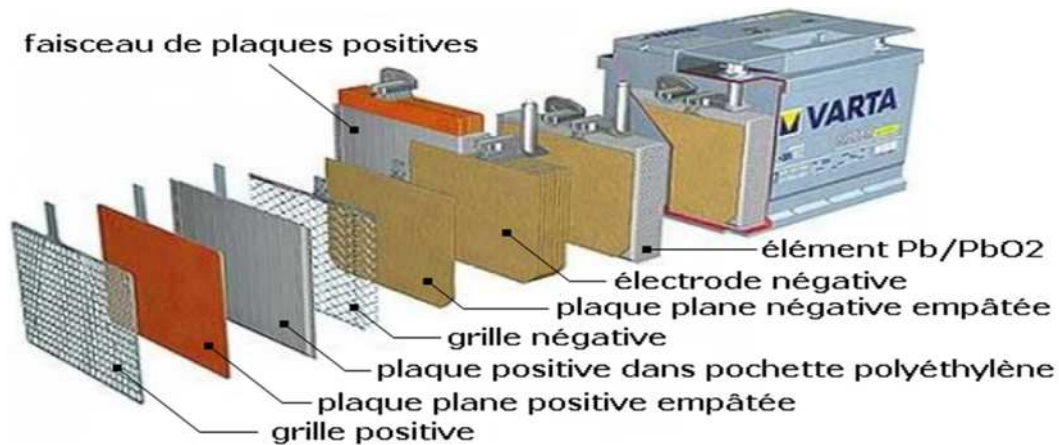


Figure (III.6).Vue éclatée d'une batterie de démarrage [14].

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la Batterie. [14] L'alliage en question est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommes. Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes".

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conductions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%.(pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en l'astique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [14].

III-2-4. Réactions chimiques

Ce sont des réactions d'oxydo-réduction : il y a un transfert d'électrons. L'atome qui capte les électrons est appelé oxydant : l'oxydant subit une réduction (à la cathode). L'atome qui cède les électrons est appelé réducteur : le réducteur subit une oxydation (à l'anode). Les polarités de la batterie sont alternativement anode ou cathode, suivant le mode de fonctionnement (charge ou décharge) : la borne négative est anode pendant la décharge et cathode pendant la charge. L'électrolyte est une solution d'eau pure et d'acide sulfurique H_2SO_4 (2H^+ ; SO_4^{2-}). L'électrode négative est formée de plomb Pb, l'électrode positive d'oxyde de plomb PbO_2 .

La décharge de l'accumulateur au plomb consomme les solides des électrodes et les ions H^+ de l'électrolyte (la concentration en acide diminue, le pH augmente), Il y a formation de sulfate de plomb PbSO_4 sur les électrodes.

- oxydation à l'anode (borne -) : $\text{Pb} \longrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$
 - réduction à la cathode (borne +) : $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
 - sulfatation des électrodes : $2\text{Pb}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{PbSO}_4$
- $$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{PbSO}_4$$

La charge de l'accumulateur au plomb forme les solides des électrodes et les ions H^+ de l'électrolyte (la concentration en acide augmente, le pH diminue). Le sulfate de plomb PbSO_4 disparaît des électrodes.

- oxydation à l'anode (borne +) : $\text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

- réduction à la cathode (borne -) : $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}$
 - désulfuration des électrodes : $2\text{PbSO}_4 \longrightarrow 2\text{Pb}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-}$
- $$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{PbSO}_4 \longrightarrow \text{Pb} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$$

III-2-5. Principe De Fonctionnement D'accumulateur Au Plomb

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge, on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [13] :

- Electrode positive: $\text{PbO}_2 + 3\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.
- Electrode negative: $\text{Pb} + \text{HSO}_4^- \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$.
- Reaction: $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{HSO}_4^- \leftrightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

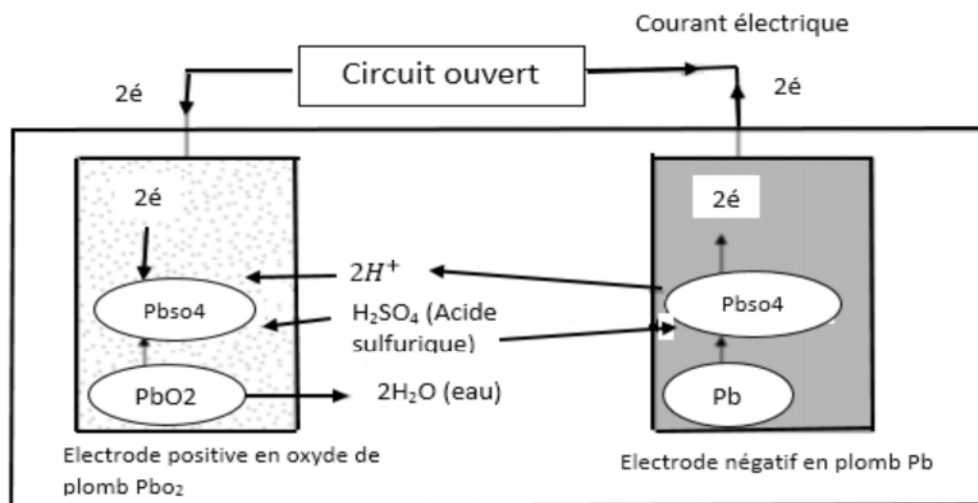
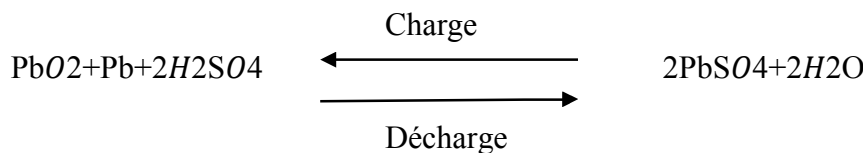


Figure (III.7) Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb [15].

III-2-5-1. En décharge

Au cours de la décharge. Il y a formation de cristaux (sulfate de plomb) sur chacune des électrodes :

La densité devient faible et ceci en fonction de la quantité déchargée.

La densité de l'électrolyte décroît en fonction de la quantité déchargée.

La tension de fin de décharge est fortement liée au courant de décharge.

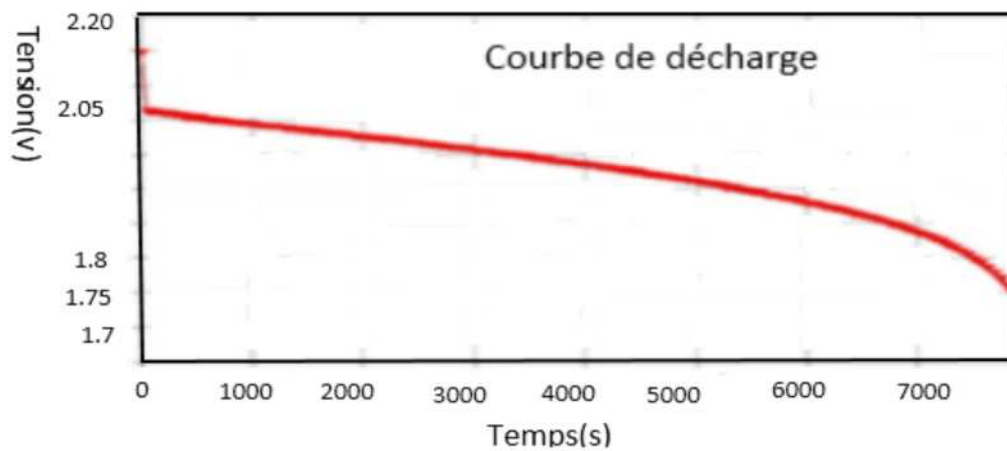


Figure (III.8). Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb [15]

III-2-5-2. En charge

- Durant la charge, le sulfate de plomb est transformé au niveau des plaques, en plomb (Pb) pour l'électrode négative et en oxyde de plomb (PbO_2) pour l'électrode positive. Cette formation s'accompagne de la formation d'acide sulfurique. La densité augmente.
- La charge d'une batterie dans un système photovoltaïque s'effectue généralement selon la caractéristique de charge IU **Figure (III.9)**. La première phase s'effectue à courant «quasiment» constant jusqu'à l'atteinte de la tension de fin de charge à partir de laquelle commence la deuxième phase de charge qui s'effectue à tension constante. Durant cette deuxième phase, le courant de charge sera réduit à niveau correspondant au maintien de la charge dans le but de conduire à une charge complète de la batterie.

