

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique



*ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE*

*Département Génie Electrique*

*PROJET DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE*

*Etude et réalisation d'un  
régulateur analogique et  
numérique de la charge/décharge  
d'une batterie associée à un  
système photovoltaïque*

*En collaboration avec UDES*

**Dirigé par :**

**Pr EM.BERKOUK**

**Mr T.ZERRAD(ING UDES)**

**Réalisé par :**

**MAKHEBI Charaf-eddine**

**TOUMERT Mhand**

*2007/2008*

# *Remerciements*

*Nous remercies Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté de réaliser ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à monsieur EM.BERKOUK professeur à l'ENP et T.ZERRAD ingénieur à l'UDES pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi pour la confiance qu'ils nous nous accordée.*

*Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.*

*J'exprime également ma profonde gratitude au monsieur CH.LARBES. et monsieur O.STIHI pour nous avoir soigneusement orientés.*

*Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À Celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver  
qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon  
existence*

*en m'offrant une éducation digne de confiance*

*À ma chère Mère.*

*À mon père, pour son amour et son soutien moral depuis mon enfance.*

*Père merci.*

*À la mémoire de mes chers grands pères.*

*A tout les membres de ma famille ; mes sœurs, mes frères, mes deux  
neveux,*

*À la famille MAKHEBI et AZZIEZ.*

*À toutes ma famille.*

*À mes meilleurs amis :*

*Tiwti, Zino, Farès, Riad, Amine, Wafik, Adel, Rafik,*

*Karim, Abdellah.*

*À mes amis de la cité universitaire BOURAOUI Amar,  
et à tous qui m'ont connu et aidé de près et de loin dans la réalisation  
de ce travail.*

*Charaf-Eddine*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et qui m'ont donné une éducation digne de confiance que dieu vous garde pour moi et toute la famille*

*Père, Mère merci.*

*A mes grands parents.*

*A la mémoire de mon oncle TOUMI Cherif que dieu tout puissant lui ouvre les portes du paradis amine inchalah.*

*A toute ma famille du plus petit au plus grand, mes sœurs, frères, mes belles sœurs, mes neveux.*

*A tous mes amis Ali, Farid, Bakhakh, Bilal, Mehdi, Amine et mon meilleur ami HADJ KALI Hocine à mes camarades de la promotion 2008 d'automatique.*

*A toute personne qui m'a aidé de loin ou de près afin de réaliser ce travail.*

***TOUMERT Mhand***

## الملخص :

هذا العمل يهدف إلى دراسة و إنجاز منظم متما تل و رقمي، لشحن و تفريغ بطارية موصلة بشبكة كهروضوئية، بالإضافة إلى هذا قمنا بدراسة معدّل رقمي يستعمل طريقة تعقب نقطة الاستطاعة القصوى، باستعمال طريقة " التشويش و الملاحظة " العادية.

قامت برامج « PROTEUS 7 PROFESSIONAL » والتجارب الميدانية بتأكيد حسن أداء جهاز السيطرة الرقمي مقارنة . بالمتما تل

كلمات مفتاحية : معدّل، كهروضوئي، متما تل ، رقمي، PIC 16F877 ، نقطة الاستطاعة القصوى، التشويش و الملاحظة، برنامج « PROTEUS 7 PROFESSIONAL »

## Résumé :

Ce travail s'intéresse à l'étude et la réalisation d'un régulateur analogique et numérique de la charge/décharge d'une batterie associée à un système photovoltaïque. En plus on a fait une étude d'un contrôleur numérique avec l'implémentation de la méthode de poursuite du point de puissance maximale par la commande « Perturbation et Observation» ordinaire.

Des simulations effectuées sous PROTEUS 7 PROFESSIONAL et des mesures expérimentales confirment la bonne performance du contrôleur numérique par rapport au régulateur analogique.

**Mots clés :** Régulateur, Photovoltaïque, Analogique, Numérique, PIC 16F877, Proteus7 professional, Langage C, MPPT, Perturbation et Observation.

## Abstract:

This work is interested to study and realization of analogical and numerical regulator of charge/discharge of battery associate to a photovoltaic system. Extra-we have study a numerical regulator with implementation the method of MPPT by ordinary command «Perturbation and Observation».

The simulation made out under PROTEUS7 PROFESSIONAL and the experimental measures confirm the best performance of controller in relation to the analog regulator.

**Keywords:** Regulator, Photovoltaic, Analogical, Numerical, PIC16F877, Software Proteus7 Professional, Language C, MPPT, Perturbation and Observation.

## SOMMAIRE

Introduction générale .....	1
<b>CHAPITRE 1 : Système photovoltaïque</b>	
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Les composants du système photovoltaïque.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Le module photovoltaïque.....	5
1.2.2 Modélisation du panneau photovoltaïque.....	11
1.2.3 Simulation du générateur photovoltaïque.....	15
1.2.4 Conclusion.....	19
<b>1.3 Le Stockage de l'énergie.....</b>	<b>19</b>
1.3.1 Choix de la technologie.....	19
1.3.2 Les caractéristiques d'une batterie au plomb.....	21
1.3.3 Fonctionnement d'un accumulateur au plomb.....	23
1.3.4 Charge des éléments .....	25
<b>1.4 Le Régulateur de charge/décharge de la batterie.....</b>	<b>29</b>
1.4.1 Fonctionnement général.....	29
1.4.1 Technologie des régulateurs.....	31
1.4.3 Comparaison et choix du régulateur.....	33
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 2 : Réalisation d'un régulateur charge/décharge analogique</b>	
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2 Le fonctionnement.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3 Détermination des composants du régulateur.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Réalisation de la carte.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5 Organisation de la réalisation.....</b>	<b>43</b>
<b>2.6 Puissance consommée par le régulateur analogique.....</b>	<b>44</b>
<b>2.7 Mesures et essais.....</b>	<b>45</b>
<b>2.8 Cout de la réalisation .....</b>	<b>47</b>
<b>2.9 Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>CHAPITRE 3 : Etude et réalisation d'un régulateur charge/décharge numérique</b>	
<b>3.1 Le Régulateur numérique (100% transistorisé) .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Partie commande .....</b>	<b>48</b>
3.2.1 Schéma de principe .....	48
3.2.2 Structure de l'algorithme .....	49
3.2.3 Identification des PIC .....	51
3.2.4 Etude du microcontrôleur 16F877 .....	51
3.2.5 Caractéristiques principales du 16F877.....	52
3.2.6 Explication du programme .....	54
3.2.7 Test du code.....	56
3.3.8 Implémentation du programme .....	57
<b>3.3 Réalisation électronique du régulateur numérique .....</b>	<b>58</b>
3.3.1 Brochage du 16F877 .....	58
3.3.2 Bloc de visualisation (l'afficheur LCD) .....	59
3.3.3 Reconnaissance des différentes parties de la carte .....	61

3.3.4 Essais et résultats .....	62
3.3.5 Relevés expérimentaux .....	66
3.3.6 Coût de la réalisation .....	67
<b>3.4 Comparatif avec la carte analogique .....</b>	<b>68</b>
<b>3.5 Conclusion .....</b>	<b>68</b>

## **CHAPITRE 4 : Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque**

<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3 Optimisation du fonctionnement du générateur .....</b>	<b>71</b>
<b>4.4 Optimisation du fonctionnement du récepteur .....</b>	<b>71</b>
<b>4.5 Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) .....</b>	<b>71</b>
4.5.1 Méthode à contre réaction de tension .....	72
4.5.2 Méthode à contre réaction de courant .....	73
4.5.3 Méthode à contre réaction de puissance .....	73
4.5.4 Méthode de poursuite analogique .....	74
<b>4.6 Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT .....</b>	<b>74</b>
4.6.1 Commande MPPT par réseau de neurones.....	74
4.6.2 Commande MPPT par logique floue .....	75
<b>4.7 Conclusion .....</b>	<b>75</b>

## **CHAPITRE 5 : Régulateur numérique avec l'implémentation de la commande MPPT**

<b>5.1. Le but d'une régulation avec MPPT .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2. Partie puissance (Convertisseur statique) .....</b>	<b>76</b>
5.2.1 Rappels éléments de base .....	76
5.2.2 Fonctionnement d'un convertisseur «Boost» .....	78
5.2.3 Puissance consommée par le convertisseur Boost .....	85
5.2.4 Détermination des composants de la carte puissance .....	86
<b>5.3. Partie commande .....</b>	<b>89</b>
5.3.1 L'objectif d'application MPPT .....	89
5.3.2 Les premiers types de commande MPPT .....	89
5.3.3 Evolution du point de fonctionnement du GPV .....	90
5.3.4 Description de la commande MPPT extrême P&O .....	92
5.3.5 Configuration des entrées sorties pour le PIC .....	96
5.3.6 Le programme .....	96
<b>5.4 Simulations et résultats .....</b>	<b>100</b>
<b>5.5 Améliorations possibles.....</b>	<b>104</b>

<b>Conclusion générale .....</b>	<b>106</b>
----------------------------------	------------



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# INTRODUCTION

# GENERALE

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

### **Introduction générale :**

Face à une industrialisation rapide des nations, à la modernisation de la société et à la croissance démographique continue des populations, la demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter [1], alors que les sources d'énergie conventionnelles tendent à s'épuiser par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité [2]. Cette extraction incontrôlée des énergies naturelles va certainement conduire notre système écologique à l'instabilité [2].

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel dans la production de l'électricité a un impact désastreux sur l'environnement (la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>) [3].

En 2003, le pétrole et le gaz et à un moindre degré le charbon, qui sont des ressources non renouvelables, ont représenté les trois quarts des ressources consommées dans le monde. Sur les 75 millions de barils de pétrole produits quotidiennement (2003) dans le monde, l'Amérique en consomme près du tiers [12].

Or 60% de cette consommation est importée et les spécialistes (J.A n° 2241 du 21/12/2003) s'interrogent sur la question de savoir s'il n'est pas plus économique de financer des recherches susceptibles d'ouvrir la voie à d'autres énergies plutôt que de continuer la débauche de dépenses civiles et militaires nécessaire pour mettre la main sur le pétrole là où il se trouve [12].

Pour ces raisons, trouver de nouvelles sources d'énergie est devenu un défi dans tous les domaines scientifiques et technologiques de part le monde, et spécialement dans le domaine de l'ingénierie électrique [2].

Ainsi, les énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, etc.) offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et de moins puiser dans les ressources naturelles.

L'énergie solaire est apparue comme une alternative importante à la consommation croissante de l'énergie dans la planète. Sa quantité journalière arrivant à la surface de la terre est dix fois plus grande que la totalité de l'énergie consommée par toutes les populations de la planète pendant une année entière [2]. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque est considérée comme une ressource primordiale, pour plusieurs pays situés dans des régions tropicales et tempérées, où la densité solaire directe peut dépasser 1 kW/m<sup>2</sup> [4].

Le physicien français Edmond Becquerel est le premier qui a décrit l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en a expliqué les mécanismes en 1912, mais c'est resté une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'aux années 50 où les équipes de Bell Laboratories ont fabriqué la première cellule au silicium cristallin de rendement 4%. Les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier au début des années 80 qu'un intérêt véritable s'est rapidement manifesté à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres des photopiles induisant une baisse constante du prix de cette énergie [5].

Par effet photovoltaïque, l'énergie contenue dans le rayon solaire peut être directement transformée en énergie électrique. Cette méthode de conversion de l'énergie présente certains avantages comme :

- La simplicité.
- L'inexistence de parties mécaniques mobiles.
- Une large flexibilité dans le design et l'application offerte par sa caractéristique modulaire.
- Une installation et un fonctionnement rapides.
- Une grande fiabilité, et une maintenance très simple.
- Une source d'énergie électrique silencieuse, saine, non polluante et renouvelable [2].
- Un potentiel à fournir de l'électricité dans les zones non servies par le réseau conventionnel : les systèmes photovoltaïques et les systèmes hybrides ont été pendant plusieurs décennies une source idéale d'énergie pour les régions éloignées [6].

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement considérés comme une source d'énergie compétitive dans plusieurs applications comme les systèmes de pompage de l'eau, l'irrigation, les équipements de communication, les signaux lumineux et d'autres applications de faible puissance.

Les principales restrictions à l'utilisation de l'énergie solaire sont :

- Le prix onéreux de l'installation initiale : Le générateur solaire représente la partie la plus chère de tout le système. Cependant, il y a une baisse continue de son prix, estimé dans les années 60 à 400\$ par Watt crête et actuellement à 3.5 – 4.5 \$ par Watt crête. Par ailleurs, la taille et le prix du générateur photovoltaïque diminuent si l'ensoleillement disponible est totalement utilisé et si le rendement des différents composants constituant le système photovoltaïque est suffisamment élevé [7].
- Le faible rendement de la cellule photovoltaïque : Le rendement de la conversion photovoltaïque d'une cellule va de 12% jusqu'à un maximum de 29% pour des unités très chères.

En dépit de ces deux facteurs, on va vers une diminution des prix des systèmes d'électroniques de puissance et des cellules photovoltaïques, indiquant un futur prometteur pour les nouvelles installations [4].

Afin d'optimiser cette source d'énergie et d'amortir l'investissement initial, il est très important d'en extraire le maximum de puissance [4].

Ce mémoire est réalisé en collaboration avec l'Unité de Développement des Equipements Solaire (UDES)

Dans ce travail, on étudie un système photovoltaïque avec batteries (on stocke l'électricité dans des batteries). Le but final étant la protection de la batterie contre une charge trop élevée et décharge profonde et réduction du coût de production de l'énergie électrique fournie par un générateur photovoltaïque en extrayant le maximum de puissance et en optimisant le rendement de notre système avec différents types de régulateurs.

Le premier chapitre décrit le système photovoltaïque à étudier en commençant par la description et la modélisation du panneau solaire et batterie avec les différents types de régulateurs utilisés.

Le deuxième chapitre comporte une étude du régulateur analogique ainsi que la description de son fonctionnement au terrain.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse au même régulateur mais cette fois ci avec une technologie numérique (utilisation d'un PIC).

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque et les différentes méthodes MPPT qui existent pour l'énergie solaire.

Le cinquième chapitre comporte deux parties. Dans la première partie on étudie la méthode MPPT (Perturbation et Observation (P&O)). Dans la deuxième partie, on propose le même modèle du régulateur numérique mais cette fois ci avec la méthode MPPT (P&O ordinaire) implémentée dans le PIC.



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Chapitre I

# Le système photovoltaïque

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

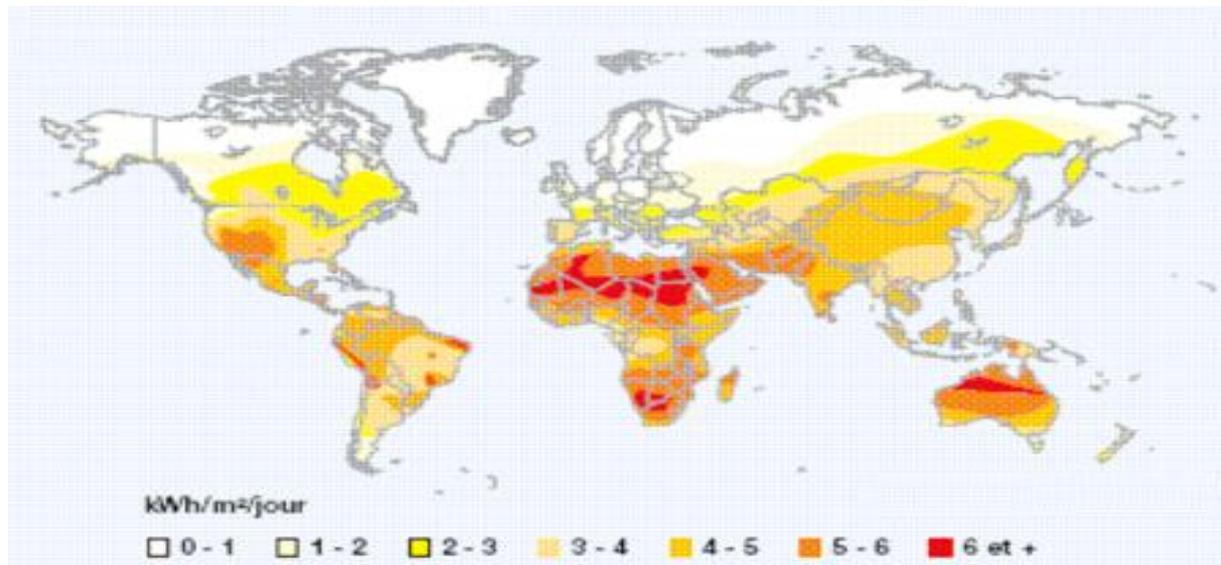
AUTOMATIQUE/2008

### 1. 1 Introduction :

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée de poussière ou d'eau.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement, répertoriées sous forme d'atlas et mettant en évidence des «gisements solaires»[2].



**Figure1.1:** Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en KWh/m<sup>2</sup> sur un plan horizontal

Dans ce chapitre un bref rappel des principales relations entre les diverses grandeurs physiques avant d'introduire la notion de capteur, puis de générateur solaire photovoltaïque. Ensuite, nous effectuons une synthèse des différentes utilisations de cette énergie avant de traiter les moyens d'adaptation de l'énergie solaire photovoltaïque en sortie du générateur grâce à divers types de régulateurs appropriés.

En ce qui nous concerne, notre but pour ce projet était de rendre le voilier énergétiquement autonome, en mettant au point un système photovoltaïque composé de trois grands ensembles :

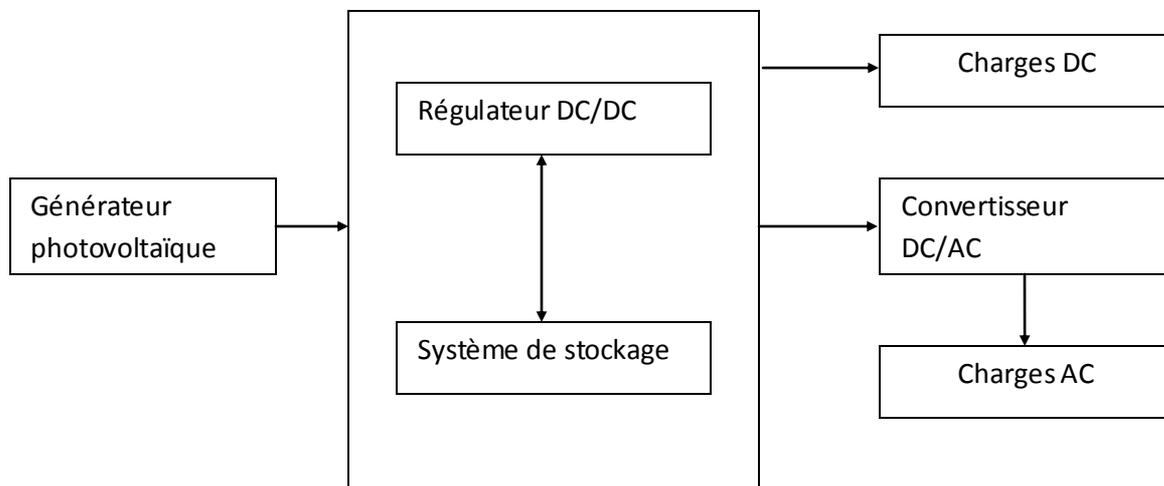
- le module photovoltaïque
- le régulateur de charge
- les batteries

L'étude de ces trois ensembles constitue la première partie de notre projet, la deuxième partie étant consacrée au dimensionnement du système global. Ainsi, tout au long de ce rapport, nous allons vous présenter le fonctionnement général de chaque module, les difficultés que nous avons pu rencontrer ainsi que les différentes solutions que nous avons pu envisager et que nous avons décidé de mettre en place.

### 1.2. Les composants du système photovoltaïque :

Dans cette première partie, nous allons vous présenter les différents éléments électriques et électroniques d'un simple système photovoltaïque.

Le montage électrique de la figure1.2 ci-dessous présente les différents organes du système. Il est constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur de charge, d'une protection batterie, de convertisseur et de l'ensemble des charges(utilisations). Tous ces composants seront successivement présentés dans les paragraphes qui suivent et seront câblés de la manière suivante :



**Figure 1.2:** Synoptique d'un système photovoltaïque.

#### 1.2.1 Le module photovoltaïque:

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

On réalise ainsi un module dont la puissance va dépendre de la surface mise en œuvre. Celui-ci va produire un courant continu en basse tension lorsqu'il sera exposé à la lumière, et il constitue la seule partie productrice d'énergie de notre générateur photovoltaïque.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que ce module sera aussi exposé aux rigueurs du climat et de l'environnement (variations de température, humidité, salinité, etc.). Etant un assemblage fragile et sensible à la corrosion, il conviendra donc de le protéger mécaniquement et efficacement.

### 1.2.1.1. Les cellules solaires :

A la différence d'une pile classique dont l'énergie est stockée et restituée selon la volonté de l'utilisateur, une cellule solaire, autrement appelée photopile, est un semi-conducteur qui ne produit de l'électricité que si elle est exposée à la lumière. Ce phénomène est appelé « conversion photovoltaïque ».

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, a découvert la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie. Ce phénomène est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

### 1.2.1.2 Le principe de fonctionnement des photopiles :

La conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques :

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

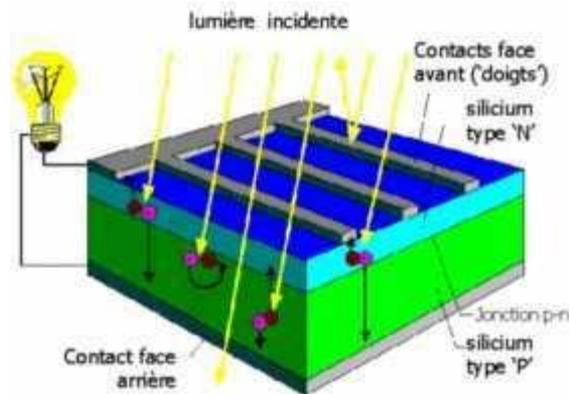
Pour cela, le matériau doit avoir des propriétés électriques et optiques spécifiques. C'est pourquoi les cellules solaires sont constituées d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Contrairement aux conducteurs électriques tels que les métaux, dans lesquels il existe une forte concentration en électrons libres, le phénomène de photoconductivité est spécifique à ces matériaux semi-conducteurs dont les électrons ne sont que « libérables ».

Pour générer un courant à partir d'un semi-conducteur, il faut réussir à libérer des électrons de l'attraction de leurs noyaux et à les attirer ensuite vers l'extérieur. Pour cela, il faut leur fournir une énergie suffisamment forte : c'est le rôle des photons constituant la lumière. (cf. figure 1.3).

Il existe un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette libération des électrons par les photons, au-delà duquel l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, niveau énergétique supérieur. Ce seuil est appelé gap optique ou largeur de bande interdite, et dépend du matériau.

L'énergie nécessaire à la séparation est mesurée en électrons-volts (eV) et varie en fonction du semi-conducteur. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin et de 1,77 eV

pour le silicium amorphe [1]. Ceci explique en partie que le rendement des cellules amorphes soit inférieur à celui des cellules cristallines.



**Figure1.3:** Absorption de la lumière et transfert de l'énergie des photons aux électrons [A]

Ensuite, pour que les charges libérées soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Autrement dit, elles doivent être attirées hors du semi-conducteur, sinon elles se recombinent.

Cette extraction de charges est réalisée grâce à une jonction créée volontairement dans le matériau. On va alors engendrer un champ électrique qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les positives de l'autre. Ceci n'est possible que grâce au dopage du semi-conducteur par des impuretés. Ce dopage est de deux types :

- un dopage de type « n » (négatif), réalisé par adjonction de phosphore (P), dont les atomes possèdent un électron périphérique de plus que ceux du silicium
- un dopage de type « p » (positif), réalisé par adjonction de bore (B), dont les atomes possèdent un électron périphérique de moins que ceux du silicium.

La mise en contact de ces deux zones au dopage opposé constitue un élément fort utile en électronique : la diode. Comme le montre la figure1.4, les charges électriques générées et ainsi attirées vont faire apparaître un photocourant, indépendant de la tension et proportionnel à la fois au flux lumineux et à la surface de la cellule.

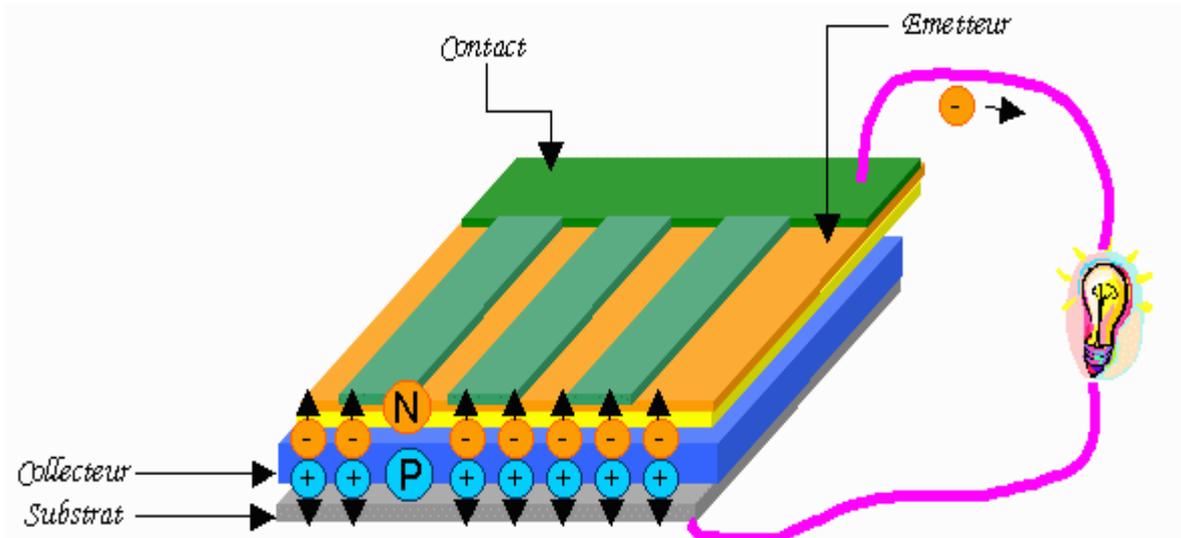


Figure1.4 : La collecte des charges [B]

### 1.2.1.3 Les caractéristiques d'une photopile :

#### ❖ La tension en circuit ouvert:

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $U_{co}$  (elle varie légèrement avec la technologie et l'éclairement) [2]. Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait que l'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N (cf. § 2.1.2). Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série.

#### ❖ Le courant de court-circuit :

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photocourant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre. Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande. De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module.

#### ❖ La puissance :

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La 2.1.3 représente la caractéristique courant-tension d'une photopile sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension  $\times$  intensité). Pour l'éclairement considéré, le point  $P_m$  représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension maximale  $U_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . C'est cette puissance qui sera toujours recherché par notre régulateur de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement de notre générateur.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (cf. définition du rendement ci-dessous), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête(Wc).

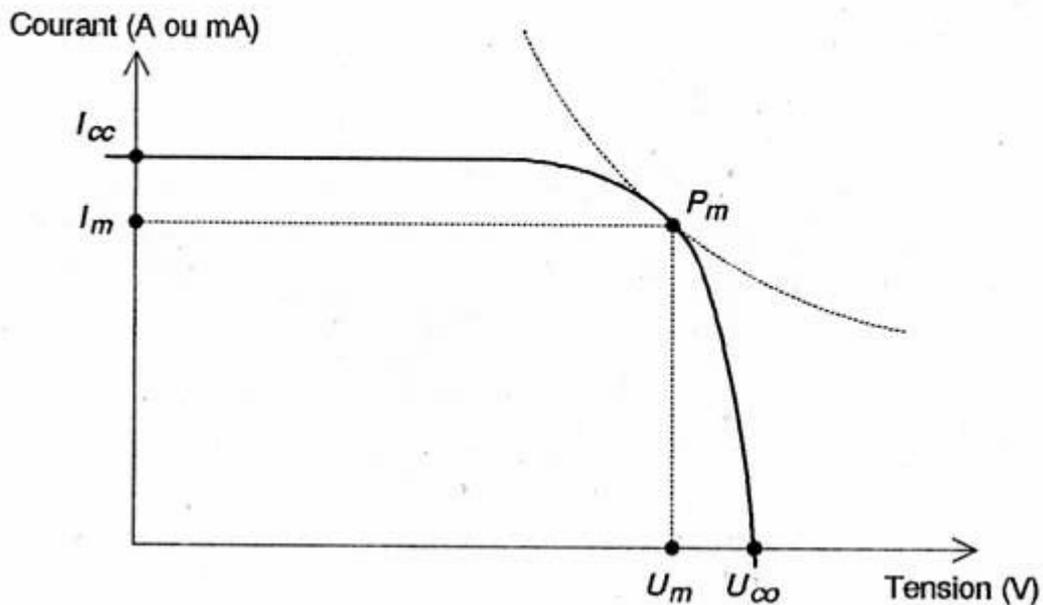


Figure1.5: Caractéristique courant-tension d'une photopile [2]

❖ Le rendement :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit la surface du module et E l'éclairement en W/m<sup>2</sup>, ce rendement a pour formule :

$$\mu = \frac{P_m}{E * S}$$

Il est généralement évalué dans des conditions de référence : sous un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>, à la température de 25 °C et sous un spectre AM 1,5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions. [3]

**1.2.1.4 Les différents types de cellules solaires et leur rendement :**

Lorsque nous avons présenté le fonctionnement des cellules solaires, nous avons évoqué quelques uns des matériaux qui les constituent. On peut, à l'heure actuelle, distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques utilisés dans des installations :

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

Le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent. Nous ne nous intéresserons donc qu'à celui-ci, les autres n'étant pas suffisamment développés et souvent onéreux. Le silicium est soit cristallin, soit amorphe :

### ❖ le silicium monocristallin:

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

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

### ❖ le silicium multicristallin:

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

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

### ❖ le silicium amorphe:

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

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

La figure 1.6 (ci-après) représente les caractéristiques courant-tension de deux cellules photovoltaïques, l'une au silicium cristallin, l'autre au silicium amorphe.

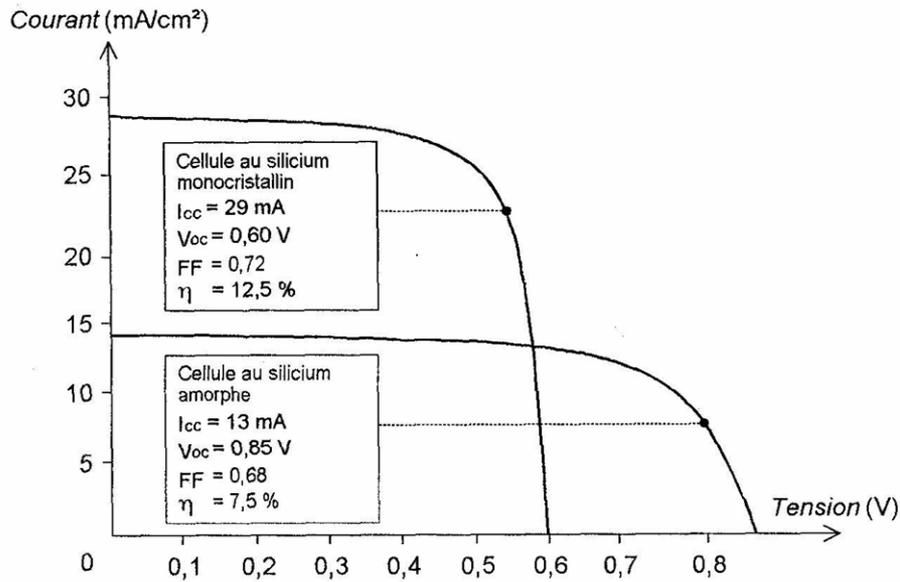


Figure1.6:Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une autre au silicium cristallin (sous 1000 W/m2) [1]

### 1.2.2 Modélisation du panneau photovoltaïque :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du générateur photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes), ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ce modèle diffère entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte.

Nous avons choisi un modèle à une diode.

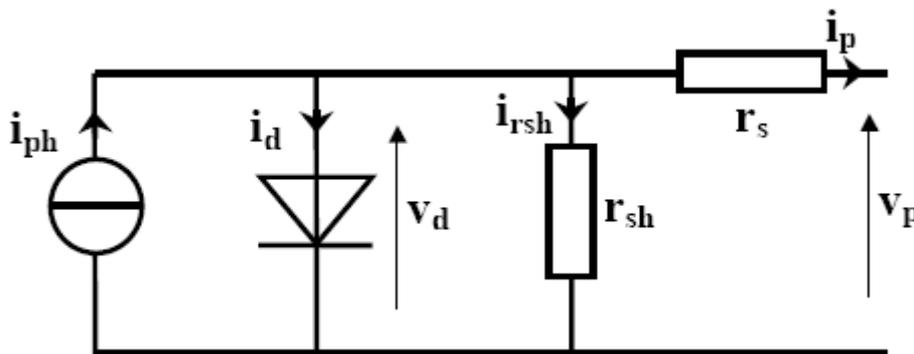


Figure1.7:schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.[5]

Avec :

$G_i$  : source de courant parfaite.