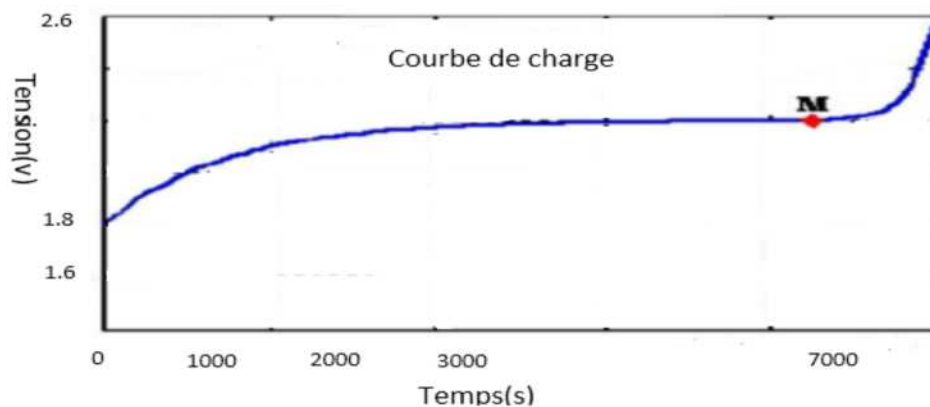


Figure (III.9). Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb [15].

NB :

- Que la densité croît lentement en début de charge pour remonter brusquement en fin de charge. Cette remontée brusque de la densité est le résultat de l'homogénéisation de l'électrolyse qui fait suite à son bouillonnement causé par l'apparition d'un dégagement gazeux.

- Que le phénomène de dégagement gazeux appelé «gassing» est lié à la tension de charge qui est-elle même quasiment dépendante de la température selon la formule :

- ✓ $Vg = Vgt0 - 0,005xt.$
- ✓ Vg = tension de gassing correspondant à la température T .
- ✓ $Vgt0$ = tension de gassing à $T = 20C^\circ$.
- ✓ T = température actuelle en C° .

III-2-6. Caractéristique électrique d'accumulateur du plomb (Pb)

Une batterie au plomb se caractérise essentiellement par :

- **La tension nominale, U** qui dépend du nombre d'éléments **n** , égale au nombre d'éléments multiplié par 2,1 V. Généralement, on considère qu'un accumulateur au plomb est déchargé lorsqu'il atteint la tension de 1,8V par élément, donc une batterie de six éléments ou 12 V est déchargée lorsqu'elle atteint la tension de 10,8 V:

$$U = n \times 2,1 \text{ Si } n = 6 \Rightarrow U = 12,6 \text{ v}$$

- **Le courant maximal, I** qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête en ampères CCA (jusqu'à une température de 0 °F soit $-17,78^\circ C$).

Les valeurs maximales sont données par le constructeur pour une batterie neuve et chargée à 100 %, elles varient sensiblement en fonction de l'état de charge, se dégradent en fonction du temps ainsi que de l'usage qui est fait de la batterie.

- **La capacité de stockage, notée C** représente la quantité d'énergie disponible (ne pas confondre avec la capacité électrique). Elle s'exprime en ampère-heure :

$$E = C \times U \text{ (} C = 50Ah \text{ et } U = 12V \Rightarrow E = 600Wh \text{)}.$$

• Exemple de caractéristiques techniques des batteries à Plomb

Type	Tension	Capacité		Longueur	Largeur	Hauteur	Poids	Courant		Impédance
	(V)	Ah/20h	Ah/10h	(mm)	(mm)	(mm)	(Kg)	(A)1 mn	(A) 1 s	(m ohm)
NPL78-12I	12	78	72,5	380	166	177,5	28,6	500	800	4
NPL100-12	12	100	93	407	172,5	240	39	600	800	4
NPL130-6I	6	130	120,3	350	166	174	24	500	800	2
NPL200-6	6	200	186	398	176	250	39	1200	1600	1,3

NB :

Pour le type **NPL100-12**, la capacité est :

- C20 = 100 Ah pour une décharge en 20 heures
- C10 = 93 Ah pour une décharge en 10 heures

Plus la rapidité de la décharge est importante, plus la capacité réelle de la batterie est faible.

La batterie **NPL100-12** peut fournir 600 A pendant 1 minute et 800 A pendant 1 seconde D'après la norme NF C 15-100, le courant de court-circuit d'une batterie est : $I_{cc} = 10 \times C_n$, Ce qui donne pour la NPL100-12 : $I_{cc} = 10 \times 100A$.

III-2-7. Les différents domaines des batteries au plomb

De nos jours, les batteries au plomb sont utilisées pour 3 grands types d'application :

- Domaine du démarrage (démarrage des moteurs de véhicules).
- Domaine de la traction (alimentation des chariots de manutention).
- Domaine des applications stationnaires (énergie de secours, photovoltaïque).

A chacune de ses applications est adaptée une technologie d'accumulateurs au plomb, qui se distinguent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide

ou immobilisé, des concentrations d'électrolyte différentes, des plaques planes ou tubulaires, etc. Sur les installations photovoltaïques autonomes, on veillera donc à mettre en œuvre des batteries conçues pour les applications stationnaires photovoltaïques. Pour chacune des 3 familles les batteries pourront être soit de type "ouvertes", soit de type "étanches".

Le marché mondial des batteries au plomb est largement dominé par les batteries de démarrage, ainsi qu'illustré sur les diagrammes ci-dessous :

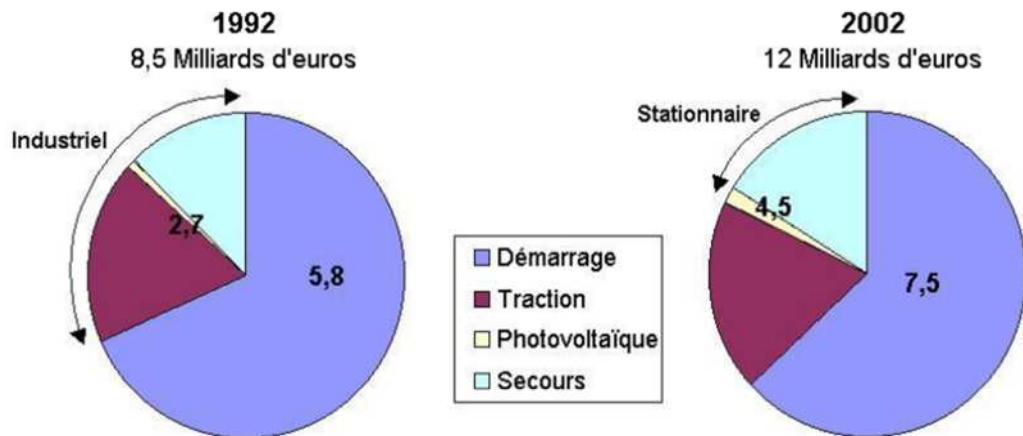


Figure (III.10). Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb [16].

III-2-8. Précautions d'exploitation

Des caractéristiques fonctionnelles des batteries au plomb présentées ci-dessus découlent certaines dispositions à prendre qui sont indispensables au bon fonctionnement de ces batteries [17].:

- La tension de fin de charge doit être fixée en tenant compte de la température :

Soit au niveau du régulateur qui doit être équipé d'un dispositif appelé compensateur de température qui fixe automatiquement la tension de fin de charge en fonction de la température mesurée.

Soit en prévoyant une tension fixe calculée à partir de la formule (a) En utilisant une température maximale du site.

- Il faudra veiller à ce que la durée du gassing ne dépasse pas 10 heures par mois.
- La fixation du seuil de tension de fin de décharge doit tenir compte du courant moyen de décharge
- Des charges d'égalisation doivent être prévues au moins deux fois par an (si le Régulateur ne dispose pas d'une activation automatique de la charge d'égalisation) pour éviter la formation prolongée de sulfate sur les plaques des batteries.