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

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

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

L'étude de la physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge:

$$i_p = i_{ph} - i_d - i_{rsh} \dots \dots \dots (I-1)$$

Avec :

$i_p$ : Le courant délivré par la photopile.

$i_{ph}$  : photo courant.

$i_d$  : courant de la diode.

$i_{rsh}$  : le courant shunt.

On a la résistance (rsh) plus élevée donc on peut négliger le courant  $i_{rsh}$  donc l'équation s'écrit :

$$i_p = i_{ph} - i_d \dots \dots \dots (I-2)$$

D'autre part le courant  $i_{ph}$  est proportionnel à l'éclairement donc :

$$i_{ph} = a_1 s^* \dots \dots \dots (I-3)$$

Tel que:

$a_1$  coefficient de proportionnalité.

Le courant de polarisation est de la forme :

$$i_d = a_2 [\exp(a_3 v) - 1] \dots \dots \dots (I-4)$$

Les paramètres  $a_1, a_2, a_3$  sont en fonction de la température T, ils sont exprimés comme suit :

$$a_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} \cdot T + 2 \cdot 10^{-4} \quad [A / (w/m^2)]$$

$$a_2 = 4 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot \exp. (-a_3) \quad [A]$$

$$a_3 = q/KT = 1.6 \cdot 10^{-19} / 1.38 \cdot 10^{-23} T \quad [A/W]$$

Donc l'équation finale du courant :

$$i_p = a_1 s^* - a_2 [\exp(a_3 v) - 1] \dots \dots \dots (I-5)$$

Tel que

$T$  : est la température ( $^{\circ}k$ )

$q$  : la charge d'électron (coulomb)

$k$  : la constante de Boltzmann (j/k)

Par contre un panneau photovoltaïque est une association série/parallèle de **ns**, **np** cellules élémentaire, ns étant le nombre de cellules en séries sur une branche et **np** le nombre de branches en parallèles. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le générateur photovoltaïque présenté par le circuit électrique équivalent suivant:

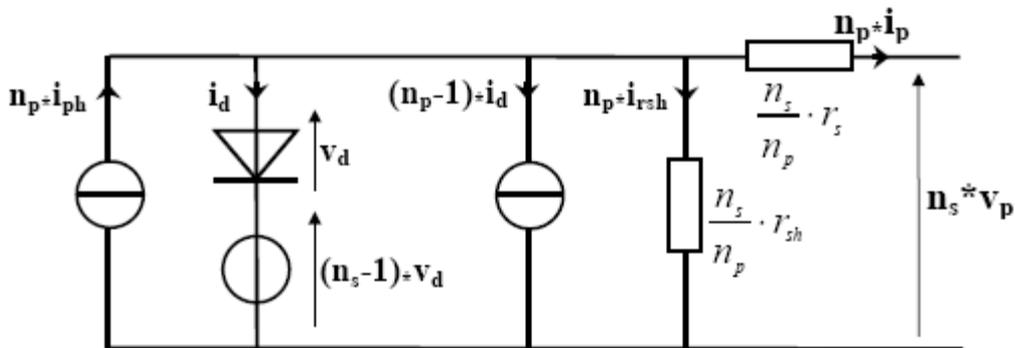


Figure1.8: schéma équivalent du panneau photovoltaïque.[5]

Nous utiliserons dans ce qui suit les notations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \\ I_G = n_p \cdot i_p \\ I_d = n_p \cdot i_d \\ I_{rsh} = n_p \cdot i_{rsh} \\ V_d = n_s \cdot v_d \\ V_G = n_s \cdot v_p \\ R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \\ R_{sh} = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_{sh} \end{array} \right.$$

Ce modèle comporte quatre variables. Les Deux variables d'entrées sont :

$E_s$  : ensoleillement dans le plan des panneaux ( $w/m^2$ ) ;

$T_j$  : température de jonction des cellules ( $^{\circ}C$ ).

Les deux variables de sorties sont :

$I_G$  : courant fourni par le panneau (A) ;

$V_G$  : tension aux bornes du panneau (V).

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un panneau photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la figure 1.8.

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \dots\dots\dots(I-6)$$

Le photo courant,  $I_{ph}$ , est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température du panneau et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = p_1 \cdot E_s [1 + p_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + p_3 \cdot (T_j - T_{ref})] \dots\dots\dots(I-7)$$

Tel que :

$E_{ref}$ : L'ensoleillement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

$T_{ref}$ : température de référence ( $25^\circ\text{C}$ ).

$p_1, p_2, p_3$  : sont des paramètres constants.

Le courant de polarisation de la jonction PN,  $I_d$ , est donné par l'expression suivante :

$$I_d = I_{sat} [\exp\{q \cdot (V_G + R_s \cdot I_G) / (k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j)\} - 1] \dots\dots\dots(I-8)$$

Où :

$I_{sat}$  courant de saturation ;

$K$  la constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/k}$ ) ;

$q$  charge élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) ;

$A$  facteur d'idéalité de la jonction.

On a aussi le courant de saturation qui est fortement dépendant de la température ; il s'écrit sous la forme :

$$I_{sat} = p_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp(-E_g / (k T_j)) \dots\dots\dots(I-9)$$

Où :

$E_g$  L'énergie de gap (pour le silicium  $E_g = 1.1 \text{ eV}$ )

$P4$  paramètre constant

L'équation de courant qui traverse la résistance shunt s'écrit comme suit :

$$I_{sh} = V_g / R_{sh} \dots\dots\dots(I-10)$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale :

$$I_G = p_1 \cdot E_s [1 + p_2 (E_s - E_{ref}) + p_3 (T_j - T_{ref})] - (V_g / R_{sh}) - p_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp(-E_g / (k \cdot T_j)) \cdot [\exp\{q \cdot (V_G + R_s \cdot I_G) / (k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j)\} - 1] \dots\dots\dots(I-11)$$

Nous pouvons noter que nous obtenons une fonction implicite de la forme :

$$I_G = f(I_G, V_G, E_s, T_j).$$

Avec 7 paramètres  $p_1, p_2, p_3, p_4, A, R_s$  et  $R_{sh}$  à déterminer.

Identification des paramètres :

L'identification des paramètres a été effectuée par un algorithme pour plusieurs couples d'ensoleillement et de la température.

Indice i	Ensoleillement dans le plan des panneaux ( $w/m^2$ )	Température des cellules ( $^{\circ}C$ )
1	100	10.8
2	127	11.5
3	189	13.9
4	260	16.5
5	399	22.6
6	494	27.3
7	592	27.9
8	704	29.6
9	854	50

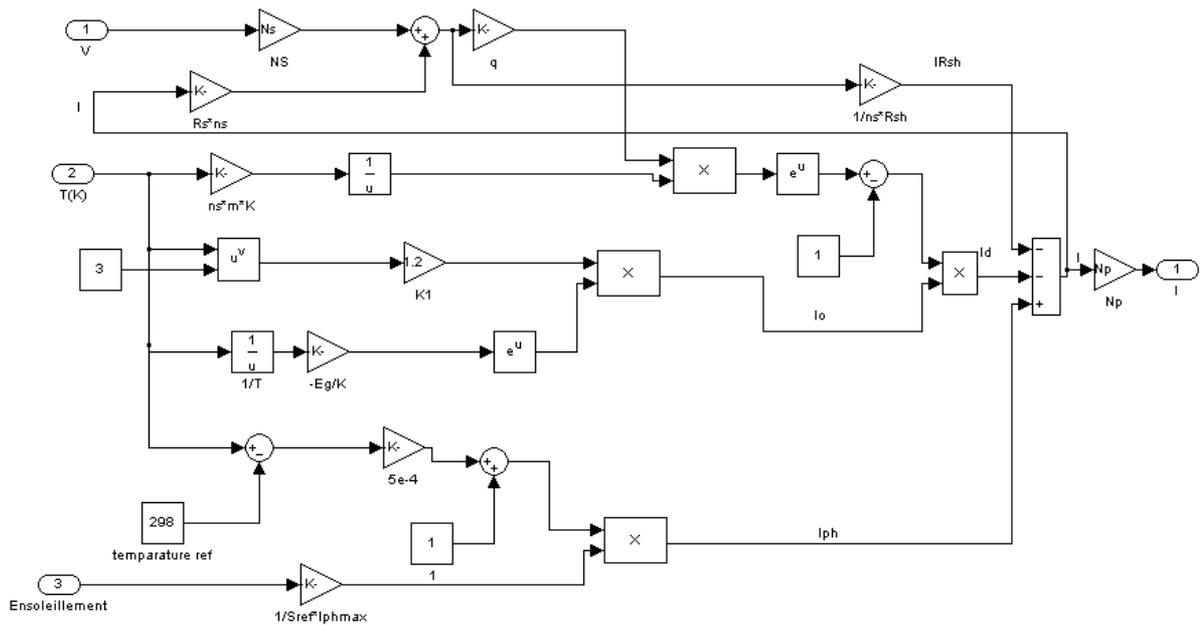
**Tableau [1.1] :** couplets (Ensoleillement, température) utilisés pour l'identification des paramètres

Paramètre	valeur
$P_1$	$15.59.10^{-5}$
$P_2$	0
$P_3$	$8.7.10^{-4}$
$P_4$	953.82
A	1
$R_s$	0.203
$R_{sh}$	106.04

**Tableau [1.2] :** Les valeurs des paramètres

### 1.2.3 Simulation du générateur photovoltaïque :

Nous avons simulé le modèle à cinq paramètres du générateur photovoltaïque avec le logiciel SIMULINK (MATLAB 6.5).



**Figure1.9:** Schéma de simulation du générateur photovoltaïque.

### 1.2.3.1 L'influence de la température sur le rendement :

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

$$I = I_p - I_s \left( e^{\frac{U}{U_t}} - 1 \right)$$

avec  $I_s$  = courant de saturation de la diode

$I_p$  = photocourant

$U$  = tension imposée à la diode

$U_t = kT/q = 26$  mV à 300 K

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

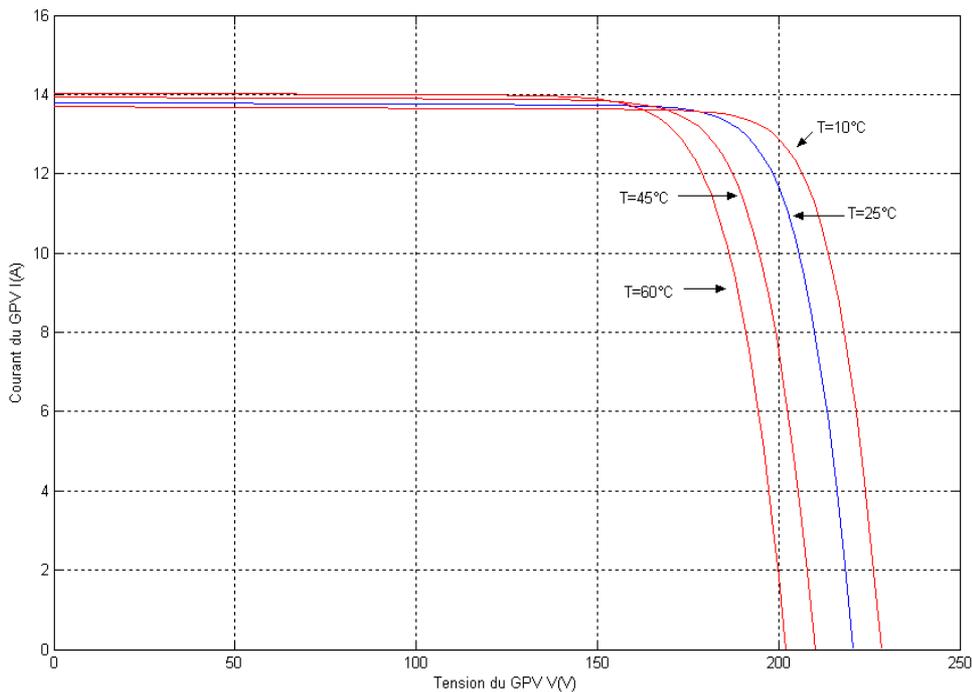
$T$  = température absolue en Kelvin

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

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_p}{I_s} \right)$$

On peut remarquer que cette tension augmente avec le logarithme de  $I_p$  et donc avec l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $kT/q$ , car  $I_s$  varie exponentiellement avec  $T$ , compensant largement ce dernier terme.

Cette chute de tension avec le facteur température aura une grande importance dans le dimensionnement du système. Cet effet est représenté sur la figure 1.10 où l'on peut observer différentes caractéristiques courant-tension à des températures allant de  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  à  $65\text{ }^\circ\text{C}$  sous un ensoleillement de  $1000\text{ W/m}^2$ . Un ordre de grandeur de cette chute est de  $2\text{ à }2,5\text{ mV/}^\circ\text{C}$ , ce qui donne un déficit d'environ  $90\text{ mV}$  entre  $10$  et  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . [5]



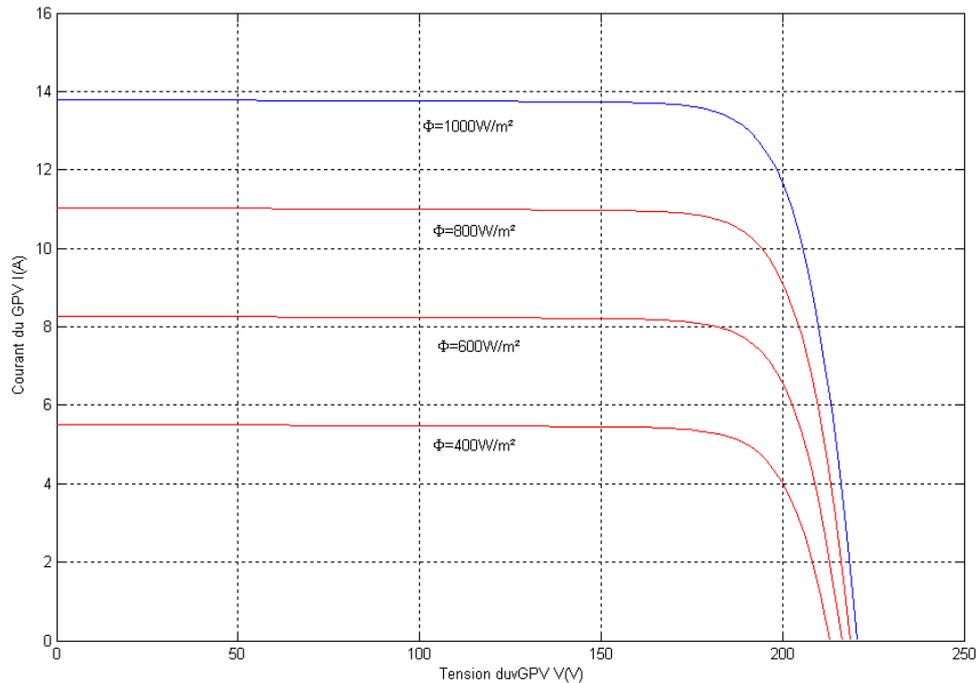
**Figure 1.10:** Influence de la température  $T$  sur la caractéristique  $I=f(V)$  d'un générateur photovoltaïque avec  $\Phi= 1000\text{ W/m}^2$ .

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

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

**1.2.3.2 L'influence de l'éclairage :**

Au cours des paragraphes précédents, nous avons évoqué l'augmentation de l'intensité du photocourant pour une hausse du rayonnement solaire. La figure suivante (figure1.12) représente la variation du courant par rapport à la tension pour différentes intensités lumineuses et les maximums de puissance pour chaque cas.



**Figure 1.12:** Courbes I(V) d'une cellule sous diverses intensités de rayonnement [5].

D'une part, on peut remarquer que les points de fonctionnement à puissance maximale se déplacent peu et se situent autour d'une valeur d'environ 0,48 V. [5] Notre 3ème régulateur de avec la commande de charge de type MPPT, ne sera donc pas trop perturbé par la variation de l'éclairage lors de sa recherche du point optimal de puissance.

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

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

### 1.2.4 Conclusion :

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

### 1.3. Le Stockage de l'énergie :

La batterie pour le solaire sera sollicitée dans la durée à des courants faibles.

#### 1.3.1 Choix de la technologie :

Les principales caractéristiques des batteries sont: [2]

- La tension nominale : c'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé.
- La tension de charge : c'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur.
- La capacité nominale: c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Elle est donnée dans des conditions de référence (durée de décharge de 20h et température de 25°C).
- La profondeur de décharge : rapport entre la quantité d'électricité déchargée à un instant  $t$  et la capacité nominale

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

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

Les différents types de batteries selon leur composition sont: [2] + [12] + [E]

#### ❖ Les accumulateurs au plomb « ouvert » :

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

#### ❖ Les accumulateurs au plomb étanche :

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

#### ❖ Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd):

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

### ❖ Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH):

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

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

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

### ❖ Les accumulateurs Lithium Ion :

Les batteries lithium-ion acceptent des charges électriques plus importantes que les batteries au nickel cadmium. Le lithium étant le métal le plus léger, ces batteries permettent une autonomie plus longue dans un boîtier moins lourd. La batterie Li-ion nécessite peu d'entretien, ce qui constitue un avantage qu'aucune autre composition chimique ne peut égaler. Il n'y a pas de mémoire et aucun cyclage périodique n'est requis pour prolonger la durée de vie de la batterie. En plus de sa densité d'énergie élevée et de son poids léger, le degré d'autodécharge de la Li-ion est deux fois moins élevé que celui de la NiCd et de la NiMH, ce qui fait de la Li-ion un produit qui convient très bien aux applications modernes utilisant des jauges à essence. Par contre, la Li-ion est fragile et requiert un circuit de protection pour assurer un fonctionnement sécuritaire. Le courant de charge est modéré, et la charge de la batterie doit être effectuée en respectant des normes rigoureuses. En outre, la Li-ion est sujette au vieillissement, qu'elle soit utilisée ou non.

### ❖ Les accumulateurs Lithium Ion Polymère :

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

Les avantages essentiels de la technologie Plomb pour le photovoltaïque sont :

- la longévité
- le rapport qualité/prix,
- un entretien faible ou nul

- une bonne tenue aux températures extrêmes, et la possibilité de charge à courant faible.

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

Type	Energie massique	Tension, d'un élément	Durée de vie(nombre de recharge)	Temps de charge	Auto décharge par mois
Plomb	30-50Wh/kg	2V	200-300	8-16h	5%
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1.25V	1500	1h	20%
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1.25V	300-500	2h-4h	30%
Li- inn	110-160 Wh/kg	3.7V	500-1000	2h-4h	10%
Li-Pn	100-130 Wh/kg	3.7V	300-500	2h-4h	10%

Tableau [1.3] : Tableau comparatif des différentes technologies.[12]+[D]

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes, ce qui nous intéresse pour notre projet, sont en général de type plomb-acide (type batterie de voiture) et c'est celles que nous allons donc choisir.

### 1.3.2 Les caractéristiques d'une batterie au plomb [2]

#### 1.3.2.1. La tension:

La tension nominale d'un élément au plomb est de 2V. Mais comme pour la technologie au nickel cette tension varie en fonction de l'état de charge de l'accumulateur. Un élément chargé présente une tension de 2,1V, et on peut le décharger jusqu'à une tension de 1,9V sans risque, le minimum absolu étant à 1,65V.

Les accumulateurs au plomb sont souvent vendus sous forme de batterie de plusieurs éléments. La version la plus courante est la batterie à 6 éléments, donc dite batterie 12V. La tension de ce type de batterie peut donc varier de 11V à 12,6V.

Attention : La tension d'une batterie au plomb 12V ne doit jamais descendre en dessous du seuil minimum de 10V (extrême limite).

#### 1.3.2.2. La capacité:

La capacité des batteries au Plomb peut aller :

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

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

### 1.3.2.3 La résistance interne :

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

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

### 1.3.2.4 L'autonomie « sans apport solaire » :

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

### 1.3.2.5 Respect de l'environnement [Z] :

Le plomb est classé parmi les métaux lourds toxiques. Cependant, la batterie au plomb lorsqu'elle est hermétique ne représente aucun risque pour l'environnement.

Néanmoins, selon l'article 8 du Décret n° 99-374 du 12/05/99 (ELIMINATION DES PILES ET ACCUMULATEURS USAGES), nous sommes tenus de collecter ou de faire collecter, de valoriser ou de faire valoriser, d'éliminer ou de faire éliminer nos accumulateurs usagés, qu'ils soient ou non incorporés à des appareils.

En effet, les batteries sont aujourd'hui récupérées et recyclées. L'industriel procède aux opérations suivantes : tri des batteries, élimination de l'acide, stockage, démontage, broyage des batteries, réparation des plastiques des parties métalliques des sels et oxydes de plomb, fusion et affinage.

Pour plus d'informations sur la sécurité des batteries, voir en annexe 4

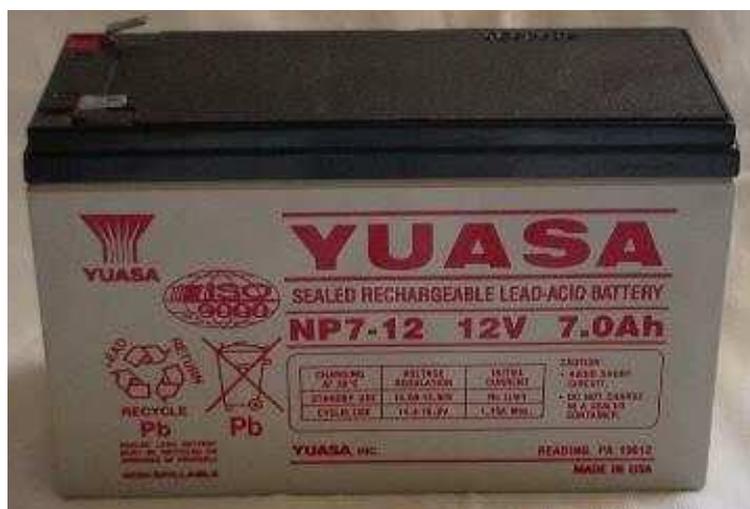


Figure 1.13: Photo d'une batterie 12V/7Ah

### 1.3.3 Fonctionnement d'un accumulateur au plomb [F]:

L'accumulateur au plomb fonctionne selon une réaction d'oxydoréduction réversible ce qu'explique que l'on peut utiliser l'accumulateur de deux façons différentes:

	Pile	Electrolyse
Transformation type de dipôle	Spontané générateur	Forcé récepteur
Fonctionnement	décharge	charge

Une batterie est constituée d'une série de cellules, branchées en série afin d'obtenir le voltage désiré en sortie. La sortie pour une cellule acide plomb est environ de 2V donc pour une batterie de 12V, il y a 6 cellules branchées en série.

Pour chaque cellule, deux électrodes en plomb sont plongées dans un bac d'acide sulfurique dilué. L'électrode positive est recouverte de peroxyde de plomb. Si un consommateur est branché, une décharge de courant se produit entraînant une réaction entre le peroxyde de plomb et l'acide sulfurique.

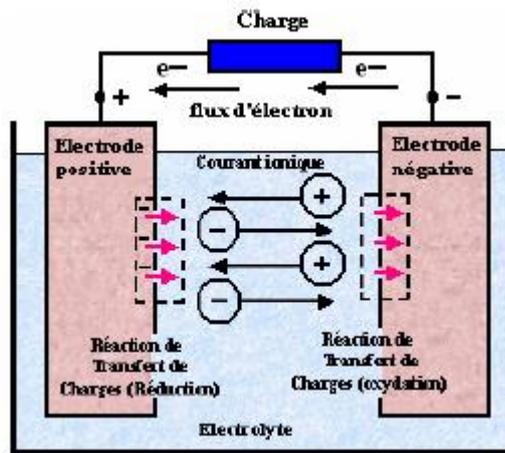
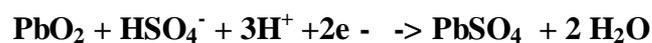


Figure1.14: Schéma d'une cellule acide plomb

Les plaques se recouvrent alors de sulfate de plomb ce qui provoque une formation d'eau et une diminution de la densité de l'acide. S'il n'y avait pas formation d'eau, la batterie se déchargerait.

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

Lors de la décharge de la batterie la réaction qui se produit à l'électrode positive est : [F] +[Q] + [11]



A l'électrode négative on a :  $\text{Pb} + \text{HSO}_4^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$

La réaction totale est donc :  $\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}^+ + 2\text{HSO}_4^- \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

L'électrode positive est donc la cathode et l'électrode négative l'anode, comme on peut le voir sur la figure 1.15 ci-dessous.

La charge est l'opération qui consiste à faire entrer de l'énergie dans la batterie. C'est ce que fait le photogénérateur qui lui est couplé en débitant un courant de charge dans la batterie.

Quand on recharge la batterie c'est la réaction contraire qui se produit : il y a formation de plomb et d'acide sulfurique et la densité de l'acide augmente.

La réaction totale est :

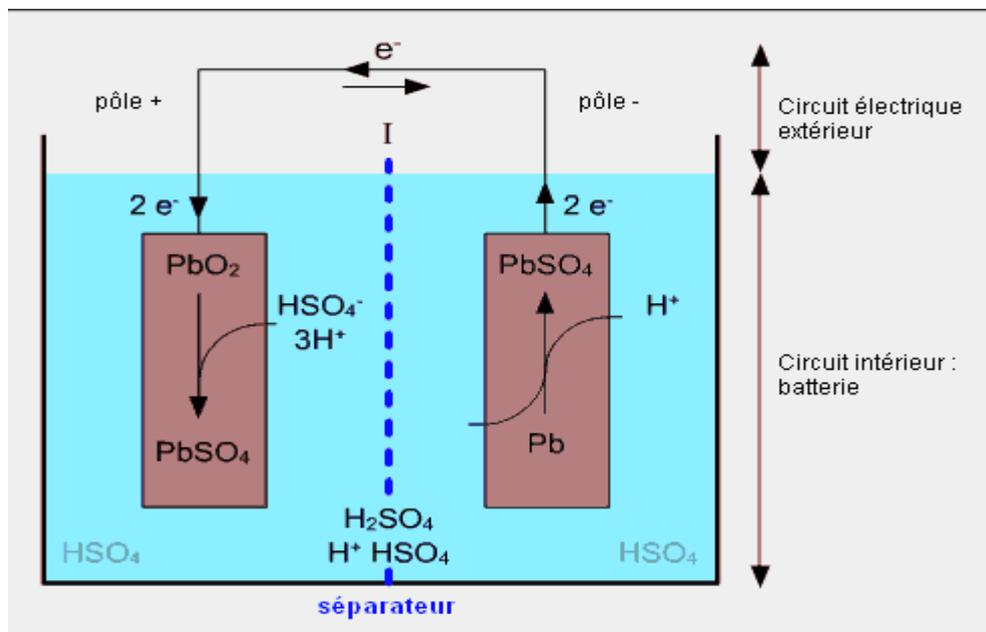
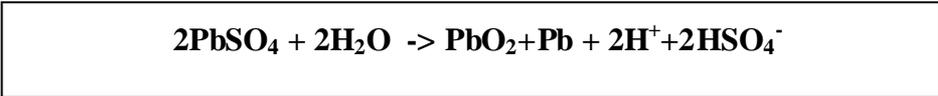
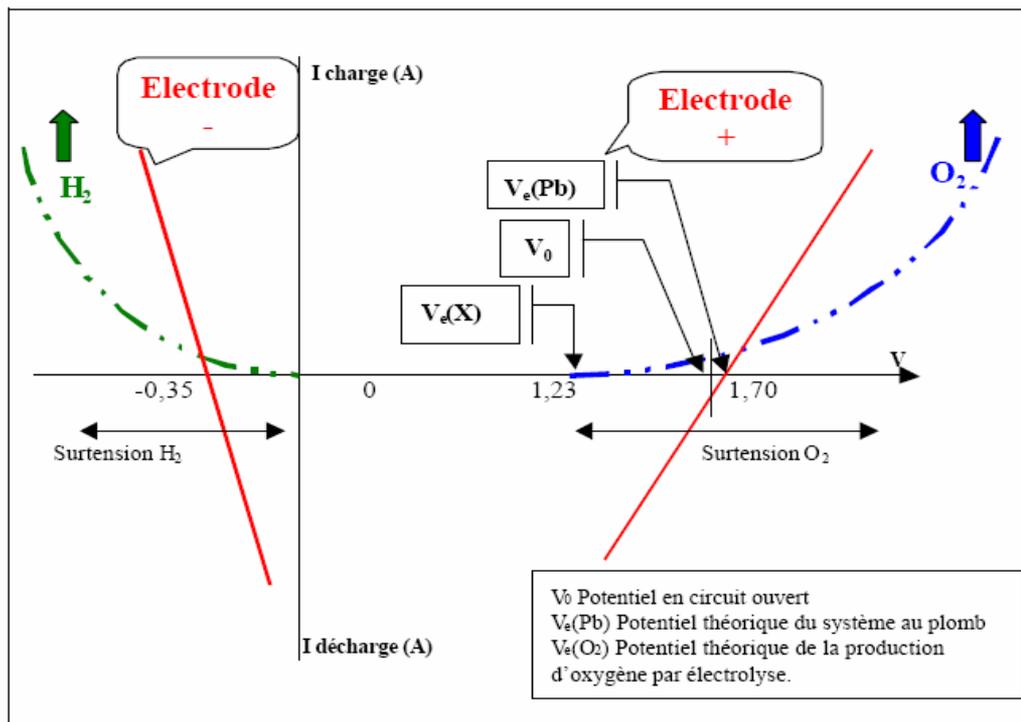


Figure 1.15 : Réaction qui se produit lors de la décharge

Afin de caractériser l'état de charge/décharge on pourrait mesurer la densité de l'acide [U]. Pour chaque Ah de décharge, 3,654 g d'acide se lient au plomb et 0,672 g d'eau est produit.

La figure suivante représente les courbes intensité/potential associées aux réactions de charge/décharge et aux dégagements gazeux pour les électrodes négatives et positives de l'accumulateur au plomb.



**Figure 1.16:** Courbes intensité/potential associées aux réactions de charge/décharge

Il ne faut jamais rajouter d'acide dans une batterie, seulement de l'eau distillée.

Notre batterie étant fermée, il n'y a pas, comme c'est le cas pour une batterie ouverte, de dégagement d'hydrogène et d'oxygène en fin de charge.

### 1.3.4 Charge des éléments :

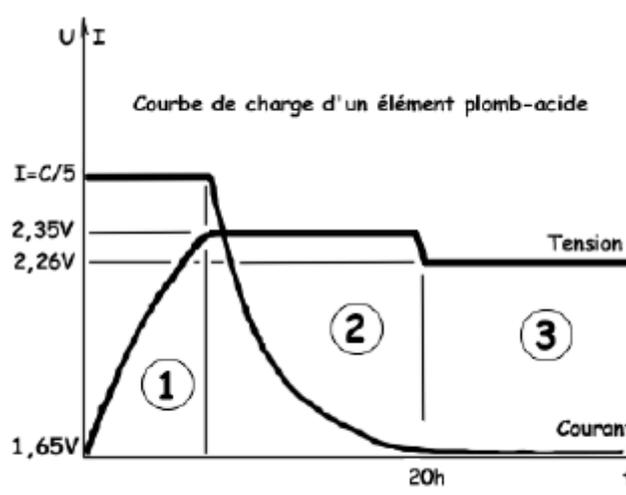
#### 1.3.4.1 La méthode de charge :

La charge des accumulateurs au Plomb se fait à tension constante. La tension de charge pour un élément est de 2,3 à 2,4 Volts. Ce qui fait une tension de charge totale de 13,8 à 14,4 Volts pour une batterie de 12V. Cette tension est nécessaire pour que la charge s'effectue correctement. Une fois chargé, l'élément présente une tension de 2,1V, soit 12,6V pour une batterie dite 12V. Du fait de la faible résistance interne de la batterie, au début de la charge il faut limiter le courant. Sinon il y a un risque d'échauffement des plaques qui alors se détérioreraient. De plus le chargeur serait en butée de puissance et risquerait de se détruire. La valeur normale de limitation de ce courant est égale à environ 1/4 à 1/5 de la capacité nominale pendant 20h. Systématiquement le courant et le temps de charge doivent être indiqués sur la batterie.

Lorsque la batterie est chargée l'idéal est de continuer à lui fournir un petit courant d'entretien sous une tension plus faible, dite "tension de floating". Cette tension aura une valeur entre 2,25V et 2,28V par élément, soit environ 13,6V pour une batterie 12V. Ce courant d'entretien permet d'avoir toujours à disposition une batterie en pleine charge.

Les batteries sont chargées idéalement en 3 différentes phases : [G]

- **Phase 1 :** Le courant est limité à un tau d'environ 1/5 de la capacité nominale. La tension augmente petit à petit jusqu'à atteindre son seuil maximum régulé à 2,35V/éInt.
- **Phase 2 :** La tension de charge est régulée à 2,35V/éInt, le courant de charge diminue alors jusqu'à devenir inférieure à C/100. Cette phase doit durer maximum 2heures, la tension ne doit pas rester au dessus de 2,26V plus longtemps. La batterie est chargée à l'issue de cette phase.
- **Phase 3 :** Une fois la batterie chargée (après environ 20h de charge) on passe en mode charge d'entretien(Floating) pour la maintenir à 100% de charge. La tension alors appliquée à la batterie sera autour de 2,26V/éInt.