III-2-9. Différentes causes de la défaillance des batteries

❖ Surcharge des batteries

Les surcharges des batteries engendrent non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, les matières actives qui se déposent aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. Les surcharges des batteries génèrent en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

❖ Décharges profondes

Les décharges profondes sont, à côté des surcharges, les premières causes de la détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autre la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

❖ Sulfatation

La sulfatation consiste en la formation sur les plaques de larges cristaux de sulfates de plomb, en lieu et place des fins cristaux qui y sont normalement présents. Les causes de la sulfatation sont :

- la non-utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou partielle,
- le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation,
- la variation de la température dans la batterie. Les manifestations de la sulfatation sont l'augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui entraîne une diminution de la décharge et une augmentation de la tension de charge.

❖ Courts-circuits

Les courts-circuits des éléments sont générés par :

- la destruction des séparateurs,
- l'accumulation excessive des sédiments au fond du bac,
- la formation de structures arborescentes de plomb, de la plaque négative vers la plaque positive.

Les manifestations du court-circuit des éléments sont les suivants :

- une densité d'électrolyte faible, en dépit de la réception normale de charge.
- une perte rapide de capacité après une pleine charge.
- une tension à vide faible.

❖ La température

La durée de vie d'une batterie est indiquée par le fabricant pour une température ambiante de 20°C, Cette durée de vie est réduite de moitié pour une élévation de température de 10°C.

❖ Autres causes de la diminution de la durée de vie des batteries

Outre les phénomènes décrits plus haut, d'autres causes que nous présentons Ci-dessous peuvent contribuer à la diminution de la durée de vie des batteries.

Il s'agit :

- des phénomènes de vibrations.
- des salissures.

III-3. Performances

La batterie au plomb est celle qui a la plus faible énergie massique, 35 Wh/kg, après la batterie nickel-fer. Mais comme elle est capable de fournir un courant crête de grande intensité, utile pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne, elle est encore très utilisée en particulier dans les véhicules automobiles et dans la plupart des véhicules ferroviaires. Elle présente aussi l'avantage de ne pas être sensible à l'effet mémoire. [18].

III-4. Choix de batteries d'accumulateurs

Les choix d'une batterie d'accumulateur se fait suivant ces paramètres :

- Cycle de vie.
- Taux de décharge.
- La capacité Ah.
- Fiabilité.

III-5. L'entretien de batteries d'accumulateurs

L'entretien des batteries est très simple, la plupart des modèles ne demande qu'à être chargée régulièrement surtout avant d'être stocké.

Pour entretenir une batterie, il faut prendre en considérations ces critères :

- Garder la batterie propre ; ne laisser pas la poussière s'accumule sous peine de risque de court-circuit.
- Il est généralement admis que le courant de charge ne doit pas dépasser 10% de capacité de la batterie.
- Ne pas les surcharger.
- Elle doit être stockée dans un endroit sec à l'abri du soleil.
- Elle doit être maintenue charger par une charge d'entretien à intervalle régulier.

III-6. Mesures de sécurité

Pour être en sécurité pendant la charge d'une batterie, suivez ses mesures :

- Pour toute manipulation portez des protections individuelles ; gants, lunettes ...surtout avec des batteries à électrolyte.
- Il est nécessaire de bien ventiler le local où s'effectue cette charge.
- Il ne faut jamais brancher les câbles de chargeur au niveau de la batterie avant d'avoir éteint le chargeur.
- Ne mettez jamais en court-circuit la batterie.
- N'inversez pas la polarité.
- Ne surcharger pas et ne percez pas le boîtier.
- Ne pas faire de décharge profonde.

III-7. Aspects environnementaux et santé humaine

S'il est ingéré ou respiré, le plomb peut être la cause d'intoxications aiguës ou chroniques. Il peut être à l'origine de cas de saturnisme. Une bonne maîtrise des risques présentés par les batteries au plomb usagées est donc indispensable et dangereux pour la santé et pour l'environnement, ces batteries doivent être collectées et retraitées par des sociétés spécialisées. Afin de prévenir les risques de pollution, les entreprises françaises ont l'obligation de mettre en place des procédés conformes aux meilleures techniques disponibles et font l'objet de contrôles stricts et régulier. Elles doivent également garantir un niveau élevé de protection de leurs salariés. Cette protection passe par la formation aux risques liés au plomb et par l'utilisation systématique d'équipements de protection collective et individuelle. L'efficacité de ces mesures est régulièrement vérifiée par la mesure de la plombémie des salariés. Un démantèlement réalisé dans de mauvaises conditions peut engendrer des décès et une pollution durable.

V- Conclusion générale

Tout au long de ce projet, nous avons pour but de réguler la charge d'une batterie au plomb acide (12V) à l'aide d'un panneau solaire. Au fur et à mesure du projet, nous nous sommes rendu compte que la partie principale était le circuit électronique de chargeur solaire et sa mise en application, tandis que les parties sur la batterie et le panneau solaire étaient des parties d'approfondissement des connaissances.

Malheureusement, à la fin du projet, nous n'avons pas eu la possibilité d'associer le panneau solaire, la batterie et le chargeur solaire. Malgré tout, chacune des parties a été approfondie et l'utilisation de chargeur a été maîtrisée. De plus, tout nous porte à penser que nous aurions pu connecter ces trois éléments si nous avions eu plus de temps et de connaissances afin de finaliser les réglages.

Le projet nous a apporté de nombreuses connaissances personnelles, des compétences techniques et générales dans le domaine de l'énergie et de l'électronique, et ce fut un moyen de mieux appréhender l'importance de l'expérimentation. De plus, travailler sur ce prototype unique nous a permis d'acquérir une première approche du travail de mise en conception d'un produit.

Pour la poursuite de ce projet, il serait bien de pouvoir finalement associer le panneau solaire, la batterie et le circuit électronique. Il serait aussi intéressant de comparer la régulation de la charge d'une batterie avec dans un premier temps un panneau photovoltaïque et en second temps, un panneau thermique.

Références Bibliographiques

- [1] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ' Le pompage photovoltaïque', université d'Ottawa, 1998.
- [2] S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [4] A. labouret et M. villosz préface de jean louis bal 'Energie solaire Photovoltaïque', liver 4 éditions, 2008.
- [3] M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays', Jornal of power electronics, May 2009.
- [5] B. Flèche - D. Delagnes 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007, <http://www.scribd.com>.
- [6] M.belhad 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome',
Mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [7] S. PETIBON 'Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [8] O.BENSEDDIK, F.DJALOUUD 'étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque', université de KASDI MERBAH- OUARGLA, 2012.
- [9] E. Razelli, "Prospects for lead–acid batteries in the new millenium", Journal of Power Sources, 116 (2003) pp. 2-3.
- [10] X. Muneret, P. Lenain, "Évolution des batteries au plomb acide de technologies avancées pour les applications stationnaires d'aujourd'hui et de demain", Colloque Gaston Planté (30 et 31 octobre 2000).

[11] R. Kubis, "Market for lead (Pb) batteries in Europe—current situation and prospects", Journal of Power Sources, (2003).

[12] N. Achaibou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV»; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.

[13] W. Merrouche, H. Tebibel et A. Malek, «Développement sous Proteus® d'un régulateur basé sur un algorithme de charge efficace et sécurisée pour batteries au plomb dans un système photovoltaïque» Revue des Energies

Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa (2012) 175–186.

[14] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef «Optimisation du rendement d'une cellule Solaire NP au silicium monocristallin» Rev .Energ. Ren: physique Energétique (1998pp.95-100).

[15] D.Thévenard, and M.Ross «validation and Verification of Component Models and System Models for the PV», CETC-internal report 2003-035, Canada, (2003).

[16] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, (2004).

[17] Julien Labbé, «hydrogène: L'électrolytique comme moyen de stockage D'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés», thèse de doctorat à l'école des mines de paris (2006).

[18] Bendjamâa Ibrahim., «*Modélisation et commande d'un système de stockage Photovoltaïque*» / Magister Université Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen.

- <https://mon-chargeur-batterie.com>.
- <https://solaire.ooreka.fr/comprendre/chargeur-solaire>.
- <http://bioneure.fr/chargeur-solaire-batterie/>
- <https://www.solaris-store.com/6-panneau-solaire>.

Cette ressource présente des liens utiles.

1 – Fabricants

Vergnet SA [1] est une entreprise française qui développe des solutions d'eau et d'électricité en milieu rural.

Solargie [2] est une entreprise française qui développe des pompes solaires. Elle propose des fiches techniques de l'ensemble des composants du système (panneaux solaires, régulateurs, onduleurs,...)

Solco [3] est un fabricant Australien d'éolienne de pompage et système photovoltaïque. La brochure montre un système bielle manivelle utilisé pour le pompage.

Solar Home [4] est un fabricant américain de solutions complètes de pompage solaire. Il est possible de télécharger un guide de montage d'une pompe solaire.

2 – Sujets examens ou concours

Concours général des lycées Session 2002 STI Electrotechnique [5] : le sujet et les corrigés disponibles sur le site du centre de ressource en électrotechnique traite de l'implantation d'une éolienne Vestas (fabricant danois) à Plouarzel en Bretagne. Il propose une étude de la transmission de puissance, du démarrage, du système d'orientation (girouette et anémomètre), de la machine asynchrone.

Agrégation externe de génie électrique 1999 - Epreuve d'électroniques [5] : le sujet porte sur la motorisation d'une pompe immergée. Les parties B et C du sujet (en trois parties) traitent du cas où la pompe est motorisée à partir de l'énergie photovoltaïque.

Références :

[1]: <http://www.vergnet.com/>

[2]: <http://photovoltaique.com/>

[3]: <http://solco.com.au/>

[4]: <http://www.partsonsale.com/>

[5]: <http://www.reseau-canope.fr/seconaire/>

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>

Les batteries (ou accumulateurs) et les piles sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les batteries sont basées sur un système électrochimique réversible, contrairement aux piles.

1 - Rappel sur le courant

L'intensité (ou courant) est proportionnelle à la quantité d'électrons déplacée par seconde.



Figure 1 : Convention de sens pour le courant

2 - Réaction électrochimique

Le courant est produit par la circulation d'électrons entre 2 plaques ou électrodes :

- une électrode positive capable de céder ou de capter les électrons,
- une électrode négative capable de céder ou de capter les électrons¹.

Le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons qui se déplacent de l'électrode positive à l'électrode négative en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter un récepteur. Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte partant de la cathode pour rejoindre l'anode. La batterie se décharge.

Une batterie ou une pile se caractérise donc tout d'abord par deux couples « oxydant-réducteur » (par exemple Plomb/Oxyde de plomb, Carbone/Oxyde de cobalt lithium ou Carbone/Phosphate de fer lithié ...) échangeant des électrons. L'association de deux plaques (ou de deux matériaux d'insertion pour la batterie li-ion) constitue l'entité primaire d'une batterie.

Les deux électrodes baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte), liquide ou sous forme de gel. C'est la réaction entre la solution et les électrodes qui est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans la solution. Ainsi, l'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique et, plus généralement, de participer à la réaction chimique. Un isolant poreux (ou séparateur) permet de séparer les deux électrodes tout en autorisant le passage des ions.

¹ Lors de la décharge, l'électrode positive est le siège d'une réaction de réduction et l'électrode négative est le siège d'une réaction d'oxydation. Lors de la charge, les réactions s'inversent. L'électrode où siège la réaction de réduction est la cathode, celle où siège la réaction d'oxydation est l'anode. Dans le cas de la décharge, l'électrode positive est la cathode, alors que dans le cas de la charge, cette même électrode positive est l'anode. Les terminologies « anode » et « cathode » ne présentent donc que peu d'intérêts ici.

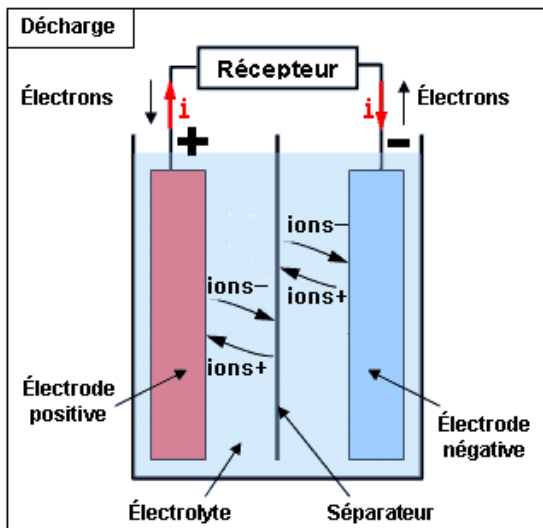


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb

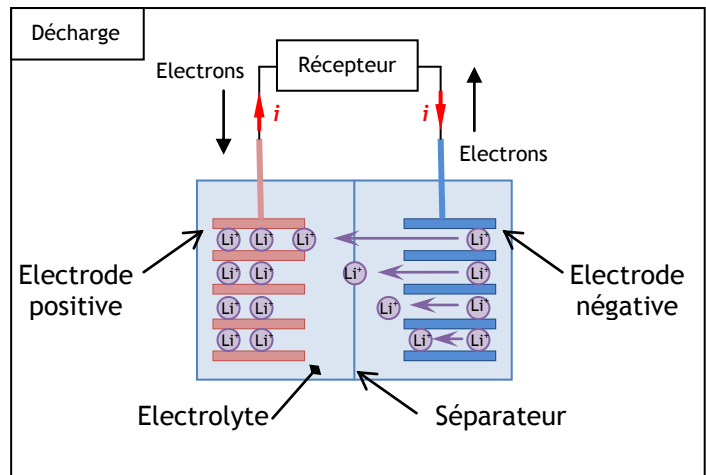
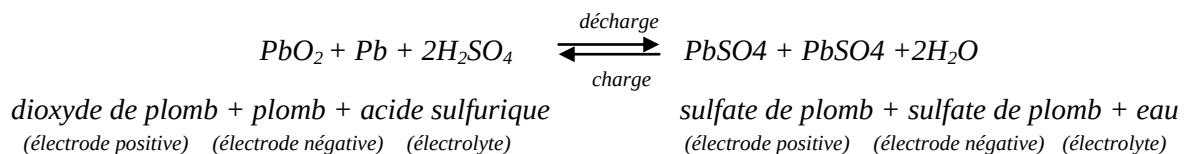


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une batterie au lithium

3 - Exemple : Entité primaire d'une batterie au plomb (oxyde de plomb/plomb)

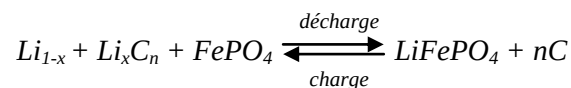
- Électrode positive : oxyde de plomb,
- Électrode négative : plomb,
- Électrolyte : mélange d'eau + acide sulfurique.



4 - Exemple : Entité primaire d'une batterie au lithium (LiFePO₄)

- Électrode positive : phosphate de fer lithié LiFePO₄,
- Électrode négative : carbone,
- Électrolyte : mélange sels de lithium + solvant organique.

La décharge entraîne la formation de LiFePO₄ à l'électrode positive alors que le graphite de lithium se sépare en carbone et en cation Li⁺ à l'électrode négative. A la charge, le graphite de lithium se forme à l'électrode négative, alors qu'à l'électrode positive il y a destruction de LiFePO₄.



5 - Phase de décharge

Lors de la décharge, la réaction électrochimique est spontanée, elle engendre le déplacement des électrons au travers du récepteur afin de rétablir l'équilibre des potentiels chimiques, créant ainsi le courant. Lorsque les deux électrodes possèdent le même potentiel, la batterie ne débite plus de courant.