**Figure 1.17:** Différentes phases de charge de la batterie

Les phases 2 et 3 peuvent être combinées en limitant dès le début la tension à 2,65V/éInt. La batterie se chargera alors très bien, mais on n'obtiendra que 95% de charge. L'avantage est qu'ainsi on n'a pas à surveiller le moment de la fin de la charge.

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

Pour charger nos batteries lorsqu'elles sont dans le bateau, nous les branchons à un générateur et nous fixons le courant à 1,4A et la tension à 16V au départ, mais ensuite la valeur de la tension diminue. Nous attendons que la tension de la batterie atteigne les 13 V environ et que le courant ait fortement diminué.

### 1.3.4.2 Risques de la surcharge:

La surcharge immodérée est non seulement un gaspillage d'énergie mais elle présente les graves inconvénients suivants:

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

- le niveau de l'électrolyte baisse rapidement. En effet un ampère-heure de surcharge détruit un tiers de gramme d'eau, avec un régime de surcharge double ou triple du régime normal le niveau du liquide baisse de plus d'un millimètre à l'heure ce qui fait qu'après dix heures de surcharge la partie supérieure des plaques commence à se découvrir et se désagrège rapidement.
- la concentration de l'électrolyte augmente du fait de la disparition de l'eau. L'élévation température de qui résulte de la surcharge aggrave l'usure des plaques en augmentant la solubilité du sulfate de plomb. Le violent dégagement gazeux qui accompagne la surcharge accélère par effet mécanique la désagrégation des plaques.

### 1.3.5 Caractéristiques:

#### 1.3.5.1 Tension:

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

#### 1.3.5.2 Charge:

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V.

En fin de charge (point **M**) figure 1.18(a), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

#### 1.3.5.3 Décharge :

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure 1.18b. Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. À partir du point **N**, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie. Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

#### 1.3.5.4 Modélisation de la batterie :

Le modèle de batterie le plus simple se compose d'un ensemble de force électromotrice en série avec une résistance interne. Mais il se trouve que ce modèle ne peut pas expliquer une autre réalité de la batterie, c'est que lorsque la batterie est mise en circuit ouvert, cette dernière perd sa charge électrique avec le temps. On utilise un modèle qui a été à l'origine développé par Salameh, Casacca, et Lynch dans et comme il est représenté sur la figure 1.18.

C'est une amélioration du modèle généralement utilisé de circuit équivalent de Thevenin. Le modèle de Thevenin décrit le comportement primaire d'une batterie correctement, mais n'explique pas les propriétés lentement changeantes d'une batterie telles que l'augmentation et la diminution de la tension de fonctionnement provoquée par le processus de la charge et de la décharge.[V]

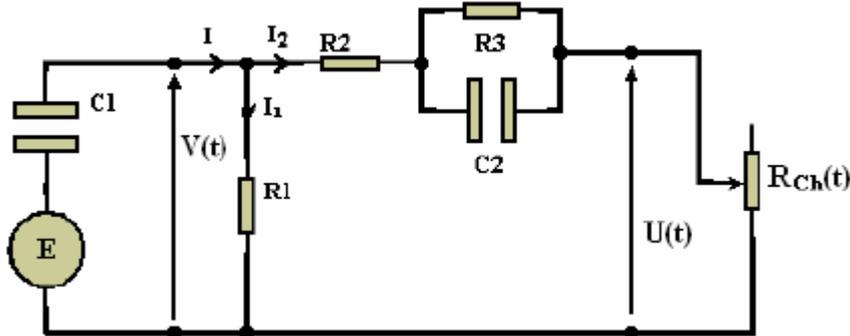


Figure 1.18: Modèle électrique équivalent d'une batterie plomb-acide

Ce nouveau modèle de batterie inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales d'une batterie plomb-acide : La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C1 ayant une tension  $V(t)$  à ses bornes qui est donnée par :

$$v(t) = \frac{q(t)}{c_1} + E \quad (I.11)$$

Avec :

$q(t)$  est la charge électrique du condensateur C1 au temps  $t$ , son énergie est donné par l'équation :

$$W_c = \frac{1}{2} C_1 v^2(t) \quad (I.12)$$

Cependant le comportement de la capacité d'une batterie est autre que le comportement de la capacité d'un simple condensateur.

Cela se concrétise au niveau de l'équation (I.11), à  $t = 0 \Rightarrow V_c = \frac{q(0)}{c} = 0$ , or que celle de la batterie ne vaut pas zéro à son plus bas état de charge  $V(0) = E$  c'est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge, qui est modélisé par une source de tension  $E$  en série avec le condensateur  $C1$ , et qui est équivalent à une énergie minimale  $W_{c1, min}$ .

$R1$  est une résistance de fuite, c'est à travers elle que s'effectue la décharge d'une batterie en circuit ouvert.  $R2$  résistance en bloc d'électrolyte et de plaque et  $R3$  résistance de la diffusion d'électrolyte, ce sont des résistances internes de valeurs faibles de quelques Ohms.  $U(t)$  est la tension mesurée au niveau des bornes externes de la batterie. Lorsque la capacité de la batterie  $C1$  est entièrement chargée cet état est représenté par un niveau maximum de son énergie  $W_{c1, max}$ .

$$W_{bat} = W_{c1, max} - W_{c1, min} = \left(\frac{1}{2}\right) C_1 V_{max}^2 - \left(\frac{1}{2}\right) C_1 V_{min}^2 = \left(\frac{1}{2}\right) C_1 (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (1.13)$$

L'énergie  $W_{bat}$  est donnée en (KWh).

On peut à ce moment exprimer la tension de la batterie  $U(t)$  en fonction de la tension de la batterie en circuit ouvert et les autres composants  $R_2$ ,  $R_3$  et  $C_2$  avec la constante de temps  $\tau = R_3 C_2$

$$U = U_{OC} + R_3 (1 - e^{(-t/\tau)}) I_2 + R_2 I_2 \quad (I.14)$$

La figure 1.19 peut être mathématiquement exprimée dans le domaine fréquentielle représentant l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide.

$$Z(s) = R_2 + R_3 (C_2 + R_1) C_1 = R_2 + \frac{R_3}{R_3 C_2 s + 1} + \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \quad (I.15)$$

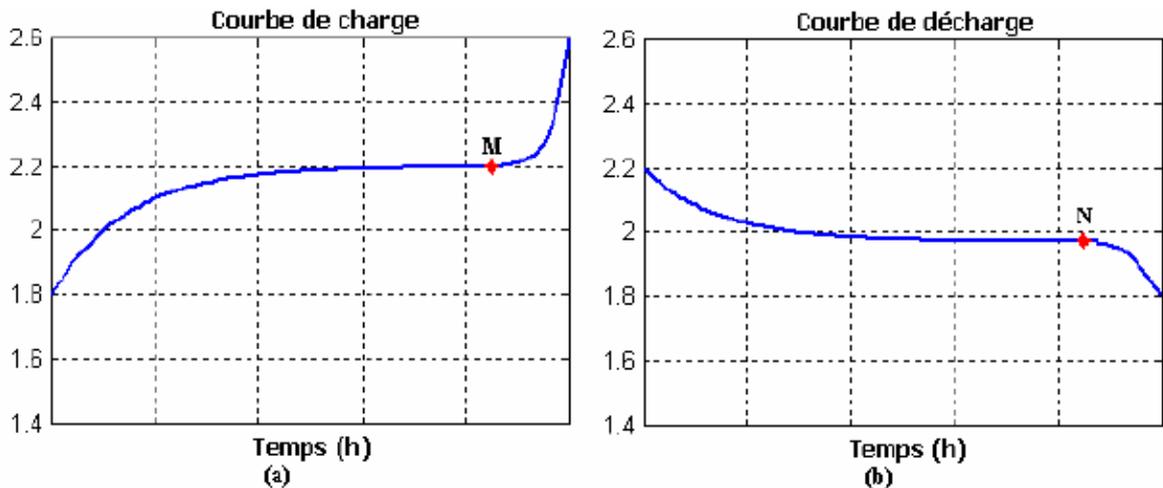
Pour une utilisation dans le modèle mathématique du système, l'équation (1.2415) peut être transformée sous la forme suivante:

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (I.16)$$

$$a_2 = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2, \quad a_1 = R_2 R_3 C_2 + R_1 R_2 C_1 + R_1 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_2,$$

$$a_0 = R_1 + R_2 + R_3, \quad b_2 = R_1 R_3 C_1 C_2, \quad b_1 = R_1 C_1 + R_3 C_2, \quad b_0 = 1. \quad (I.17)$$

C'est la forme finale du modèle mathématique de la batterie qui sera employé dans les simulations.



**Figure 1.19:** Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge.

## 1.4 Le Régulateur de charge/décharge de la batterie [1] + [2]:

### 1.4.1 Fonctionnement général:

C'est l'élément central du système photovoltaïque car il permet de protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie ce qui est important car la batterie a une durée de vie inférieure aux photogénérateurs (5 ans au lieu de 20 ans). Pour la batterie au plomb que nous utilisons, il améliore la durée de vie en empêchant la surcharge et la décharge profonde (C'est-à-dire que la batterie soit vidée de plus de 90% de sa charge).

Ces deux fonctions sont réalisées avec un régulateur charge/décharge connecté avec les panneaux, la batterie et les systèmes utilisateurs. La tension d'une batterie chargée à courant constant (0.7A) augmente de façon linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne pratiquement la fin de charge où soudainement elle augmente beaucoup plus rapidement.

C'est lorsque sa matière active est presque complètement transformée et quand l'électrolyte commence à libérer des gaz (décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène). Si on laisse durer ce phénomène, la batterie deviendra surchargée, ce qui accélérera la corrosion du plomb, fera perdre de l'électrolyte et endommagera les plaques de plomb. La fonction principale du régulateur est d'empêcher cette surcharge.

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

Afin de paramétrer le régulateur de charge, il est nécessaire d'utiliser deux valeurs caractéristiques de la batterie : la tension de fin de charge  $V_{fc}$  et la tension de recharge  $V_{re}$ , valeur pour laquelle le processus de charge recommence. La plupart des régulateurs travaillent en tout ou rien et utilisent ces deux tensions pour arrêter ou recommencer la charge. Pour interrompre le courant, on peut utiliser un relais, un transistor ou bien un MOSFET.

Quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie de 12 V nominale comme la notre), le régulateur coupe la liaison avec le panneau, ce qu'implique que la batterie n'est plus chargée. Cette charge est rétablie vers 13,5 V.

De même, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation.

Le schéma 4.1 suivant illustre le principe du fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.

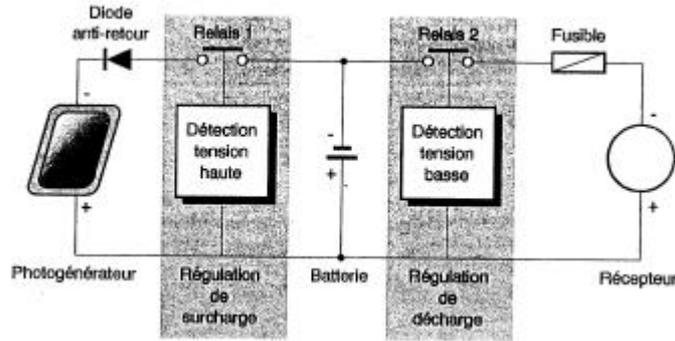


Figure1.20: Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge

### 1.4.2 Technologie des régulateurs [1]:

Trois différentes méthodes de contrôle de charge sont généralement utilisées: les types série, shunt et le MPPT (Maximum Power Point Tracker).

Les régulateurs de type série incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur afin d'arrêter la charge.

Pour les régulateurs de type shunt, le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance et un court-circuit est effectué au niveau des modules solaires en fin de charge. Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum, utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteur sa puissance maximale.

#### **Remarque :**

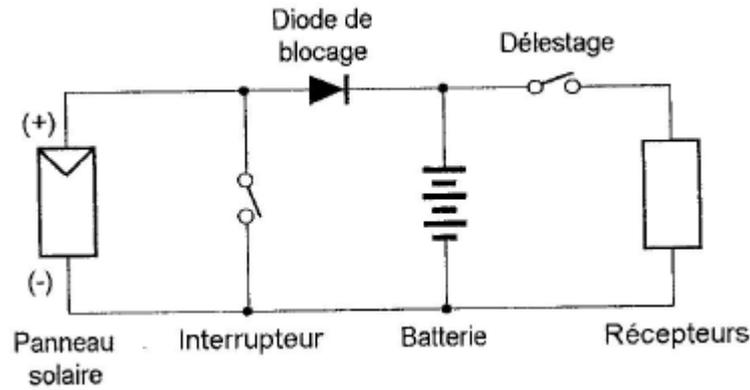
Pour plus d'information sur les régulateurs qui existent sur le marché international on a présenté dans l'annexe 4 les différents types des régulateurs avec leur prix et caractéristiques

#### 1.4.2.1 Régulateurs de type shunt:

C'est le modèle le plus répandu car il est simple à réaliser. Le courant des panneaux solaires est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge. Le principe du circuit est un simple aiguillage. Tout le courant des panneaux passe normalement dans la batterie et lorsque le seuil de coupure est atteint, tout le courant passe dans l'interrupteur. Il est donc nécessaire de rajouter une diode entre cet interrupteur et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode pourra servir de diode anti retour.

L'interrupteur utilisé est le plus souvent un MOSFET car il est plus intéressant qu'un transistor bipolaire car il dissipe moins d'énergie. Il est également plus intéressant qu'un relais car le relais présente une résistance de passage très faible mais il devra être temporisé pour ne pas atteindre rapidement sa durée de vie de commutation, ce qui pose des problèmes si le courant de charge pour une capacité de batterie donnée est important.

Le principe du régulateur shunt est illustré sur la figure 1.21.



**Figure 1.21:**Schéma d'un régulateur de type shunt.

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

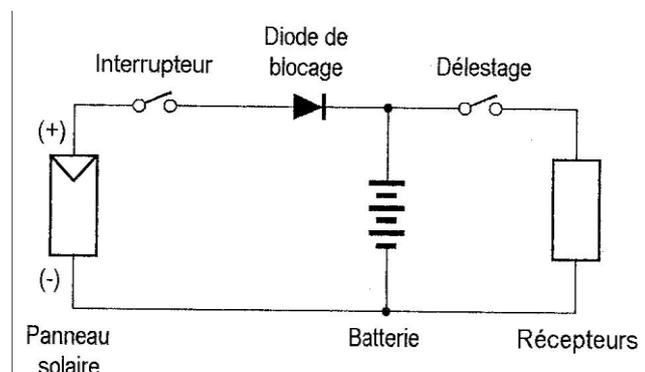
L'avantage est que la charge totale de la batterie est garantie, le désavantage est que la puissance non utilisée du panneau en fin de charge doit être dissipée par le transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants.

#### 1.4.2.2 Régulateur de type série:

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

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

Le principe du régulateur série est illustré sur la figure 1.22 suivant :



**Figure1.22:** Schéma d'un régulateur de type série.

### 1.4.2.3 Régulateurs PWM :

Ce type de régulateur essaie de rassembler les avantages des deux techniques précédentes en utilisant un interrupteur actif modulé par impulsions de largeurs variables (Pulse Width Modulation (PWM)). Les avantages sont que l'on peut maintenir une tension constante aux bornes de la batterie pour terminer la charge tout en dissipant dans le transistor (Un MOSFET pour ce projet et en général) uniquement les pertes dues à la résistance de passage. Les deux techniques shunts et série peuvent être utilisées dans ce cas mais la majorité des fabricants utilisent la technique série. La recharge de la batterie étant un processus relativement lent, cette technique doit être utilisée à fréquence assez basse (au maximum quelques centaines de hertz) pour que la charge fonctionne.

### 1.4.2.4 Régulateurs MPPT :

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale (MPPT Max Power Point Tracker). Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 17 à 18 V dans un système 12V.

### 1.4.3 Comparaison et choix du régulateur :

Les avantages et les inconvénients des différentes technologies de régulateur sont donnés dans le tableau (I.4)

Les critères de choix d'un régulateur sont également donnés dans le tableau (I.5)

### 1.5 Conclusion :

D'après cette description du système photovoltaïque on déduit que le stockage d'énergie c'est l'élément le plus important dans cette partie, et on va concentrer notre travail sur la régulation de cet ensemble (batterie) dans les chapitres suivants.

Type de régulateur	Méthode de charge	Avantages	Désavantages
<b>Shunt-interrupteur</b>	On/Off	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible résistance de passage entre le panneau et la batterie</li> <li>- simple, fiable si bien dimensionné</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dissipation de l'interrupteur au <math>I_{cc}</math> du panneau</li> <li>- diode de blocage indispensable</li> <li>- tension de hot spot + élevée</li> <li>- fin de charge difficile à atteindre</li> <li>- tension + élevée sur l'interrupteur en cas de surtension</li> </ul>
<b>Shunt-linéaire</b>	Tension constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fin de charge optimale</li> <li>- faible résistance de passage entre les panneaux et la batterie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dissipation thermique importante</li> <li>- diode de blocage indispensable</li> <li>- tension de hot spot + élevée</li> </ul>
<b>Série-interrupteur</b>	On/Off	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dissipation de l'interrupteur à <math>I_{max} &lt; I_{cc}</math></li> <li>- simple et fiable</li> <li>- surtension sur l'interrupteur réduite d'une tension de batterie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fin de charge difficile à atteindre</li> </ul>
<b>Série-linéaire</b>	Tension constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fin de charge optimale</li> <li>- surtension sur l'interrupteur réduite d'une tension de batterie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dissipation thermique importante</li> <li>- tension de passage + élevée</li> </ul>
<b>Série-PWM</b>	Tension constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fin de charge optimale</li> <li>- dissipation thermique réduite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tension de passage + élevée</li> <li>- électronique + complexe</li> <li>- génère des parasites possibles sur des équipements sensibles proches</li> </ul>
<b>MPPT</b>	Tension constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rendement élevé à toute température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- coût</li> <li>- génère des parasites possibles sur des équipements sensibles proches</li> </ul>

**Tableau [1.4]:** Les avantages et inconvénients des différents régulateurs de batterie.

Type de contrôleur	Tout ou rien/Tension constante – Shunt/Série
Procédure de charge	Linéaire/PWM
Température ambiante	°C
Tension nominale	V
Courant nominal ( $\times 1,5$ )	A
Compensation thermique	Sonde interne/externe
Pertes au repos	En % de la puissance solaire
Diode de blocage	Schottky/bipolaire
Tension de coupure	$V_{fc}$
Tension de recharge	$V_{rc}$
Tension de délestage	$V_{dl}$
Tension de réenclenchement	$V_{rl}$
Tension de charge forcée	$V_{fbc}$
Tension d'égalisation	$V_{reg}$
Seuils ajustables	$V_{\pm} \times mV$
Types d'interrupteurs	Relais/semi-conducteurs
Contrôle des récepteurs	Priorités, horloge...
Protections	Surcharges/polarité
Facilités de montage	Section, type de bornes
Environnement	Boîtier, matière
Réputation du fabricant, service après-vente	
Dimensions, poids	
Coût et garantie	

Tableau [1.5] : Les critères de choix du régulateur.



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Chapitre 2

## Réalisation d'un régulateur

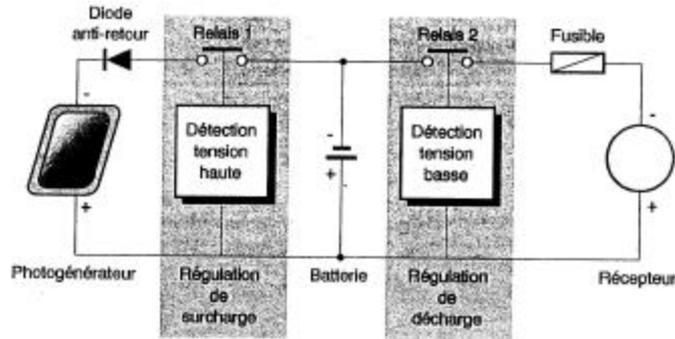
## charge/décharge analogique

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

## 2.1 Introduction :

Après la comparaison entre les différents types des régulateurs étudiés en 1<sup>er</sup> chapitre on a décidé de réaliser le contrôleur de type série (figure2.1).

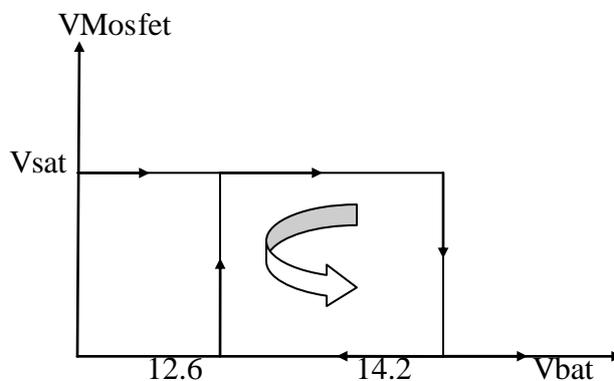


**Figure2.1** : Fonctionnement d'un régulateur charge/décharge

## 2.2 Le fonctionnement :

Le régulateur analogique effectue les fonctions suivantes dans une installation photovoltaïque:

- Il évite que la batterie se décharge à travers le circuit des panneaux (ce qui est qui pourrait les endommager) au moyen d'une diode de blocage de chute de tension entre le panneau et la batterie.
- Il limite la charge de la batterie quand la tension atteint un maximum (14.2 V dans le modèle de 12V) et il reprend la charge lorsque la tension  $V_{batterie}$  soit inférieur à 12.6V, L'augmentation de la tension due à des charges supérieures pourrait provoquer l'évaporation de l'électrolyte et la détérioration de la batterie. La lumière verte sur le frontal du contrôleur informe que le panneau est entrain de charger la batterie. La figure2.2 suivante montre le cycle d'hystérésis du comparateur pour la régulation de la charge.



**Figure2.2:** Cycle d'hystérésis pour la charge

- Il limite la décharge de la batterie en déconnectant son utilisation, quand la tension approche 11.6V (selon le modèle 12V) et il reprend la décharge lorsque la tension  $V_{batterie}$  soit supérieure à 12.9V. Continuer à consommer du courant sous ces valeurs peut produire des dommages irréversibles dans la batterie. La lumière rouge dans le frontal du régulateur informe que le circuit de décharge utilise l'énergie dissipé par la batterie. La figure2.3 suivante montre le cycle d'hystérésis du comparateur pour la régulation de la décharge [12].

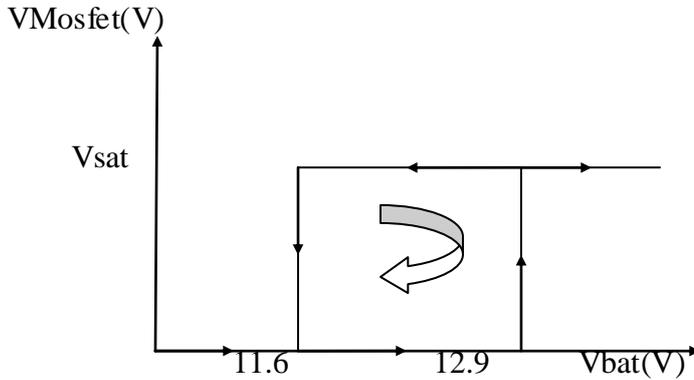
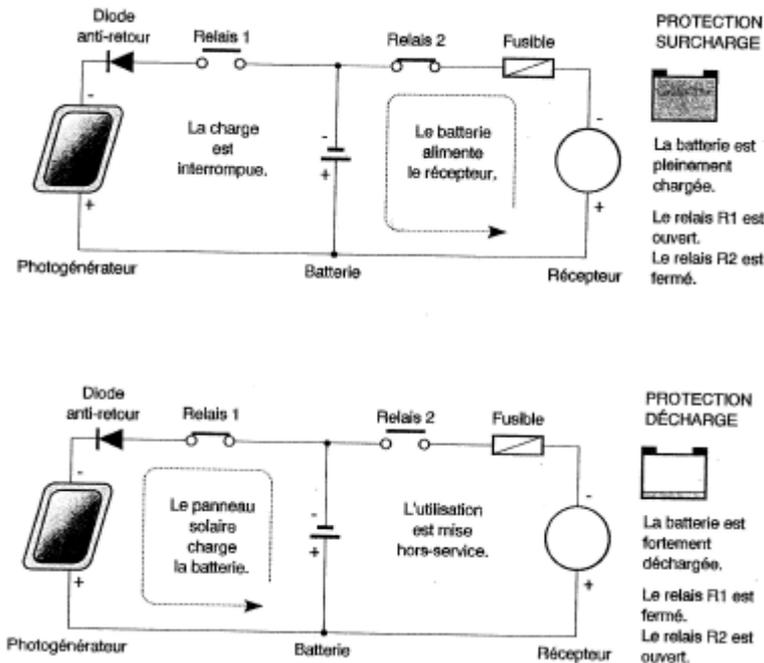


Figure2.3: Cycle d'hystérésis pour la décharge

Les différents états de fonctionnement du système sont donc :



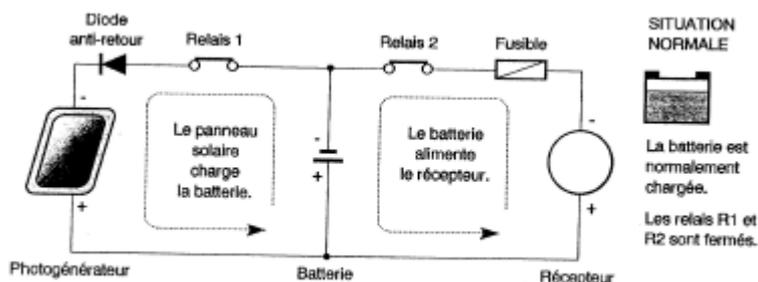


Figure 2.4 : Différents états du système

### 2.3 Détermination des composants du régulateur :

Après avoir défini le type de circuit que nous allons réaliser (un circuit de régulation analogique d'une batterie 12V et 7A/h en ce qui nous concerne), avant de faire réaliser la carte, il fallait déterminer les composants que nous allons utiliser, afin de prévoir les tensions, courants, etc... mis en jeu.

De plus, suivant les types ou même marques des composants, les branchements pouvaient différer. Dans cette partie, nous développerons uniquement les calculs des valeurs des composants. En ce qui concerne le choix précis de ces composants, nous nous sommes faits aider par les sites web et les cours étudiés en 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année. Pour plus de renseignements, reportez-vous en annexe2, tous les datasheets des composants utilisés sont fournis.

Déterminer les caractéristiques des composants est une étape critique dans la construction du contrôleur. Certes, tout composant inadapté peut logiquement empêcher un fonctionnement optimal, mais surtout risque-t-il d'occasionner des pertes bien plus importantes que les économies réalisées (en effet toute l'énergie finalement stockée dans la batterie traverse le contrôleur, qui constitue l'interface panneaux solaires/batterie et batterie/utilisations).

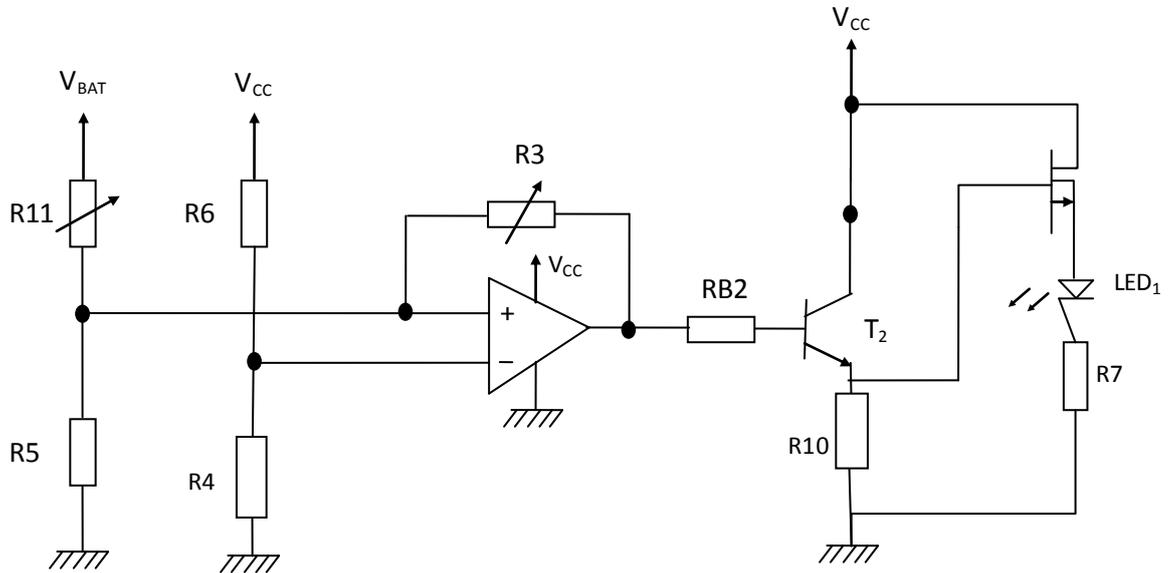
Dans tous les calculs qui vont suivre, le cas extrême sera envisagé. Nous supposons que le circuit est toujours efficace à 100% (comme nous l'avons fait dans l'étude théorique) :

$$P_{in} = P_{out} * Q \quad (92\% < Q < 97\%)$$

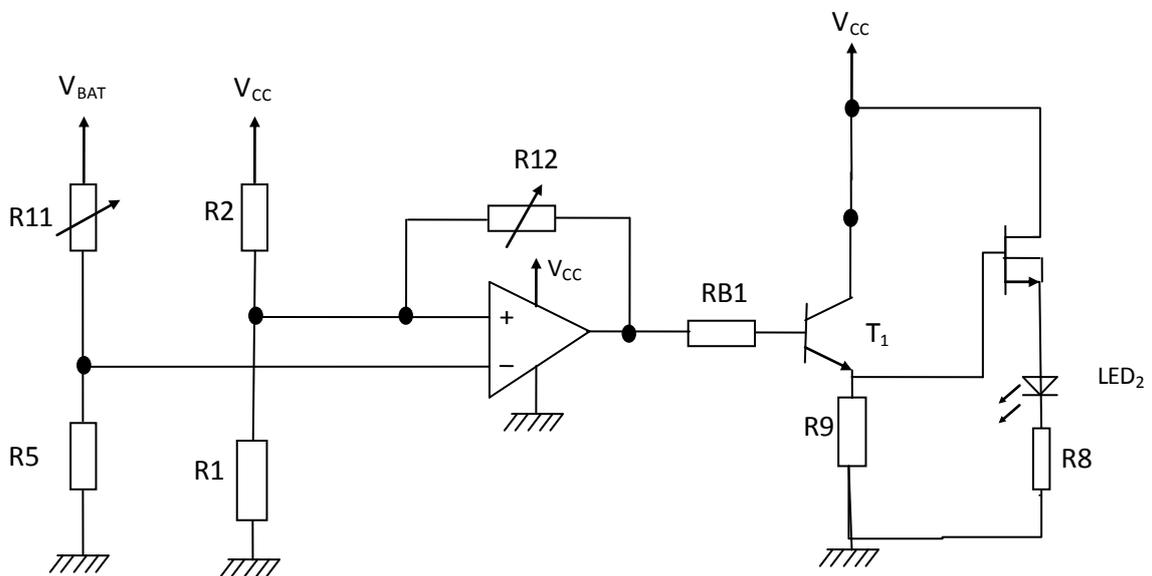
Donc :

$$V_d * I_d = V_o * I_o * Q \quad (92\% < Q < 97\%)$$

Le schéma final dont nous allons chercher les composants est le suivant, (nous justifierons la présence de ces composants ainsi que leur choix dans la suite) :



**Figure2.5 (a):** Circuit de régulation automatique de charge de la batterie



**Figure2.5(b) :** Circuit de régulation automatique de décharge de la batterie

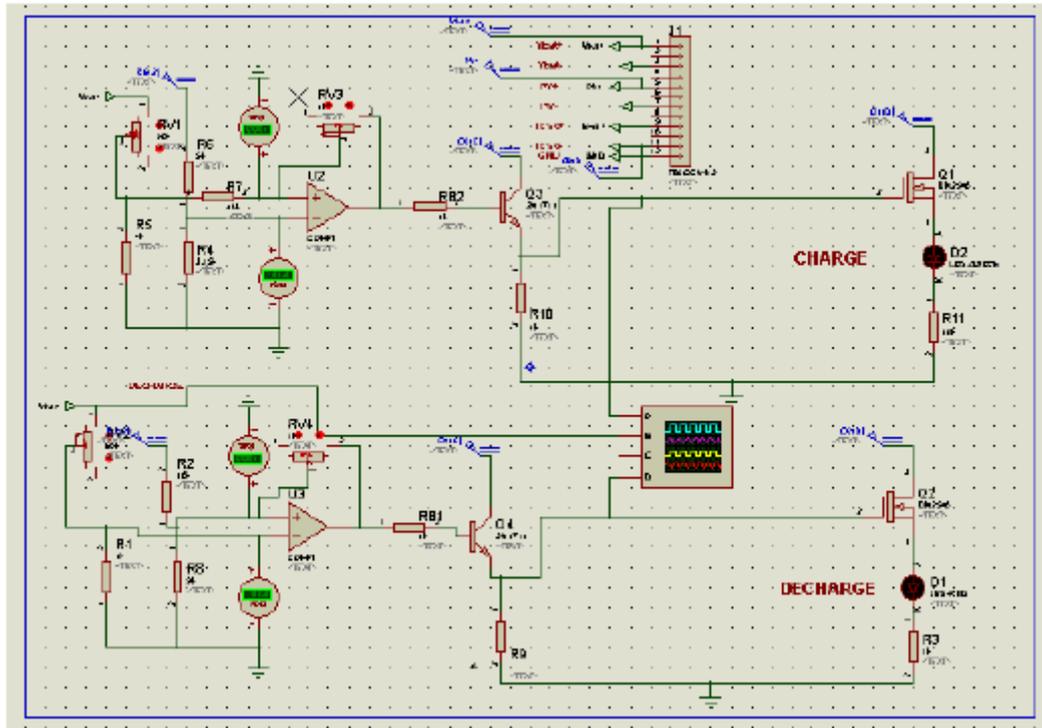


Figure 2.6: Schéma complet du régulateur analogique

Les composants utilisés sont :

❖ **MOSFET :**

Nous avons choisit un MOSFET à canal N (BUK9805) qui peut fonctionner avec des tensions VDS jusqu'à 55 V, et des courant ID jusqu'à 15 A. Sachant que dans le cas le plus défavorable, au sein de notre contrôleur, le MOSFET ne sera qu'à être soumis à 16 V entre le drain et la source et à un courant de l'ordre de quelques centaines de mA. Il a un courant de fuite maximal de 100  $\mu$ A, ce qui est négligeable au vu des courants en jeu dans notre montage, et une faible résistance en fonctionnement de 100 m $\Omega$  (donc des résistances  $10^4$  fois plus faibles que les autres résistances du circuit). Pour plus d'information voir (Annexe 2).

❖ **Régulateur de tension**

Sachant que le comparateur nécessite une alimentation de 5V, nous avons choisit un régulateur de tension LM 7805 CT, dont les principales caractéristiques sont :

- Une tension d'entrée maximale de 35 V (ce qui est amplement suffisant puisque nous placerons ce contrôleur en sortie de la batterie de tension nominale 12 V)
- Une protection interne contre les courts circuits : ce système protège le système aval (ici le comparateur) en cas de court circuit.
- Une protection interne contre les surchauffes : ceci protégera le régulateur lui-même d'une surchauffe en cas de court circuit dans le montage.
- Une faible consommation de courant (8 mA) lorsque le régulateur ne fonctionne pas (ce qui permet logiquement de diminuer la puissance consommée)

### ❖ Diviseurs des tensions

Les tensions que nous devons mesurer afin de mettre en œuvre notre circuit sont bien plus importantes que celles pouvant être reçues par le comparateur(TLC272) (en effet celui-ci ne tolère pas de tension au-delà de 5V alors que les panneaux solaires peuvent délivrer une tension de 16,5 V et la batterie 12V).

Nous avons donc calculé les rapports nécessaires et puis nous avons choisi les résistances nécessaires pour réaliser ces rapports.

C'est ainsi que nous avons pour le diviseur de tension en sortie du panneau solaire ( $V_{ref1}=14.2V$  et  $V_{ref2}=11.6V$ ), la batterie utilisée a 6 éléments donc on a préféré diviser la tension de la batterie sur 6 et  $V_{ref}$  sur 6 et se référer à un seul élément.

Pour le PV :

$$R'2 / (R'1 + R'2) = 2,7 / (6,8 + 2,7) = 0,284 \\ \Rightarrow V_{pvmax} = 0,284 * 16,5 = 4,68 \text{ V.}$$

Et pour la batterie :

$$R5 / (R11 + R5) = 1 / (4,78 + 1) = 0,173 \\ \Rightarrow V_{battmax} = 0,173 * 12 = 2,076 \text{ V.}$$

### ❖ Transistor :

Le transistor utilisé dans ce contrôleur analogique c'est le 2N3906, qui peut fonctionner avec des tensions VDS jusqu'à 55 V, et des courant ID jusqu'à 15A. Sachant que dans le cas le plus défavorable, au sein de notre contrôleur, le MOSFET ne sera qu'à être soumis à 16 V entre le drain et la source et à un courant de l'ordre de quelques centaines de mA. Il a un courant de fuite maximal de 100 $\mu$ A, ce qui est négligeable au vu des courants en jeu. Pour plus d'information sur ce type de transistors le datasheet est à l'annexe2.

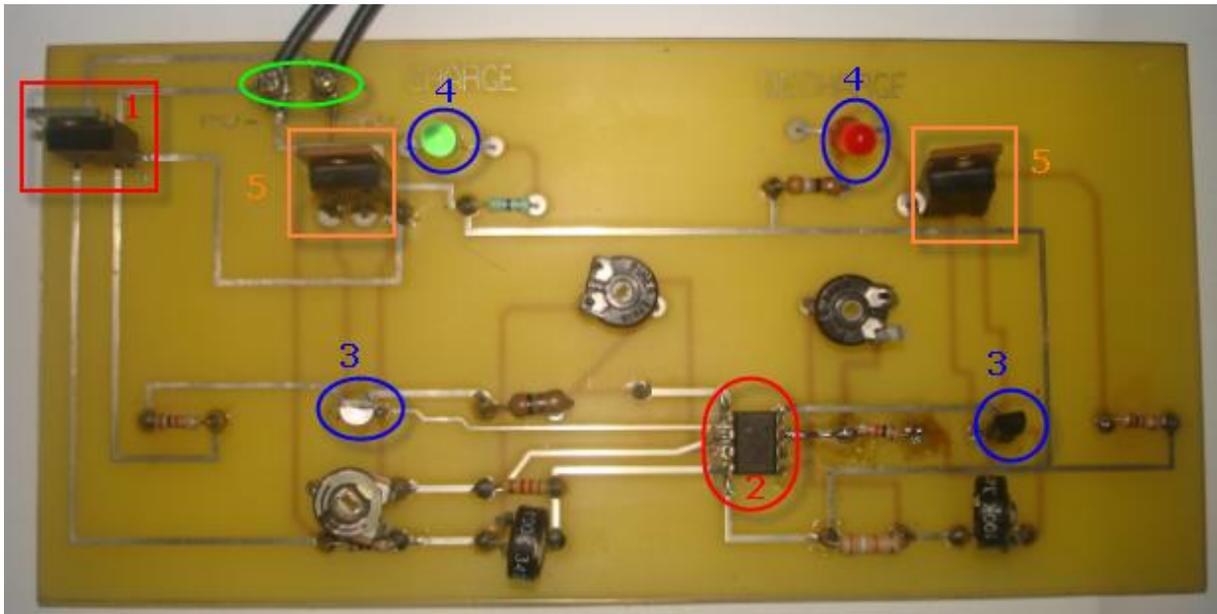
### ❖ comparateur:

On a utilisé le TLC272 à 8 broches, il est constitué de deux comparateurs intégrés, les broches 2,3,5,6 comme entrées et 1,7 comme sorties ; alimenté par VCC(5V) sur le broche 8 et le 4 lié à la masse. Pour plus d'informations veuillez consulter le datasheet dans l'annexe2.

#### **Bilan:**

$R1=37\Omega$ ,  $R2=59\Omega$ ,  $R4=R5=1K\Omega$ ,  $R6=1.23K\Omega$ ,  $RB1=RB2=30\Omega$ ,  
 $R7=R8=R9=R10=230\Omega$ ,  $R11=4.78K\Omega$ .  
Régulateur de tension 5V(LM7805)  
Comparator (TLC272)  
MOSFET (BUK 9508).

## 2.4 Réalisation de la carte :



**Figure2.7 :** Le contrôleur charge/décharge

### Légende :

- 1-Régulateur de tension 5V(LM7805)
- 2-Comparateur (TLC272)
- 3-Transistor (2N3904)
- 4-LED
- 5-Mosfet (BUK9805-55)
- 6-Branchement batterie (Vbat+ et Vbat -)

### 2.4.1 Instructions d'assemblage

A cause de la non disponibilité des panneaux on a préféré d'utiliser la tension de 5V comme tension de référence pour visualiser le fonctionnement du contrôleur et la décharge vers la masse.

Les éléments suivants de l'installation doivent être connectés au contrôleur, en respectant les polarités marquées:

- Panneaux photovoltaïques. On doit relier dans les entrées bien spécifiées, les câbles positif et négatif des panneaux.
- Batterie. On relie dans l'entrée 1 le moins et 2 le plus des câbles de celle-ci. Il faut essayer d'utiliser des fils qui ne produisent pas de chutes de tension supérieures à 4% de la tension nominale.
- Circuit décharge. On doit relier dans les entrées spécifiées lowd, respectivement, les câbles positif et négatif des panneaux.

## 2.5 Organisation de la réalisation :

Le logiciel de routage utilisé pour cette carte est 'ARES' .

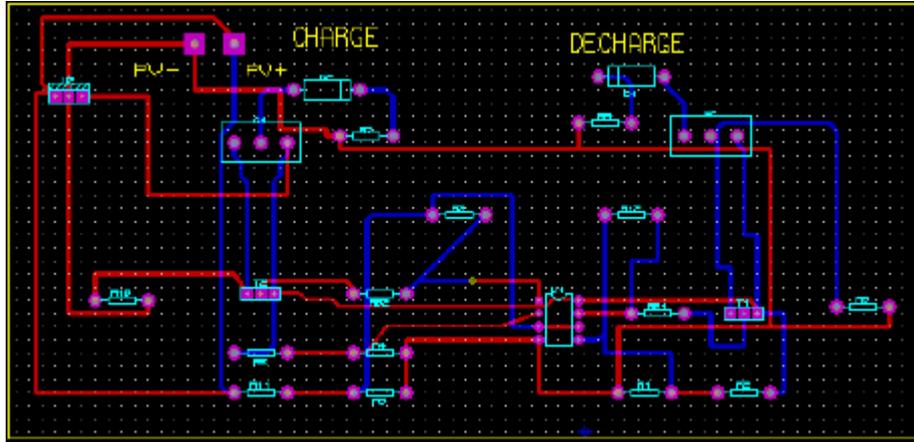


Figure2.8.a: Schéma sous ARES du circuit imprimé de notre régulateur analogique

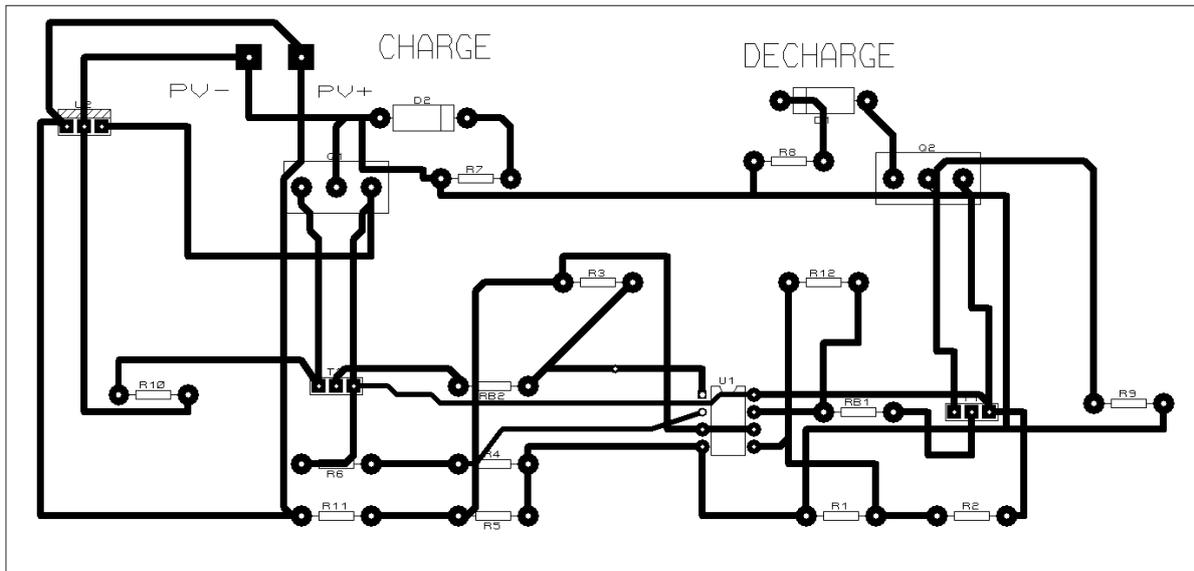


Figure2.8.b: Schéma sous ARES du circuit imprimé de notre contrôleur analogique

Ce schéma a été réalisé à partir d'un schéma identique à celui donné en figure2.5.

Au-delà des calculs théoriques effectués jusqu'ici, la construction de la carte demande des précautions vis-à-vis de l'utilisation de certains composants. Ainsi nous avons placé un radiateur autour du MOS afin de dissiper les surplus de chaleur.

Pratiquement, nous avons choisi le dissipateur extrudé prévu pour transistor de type TO 220(le type du MOSFET choisi au préalable) et une feuille isolante également conçue pour ce type de transistor. (cf. annexe 2 pour l'ensemble des renseignements sur ces composants).

Après réception du circuit imprimé ont a soudé les différents composants pour terminer cette réalisation et obtenir la carte représentée en figure2.6.

## 2.6 Puissance consommée par le régulateur analogique :

Les éléments qui causent une perte de puissance au sein du convertisseur sont la diode(LED), le transistor, le MOSFET, et les changements de position du MOSFET.

### ❖ Led :

Dans le datasheet de la led utilisée dans notre circuit, il est dit d'évaluer les pertes : à l'aide du calcul suivant :

$$P_{led} = 0,42 * I_{moy} + 0,022 * I_{RMS}^2 \quad (\text{II.1})$$

### ❖ Mosfet :

Pour le MOSFET lorsqu'il est passant :

$$P_{MOSFET} = I_L^2 * R_{DS} * \alpha \quad (\text{II.2})$$

Où  $R_{DS}$  est la résistance drain source du MOSFET

Bilan : lorsque le convertisseur statique conduit, les pertes de puissance qui y sont associées sont données par (d'après (II.1) et (II.2)) :

$$P_{conduction} = P_{diode} + P_{MOSFET} \quad (\text{II.3})$$

Le MOSFET est aussi cause de pertes à chaque changement d'état. Il y a 4 états pour un MOSFET (turn on, passant, turn off et bloquant). La puissance dissipée ainsi s'exprime

- $P_{turn\_on} = I_{dso} * V_{dd} * t_d * f + f * I_{ds} * t_r * [V_{dd}/2 + (V_{ds,sat} - V_{dd}) / 3] \quad (\text{II.4})$

Où  $f$  est la fréquence d'alternance on/off

$V_{dd}$  : est la tension du drain

$t_d$  : le retard au turn on

$I_{ds}$  : le courant « leakage » drain - source

$t_r$  temps : de montée

$V_{ds,sat}$  : tension de saturation drain-source

- $P_{turn\_off} = I_{ds} * V_{ds,sat} * t_s * f + f * I_{ds} * t_f * V_{dd} / 6 \quad (\text{II.5})$

Où  $t_s$  est le temps de stockage

- $P_{passant} = I_{ds} * V_{ds,sat} * t_c * f \quad (\text{II.6})$

Où  $t_c = \alpha / (f - t_d - t_r)$  est le temps où le MOSFET est passant

- $P_{bloquant} = V_{dd} * t_o * f * I_{dso} \quad (\text{II.7})$

Où to est le temps où le MOSFET est bloqué

Bilan : lorsque le MOSFET commute, les pertes de puissance qui y sont associées sont données par (d'après (II.4), (II.5), (II.6) et (II.7)) :

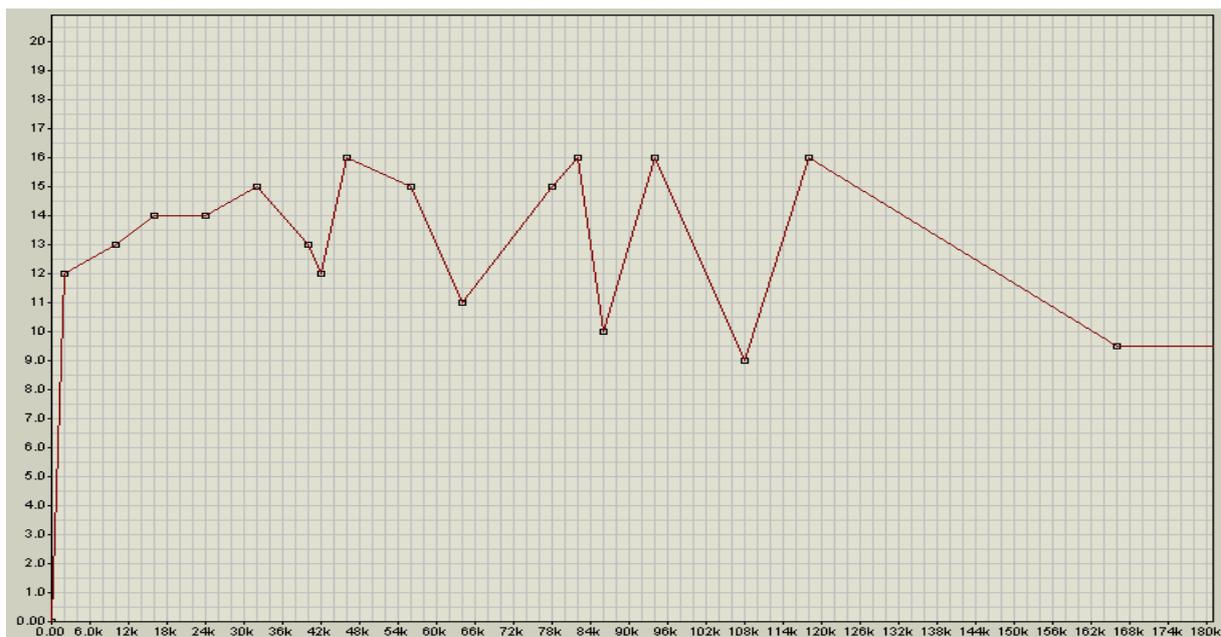
$$P_{\text{commutation}} = P_{\text{turn\_on}} + P_{\text{turn\_off}} + P_{\text{passant}} + P_{\text{bloquant}} \quad (\text{c.8})$$

## 2.7 Mesures et essais:

Dans cette section nous présentons les essais que Nous avons étudiés sur le comportement du contrôleur pendant toute une journée. Pour que les résultats soient réellement fiables, il est nécessaire que la tension de la batterie ait

des changements brutales pour bien visualisé le comportement du régulateur analogique.

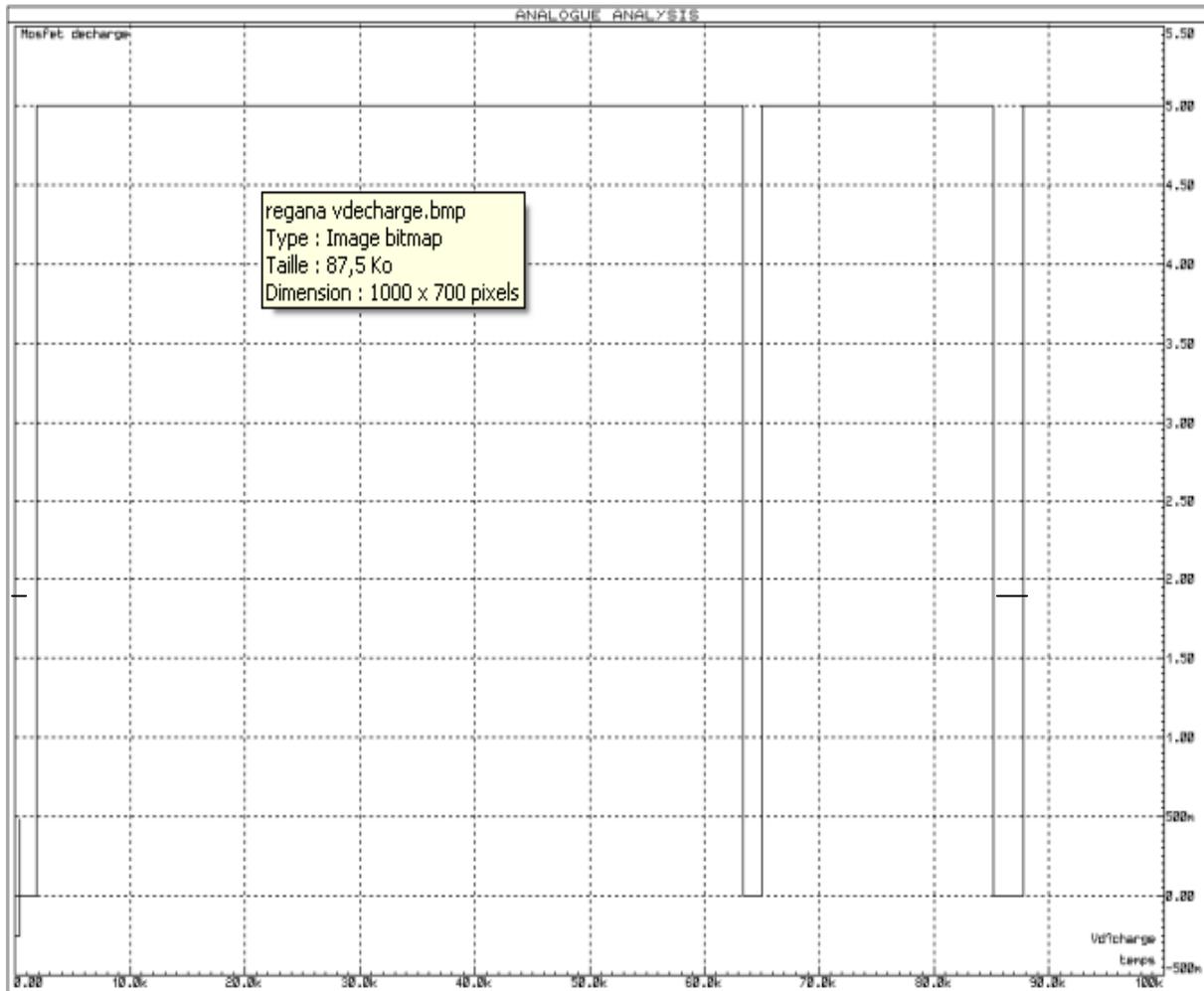
Soumis à la même valeur de tension Vbat pour pouvoir comparer les différents rendements des deux contrôleurs analogique/numérique.



**Figure2.9** : Variation de la tension VBatterie

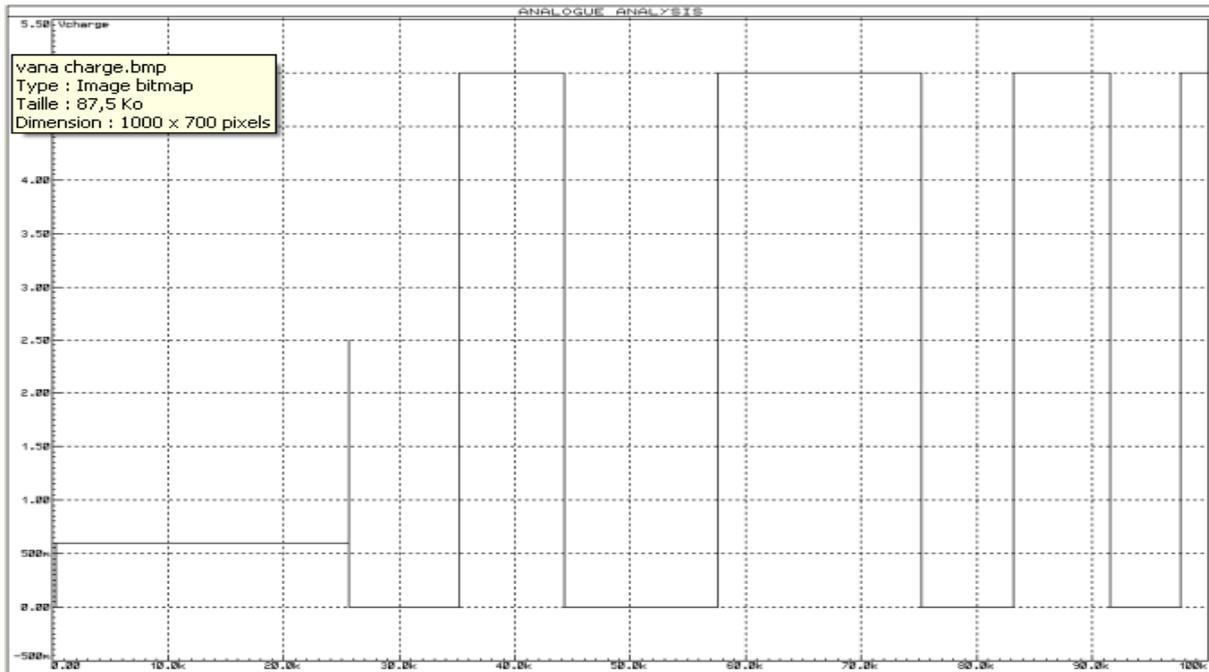
La figure 2.8 illustre le comportement de la grandeur électrique Vbatterie du système vis-à-vis des changements brutaux de tension du PV et d'utilisation. La tension du point de fonctionnement de la batterie se trouve modifiée si on connecte ou déconnecte le générateur photovoltaïque et le circuit de décharge.

Nous pouvons constater une différence importante de comportement par rapport à la situation duale de variation brutale de tension de la batterie c'est pour cette cause il ne faut pas trop utiliser ce régulateur a cause d'échauffement des MOSFET et la non disponibilité des radiateurs bien spécifié pour ces MOS.



**Figure 2.10:** Réponse de la sortie décharge du régulateur vis-à-vis de changements brutaux de tensions dans la batterie

La figure 2.9 montre la tension fournit par le MOSFET quand le contrôleur est connecté sur une batterie de 12V. Nous constatons que le contrôleur peut suivre le fonctionnement désiré avec des rendements élevés. En effet ce résultat est bien spécifié juste dans le cas d'une batterie de 12V/7A.



**Figure 2.11:** Réponse de la sortie charge du régulateur vis-à-vis de changements brutaux de tensions dans la batterie

En premier d'abord, ce graphique ressemble beaucoup au précédent, en effet le graphe de tension  $V_{décharge}$  (en haut) la commande du mosfet bascule 0 vert1 lorsque ( $11.6 < V_{bat}$ ) contrairement a la sortie charge il faut que ( $V_{bat} > 14.2$ ) pour que la commande du mosfet=0.

### 2.8 Conclusion :

Comme nous venons de vous le détailler, la partie théorique, concernant l'électronique et le système de régulation type analogique, a été entièrement réalisée.

Nous avons de plus réalisé le schéma de la carte du régulateur, la création du circuit imprimé et le montage et la soudure des différents composants, nous avons également démontré des mesures. Tous ces composants ont été bien simulés et nous espérons faire des bons résultats avec le contrôleur numérique.



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Chapitre 3

## Réalisation d'un contrôleur

## charge/décharge numérique

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

### 3.1 Le Régulateur numérique (100% transistorisé) :

L'objectif de notre étude est la réalisation d'une commande numérique basée sur le régulateur déjà existant en version analogique. Les objectifs concrets que nous voulons atteindre par cette réalisation numérique sont les suivants :

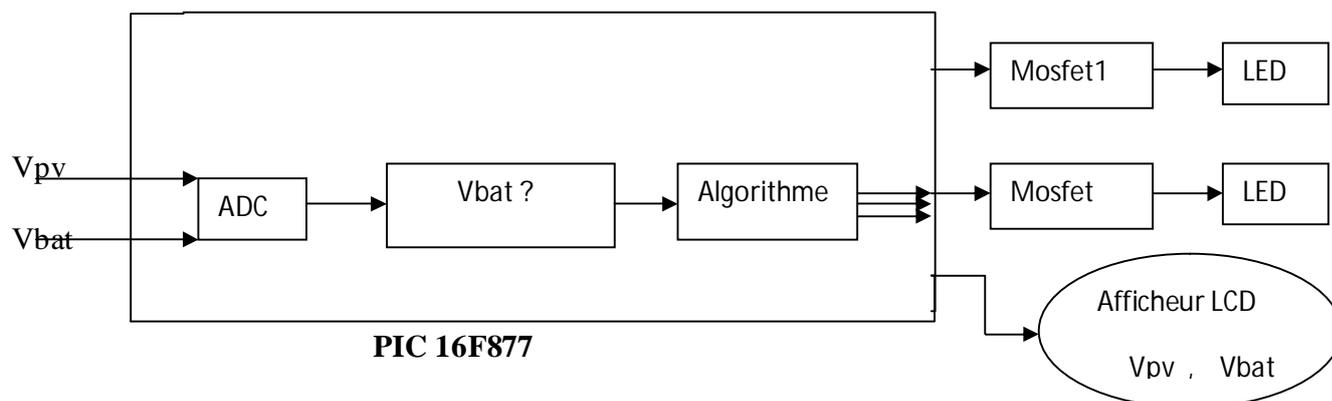
- Obtention des rendements équivalents à ceux obtenus avec la commande analogique.
- Réduction du coût de fabrication par rapport au régulateur analogique.
- Réduction du nombre de composants utilisés pour la mise en œuvre.
- Diminution du volume total du système de régulation des PVS.
- Diminution de la consommation de la commande.

100% transistorisé c'est que toutes les ouvertures et fermetures de circuit se font par des transistors à effet de champ (comme le régulateur analogique).Le régulateur ne comporte aucun relais mécanique.

### 3.2 Partie commande :

#### 3.2.1 Schéma de principe :

La figure 3.1 montre le schéma de principe de la commande numérique, nous notons que nous utilisons un microcontrôleur PIC de la série 16F pour la mise en œuvre de l'algorithme de commande des 2 MOSFET (**MOSFET1=charge/MOSFET2=décharge**). Nous pouvons voir sur cette figure que nous n'avons plus besoin du comparateur, indispensable pour la commande analogique. D'un autre coté, l'algorithme de régulation génère un signal qui permet de charger et de décharger la batterie comme il a été défini dans le cas du régulateur analogique.

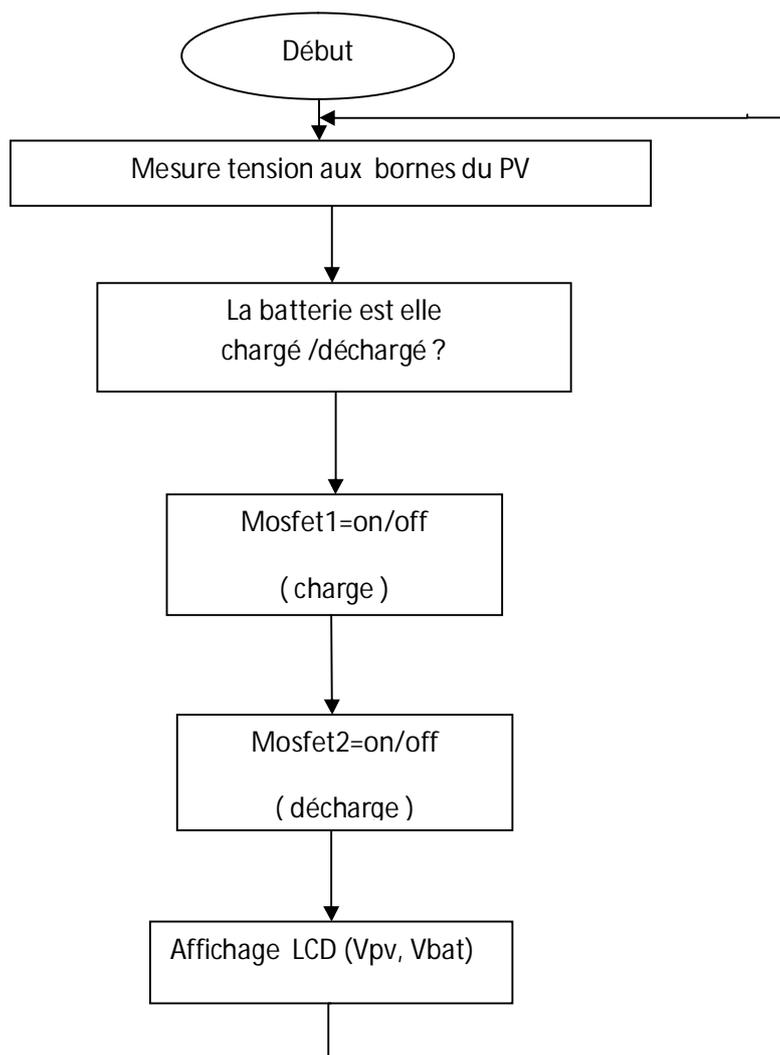


**Figure3.1:** Schéma de la commande numérique.

La figure 3.2 montre le diagramme de blocks de l'algorithme de commande intégré dans le microcontrôleur PIC. Le fonctionnement de cet algorithme est le suivant. Dans un premier temps nous configurons les registres du microcontrôleur PIC16F. Nous effectuons l'acquisition de la valeur de tension du PV ( $V_{pv}$ ) suivit de celle de la batterie ( $V_{bat}$ ).