6 - Phase de charge

Le procédé est l'inverse de la décharge : pendant la charge, la batterie est réceptrice du courant fourni par le secteur. Un générateur est placé aux bornes de la batterie et débite en sens inverse dans le système. À l'intérieur de la batterie, les potentiels chimiques des électrodes « s'éloignent » et donc la tension augmente. L'énergie chimique accumulée se manifeste par des réactions électrochimiques forcées, sens opposé au sens spontané. À l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se manifeste par un déplacement d'électrons.

7 - Effet mémoire

L'effet mémoire touche les batteries nickel-hydrure de métal, Ni-MH. Le principe est que lorsque l'on recharge une batterie sans jamais la laisser se décharger totalement, on finit par perdre la capacité non utilisée : une batterie utilisée la plupart du temps à 75% finit par perdre 25% de sa capacité. Une décharge complète avec un appareil approprié peut rendre réversible ce phénomène. *Une explication de ce phénomène peut par exemple être consultée sur le site « Le monde des accumulateurs & batteries rechargeables » [1].*

8 - Réalisations industrielles

La tension nominale aux bornes d'un élément primaire (deux plaques : électrode positive et électrode négative) dépend des couples de matériaux utilisés dans la batterie. Par exemple, aux bornes de batterie au plomb (couple plomb/oxyde de plomb) la tension théorique maximale est de 2 V. Afin d'obtenir une batterie de 12 V il faut empiler 6 entités primaires.

Deux formes principales sont proposées :

- agencement cylindrique,
- agencement prismatique.

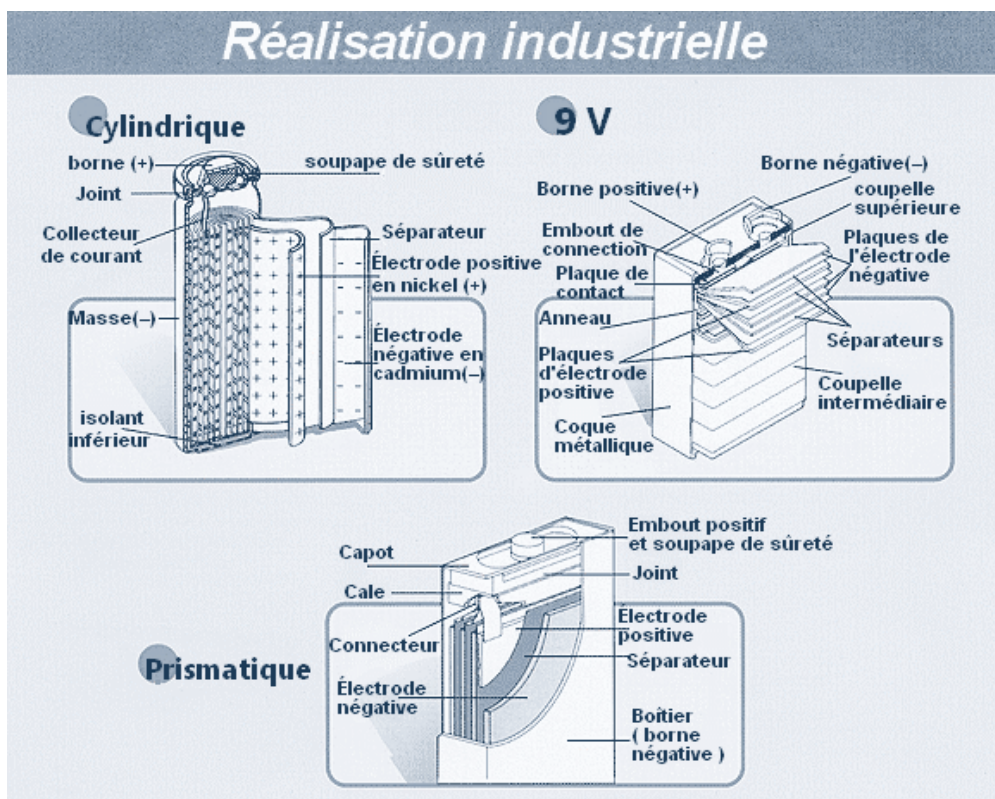


Figure 3 : Différentes réalisations de batteries [1]

Suivant le couple oxydant/réducteur utilisé, d'autres dispositions doivent être prises. Par exemple dans les batteries au plomb (batterie automobile) des réactions parasites provoquent un dégagement de gaz (de dioxygène et de dihydrogène) et de chaleur. Par sécurité et afin d'évacuer la surpression engendrée par la réaction, un ou des événements (soupapes) sont disposés sur la face supérieure. Ces batteries ouvertes peu onéreuses nécessitent un entretien, en particulier de compléter le niveau de liquide (acide et eau) et ne peuvent pas être renversées. Pour limiter cette contrainte, le liquide électrolytique peut être remplacé par un gel (principe utilisé dans les VAE qui sont susceptibles de subir des variations d'inclinaison importantes). Des batteries étanches et avec peu d'entretien ont vu le jour : les batteries étanches VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Ce sont des batteries à recombinaison de gaz, qui permettent de reformer de l'eau à partir de la combinaison de dioxygène et de dihydrogène.

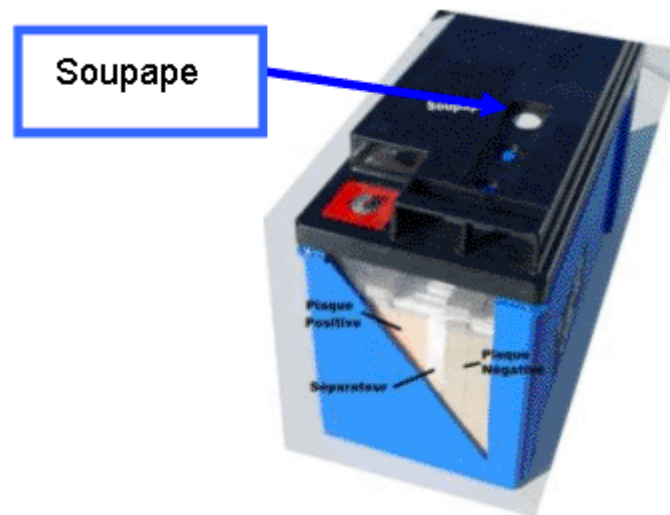


Figure 4 : Repérage de la soupape de dégagement de gaz [1]

Références :

[1]: <http://www.ni-cd.net/>

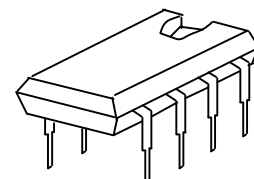
[a] : C. Lefrou, P. Fabry, J-C. Poignet - Electrochimie : Concepts fondamentaux illustrés

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>

Section : S	Option : Sciences de l'ingénieur	Discipline : Génie Électrique
Le circuit intégré NE 555		
Domaine d'application : Traitement du signal	Type de document : Exercice	Classe : Terminale
Date :		

I - Présentation du circuit

Le circuit intégré NE 555 permet de réaliser les fonctions astable et monostable de longue durée qui permettent la réalisation de temporisation allant de quelques microsecondes à quelques heures. Ses performances et ses facilités d'emploi lui ont ouvert des domaines réservés pendant longtemps à l'électromécanique. Le NE 555, qui se présente sous la forme d'un circuit intégré à 8 bornes, représente aujourd'hui une des solutions les plus utilisées pour la génération de signaux rectangulaires.