L'acquisition de ces variables doit se faire parallèlement car le microcontrôleur dispose de 5 convertisseurs analogique-numérique (CAN). Une fois que nous avons obtenu les valeurs de ces deux variables, nous les utiliserons ensuite dans le programme principale.

A partir de ces valeurs ( $V_{pv}$ ,  $V_{bat}$ ) nous pouvons déterminer l'états du signal de sortie dans les ports(B4,B2) et les affichées a travers LCD à l'aide de ce que nous notons dans la figure 3.2 .



**Figure3.2:** Algorithme de la commande numérique

### 3.2.2 Structure de l'algorithme :

Ici nous décrivons le fonctionnement de l'algorithme. La valeur de la tension de la batterie nous permet d'exécuter cet algorithme. Si la tension est supérieure à 14.2V alors l'état de la sortie(RB2) est à niveau Bas « 0 » ça implique que le mosfet de charge est ouvert si cette tension

diminue jusqu'au 12.6V alors le mosfet de charge devient fermer donc le PV est entrain de chargé la batterie.

Nous testons la valeur de la variable Vbat si elle est inférieure à 11.6V alors l'état de la sortie(RB4) est à niveau bas «0» cette dernière bascule si la tension Vbat augmente jusqu'au 12.9V .Après chaque exécution d'une boucle du programme principal LCD affiche les tensions Vpv et Vbat.

La figure 3.3 montre en détail le schéma de principe de l'algorithme implémenté.

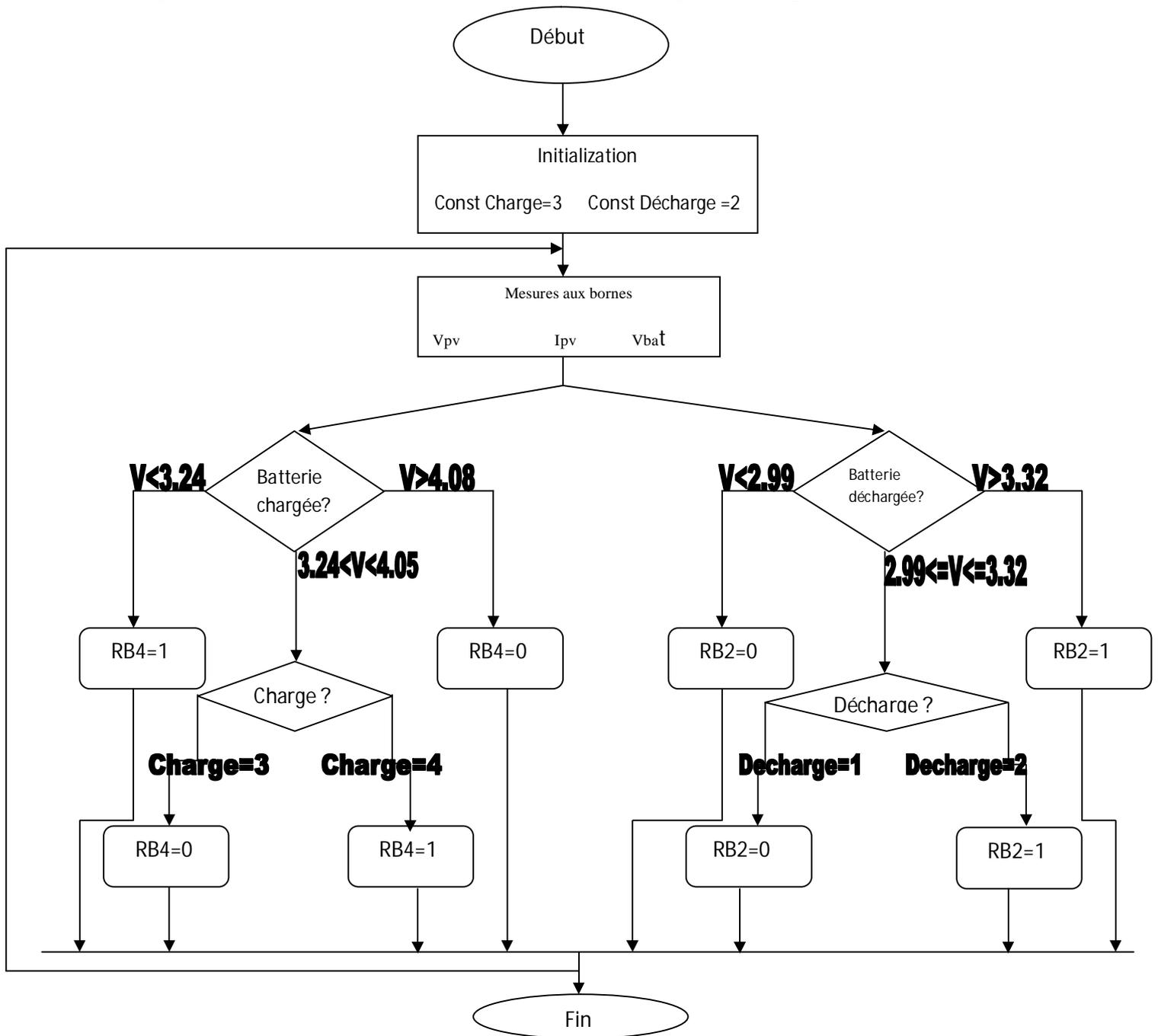


Figure 3.3: Schéma de principe de l'algorithme implémenté.

### 3.2.3 Identification des PIC :

On peut identifier un PIC à travers sa référence, les deux premiers chiffres indiquent la famille du PIC par exemple: 16 représente la famille Mid-Range, 18 la famille High-End. Juste après, vient parfois la lettre L qui indique que le PIC peut fonctionner avec une plage de tension beaucoup plus tolérante. Le type de mémoire programme peut être indiqué grâce à la lettre C si elle est de type EPROM, CR si elle est de type ROM, ou bien F si la mémoire est de type FLASH. En fin, les derniers chiffres représentent le PIC lui-même.

- Ø Souplesse d'utilisation et de programmation.
- Ø Flexibilité et efficacité.
- Ø Ne nécessite que très peu de composants pour son fonctionnement.
- Ø Disponibilité à des prix dérisoires.
- Ø Système de développement téléchargeable gratuitement sur Internet

### 3.2.4 Etude du microcontrôleur 16F877 [K] :

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

Les broches du PIC et leurs différentes fonctions sont montrées par la figure3.4.

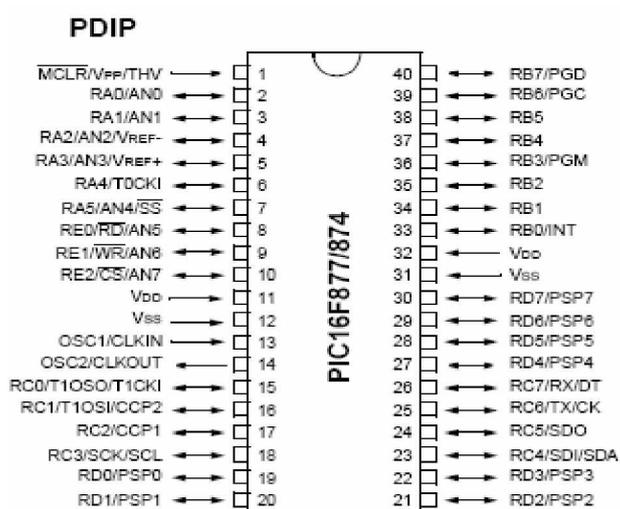


Figure3.4: Les broches du PIC et leurs différentes fonctions

### 3.2.5 Caractéristiques principales du 16F877 :

Les principales caractéristiques du 16F877 sont regroupées dans le (tableau3.1).

Key Features PIC micro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F877
Fréquence System	DC - 20 MHz
RESETS (et Délais)	POR, BOR (PWRT, OST)
Mémoire Programme de type FLASH (mots de 14 bits)	8K
Mémoire de données	368 Octets
Mémoire de données EEPROM	256 Octets
Sources d'interruptions	14
Les Ports d'Entrées/Sorties	Ports A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits), D (8 bits), E (3 bits)
Les timers	3
Les modules de captures et de comparaison avec PWM (modulation de largeur d'impulsions)	2
Communications séries	MSSP, USART
Communications parallèles	PSP
Convertisseur A/N de 10 bits	8 entrées multiplexées
Jeu d'instruction	35 instructions

**Tableau [3.1]:** les principales caractéristiques du PIC16F877

En plus de ces caractéristiques, le 16F877 est programmable et débbugable sur site ICSP (In Circuit Serial Programming) bootloader et ICD (In Circuit Debbging). Il possède un chien de garde ainsi qu'une surveillance d'horloge OST et de tension d'alimentation BOR.

Le PIC 16F877 possède trois Timers : le Timer0, Timer1, Timer2.

Le Timer0 ainsi que le Timer2 sont sur 8 bits, tandis que le Timer1 est sur 16 bits. Ils peuvent jouer le rôle de compteur, de temporisateur ou les deux en même temps selon la configuration du Timer.

Pour les interfaces de communication, le 16F877 est doté d'interfaces série synchrone et asynchrone USART. Ainsi que les interfaces sériente synchrone SSP, SPI et I2C.

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

- Ø <2mA à 5V pour une fréquence du Quartz=4Mhz.
- Ø 20µA à 3V pour une fréquence du Quartz à 32Khz.
- Ø <1µA en mode sommeil.

Dans la figure3.5, nous allons exposer d'une manière simple et explicite les éléments constituant le PIC 16F877 :

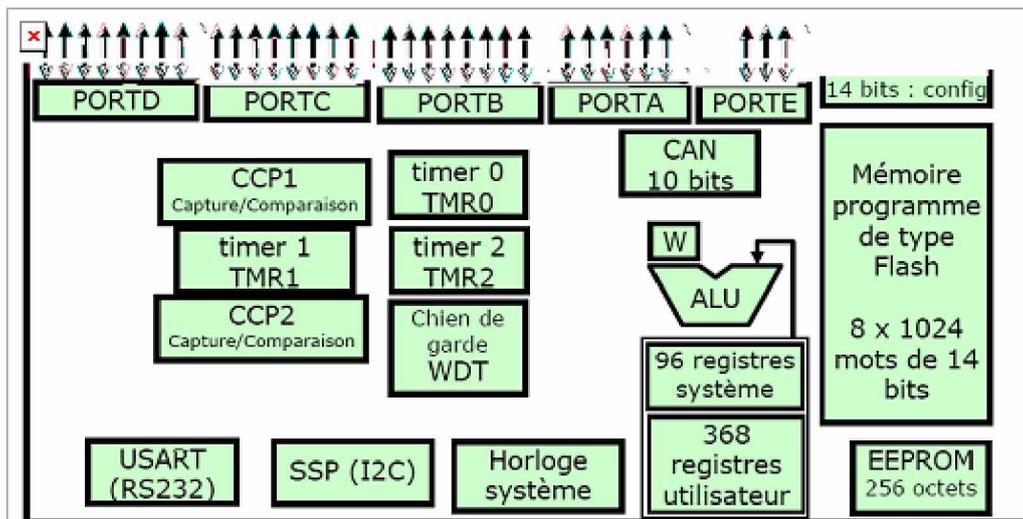


Figure3.5: Organisation interne du PIC 16F877

Les ressources utilisées dans notre travail sont les suivantes :

- Ø Le Timer0.
- Ø Les ports d'Entrée/Sortie.
- Ø Les sources d'interruption du timer0 .
- Ø L'interface de communication série USART.
- Ø L'écriture et la lecture en EEPROM du PIC.

### 3.2.6 Explication du programme :

Le programme complet en C de la commande utilisée est inclus dans l'annexe1 de ce document.

#### a) Les avantages de la programmation en C :

La programmation en C se fait à l'aide d'un langage facile et direct qui (bien qu'étant de l'anglais) comprend des mots puissants, si bien qu'un programme écrit en C comporte peu de mots.

Les erreurs de programmation sont plus rares, et se décèlent facilement.

L'écriture des programmes prend peu de temps [L].

#### b) Les inconvénients :

La programmation en C nécessite un compilateur expressément conçu pour la programmation des PIC (CCS C voir annexe3).

Il s'agit d'un produit commercial, fruit d'un travail d'équipe, et donc **payant**.

Les programmes en langage C, bien que très courts pour le programmeur qui les écrit, demandent plus de place EEPROM car, vus côté PIC, ils demandent plus d'instructions élémentaires. À tel point que parfois un microcontrôleur pouvant contenir à l'aise un programme écrit en langage assembleur, s'avère posséder une mémoire insuffisante s'il était programmé en langage C, pour faire la même chose.

Dans le cas de notre travail, on a choisi le langage C (COMPILATEUR CCS C) pour la programmation des PICs, et c'était pour les raisons suivantes :

- 1-La disponibilité du compilateur C.
- 2-La complexité du programme (multiplication.....)
- 3-La limitation de la durée pour l'élaboration du projet.
- 4-Sa facilité par rapport à l'Assembleur et ses fonctions spéciales concernant le convertisseur A/D et la MLI et l'affichage LCD

#### c) L'explication :

Dans un premier temps nous incluons les bibliothèques nécessaires pour le bon fonctionnement du programme :

- p18f1220.h (bibliothèque du PIC18F1220)
- stdio.h
- math.h
- configuration du watch-dog comme inactif
- la conversion se fait sur 10bits ADC=10

Ensuite, nous déclarons toutes les variables globales. Ces variables sont toutes les variables qui sont actives pendant toute l'exécution du programme.

Configuration du port A du PIC comme entrées analogiques AN0 et AN1 dans le registre TRISA. De la même manière nous configurons tout le port B ,C,D,E du PIC comme sortie.

Après nous devons configurer le CAN afin de capturer les valeurs de la tension du PV et Vbat. La tension de référence du CAN est de 5V, un pont diviseur de tension sont nécessaires du coté du panneau solaire et batterie pour adapter ( $V_{pv}$  et  $V_{bat}$ ) à cette tension de référence.

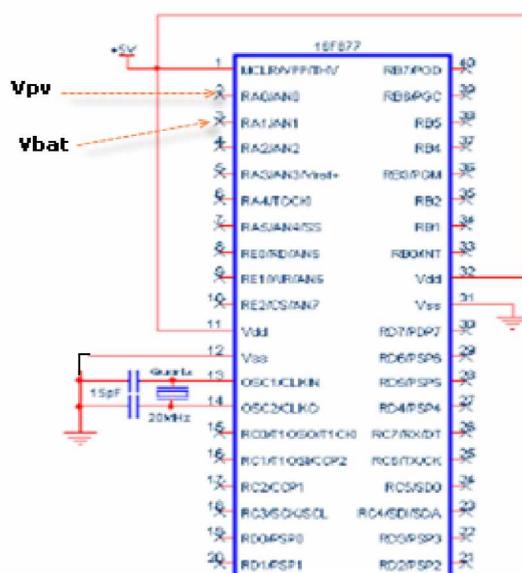


Figure3.6: La mise en échelle des tensions

De cette manière nous obtenons les équivalences suivantes sur les deux ports d'entrée.

Les tensions maximales que peut fournir le panneau et la batterie sont :

- $V_{PV}$  0 à 20V ( $I_{pv}=3A$ )
- $V_{bat}$  0 à 16V

Capteur de tension  $V_{pv}$  : 0 5V-----: 0 5V PIN2 (CAN)

Capteur de tension  $V_{bat}$  : 0 5V-----: 0 5V PIN3 (CAN)

Nous effectuons un petit retard pour mieux acquérir le courant du module PV et effectuer la conversion A/N. Une fois acquis la valeur de la tension, nous commençons à faire la conversion. La conversion consiste à convertir la valeur de la tension de référence du PIC. Ceci nous le faisons en configurant le registre ADC (registre de conversion) du PIC16F877. Dans ce registre nous informons au PIC :

- le canal sur lequel va se faire la conversion (RA0, RA1, RA2)

- La fréquence d'échantonnage 25Khz (Div,32)
- tension de référence du PIC pour qu'il travaille entre 0 et 5 V (bits 6, 7)

La tension  $V_{pv}$  est connectée sur le PORTA. RA0, configurée en entrée analogique du CAN (AN0), tandis que la tension  $V_{bat}$  est sur le PORTA. RA1 (AN1), La conversion peut se faire sur 8 bits ou 10 bits (voir tableau 3.2).

Les pins utilisés du PIC

Les pins	Fonction	E/S
RA0-RA1	Les entrées ADC ( $V_{bat}$ , $V_{pv}$ )	E
RB2	La commande du Mosfet (charge)	S
RB4	La commande du Mosfet (décharge)	
RD0-RD7	Commande de l'afficheur LCD	S
OSC1+	Branchement du quartz (input)	E
OSC1-	Branchement du quartz (Output)	E
Pin12,32	VDD	E
PIN11,33	VSS	E

**Tableau [3.2]:** Les pins utilisés du PIC16F877.

#### 3.2.7 Test du code :

Afin de vérifier la validité du code (autrement dit que les variations du signal en sortie du microcontrôleur sont bien, celles attendues en fonction des variations des signaux en sortie des panneaux), après avoir compilé notre code grâce au logiciel CCS C.

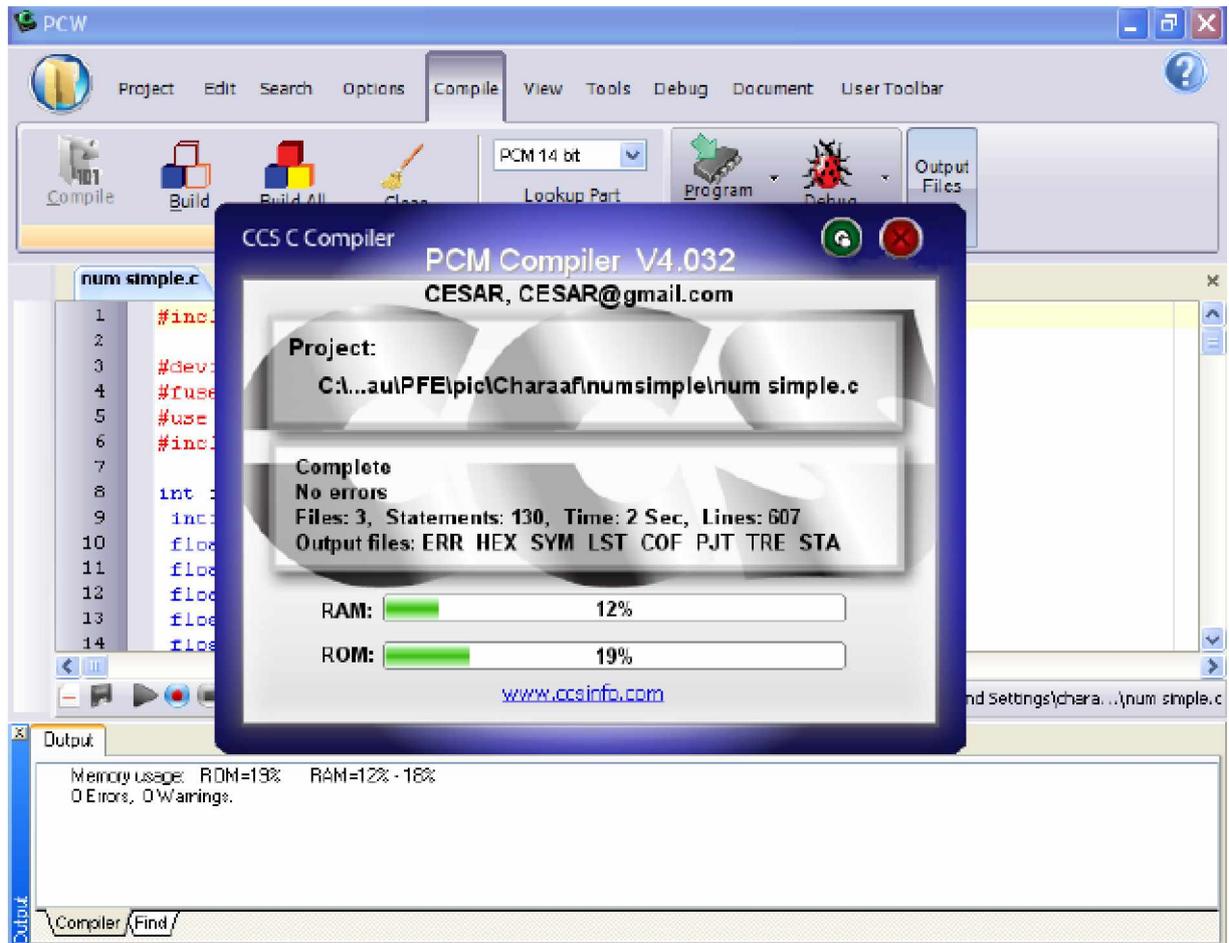


Figure3.7 : Compilation du programme avec compilateur CCS C

### Résultats :

Nous avons donc pu vérifier que l'ensemble d'algorithme était à priori correctement programmé, puisqu'il était possible de le compiler et la figure3.7 montre que le programme ne contient pas des erreurs ou des warnings en plus le logiciel mentionne que l'espace du programme va occuper 22% de la ROM. Néanmoins, nous n'avons pas pu tester si le programme marche sur le pic16F877.

### **3.3.8 Implémentation du programme :**

L'implémentation du programme a été faite à l'aide d'une carte de démonstration de PIC (PIC DEMO2 PLUS) qui qu'utilise le logiciel MPLAB pour le transfère des programmes (hex) cette dernière est représentée à la figure 3.8.

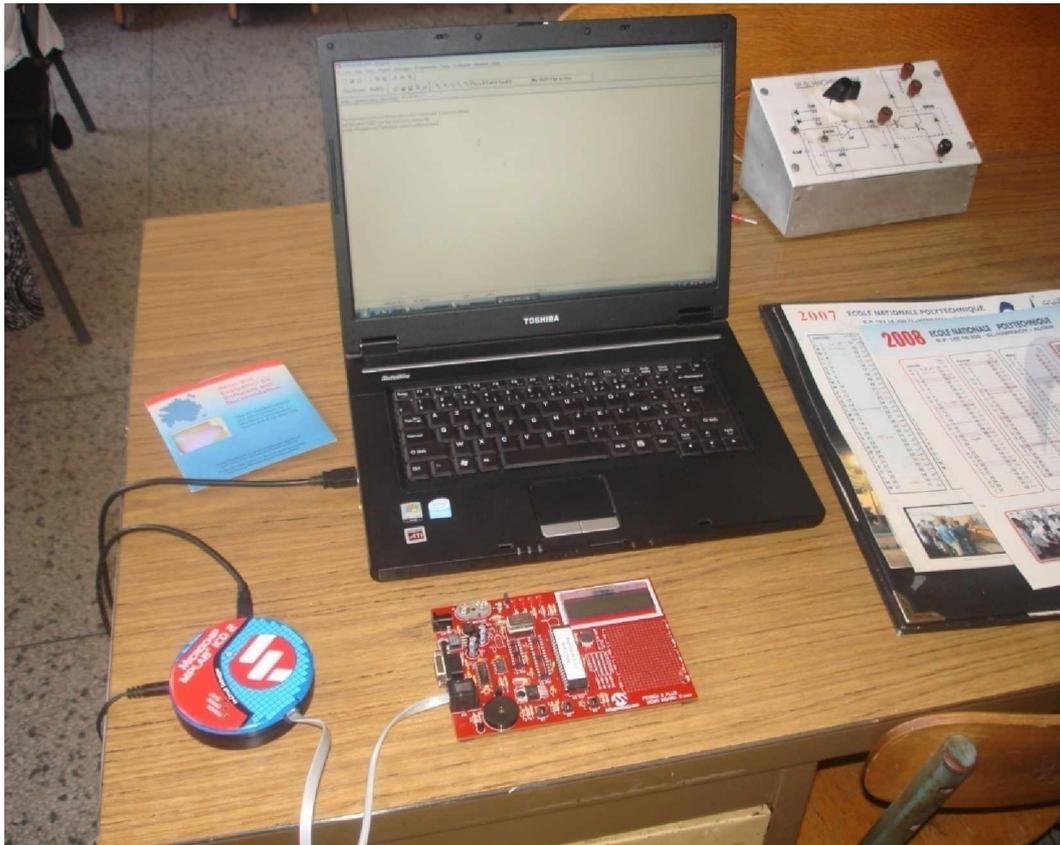


Figure3.8 : La carte de démonstration (PIC DEMO2 PLUS)

### 3.3 Réalisation électronique du régulateur numérique :

#### 3.3.1 Brochage du 16F877 :

Comme le montre la figure3.9, c'est un boîtier PDIP de type DIL (Dual In Line) :

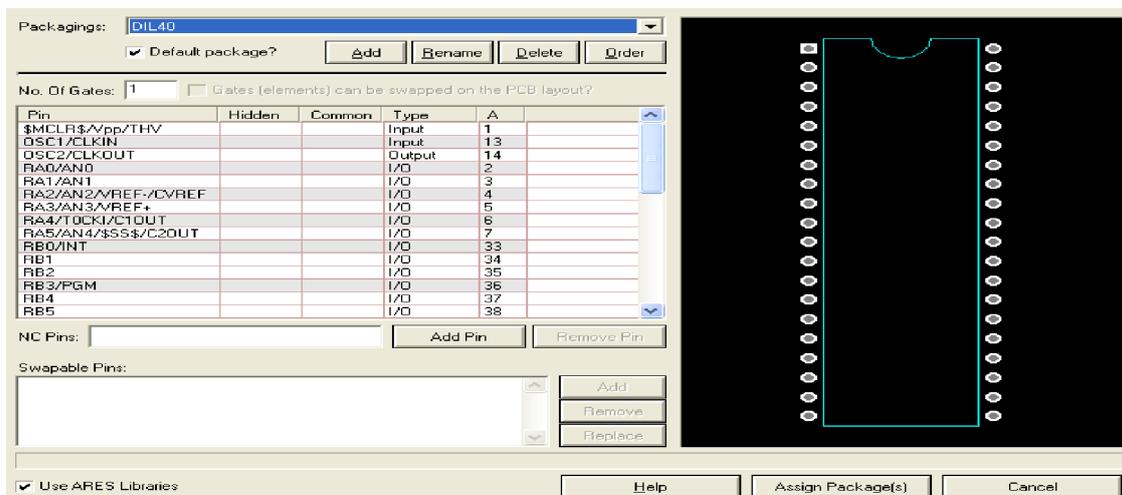


Figure3.9: Brochage du PIC

### 3.3.2 Bloc de visualisation (l'afficheur LCD) :

Afin d'élargir la fonctionnalité de notre projet nous avons rajouté un bloc de visualisation qui nous permet de communiquer facilement avec le microcontrôleur.

Le bloc d'affichage permet de visualiser les données et d'afficher l'ensemble des tentions transmises au microcontrôleur. Ces résultats seront par la suite gérés et traités par l'unité de traitement. Ce bloc d'affichage est composé essentiellement d'un afficheur LCD à 1 ligne 16 caractères, son brochage est donné par la figure3.10:

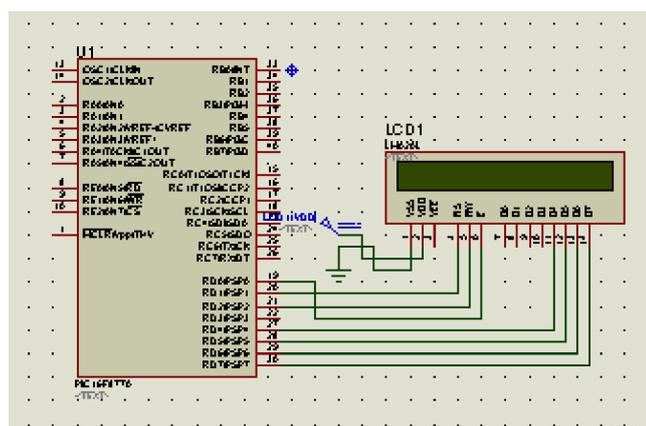


Figure3.10 : Brochage de l'afficheur

Le type d'afficheur que nous avons utilisé est l'afficheur LCD (Liquid Crystal Display) une ligne 16 caractères. Ces types d'afficheurs sont dotés d'une certaine intelligence grâce au microcontrôleur placé sur l'afficheur de la firme GDM1602A.

On assure la réception des données, leur décodage et le pilotage des matrices de cristaux liquides. Les broches de l'afficheur sont au nombre de 14: 2 pour l'alimentation, 4 pour le contrôle et 8 constituant le bus de données. L'utilisation de l'interface d'affichage nous aide à visualiser les données et faciliter leur programmation.

Les pins de contrôle sont :

- ✓ Pin 3 : Vee pour l'ajustement du contraste relié à +5v par une résistance variable de valeur 330  $\Omega$ . Pour améliorer le degré d'affichage en matière d'obscurité nous avons fait appel à une option existante dans l'afficheur LCD qui est le rétro éclairage. Pour intervenir sur la qualité d'affichage ou le contraste une résistance variable d'une valeur de 680 $\Omega$  fait l'affaire.
- ✓ pin 4 : RS (Register Select) : permet de sélectionner le mode de fonctionnement de l'afficheur (réception d'un caractère ou d'une commande) RS =1 pour la réception d'un caractère RS=0 pour la réception d'une commande.

✓ pin 5: R/W (read / write) R/W=0 pour écrire, R/W +=1 pour la lecture.

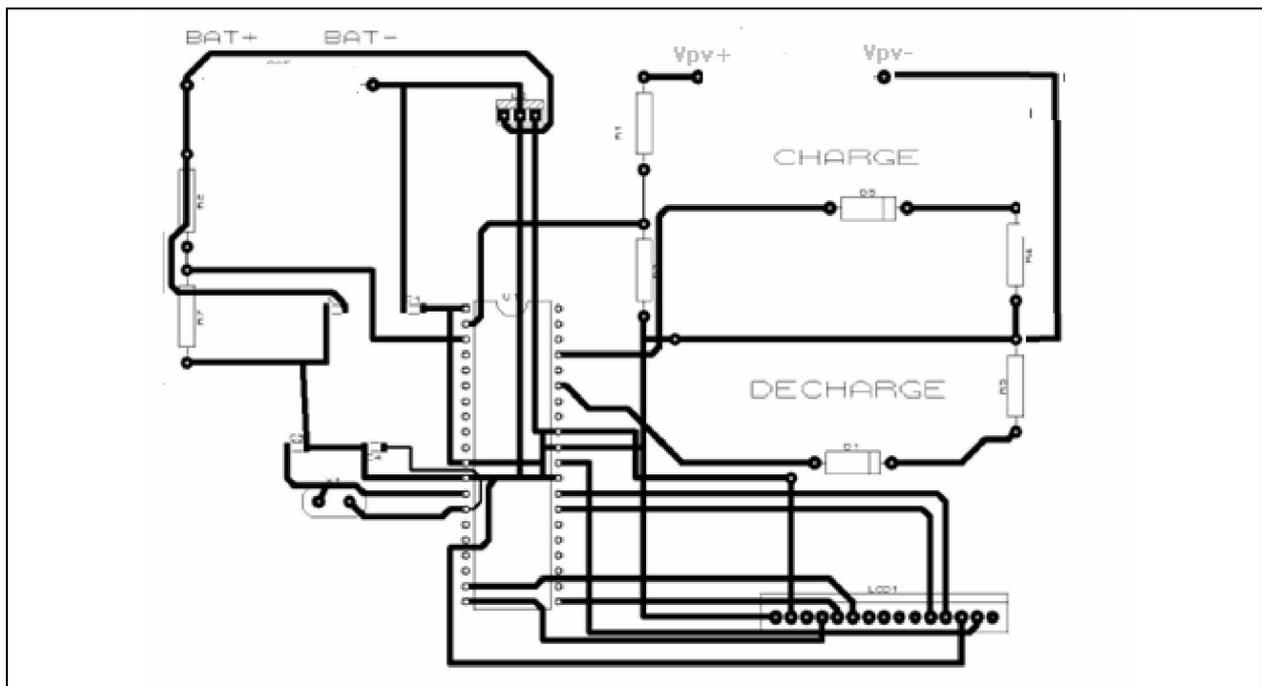
✓ pin 6 : E (Enable), pour valider la donnée par un front descendant.

Les données peuvent être envoyées de deux manières :

Soit 8 bits à la fois, ce qui nécessite le câblage de tout un bus de 8 lignes, ou bien par paquet de 4 bit en utilisant les bits b4 à b7 de l'afficheur. C'est ce mode que nous avons choisi vu le gain de 4 pins du microcontrôleur.

La sélection du mode se fait en envoyant le mot de commande approprié lors de l'initialisation

Dans cette section nous détaillons la réalisation électronique du contrôleur numérique réalisée dans le cadre de ce projet. Nous détaillons le schéma électronique ainsi que le lay-out de la carte que nous avons réalisé.



**Figure3.11:** Schéma du Lay out sous ARES

Le schéma ci-dessus montre la connexion des différents composants utilisés pour réaliser notre projet.

### 3.3.3 Reconnaissance des différentes parties de la carte :

Au-delà des calculs théoriques effectués jusqu'alors, la construction de la carte demande des précautions vis-à-vis de l'utilisation de certains composants.

#### Légende :

- 1 : Entrées panneau
- 2: Entrées batterie
- 3 : LED charge
- 4: LED décharge
- 5 : Afficheur LCD 1\*16
- 6 : Régulateur de tension 5V LM7805
- 7 : Quartz 20Mhz
- 8 :PIC 16F877

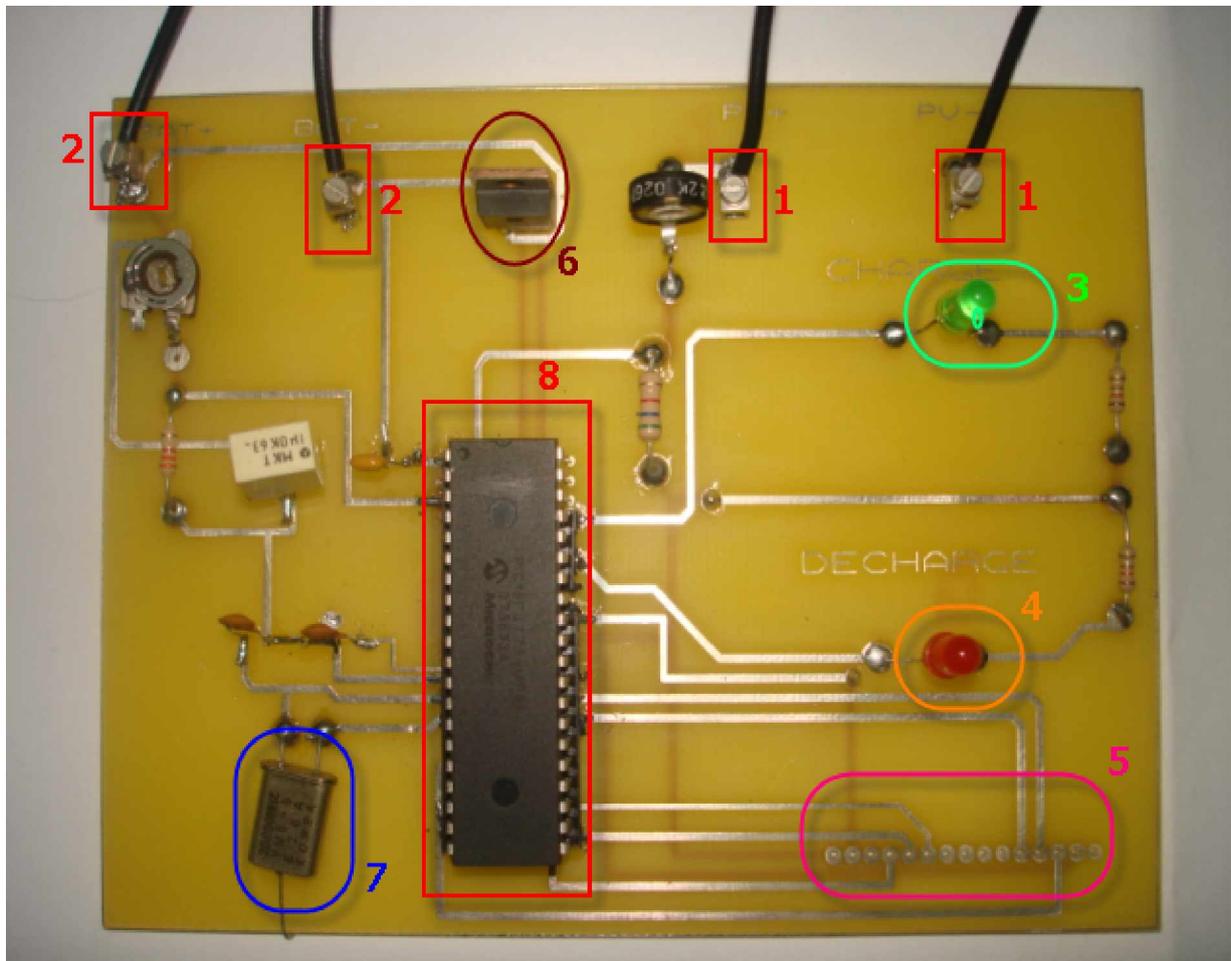


Figure 3.12 : Photo commentée du régulateur

### 3.3.4 Essais et résultats :

Afin de bien choisir le type du PIC et la compilation du programme nous avons effectué des différents essais en plus nous n'avons pas considéré que le régulateur numérique est dimensionné presque a 95% (figure3.13).

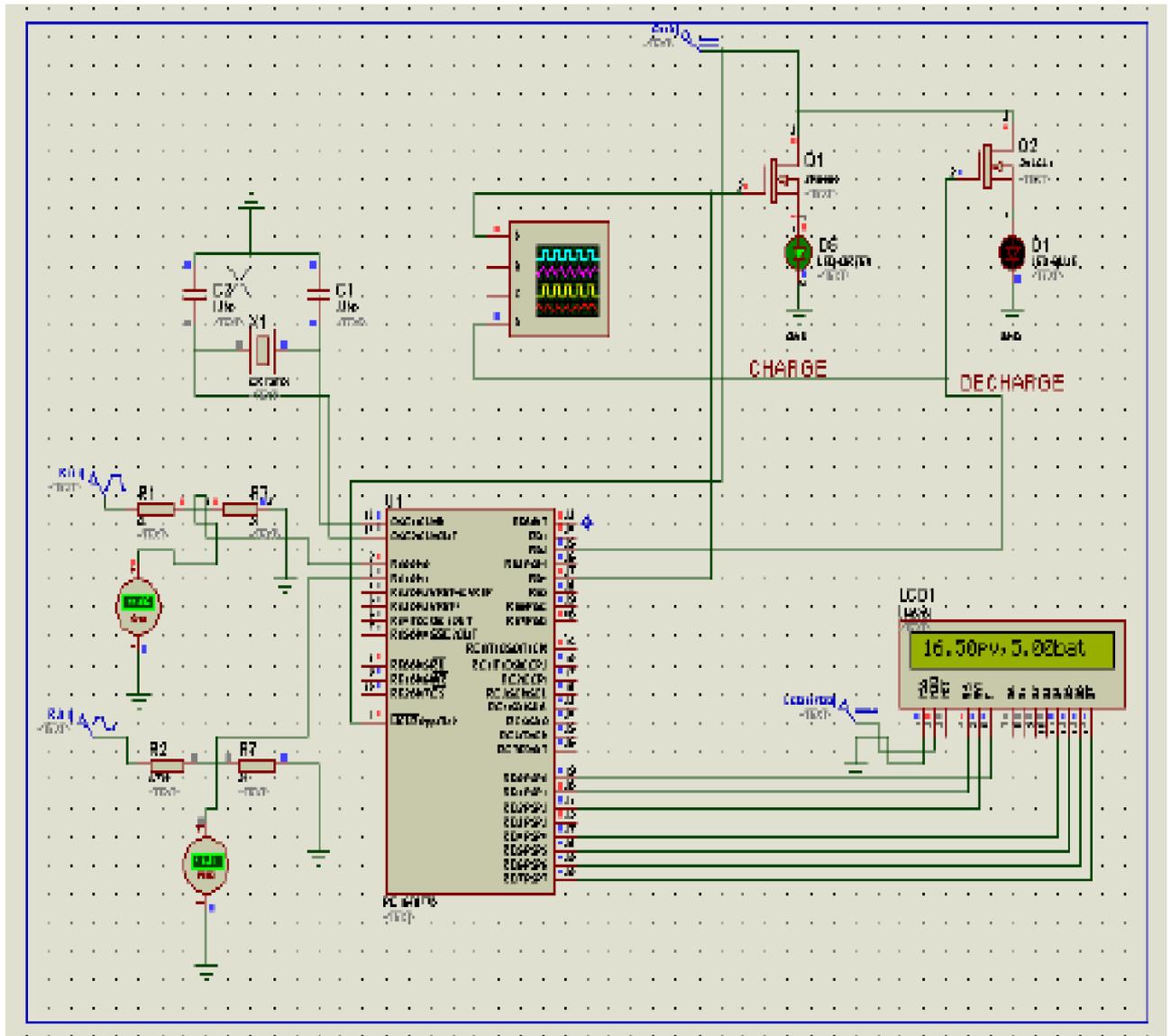


Figure3.13 : Schéma du régulateur numérique sous Proteus 7Professional

Pour que les résultats soient réellement fiables, il est nécessaire que la tension de la batterie ait des changements brutaux pour bien visualiser le comportement du régulateur numérique.

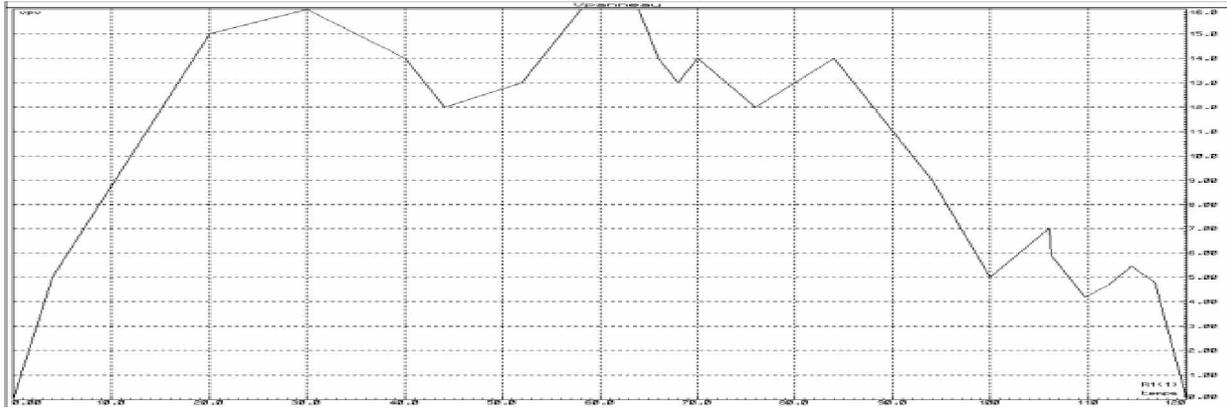


Figure 3.14: Variation de la tension du panneau solaire Vpv

Après injection de ces tensions d'entrées dans le système présenté dans la figure 3.14 et 3.15 on obtient les résultats suivants:

**-Pour la décharge :**

- Si  $v_{bat} < 11.6V \Rightarrow$  Out Décharge=0
- Si  $V_{bat} > 12.9 \Rightarrow$  Out Décharge=1
- Si  $11.6 < V_{bat} < 12.9$  il ya deux possibilités :
  - Au sens croissant  $\Rightarrow$  Out Décharge=0
  - Au sens décroissant  $\Rightarrow$  Out Décharge=1

**-Pour la charge :**

- Si  $v_{bat} > 14.2V \Rightarrow$  Out charge=0
- Si  $V_{bat} < 12.6V \Rightarrow$  Out charge=1
- Si  $12.6 < V_{bat} < 14.2$  il ya deux possibilités :
  - Au sens croissant  $\Rightarrow$  Out charge=1
  - Au sans décroissant  $\Rightarrow$  Out charge=0

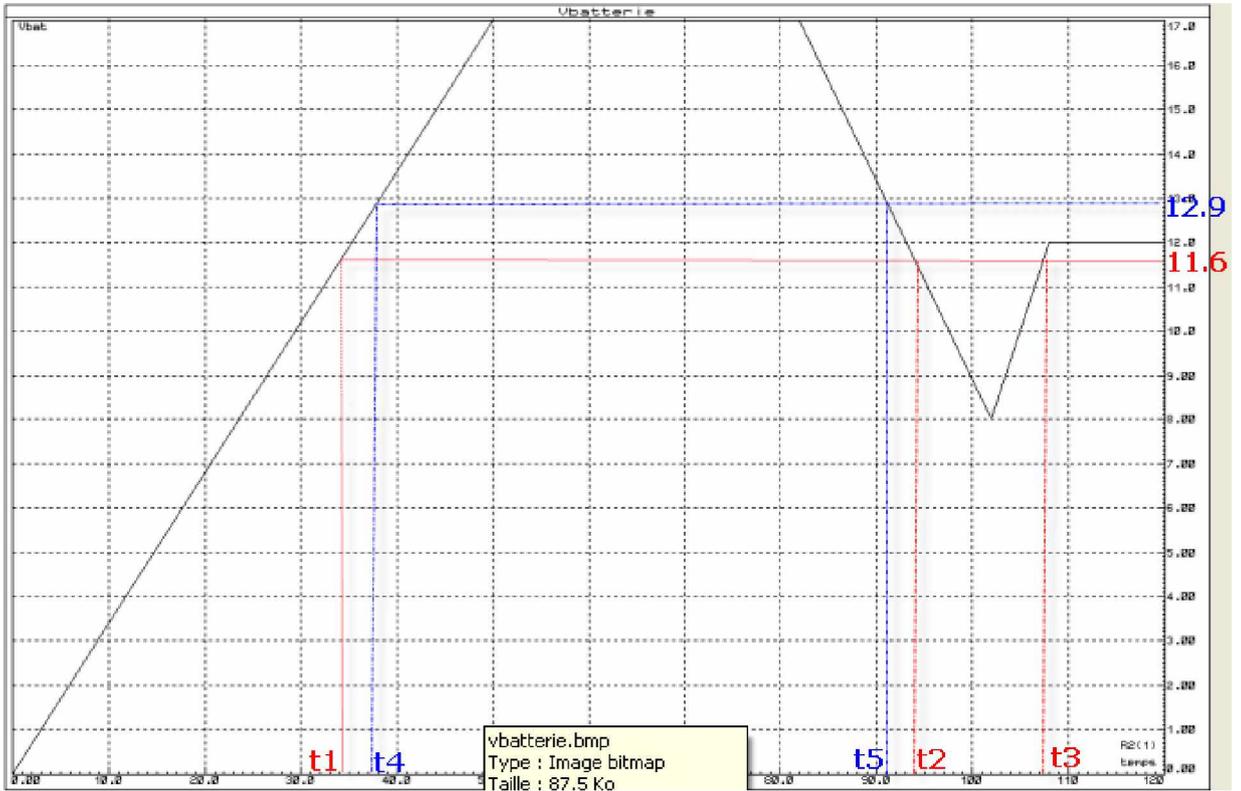


Figure3.15(a): Variation de la tension  $V_{batterie}$ .

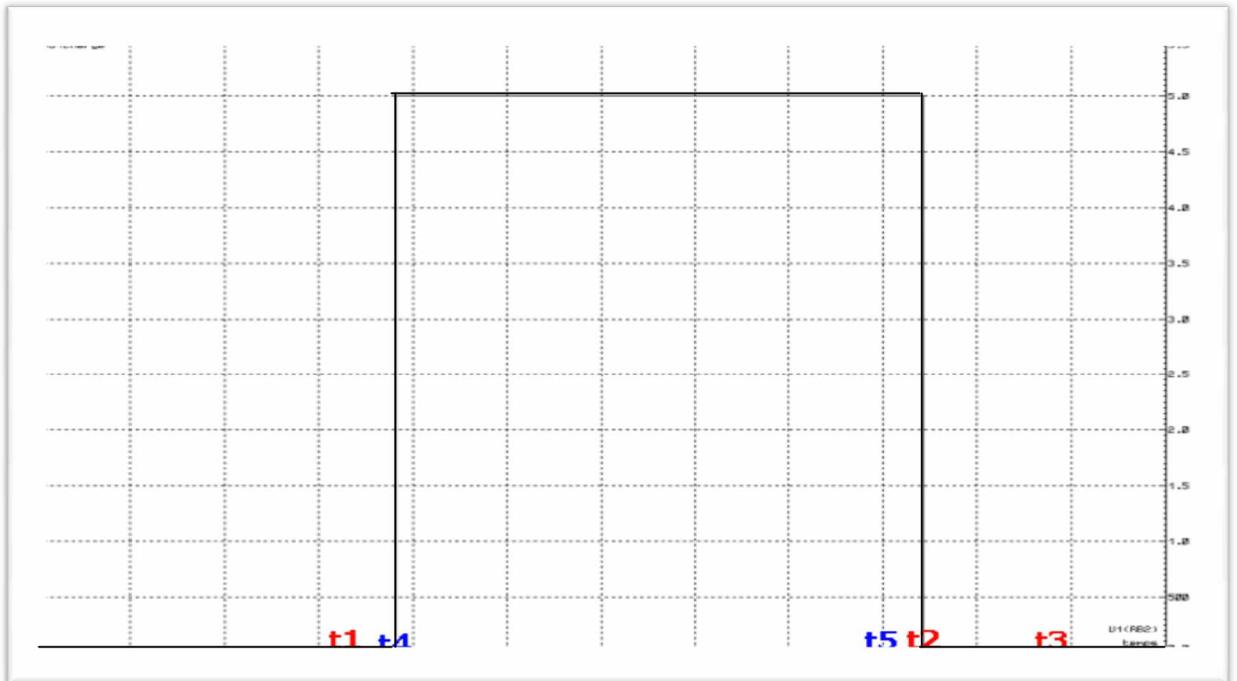


Figure3.16: Sortie décharge

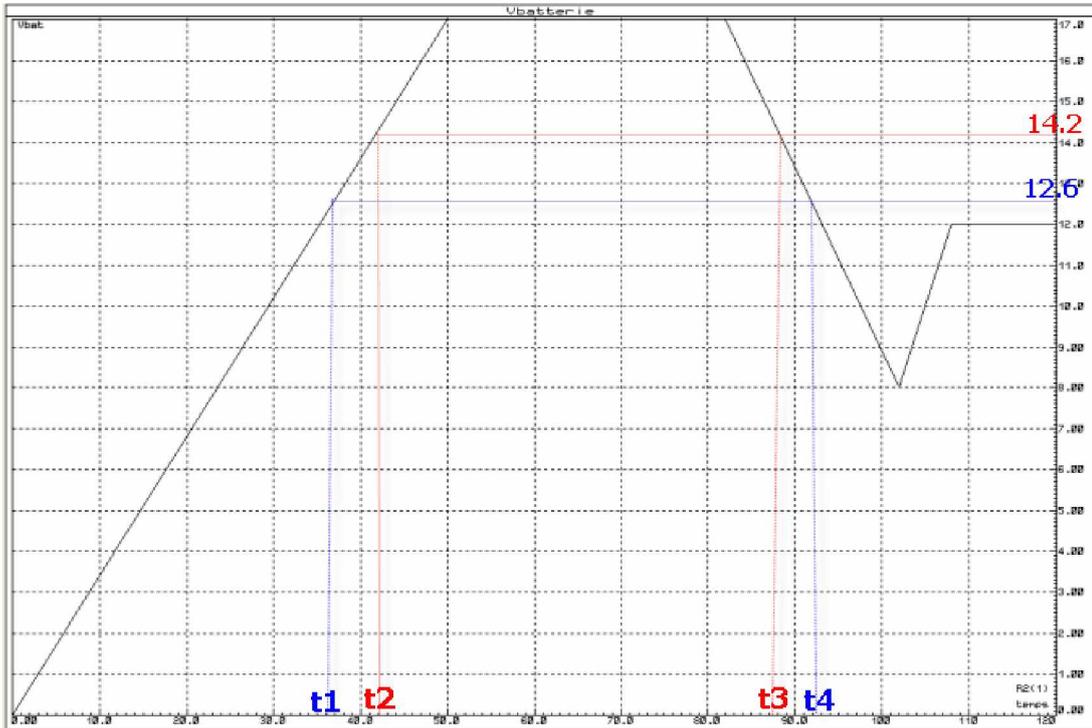


Figure3.15(b): Variation de la tension  $V_{batterie}$

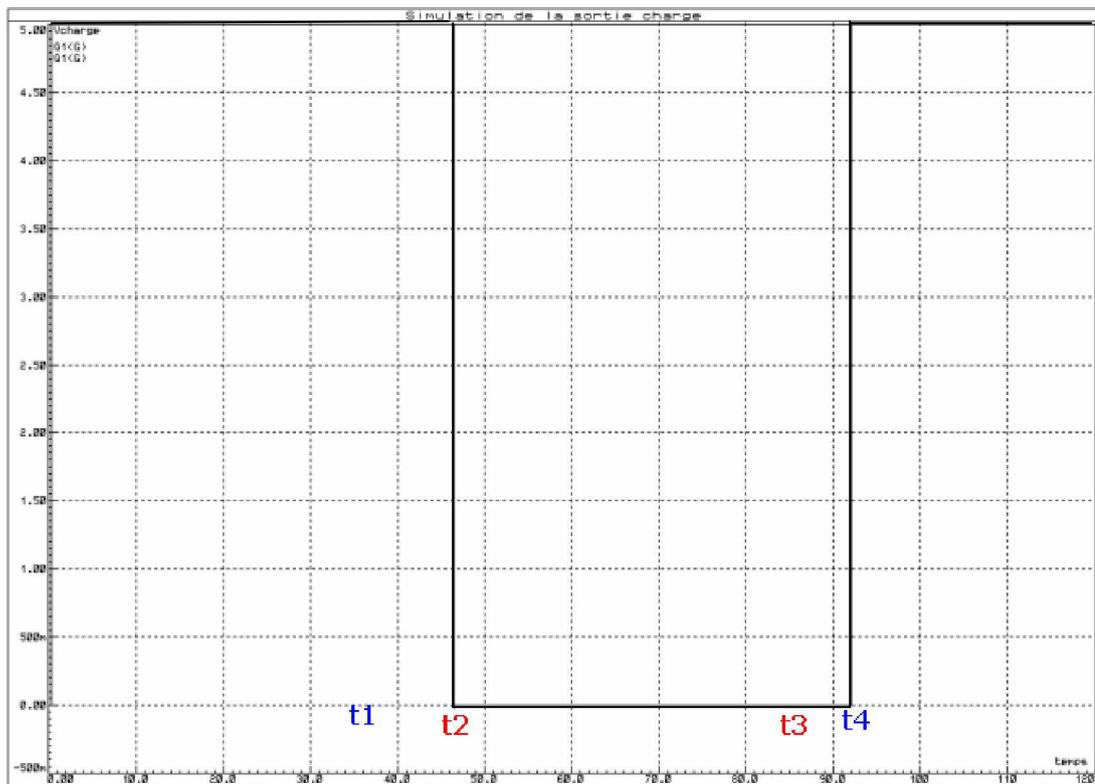


Figure3.17: Sortie charge

Temps	Vbatterie	Out décharge
[0, t1]	$V < 11.6$	0 (MOSFET=ouvert)
[t1, t4]	$11.6 < V < 12.9$ sens croissant	0 (MOSFET=ouvert)
[t4, t5]	$V > 12.9$	1 (MOSFET=fermé)
[t5, t2]	$11.6 < V < 12.9$ sens décroissant	1 (MOSFET=fermé)
[t2, t3]	$V < 11.6$	0 (MOSFET=ouvert)
[t3, fin]	$11.6 < V < 12.9$ $V = 12$ volt sens croissant	0 (MOSFET=ouvert)

**Tableau [3.3]:** Démonstration des résultats de la commande décharge.

Temps	Vbatterie	Out charge
[0, t1]	$V < 12.6$	1 (MOSFET= fermé)
[t1, t2]	$12.6 < V < 14.2$ sens croissant	1 (MOSFET=fermé)
[t2, t3]	$V > 14.2$	0 (MOSFET=ouvert)
[t3, t4]	$12.6 < V < 14.2$ sens décroissant	0 (MOSFET=ouvert)
[t4, fin]	$V < 12.6$ , $V = 12$ volt	1 (MOSFET=fermé)

**Tableau [3.4]:** Démonstration des résultats de la commande charge.

Après ces très bons résultats du fonctionnement du régulateur numérique on voit que le retard de réponse = 1s presque (le temps d'exécution de chaque boucle du programme)

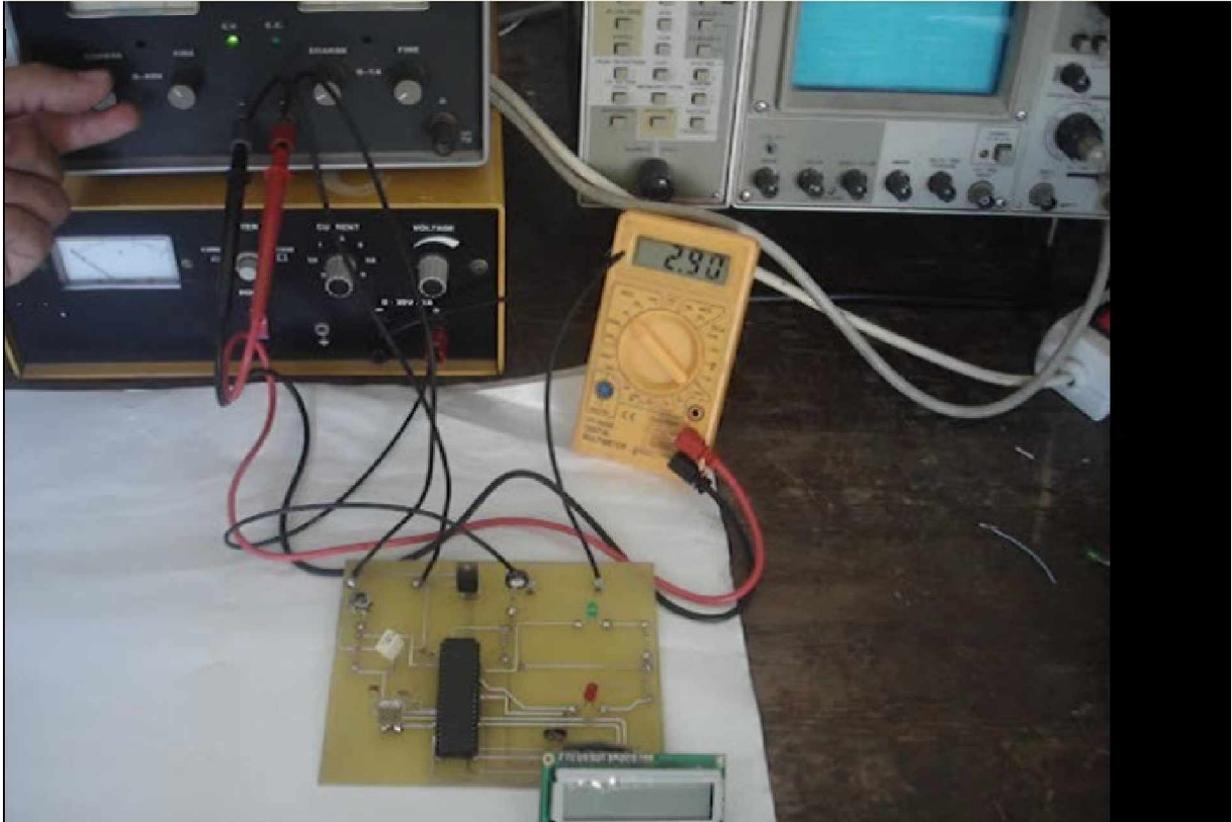
### 3.3.5 Relevés expérimentaux:

Plusieurs essais ont été réalisés, Tout d'abord un essai de test pour visualiser le bon fonctionnement du microcontrôleur et de la carte.

Par la suite nous avons simulé une variation de la tension de la batterie. Pour finir nous avons analysé le comportement du contrôleur avec une tension  $V_{BAT}(t=0) = 12V$ .

La représentation de ces relevés expérimentaux est représentée par la figure 3.18.

Finalement on a trouvé des résultats identiques à la simulation mais malheureusement on n'a pas pu faire marcher l'afficheur LCD à cause des problèmes qu'on n'a pas pu les identifier.



**Figure3.18:** Les mesures expérimentales du contrôleur numérique

### 3.3.6 Coût de la réalisation:

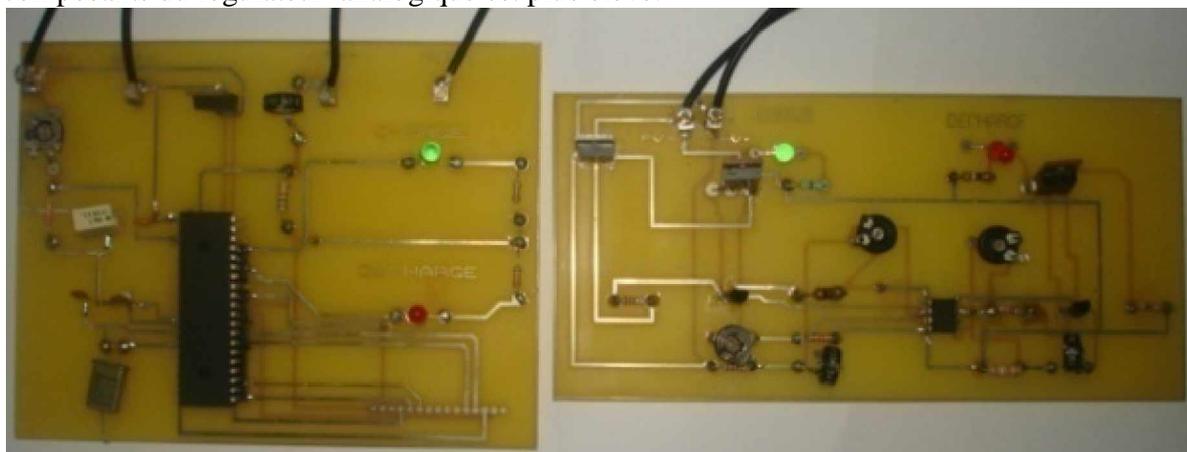
Le tableau 3.5 montre le coût de la réalisation du régulateur numérique que nous avons fait.

Quantité	référence	Prix(DA)
2	PIC16F877	900.00
1	LCD 1*16	450.00
1	LM7805	70.00
2	Potensiomètre22K	20.00
2	Résistance	3.00
4	capacité	5.00
1	Circuit imprimé	1360.00
Total : 3736.00DA		

**Tableau [3.5] :** Le Coût de la réalisation

### 3.4 Comparatif avec la carte analogique:

La figure 3.19 montre la photographie du prototype final du régulateur analogique avec le régulateur numérique. Comme nous pouvons le voir sur la figure suivante, le nombre des composants du régulateur analogique est plus élevé.



**Figure3.19** : Prototype final du régulateur analogique avec le régulateur numérique

Dans le cas d'utiliser une technologie CMS, la taille de la carte numérique était approximativement quatre fois plus petite que la version CMS de la carte analogique.

D'un autre coté, le régulateur analogique a une consommation de 400mW, de son coté le régulateur numérique a une consommation de 93 mW, ce qui, dans le cadre de notre application, est très intéressant. De plus, la commande numérique est plus souple que la commande analogique car si on veut faire des changements sur les paramètres du système ou le type de la commande il faut juste changer le programme du PIC mais pour le régulateur analogique il faut tout refaire.

### 3.5 Conclusion :

Les avantages de réaliser un régulateur numérique sont principalement :

- Ø son prix de revient faible et l'aisance d'apporter des modifications au niveau du programme (changement de la valeur du délai, du mode de calcul de la moyenne,...) et la possibilité d'intégrer plusieurs niveaux de protections au sein du système (reset, contrôle de la température des composants,...).
- Ø Le nombre de composants par rapport au régulateur analogique est moindre, le comparateur et les transistors analogique sont remplacés par le multiplicateur hardware intégré dans l'ALU du microcontrôleur PIC.
- Ø L'affichage de la tension du panneau et de la batterie présente des options en plus pour ce régulateur.
- Ø La dimension du régulateur change par rapport au régulateur analogique.
- Ø Le système est moins encombré.

Ce chapitre nous a permis de présenter le microcontrôleur utilisé et la carte électronique réalisée avec un type de commande simple mais le rendement de ce régulateur est satisfaisant. Ce circuit intégré qui comprend à la fois l'unité centrale, le programme et les organes d'entrées/sorties. Aussi nous avons détaillé les différents blocs constituant la carte à microcontrôleur que nous avons conçu et réalisé pour la régulation de la charge et décharge de la batterie d'un système photovoltaïque.

Il s'agit à présent de présenter une nouvelle commande qui porte l'amélioration de l'énergie transmise du panneau solaire à la batterie le programme informatique (commande MPPT) qui permet de piloter le même régulateur mais avec un changement dans le 1<sup>er</sup> programme. Ce travail fera l'objet des chapitres 4 et 5.



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Chapitre 4

## Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

### 4.1. Introduction :

Nous avons vu précédemment que les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'un générateur photovoltaïque montrent que la puissance maximale générée dépend de l'éclairement et de la température. De plus le générateur photovoltaïque ne peut céder son maximum d'énergie que pour une certaine tension et courant de fonctionnement. Le point de puissance maximal (PPM) est à son tour fonction de l'éclairement, de la température ainsi que de la charge. Par conséquent il faut adapter la charge en permanence pour que le générateur cède le maximum d'énergie.