Circuit intégré à 8 bornes

Comme le montre le brochage sur la *Figure 1*, les 8 bornes du circuit NE 555 sont :

- 1 → la masse [alimentation 0 V]
- 2 → entrée de déclenchement
- 3 → la sortie principale
- 4 → entrée RAZ [Remise A Zéro]
- 5 → sortie de contrôle
- 6 → entrée de seuil
- 7 → sortie déchargement
- 8 → alimentation [tension V_{CC}]

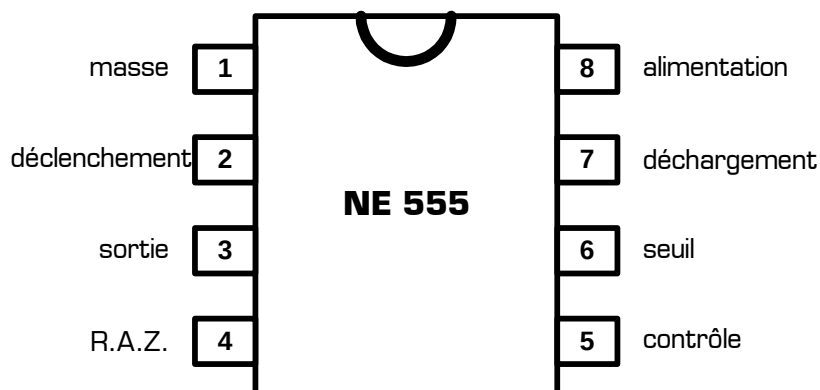


Figure 1 : brochage du circuit intégré NE 555

Le circuit NE 555 possède donc 3 entrées, 3 sorties, et 2 bornes d'alimentation.

Dans tout ce qui suit nous appellerons V_2 la tension présente sur la borne 2 [déclenchement], V_6 la tension sur la borne 6 [seuil], V_5 la tension sur la borne 5 [contrôle], et V_3 la tension sur la borne 3 [à la sortie du circuit].

A l'intérieur du NE 555 se trouvent plusieurs composants. Le circuit électronique interne du NE 555 est le suivant :

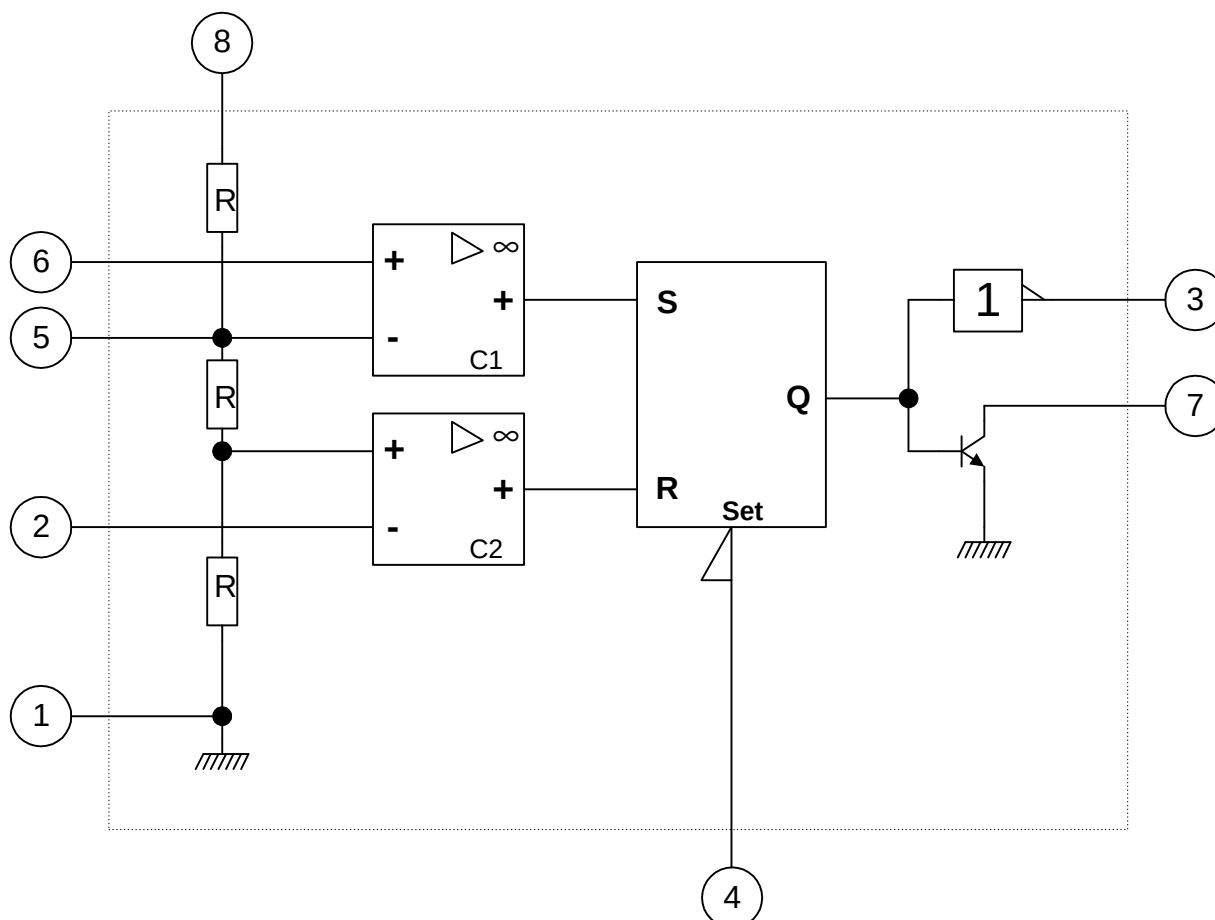


Figure 2 : montage électronique contenu à l'intérieur du circuit intégré NE 555

Sur la *Figure 2*, le circuit électronique interne nous montre que le NE 555 est constitué de :

- * 3 **résistances** de même valeur **R**
- * 2 **comparateurs de tension** C1 et C2
- * une **bascule RS**, possédant 2 entrées de mise à 1 (S et Set)
- * un **inverseur** dont la sortie est reliée à la borne n°3 du NE 555
- * un **transistor** dont le collecteur est reliée à la borne n°7 du NE 555

Remarques complémentaires :

- * Les 3 résistances R ont chacune une valeur de **5kΩ**
- * L'entrée **Set** de la bascule RS est prioritaire devant son entrée **S**, elle-même prioritaire devant l'entrée **R** : la mise à 1 de la bascule est donc prioritaire devant la mise à 0.
- * Les entrées **R** et **S** de la bascule sont actives au **niveau HAUT**
- * L'entrée **Set** de la bascule est active au **niveau BAS**
- * Le transistor relié à la borne n°7 se comporte comme un interrupteur commandé :
 - Si **Q = 0** (sortie de la bascule) alors le transistor est équivalent à un interrupteur **ouvert** et la borne n°7 (déchargement) est reliée à rien
 - Si **Q = 1** alors le transistor est équivalent à un interrupteur **fermé** et la borne n°7 est reliée à la masse
- * Les comparateurs, la bascule RS et l'inverseur sont alimentés entre 0 V et V_{CC} : leur tension de sortie est donc soit 0 V (au niveau bas) soit V_{CC} (au niveau haut).

II - Câblage du NE 555 en astable

En connectant quelques composants autour du NE 555, on réalise le câblage de la *Figure 3* dans lequel :

- * $R1 = 33\text{ k}\Omega$
- * $R2 = 22\text{ k}\Omega$
- * $C = 10\text{ }\mu\text{F}$
- * La tension d'alimentation présente sur la borne n°8 est $V_{CC} = 12\text{ V}$
- * La sortie du NE 555 (borne n°3) alimente une LED rouge D

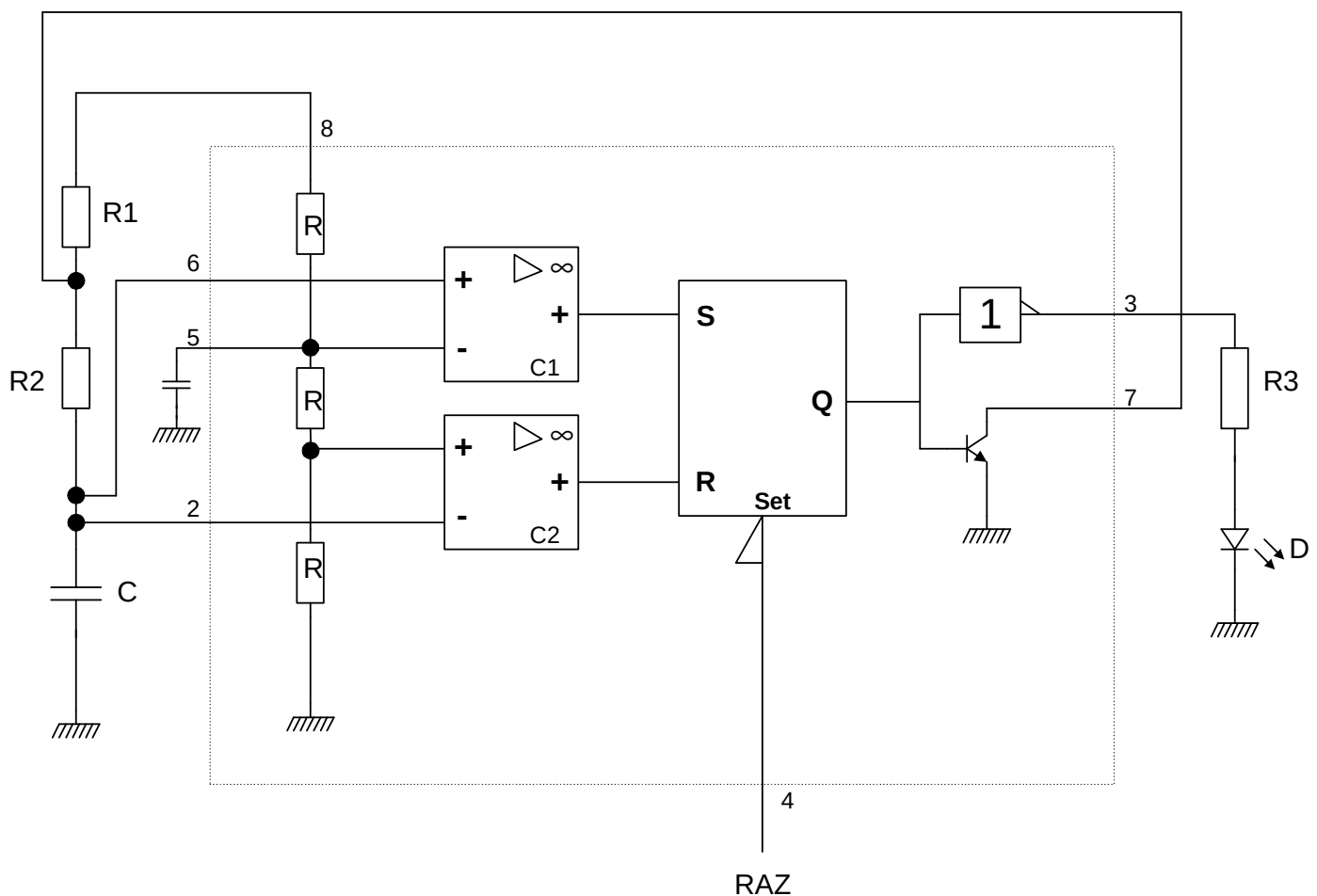


Figure 3 : câblage du NE 555 en astable

On peut remarquer sur le schéma de la *Figure 3* que :

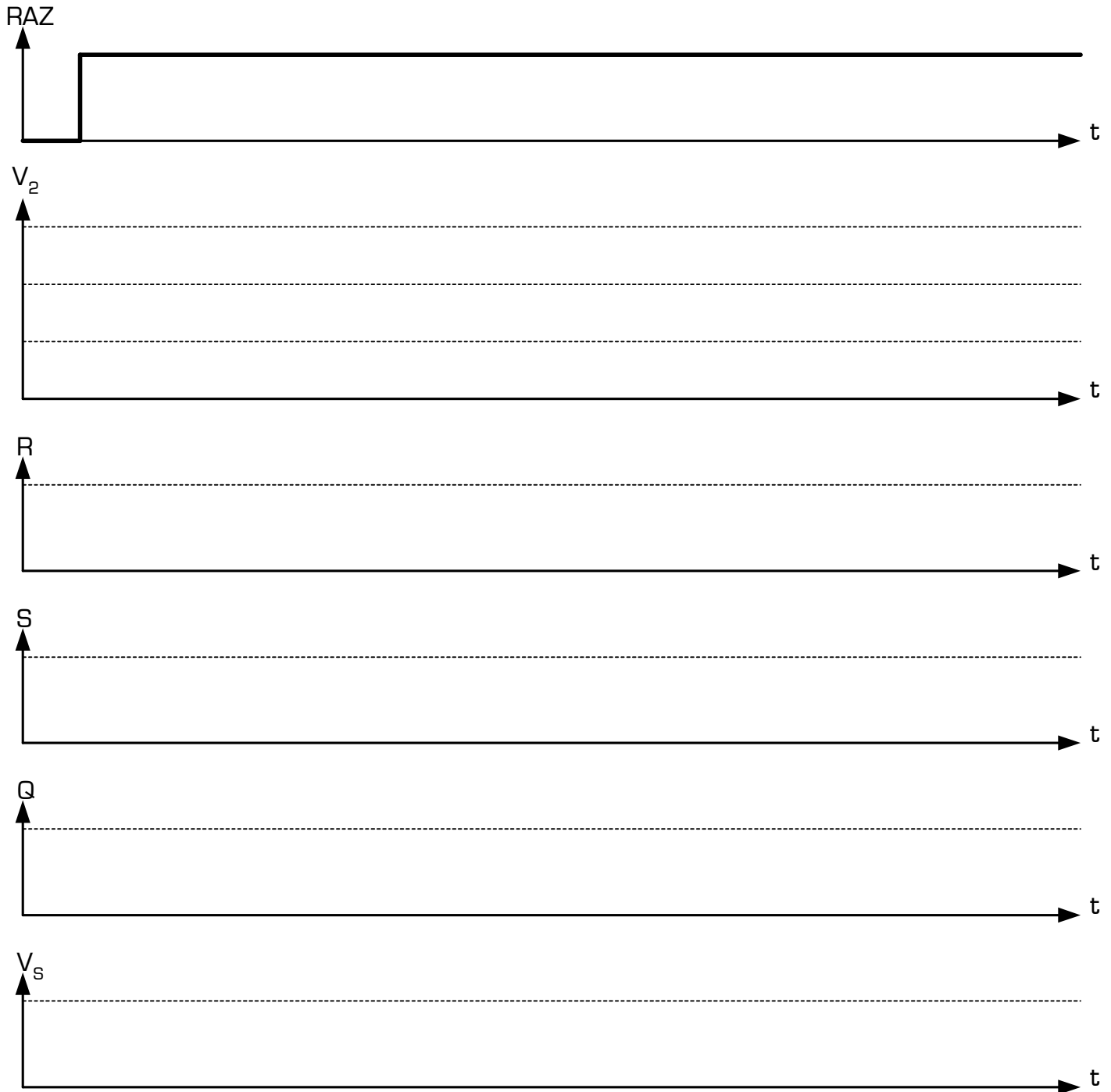
- * Lorsque la sortie Q de la bascule vaut 0, le condensateur C se **charge** à travers les résistances **R1 et R2**.
- * Lorsque la sortie Q de la bascule vaut 1, le condensateur C se **décharge** à travers la résistance **R2**.

II - 1 - Calculez la tension présente sur l'entrée inverseuse du comparateur C1. On la notera V_s .

II - 2 - Calculez la tension présente sur l'entrée non inverseuse du comparateur C2. On la notera V_+ .

II - 3 - Les tensions V_2 et V_6 sont identiques puisque les bornes 2 et 6 sont connectées ensemble. Nous noterons V_2 la tension présente sur les bornes 2 et 6 du NE 555, cette tension correspondant à la tension présente aux bornes du condensateur C. Fléchez les tensions V_2 et V_s sur le schéma de la *Figure 3* [page 2].

II - 4 - Tracez ci-dessous l'évolution des signaux V_2 [tension aux bornes du condensateur], R [sortie du comparateur C2], S [sortie du comparateur C1], Q [sortie de la bascule] et V_s [sortie principale du NE 555] en fonction de l'état de l'entrée **RAZ** et en sachant que le condensateur est complètement déchargé à l'instant $t = 0$.



II - 5 - Calculez la valeur du temps HAUT du signal de sortie V_s .

II - 6 - Calculez la valeur du temps BAS du signal de sortie V_s .