### 4.2. Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV) à sa puissance maximale:

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque (GPV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Chaque charge, que ce soit en continu (DC) (batteries comme notre cas, certains appareils électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) ou bien en alternatif (AC), possède un comportement propre. De plus, souvent, la charge varie brutalement en fonction de la consommation des utilisateurs, ce qui est souvent difficile à prévoir surtout sur des petits réseaux locaux. Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un GPV et une charge purement résistive  $R_{opt}$  et une autre résistance quelconque  $R$ . Les deux points de fonctionnements sont différents. Celui qui correspond à  $R_{opt}$  permet d'extraire le maximum de puissance du générateur.

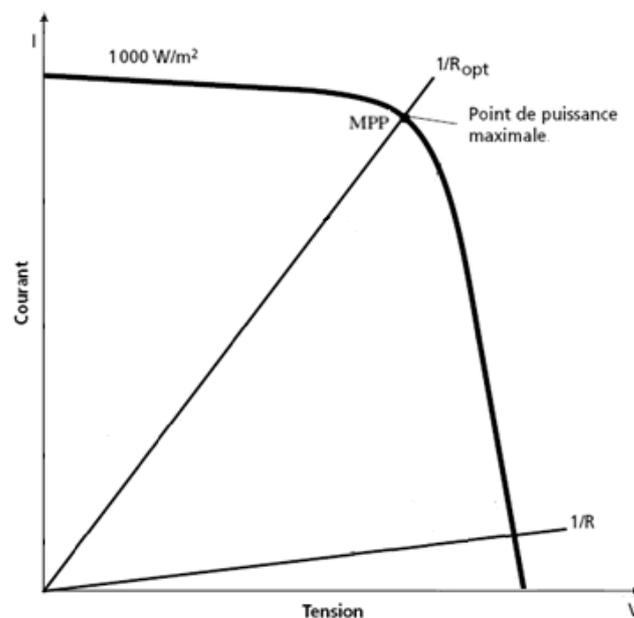


Figure 4.1 : point de fonctionnement du générateur pour différentes charges.

### 4.3. Optimisation du fonctionnement du générateur [17]:

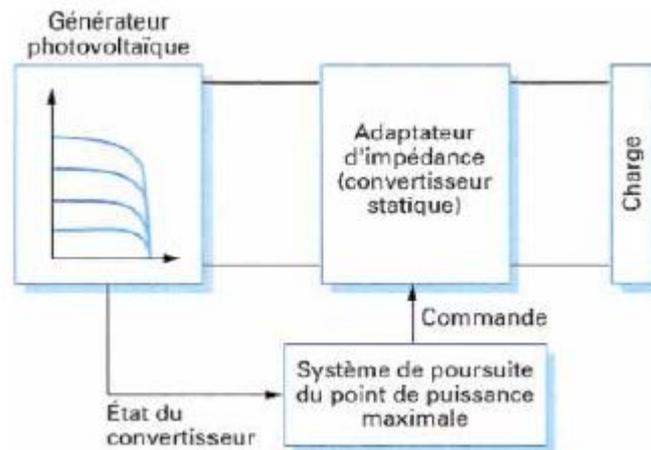
L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal d'énergie ou avec un simple mosfet pour transformer cette énergie a une batterie. La commande de ce convertisseur permettra de faire fonctionner le système en un point ou le générateur délivre le maximum de puissance.

### 4.4. Optimisation du récepteur :

Le récepteur absorbe les pertes aux près de la puissance fournie par le générateur. Le point de fonctionnement est choisi afin que la puissance utilisable soit égale à la puissance maximale fournie par le générateur. Le problème sera donc d'imposer un ou plusieurs paramètres de contrôle au récepteur.

### 4.5. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un mécanisme de control de poursuite qui est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. La figure (4.2) montre une vue générale d'un système photovoltaïque doté d'un contrôleur MPPT.



**Figure 4.2 :** Vue Générale d'un système photovoltaïque doté d'un MPPT

Le mécanisme de poursuite (MPPT) est un élément important dans tout système photovoltaïque, depuis 1968 Plusieurs commandes MPPT ont été développées et implémentées, parmi ces méthodes on trouve les méthodes à contre réaction de tension et de courant...

4.5.1. Méthode à contre réaction de tension :

Cette méthode se base sur l'asservissement de la tension du générateur à une tension de référence. En fonction de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) cette méthode comporte trois sortes.

4.5.1.1. Méthode à tension de référence fixe :

Cette méthode résulte du fait que la tension des photopiles à la puissance maximale est en première approximation constante lorsque l'éclairement varie. Par conséquent il suffit de maintenir constante la tension au borne du générateur quel que soit l'éclairement, et de faire corriger cette tension en fonction de la température.

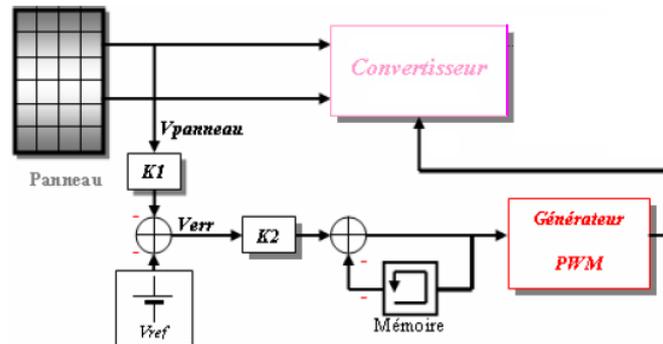


Figure 4.3 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

4.5.1.2. Méthode à tension de référence en fonction de  $V_{oc}$  :

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  ( $V_{mp} = k_1 V_{oc}$ ) du générateur (panneau). Cette tension est prélevée régulièrement par le débranchement du générateur pour une courte durée afin d'ajuster la tension de référence. Le coefficient  $k_1$  est pris dans l'intervalle [0.71-0.78].

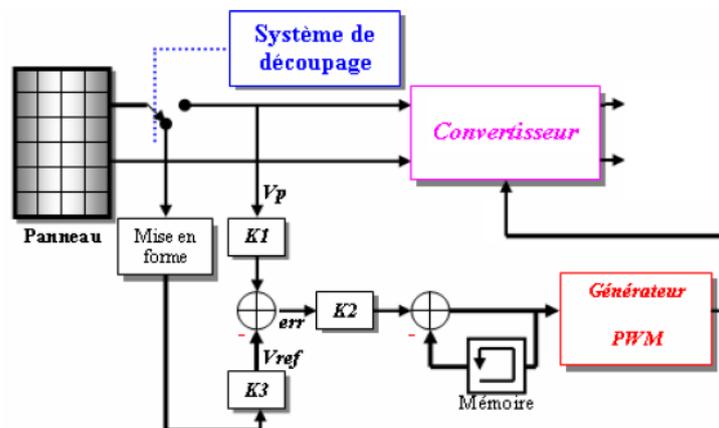


Figure 4.4 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert

### 4.5.1.3. Méthode à tension de référence externe (cellule pilote) :

Cette méthode fait appel au même principe que la précédente, dans ce cas l'estimation de la tension  $V_{oc}$  est réalisé par l'ajout d'une cellule pilote a l'ensemble de l'installation, cette cellule donne continuellement une information implicite sur la tension en circuit ouvert de l'ensemble.

De même que les autres méthodes, la tension  $V_{mp}$  est estimée à partir de la tension  $V_{oc}$ .

### 4.5.2. Méthode à contre réaction de courant :

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension, le courant de court circuit du générateur permet de savoir la valeur du courant optimale qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit ( $I_{mp} = k_2 I_{sc}$ ). Le coefficient  $k_2$  est généralement entre 0.78 et 0.92.

### 4.5.3. Méthode à contre réaction de puissance :

Ces méthodes se basent sur des algorithmes de recherche itérative qui permettent de trouver le point de fonctionnement maximal du générateur sans interruption du système. La puissance extraite du générateur est calculée à partir des mesures du courant et de la tension, la multiplication de ces deux grandeurs donne la puissance. Le sens de variation de la puissance est connu par le calcul approximatif de la dérivée  $dP = P(k) - P(k - 1)$  sur un temps d'échantillonnage.

#### 4.5.3.1. Algorithme « perturbation et observation » (P&O) :

C'est l'algorithme de poursuite le plus utilisé, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou on agit directement sur un paramètre de réglage (rapport cyclique ou fréquence) puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du générateur. Si la valeur de la puissance  $P(k)$  est supérieure à la précédente  $P(k - 1)$  alors on garde la même direction de perturbation sinon on inverse la perturbation. Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure (voir chapitre 5).

#### 4.5.3.2. Algorithme « conductance incrémental » :

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du générateur est calculée d'une autre manière. Elle est fonction de la tension et de la différence de la tension ainsi que du courant et de sa différence. Cette dérivée est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite.

Cette méthode utilise la conductance incrémentale de la source comme MPPT. Cette méthode est plus efficace que la méthode de perturbation, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. Les tensions et courants du panneau sont monitorés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement.

### 4.5.4. Méthode de poursuite analogique :

Cette méthode utilise directement la tension et le courant du générateur pour le contrôle du MPP, une image de la puissance est obtenue par la multiplication des grandeurs précédentes. Le sens de variation de la puissance est déterminé grâce à deux filtres RC de constantes de temps différentes et un comparateur de tension comme illustré sur la figure(4.5).

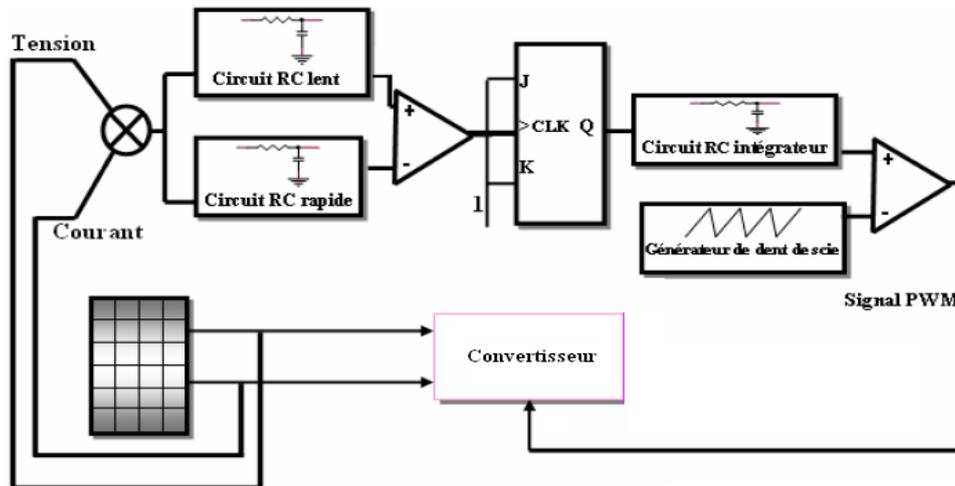


Figure 4. 5: principe de la méthode de poursuite analogique

### 4.6. Méthodes intelligentes pour la commande du MPPT :

Dans la partie précédente, les méthodes classiques et les mécanismes de poursuite de la puissance maximale les plus rencontrés dans la littérature ont été présentés. Cette partie quant à elle, décrit les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de contrôle des MPPT. Il s'agit des réseaux de neurones et de la logique floue.

#### 4.6.1. Commande MPPT par réseau de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles électroniques basés sur la structure neuronale du cerveau lesquels sont souvent utilisés pour l'optimisation de l'algorithme de MPPT. En effet les réseaux de neurones peuvent être utilisés afin de trouver la position du point maximum de puissance avec un nombre réduit d'itérations pour atteindre le MPP et une réduction des oscillations autour du MPP.

### 4.6.2. Commande MPPT par logique floue :

La logique floue est une nouvelle méthode de tracking du MPP, elle a l'avantage de travailler sur plusieurs phases de tracking. La première est rude ou le pas de recherche est important, une fois le point de fonctionnement est proche du MPP l'algorithme fonctionne dans la phase fine ou le pas de recherche est faible, ainsi l'ondulation est minime.

### 4.7. Conclusion :

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Chapitre 5

## Régulateur numérique avec une commande de charge de type MPPT

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

### 5.1 Le but d'une régulation de charge avec MPPT :

Le but d'un tel régulateur de charge est de détecter et de placer le circuit au Point de Puissance Maximal que nous pouvons observer sur le graphique suivant.

Un régulateur de charge de type MPPT est constitué de deux parties distinctes : la partie commande (ici réalisée en informatique industrielle) dont le but est de déterminer le point de fonctionnement, de la partie puissance, où les panneaux pourront transmettre la puissance la plus importante aux batteries et la partie puissance qui assure le transfert d'énergie entre les panneaux solaires et les batteries [13]

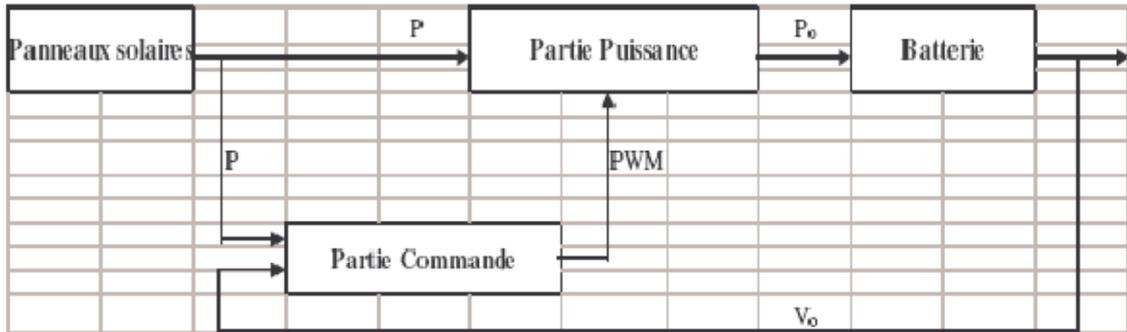


Figure 5.1 : Schéma bloc du MPPT

Nous distinguerons donc les deux parties dans cette section.

Remarque : dans la littérature, il arrive que « MPPT » désigne uniquement la partie commande qui recherche effectivement le Point de Puissance Maximum, et non l'ensemble du régulateur de charge comme c'est le cas dans notre rapport.

### 5.2 Partie puissance (Convertisseur statique) :

Entre les panneaux solaires et la batterie, nous allons placer un convertisseur statique, et c'est ce convertisseur qui sera commandé par le microcontrôleur (via un signal de commande PWM-ou MLI en français).

#### 5.2.1 Rappels Eléments de base :

##### 5.2.1.1 Signal PWM :

Un signal Pulse With Modulation (ou Modulation de la Largeur d'Impulsion en français) est un signal périodique dont on peut contrôler le rapport cyclique (noté  $\alpha$ ) et la figure 5.2 représente ce signal [13].

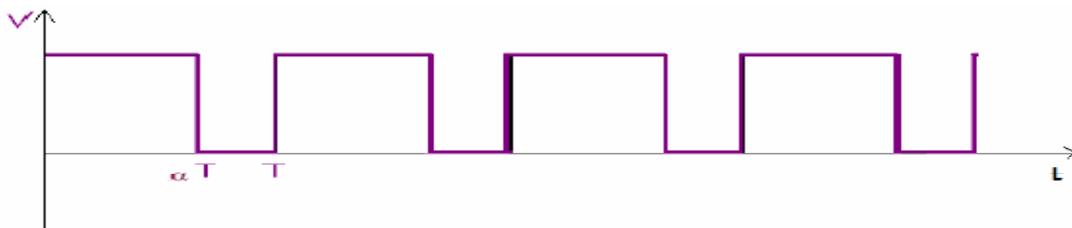
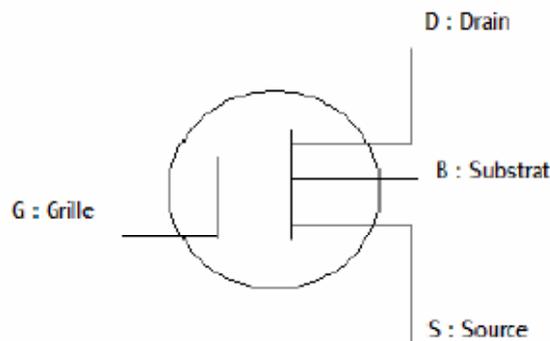


Figure 5.2 : Signal PWM

Petit rappel : un convertisseur statique est un montage permettant par une commande pertinente d'un ou plusieurs interrupteurs à semi conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur [M].

Il existe de nombreuses sortes d'interrupteurs à semi conducteur, nous utiliserons un transistor MOSFET.

### 5.2.1.2 MOSFET [I],[J]



**Figure 5.3** : Schéma du MOSFET

Le MOSFET est un transistor à effet de champ. Seulement, à la différence des JFET (transistors effets de champ à jonction ), un MOSFET est un transistor à semi-conducteur en métal oxyde (la grille isolée du canal par une couche de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ )).

Il existe 2 grands types de MOSFET : ceux à enrichissement (les « normally OFF ») et ceux à appauvrissement (les « normally ON »). Dans tous les cas, ces transistors sont commandés par la tension appliquée entre la grille et la source ( $V_{GS}$ ). Pour un MOSFET à enrichissement, lorsque la différence entre les 2 potentiels G et S augmente, le transistor est de plus en plus passant jusqu'à l'être tout à fait quand  $V_{GS} > V_{TH}$ . Respectivement pour un MOSFET à appauvrissement, lorsque  $|V_{GS}|$  augmente le transistor devient de moins en moins passant, jusqu'à ne plus l'être au delà de la tension de seuil  $V_{TH}$ . Les 2 types de MOSFET peuvent chacun être à canal N (le courant provient du déplacement d'électrons) ou P (le courant provient du déplacement de trous). Cela impliquera simplement pour l'utilisateur que la tension « de commande » appliquée entre la grille et la source est négative ou positive.

### 5.2.1.3 Les différents types de convertisseurs statiques :

Usuellement, au sein d'un MPPT, deux types de convertisseurs statiques sont utilisés :

- des convertisseurs de type « Boost » : la tension en sortie (aux bornes de la batterie) est plus importante que celle en entrée (aux bornes du panneau solaire)
- des convertisseurs de type « Buck » : la tension en sortie est alors plus faible que celle en entrée.

Il est aussi possible de concevoir des convertisseurs « Boost Buck » qui se comportent comme l'un ou l'autre suivant les besoins.

### 5.2.2 Fonctionnement d'un convertisseur « Boost » [15] :

Commençons par introduire les notations correspondantes aux calculs qui vont suivre :

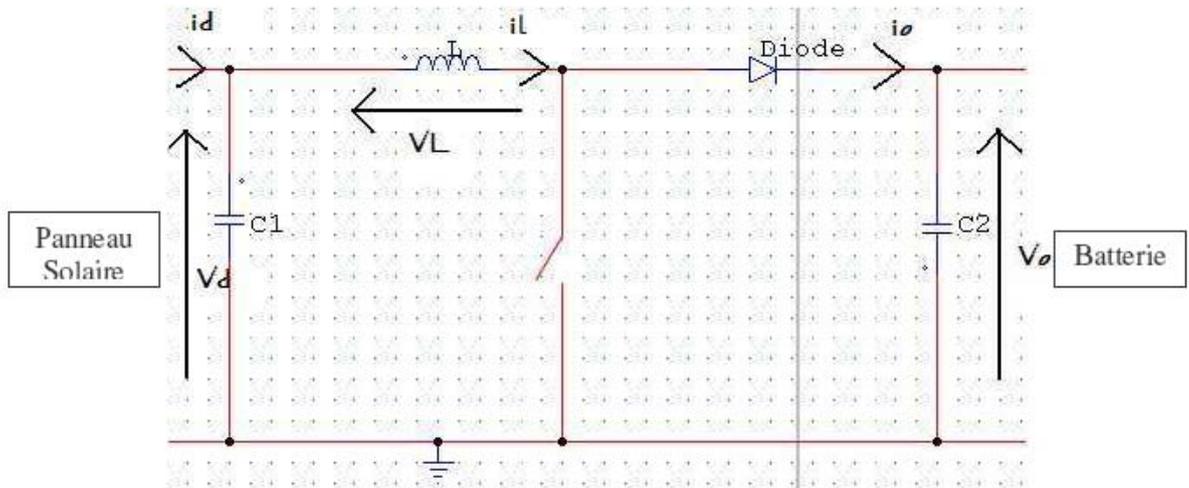


Figure 5.4: Schéma de principe d'un convertisseur boost

#### 5.2.2.1 Les différents schémas équivalents [15] :

❖ 1er intervalle de temps : interrupteur fermé :

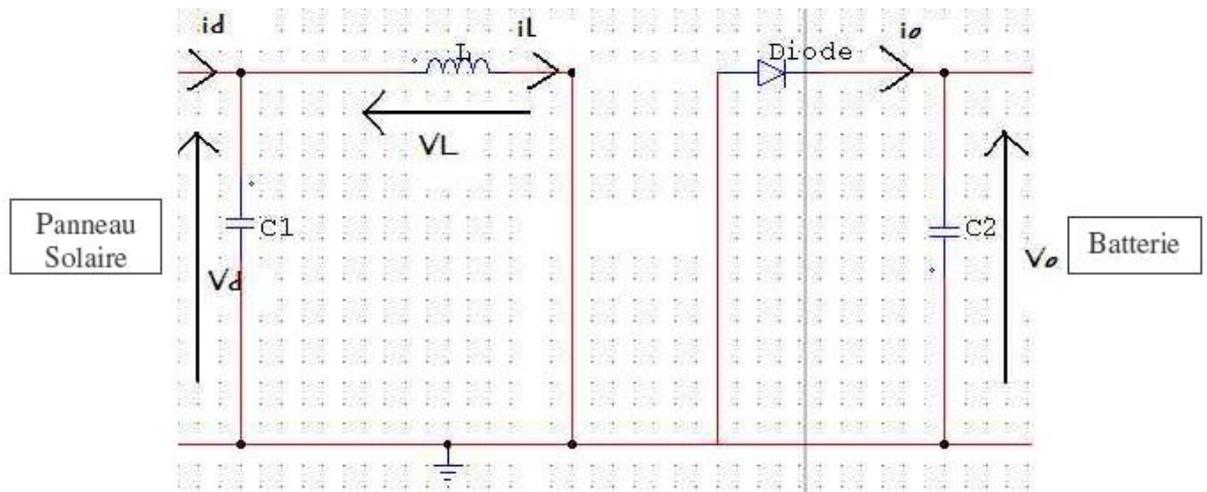
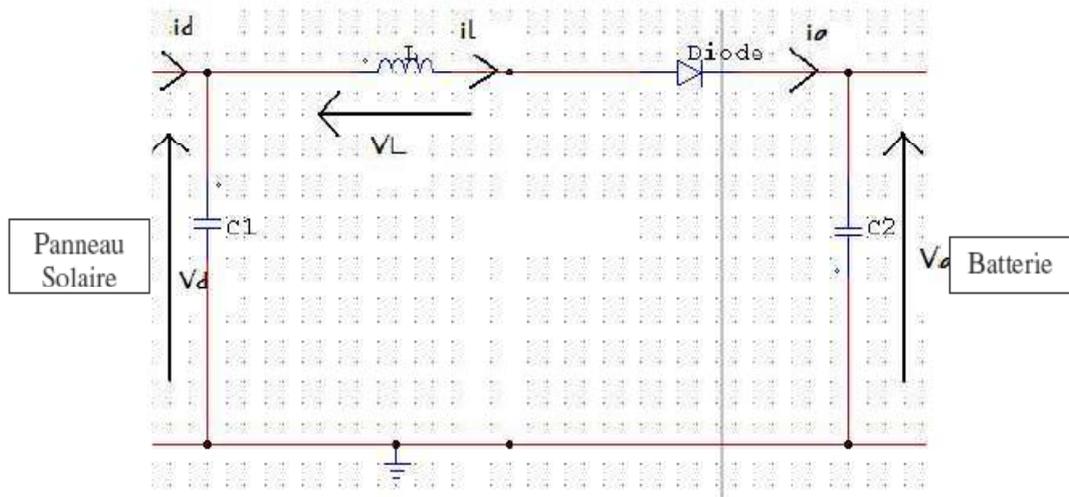


Figure 5.5 : Schéma équivalent interrupteur fermé

Pendant l'intervalle de temps  $t_{fermé} = \alpha * T$ , l'interrupteur fermé connecte l'entrée (à travers l'inductance) à la masse, et donc la puissance stockée dans la bobine augmente (par l'augmentation du courant la traversant). La diode est alors bloquée, ainsi aucun courant ne peut charger la batterie

❖ 2ème intervalle de temps : interrupteur ouvert :



**Figure5.6 :** Schéma équivalent interrupteur ouvert

Lorsque l'interrupteur est ouvert sur l'intervalle  $t_{ouvert} = (1-\alpha) * T$ , l'étage de sortie reçoit l'énergie emmagasinée dans la bobine ainsi que celle provenant directement de l'entrée (du panneau solaire). En régime établi, le condensateur de sortie est supposé avoir une capacité suffisante pour assurer une tension de sortie constante  $V_o$  (et donc le courant traversant le condensateur de sortie est supposé nul).

Mentionnons à présent que deux modes de fonctionnement différents peuvent exister : ce sont les modes continu et discontinu.

### 5.2.2.2 Les trois différents modes de fonctionnement [15]

➤ Mode continu :

En régime établi, ce mode se caractérise par le fait d'avoir en permanence  $i_L(t) > 0$ .

Lorsque l'interrupteur est fermé nous avons :

$$v_L = V_d \quad (\text{ch.1})$$

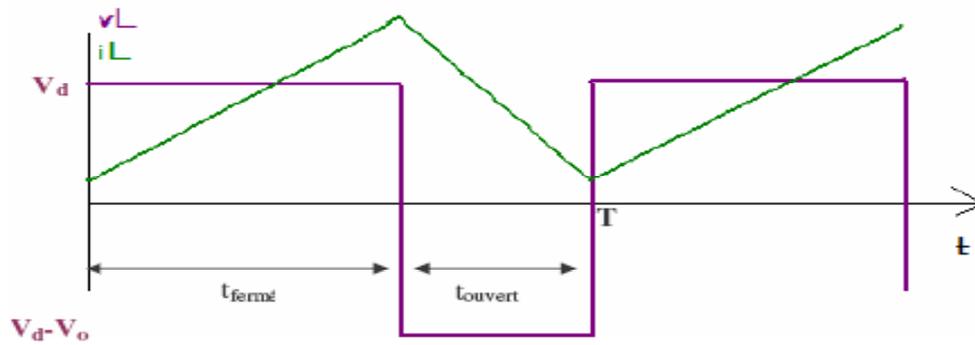
Tandis qu'interrupteur ouvert, la loi des mailles fournit :

$$v_L = V_d - V_o \quad (\text{ch.2})$$

Etant donné la loi aux bornes de la bobine (supposée parfaite), on a :

$$v_L = L * \frac{di_L}{dt} (*)$$

Nous obtenons donc le tracé suivant :



**Figure5.7** : Mode continu

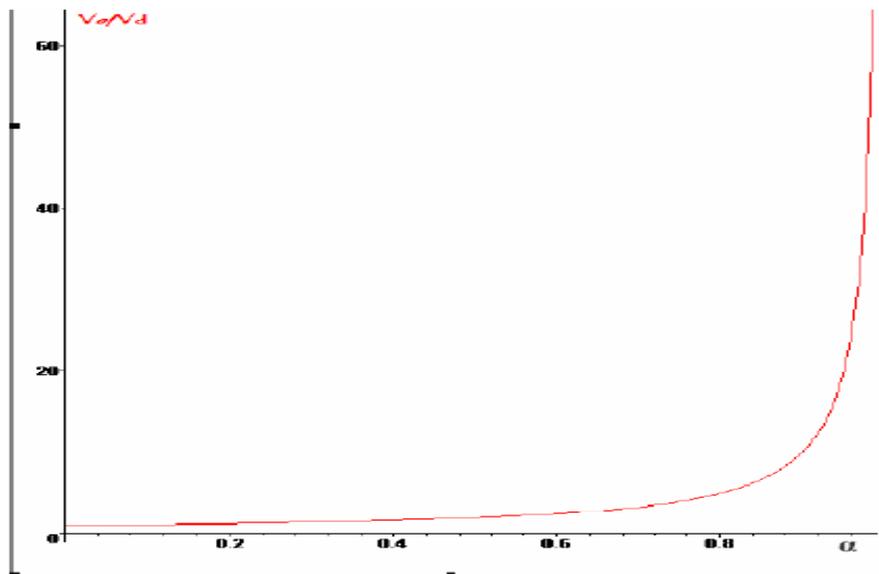
En régime établi, la valeur moyenne du courant traversant la bobine reste constante. Ainsi, l'intégrale de la tension  $v_L$  sur une période est nulle (d'après (\*)).

Ce qui s'écrit :

$$V_d * t_{fermé} + (V_d - V_o) * t_{ouvert} = 0 \quad \text{(ch.3)}$$

Après calcul, sachant que  $t_{fermé} = \alpha * T$  et  $t_{ouvert} = (1 - \alpha) * T$ , on obtient :

$$\frac{V_o}{V_D} = 1 / (1 - \alpha) \quad \text{(ch.4)}$$



**Figure5.8** : Evolution théorique du gain en tension en fonction du rapport cyclique en mode continu

En réalité, lorsque  $\alpha$  tend vers 1,  $(V_o / V_d)$  arrête assez rapidement d'augmenter, car l'interrupteur fonctionne souvent mal pour de grandes valeurs de  $\alpha$ .

Ce graphique est capital, en effet, nous supposons plus tard que notre MPPT travaillera toujours en mode continu, et les variations de la tension aux bornes du panneau  $V_d$  seront imposées par des variations de  $\alpha$  (avec  $V_o$  constant). Nous observons donc que faire varier  $\alpha$  dans un sens produit la variation inverse de  $V_d$ .

En supposant les pertes de puissance négligeables, nous obtenons :

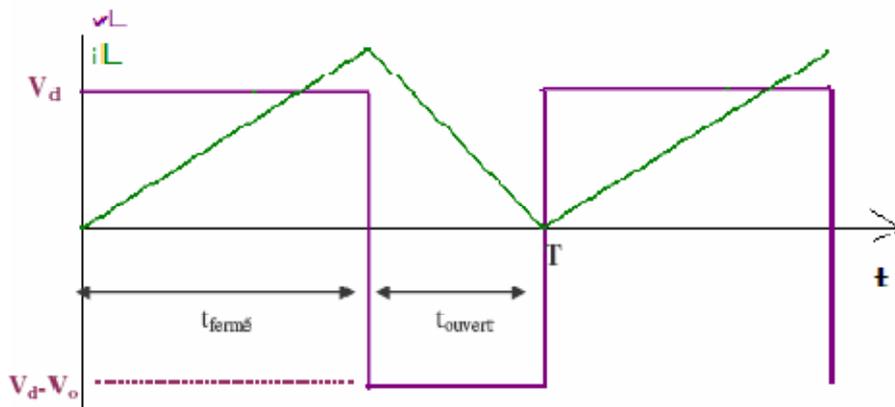
$$V_d * I_d = V_o * I_o \text{ (ch.5)}$$

D'où, d'après (ch.4) :

$$I_o / I_d = 1 - \alpha \text{ (ch.6)}$$

➤ A la frontière entre le mode continu et le mode discontinu :

Dans ce mode, ou plus précisément cette frontière entre les 2 modes, le courant traversant l'inductance part de, et revient à, 0 sur une période  $T$  (cf. figure suivante).