II - 7 - En déduire la période et le rapport cyclique du signal rectangulaire V_s généré par le montage de la *Figure 3*, ainsi que la fréquence de clignotement de la LED D. Graduez tous les axes des signaux ci-dessus en conséquence.

II - 8 - On garde le même câblage que celui de la *Figure 3* [page 2], avec les mêmes valeurs des composants mais en alimentant le circuit avec une tension $V_{cc} = 5\text{ V}$ à la place de $V_{cc} = 12\text{ V}$. Quelles sont les caractéristiques du signal de sortie V_s qui sont modifiées à la suite du changement de la tension d'alimentation du montage ?

III - Câblage du NE 555 en monostable

On réalise maintenant le câblage de la *Figure 4* en utilisant un NE 555.

Dans ce montage :

- * $R = 470 \text{ k}\Omega$
- * $C = 220 \text{ }\mu\text{F}$
- * $V_{CC} = 9 \text{ V}$
- * La borne 5 [contrôle] n'est pas utilisée
- * L'entrée 4 [RAZ] est reliée à V_{CC}
- * Les bornes 6 et 7 du NE 555 sont reliées ensemble

III - 1 - On appelle V_6 la tension présente sur la borne n°6 (seuil) du NE 555. V_6 correspond à la tension présente aux bornes du condensateur C. Fléchez la tension V_6 sur le schéma de la *Figure 4*.

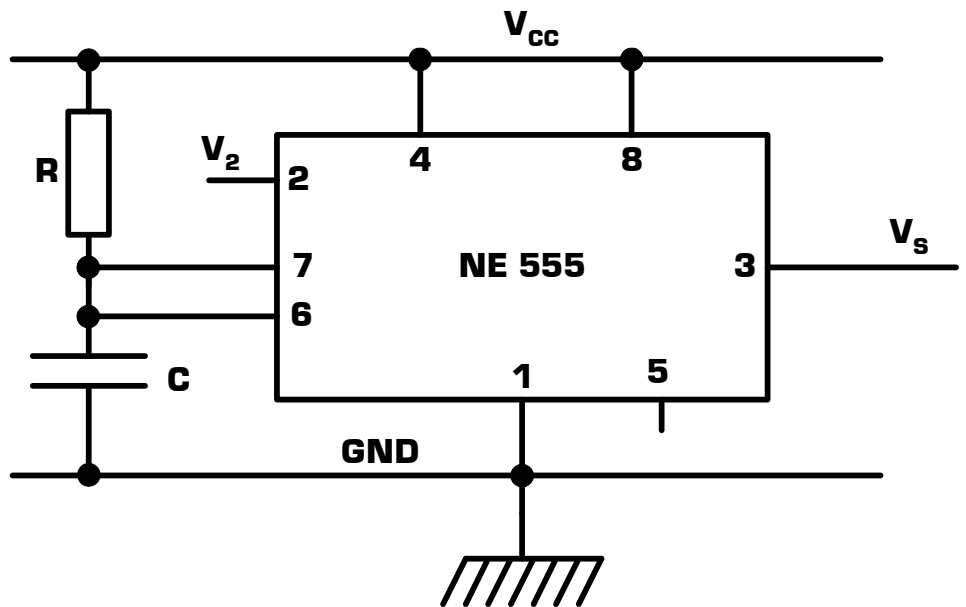
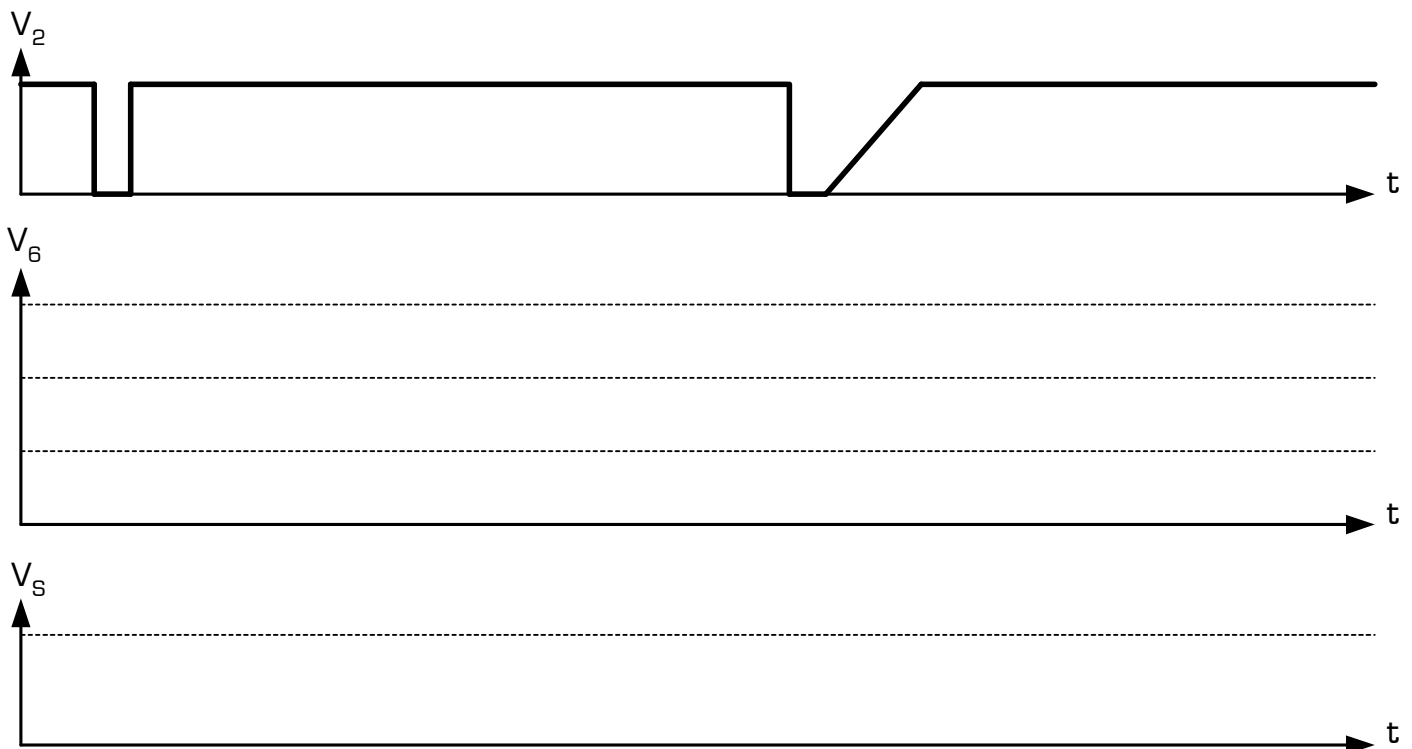


Figure 4 : câblage du NE 555 en monostable

III - 2 - Tracez ci-dessous l'évolution des signaux V_6 [tension aux bornes du condensateur] et V_s [sortie principale du NE 555] en fonction de l'état du signal V_2 [tension présente sur l'entrée déclenchement] et en sachant que le condensateur est complètement déchargé à l'instant $t = 0$. Graduez l'axe des ordonnées pour chacun des signaux.



III - 3 - Calculez la durée de la temporisation réalisée par le montage de la *Figure 4*, c'est-à-dire le temps pendant lequel V_s reste à l'état haut après l'impulsion de déclenchement sur V_2 , puis graduez ci-dessus les axes horizontaux.

III - 4 - Ce monostable est-il déclenché sur front montant ou sur front descendant ? Quel doit être le niveau exact de tension sur V_2 pour déclencher le monostable ?

III - 5 - La temporisation réalisée par le montage de la *Figure 4* est-elle modifiée si la tension d'alimentation passe de 9 V à 12 V ? Si oui, quelle est la nouvelle valeur de la temporisation ?

III - 6 - Quelle est la temporisation réalisée par le montage de la *Figure 4* si $V_{CC} = 6 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C = 47 \text{ nF}$?

III - 7 - Proposez un montage réalisant une temporisation de 30 secondes, en utilisant un circuit NE 555 alimenté en 8 V, un condensateur C d'une capacité de 680 μF , et une résistance R dont vous calculerez la valeur.