**Figure5.9** : Frontière continu-discontinu

Dans cette situation, le courant moyen à la frontière parcourant la bobine vérifie :

$$I_{LF} = I_{Lmax} / 2 \text{ (f.1)}$$

Donc :

$$I_{LF} = V_d * t_{fermé} / (2 * L) \text{ (f.2)}$$

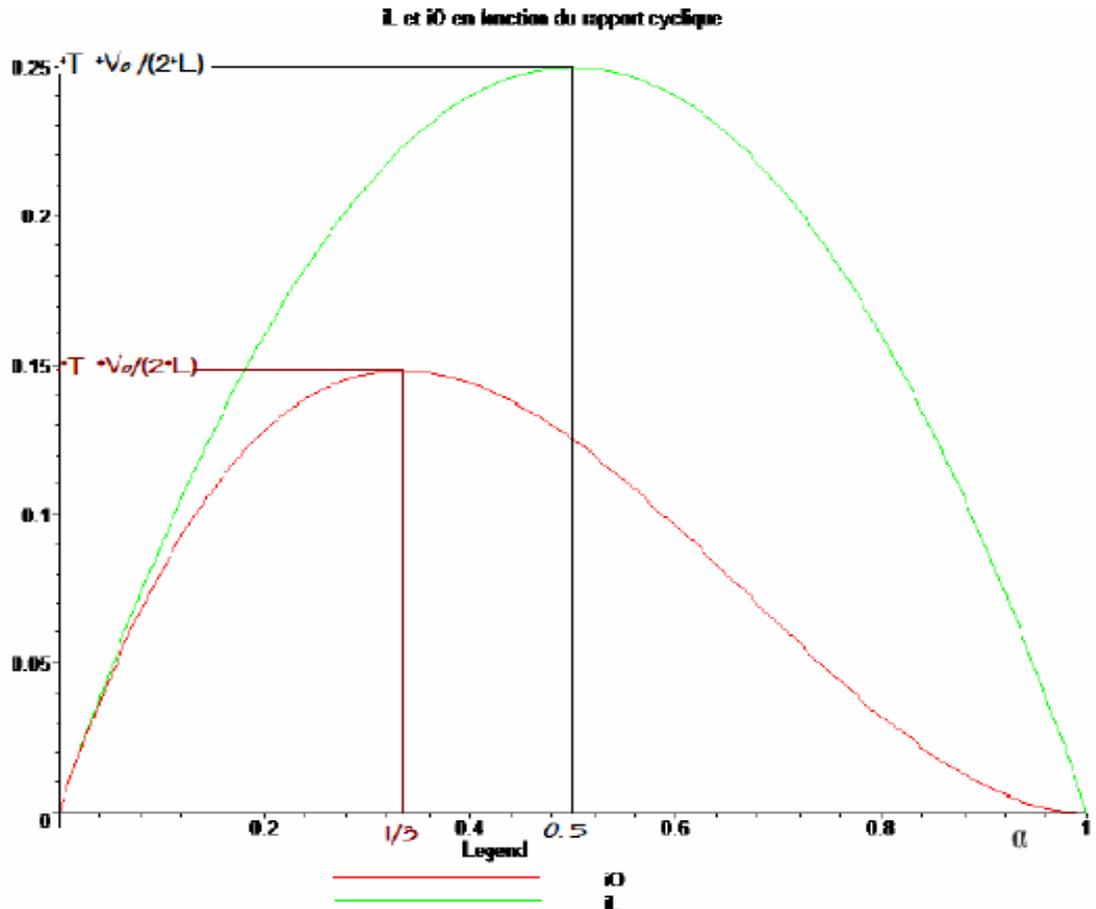
Puis :

$$I_{LF} = V_o * (1 - \alpha) * \alpha * T / (2 * L) \text{ (f.3)}$$

A l'état permanent le courant moyen parcourant le condensateur de sortie est nul, donc  $i_d = i_L$ . Alors en utilisant (ch.3) et (ch.6), on obtient :

$$I_{OF} = V_o * (1 - \alpha)^2 * \alpha * T / (2 * L) \text{ (f.4)}$$

En considérant  $V_o$  constant (il s'agit de la tension aux bornes de la batterie), il est alors possible de tracer l'évolution du courant de sortie dans le cas frontière en fonction du rapport cyclique.



**Figure5.10** : Courant en sortie et à travers de la bobine à la frontière ( $V_o$  constant)

Cette figure illustre que pour un rapport cyclique  $\alpha$  donné, à  $V_o$  constant, si le courant moyen de sortie descend en dessous de  $I_o$  tracé (ou si le courant moyen dans la bobine passe en dessous du  $i_L$  tracé), alors le convertisseur passera en mode discontinu.

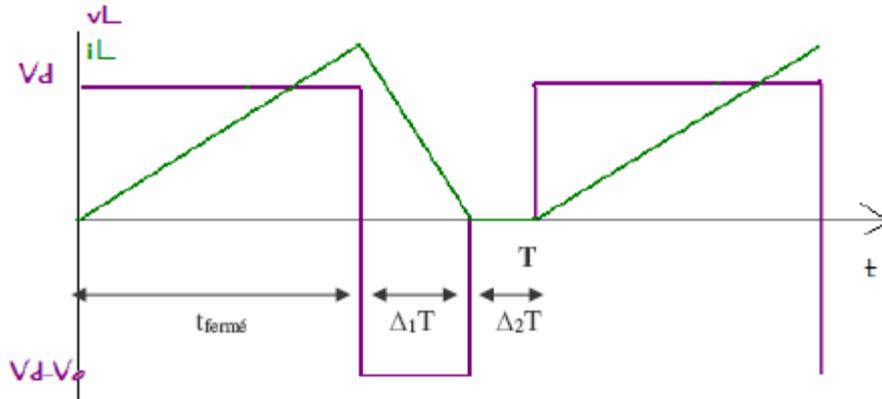
Ce tracé est important dans le sens où il donne, le courant limite pour être en mode continu, qui est le mode dans lequel on espère se placer pendant le fonctionnement de notre MPPT.

Le calcul exact nous donne (après calcul de la dérivée de (f.4)) :

$$I_{OmaxF} = (4 \cdot T \cdot V_o) / (47 \cdot L) \quad (f.5)$$

➤ Mode discontinu :

En discontinu (figure 5.11), le courant part également de 0, mais s'annule avant  $t = T$ .



**Figure5.11 : Mode discontinu**

Pour mener les explications du mode discontinu nous supposons que la tension aux bornes du panneau  $V_d$  et le rapport cyclique  $\alpha$  sont constants (bien que ce ne soit pas forcément le cas en pratique).

De même qu'en mode continu, l'intégrale de la tension aux bornes de la bobine est nulle sur une période, ce qui nous donne :

$$V_d * t_{\text{fermé}} + (V_d - V_o) * \Delta_1 * T = 0 \quad (\text{d.1})$$

Donc :

$$V_o/V_d = (\Delta_1 + \alpha) / \Delta_1 \quad (\text{d.2})$$

Circuit 100% efficace (même équation que (c.5))

$$\Rightarrow I_o / I_d = \alpha / (\alpha + \alpha_1) \quad (\text{d.3})$$

A partir de la figure précédente, on obtient (calcul de la valeur moyenne de  $i_L$ , aussi valeur moyenne du courant en sorti en régime établi) :

$$I = \frac{i_{L\text{max}} \int_0^{\alpha T} t dt}{\alpha T} + \frac{i_{L\text{max}} \int_{\alpha T}^{(\alpha + \Delta_1)T} \left( \frac{t}{T} + \alpha + \Delta_1 \right) dt}{T \Delta_1}$$

Après calcul, on obtient :

$$I_d = 1/2 i_{L\text{max}} (\alpha + \Delta_1) \quad (\text{d.4})$$

De plus, à l'aide de la figure 5.14 et (\*), on obtient :

$$i_{L\text{max}} * L / (\alpha * T) = V_d \quad (\text{d.5})$$

Puis (d.5) et (d.4) donnent :

$$I_d = V_d * \alpha * T * (\alpha + \Delta_1) / (2 * L) \quad (d.6)$$

D'où (d.3):

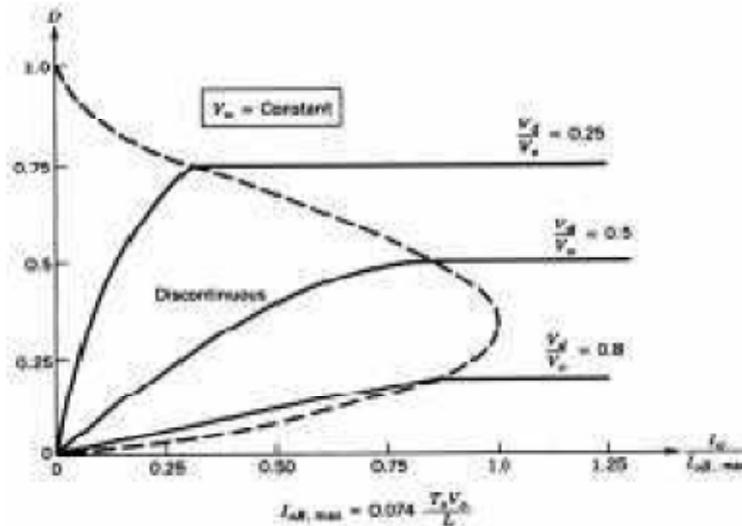
$$I_o = V_d * \alpha * T * \alpha_1 / (2 * L) \quad (d.7)$$

En pratique, grâce à la partie commande du MPPT,  $\alpha$  varie en fonction des variations de la tension en sortie des panneaux solaires  $V_d$ , tandis que  $V_o$  est maintenue constante. Il apparaît donc utile de tracer le rapport cyclique  $\alpha$  comme une fonction du courant chargeant la batterie pour différentes valeurs de gain de tension  $V_o / V_d$ .

A l'aide des équations (f.5), (d.3) et (d.7), on obtient :

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{4 * V_o * I_o}{47 * I_{OmaxF} * V_d}\right) * (V_o / V_d - 1)} \quad (d.8)$$

Bien entendu, cette loi n'est valable que lorsque l'on est en mode discontinu, en mode continu, en tenant compte de l'hypothèse de cette partie ( $V_d$  constant), le rapport  $V_d/V_o$  est constant ! Nous pouvons observer cela sur le graphe suivant qui représente l'évolution de  $\alpha$  en fonction du rapport  $I_o/I_{OmaxF}$ , pour différentes valeurs du gain de tension au travers le convertisseur statique (i.e. pour différentes valeurs de  $V_d/V_o$ ).



**Figure5.12** : Evolution du rapport cyclique pour différents rapports  $V_d/V_o$

### 5.2.2.3 Variations [11] :

Tandis que les variations de tension aux bornes de la batterie seront à priori assez faibles (i.e.  $\Delta V_o$  de l'ordre de 1 à 2%), l'amplitude des oscillations du courant  $i_L$  peuvent atteindre 20% de la valeur moyenne. Ces variations sont importantes à connaître, car elles sont directement liées à la valeur de l'inductance  $L$ . De plus, dans le cas où les variations deviendraient trop importantes, il faudrait augmenter la taille du MOSFET afin qu'il supporte les forts courants. Un tel changement coûterait plus cher, et causerait une augmentation de la masse.

- Variations du courant traversant la bobine  $i_L$  :

Interrupteur ouvert :

$$di_L / dt = V_d / L \quad (o.1)$$

Interrupteur fermé :

$$di_L / dt = (V_d - V_o) / L \quad (o.2)$$

Ainsi, l'intensité crête à crête s'exprime par :

$$I_{Lcc} = 2 * \Delta_1 i_L = V_d * \alpha * T / L \quad (o.3)$$

Nous pouvons donc exprimer L en fonction de l'amplitude des variations de  $i_L$  :

$$L = V_d * \alpha * T / (2 * \Delta_1 i_L) \quad (o.4)$$

- Variations de la tension de sortie  $V_o$  :

La tension de sortie est la tension aux bornes du condensateur de sortie de capacité C. Pour faire ce calcul, on suppose que toute l'intensité qui traverse la diode  $i_D$  circule à travers le condensateur de sortie, on obtient ainsi :

$$\Delta V_o = \Delta Q / C = I_o * \alpha * T / C \quad (o.5)$$

A partir de l'équation (o.5), on remarque bien que pour une importante capacité du condensateur de sortie, on peut minimiser les variations de  $V_o$ .

### 5.2.3 Puissance consommée par le convertisseur Boost [15] :

Les éléments qui causent une perte de puissance au sein du convertisseur sont la diode, la bobine, le MOSFET, et les changements de position du MOSFET.

#### 5.2.3.1 Diode :

Dans le datasheet(annexe2) de la diode Schottky utilisée dans le circuit, il est dit d'évaluer les pertes à l'aide du calcul suivant :

$$P_{diode} = 0,42 * I_{moy} + 0,022 * I_{RMS}^2 \quad (p.1)$$

#### 5.1.3.2 Bobine :

On sait qu'au travers la bobine, la puissance dissipée peut être calculée à l'aide de :

$$P_L = I_L^2 * R_L \quad (p.2)$$

où  $R_L$  est la résistance équivalente de la bobine

### 5.2.3.3 MOSFET

Pour le MOSFET lorsqu'il est passant :

$$P_{\text{MOSFET}} = I_L^2 * R_{\text{DS}} * \alpha \quad (\text{p.3})$$

où RDS est la résistance drain source du MOSFET

Bilan : lorsque le convertisseur statique conduit, les pertes de puissance qui y sont associées sont données par (d'après (p.1), (p.2) et (p.3)) :

$$P_{\text{conduction}} = P_{\text{diode}} + P_L + P_{\text{MOSFET}} \quad (\text{p.4})$$

Le MOSFET est aussi une cause de pertes à chaque changement d'état. Il y a quatre états pour un MOSFET (turn on, passant, turn off et bloquant). La puissance dissipée ainsi s'exprime ;

$$P_{\text{turn\_on}} = I_{\text{dso}} * V_{\text{dd}} * t_{\text{d}} * f + f * I_{\text{ds}} * t_{\text{r}} * [V_{\text{dd}}/2 + (V_{\text{ds,sat}} - V_{\text{dd}}) / 3] \quad (\text{p.5})$$

où f est la fréquence d'alternance on/off

Vdd est la tension du drain

td le retard au turn on

Ids le courant « leakage » drain-source

tr temps de montée

Vds,sat tension de saturation drain-source

$$P_{\text{turn\_off}} = I_{\text{ds}} * V_{\text{ds,sat}} * t_{\text{s}} * f + f * I_{\text{ds}} * t_{\text{f}} * V_{\text{dd}} / 6 \quad (\text{p.6})$$

où ts est le temps de stockage

$$P_{\text{passant}} = I_{\text{ds}} * V_{\text{ds,sat}} * t_{\text{c}} * f \quad (\text{p.7})$$

Où tc = α / f - td - tr est le temps où le MOSFET est passant

$$P_{\text{bloquant}} = V_{\text{dd}} * t_{\text{o}} * f * I_{\text{dso}} \quad (\text{p.8})$$

où to est le temps où le MOSFET est bloqué

Bilan : lorsque le MOSFET commute, les pertes de puissance qui y sont associées sont données par (d'après (p.5), (p.6), (p.7) et (p.8)) :

$$P_{\text{commutation}} = P_{\text{turn\_on}} + P_{\text{turn\_off}} + P_{\text{passant}} + P_{\text{bloquant}} \quad (\text{p.9})$$

### 5.2.4 Détermination des composants de la carte puissance :

Après avoir défini le type de circuit que nous allons réaliser (un circuit de type «Boost» en ce qui nous concerne), avant de faire simuler ce convertisseur, il fallait

déterminer les composants que nous allons utiliser, afin de prévoir les tensions, courants, etc... mis en jeu.

De plus, suivant les types ou même marques des composants, les branchements pouvaient différer. Dans cette partie, nous développerons uniquement les calculs des valeurs des composants. En ce qui concerne le choix précis de ces composants, nous nous sommes faits aidés par les forums des énergies renouvelables. Pour plus de renseignements, reportez-vous en annexe2, tous les datasheets des composants utilisés sont fournis.

Déterminer les caractéristiques de la carte de puissance est une étape critique dans la construction du MPPT. Certes, tout composant inadapté peut logiquement empêcher un fonctionnement optimal de cette carte de puissance, mais surtout risque-t-il d'occasionner des pertes bien plus importantes que les économies réalisées (en effet toute l'énergie finalement stockée dans la batterie traverse le MPPT, qui constitue l'interface panneaux solaires /batterie sans s'oublié la partie batterie /utilisation).

Dans tous les calculs qui vont suivre, le cas extrême sera envisagé. Nous supposons que le convertisseur est toujours efficace à 100% (comme nous l'avons fait dans l'étude théorique préliminaire).

$$P_{in} = P_{out}$$

Donc :

$$V_d * I_d = V_o * I_o$$

Le schéma final dont nous allons chercher les composants est le suivant, (nous justifierons la présence de ces composants ainsi que leur choix dans la suite) :

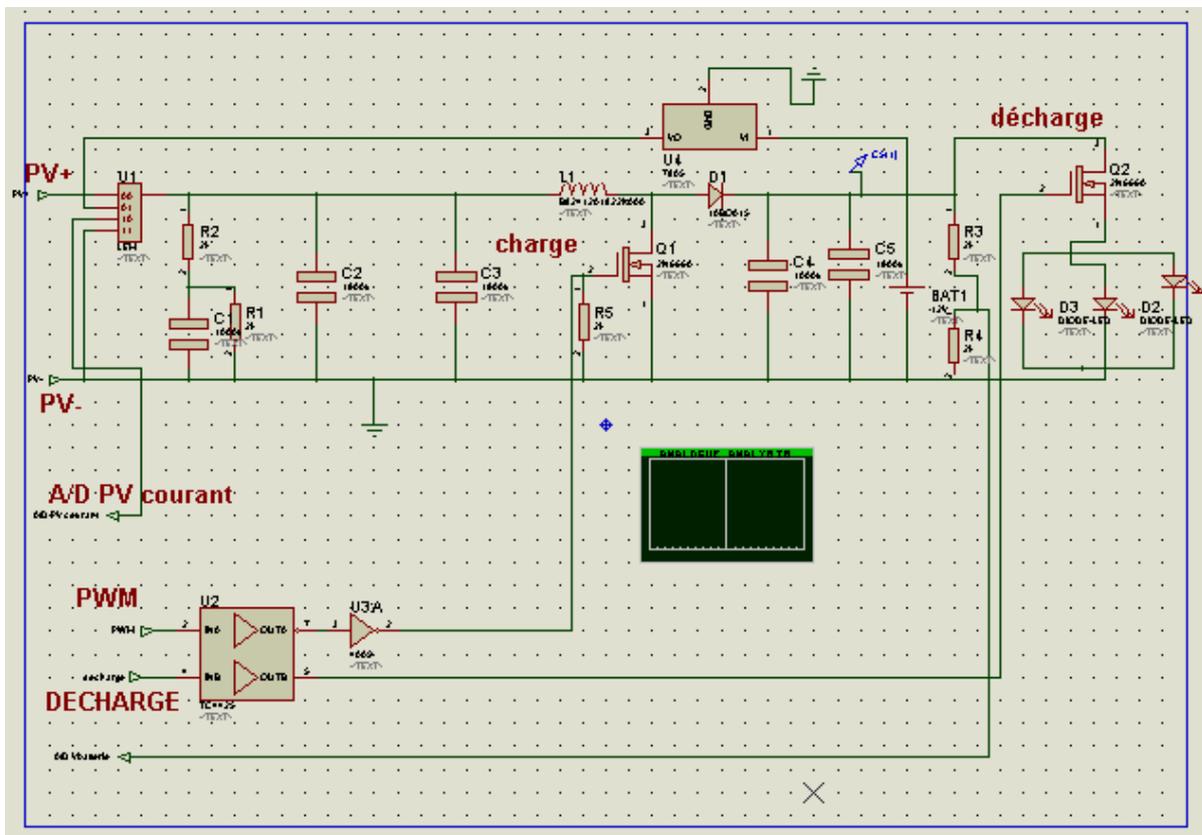


Figure5.13 : Schéma complet de la carte de puissance sous ISIS 7 PROFESSIONAL

### 5.2.4.1 La bobine :

Cet élément est le plus délicat à déterminer. En effet, une inductance trop faible ne permet pas le fonctionnement de la carte de puissance, et une inductance trop forte quant à elle provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet Joule. En effet, une bobine réelle peut être représentée par une bobine parfaite en série avec une résistance (la valeur de cette résistance étant d'autant plus forte que l'inductance de la bobine).

Calcul du courant de sortie :

$$I_o = (V_d * I_d) / V_o$$

$$\text{A.N : } I_o = 16,5 * 0,3 / 12$$

$$I_o = 0.4125 \text{ A}$$

Comme nous l'avons remarqué auparavant : l'amplitude des variations du courant autour de sa valeur continue varie entre 10 et 20 %.

En prenant 10 % (et en remarquant qu'en régime établi aucun courant ne circule dans le condensateur de sortie), on peut estimer  $\Delta i_L$ .

$$\Delta i_L = I_o * 0,1 = 20,6 \text{ mA.}$$

Finalement, comme :

$$L = V_d * \alpha * T / (2 * \Delta i_L) \quad (0.4)$$

Le rapport cyclique que l'on peut prévoir dans les conditions nominales ( $V_d = 16.5\text{V}$  et  $V_o = 24 \text{ V}$ ) se déduit de :

$$V_o / V_d = 1 / (1 - \alpha) \quad (\text{ch.4})$$

$$\text{AN : } \alpha \sim 0,3125$$

Nous supposons que notre convertisseur statique fonctionne à la fréquence de 20 kHz (il s'agit de la fréquence de commutation de l'interrupteur), cela implique que :

$$T = 10 \mu\text{s}$$

Ce qui nous permet de calculer la valeur minimale de L

$$\text{AN : } L \sim 1,25 \text{ mH}$$

Remarquons par ailleurs que la bobine doit être capable de supporter un courant de 0,3 A.

Nous avons toujours :  $T = 10 \mu\text{s}$ ,  $\alpha = 0,3125$ , et nous avons décidé que  $V_o = 0,1 * V_o$  (soit 0,24 V).

De plus, d'après (0.5) nous savons que :

$$C = I_o * \alpha * T / \alpha V_o$$
$$AN : C = 2,68 \mu F.$$

Ainsi la capacité du condensateur équivalent à nos deux condensateurs placés en parallèle en sortie du boost doit valoir au minimum 2,68  $\mu F$ . Ceci est largement assuré puisque selon les conseils que nous avons reçus, nous avons choisi un condensateur de capacité 1000  $\mu F$  et un autre de capacité 1  $\mu F$ .

La capacité du condensateur équivalent à nos deux condensateurs placés en parallèle est donc :

$$C_{eq} = 1000 + 1 = 1001 \mu F \gg 2,68 \mu F$$

Nous avons fait les même choix de valeurs de capacité en entrée et en sortie.

Bilan : C1 = 47  $\mu F$  ; C2 = 1000  $\mu F$  ; C3 = 1  $\mu F$  ; C4 = 1000  $\mu F$  ; C5 = 1  $\mu F$  ; C6 = 0,22  $\mu F$  ; C7 = 0,1  $\mu F$  ; C8 = 22  $\mu F$  ; C9 = 0,33  $\mu F$ , R1 = 2,7 k ; R2 = 6,8 k ; R3 = 1 k ; R4 = 3,9 k ; R5 = 6 k.

### 5.3 Partie commande :

#### 5.3.1 L'objectif d'appliquer MPPT:

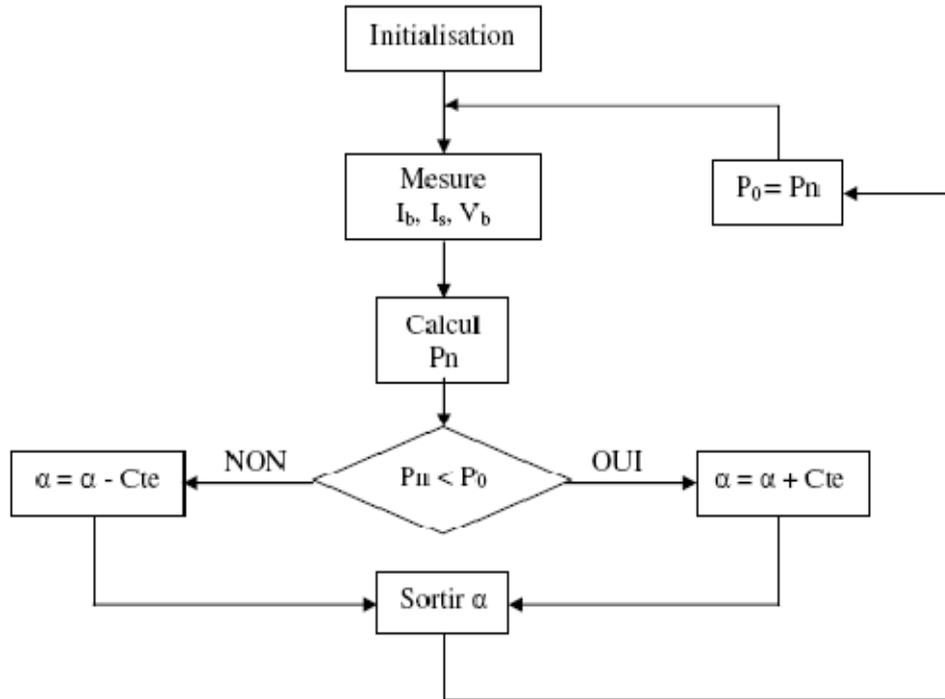
L'objectif de notre étude est la simulation et réalisation d'une commande MPPT numérique basée sur la commande numérique simple et la régulation TOR déjà existante en version analogique et numérique. Les objectifs concrets que nous voulons atteindre par cette réalisation numérique sont les suivants :

- Obtention des rendements MPPT équivalents à ceux obtenus avec la commande numérique simple et TOR analogique
- Réduction du coût de fabrication par rapport à la commande analogique
- Réduction du nombre de composants utilisés pour la mise en œuvre
- Diminution du volume et encombrement total du régulateur
- Diminution de la consommation de la commande

#### 5.3.2 Les premiers types de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières MPPT conçues était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à cette époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

Appliqué au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F Boehringer [16]. La commande exposée dans cet article est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est représenté en figure 5.14 et peut être implanté entièrement en numérique.



**Figure5.14** : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique

Le système démarre d'un rapport cyclique initial  $\alpha_0$  et d'une puissance initiale  $P_0$ . Après avoir effectué la mesure du courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_b$  aux bornes de la batterie et du courant de charge  $I_s$ , le produit  $I(k) * V(k)$  est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée  $P_n$  délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance  $P_0$ , si  $P_n$  est inférieure à  $P_0$ , alors  $\alpha$  est incrémenté, sinon  $\alpha$  est réduit. Une fois  $\alpha$  modifié,  $P_0$  prend la valeur  $P_n$  et on effectue une nouvelle mesure de  $I_{pv}$ ,  $V_b$  et  $I_s$  pour calculer la nouvelle puissance  $P_n$ .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur.

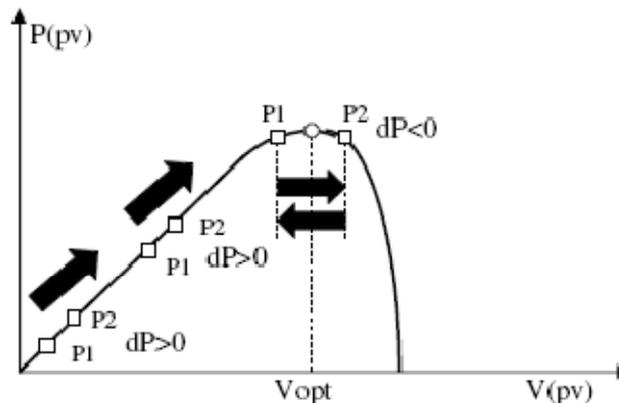
### 5.3.3 Evolution du point de fonctionnement du GPV :

Nous devons chercher le point de puissance maximal, pour cela nous comparons un point de puissance ( $P_2$ ) mesuré à l'instant ( $t$ ) avec un point de puissance ( $P_1$ ) mesuré à l'instant ( $t-1$ ) (figure5.15).

Si  $P_1 < P_2$ , la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal. Ainsi, au démarrage du système, la recherche de PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent.

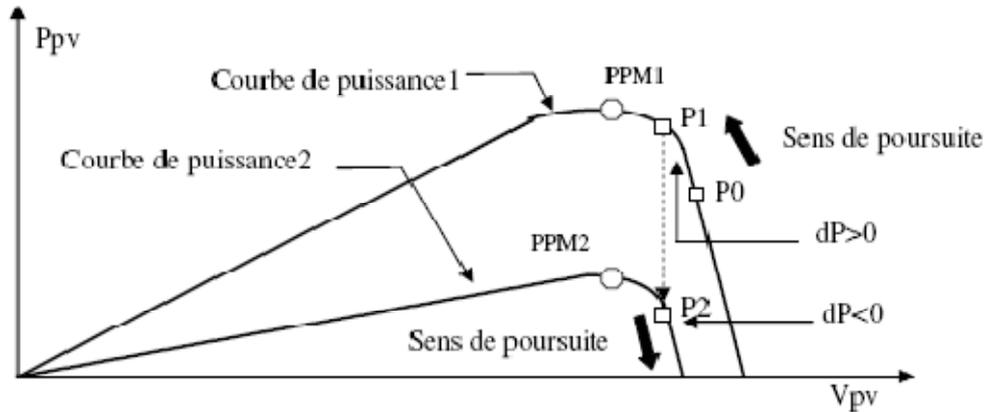


**Figure5.15** : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir :

- La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.
- Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure5.16. Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance 1 avant le changement d'éclairement.
- Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.



**Figure 5.16 :** Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

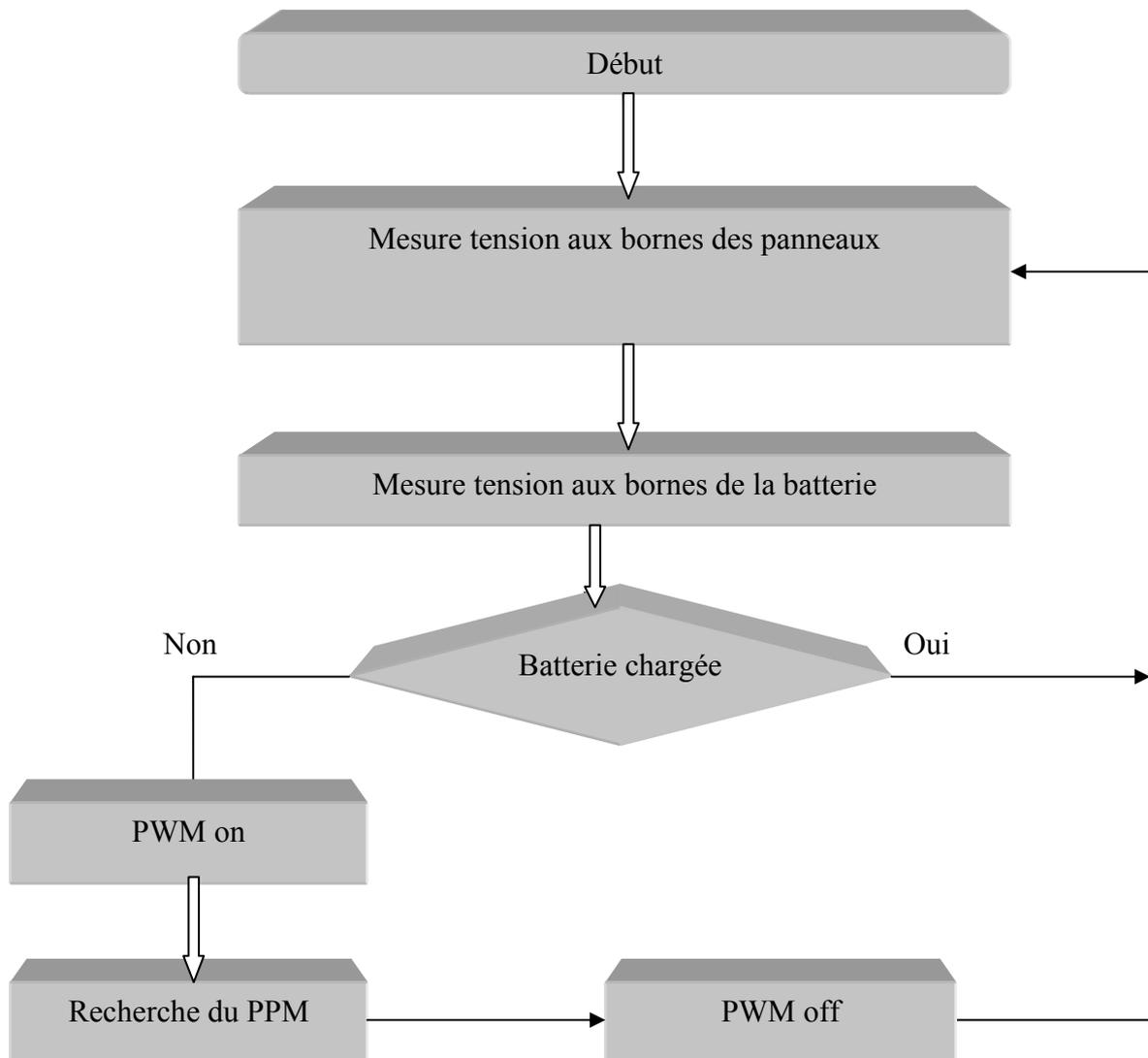
### 5.3.4. Description de la commande MPPT Extrémale P&O :

Les commandes MPPT développées au cours de ces dernières années sont toutes basées sur le principe de la commande extrémale. Ce type de commande se base sur la recherche d'un extrême pour un paramètre ou une variable physique d'un système par la variation ou perturbation d'un paramètre d'entrée de ce système. La commande extrémale perturbation et observation a été rapportée en 1920 par Leblanc pour la recherche du pic de résonance d'un système électromécanique. Dans le cas particulier d'un PV, une commande MPPT P&O oblige le point de fonctionnement du GPV à se rapprocher du PPM et à osciller autour de lui indéfiniment.

Le diagramme de la figure 5.17 représente le principe général décomposé en différentes fonctions, de la commande MPPT extrémale P&O. Pour ce type de commande, il est tout d'abord nécessaire de connaître les tensions ( $V_{pv}$ ) et les courants ( $I_{pv}$ ) en permanence aux bornes du PV. Ces deux mesures permanentes permettent d'identifier au mieux tout changement de condition de fonctionnement du générateur. Pour cela, deux capteurs distincts doivent être prévus. A partir des informations délivrées par ces capteurs, une image de la puissance fournie par le PV peut être obtenue en utilisant un multiplieur software dans le programme. Le niveau de puissance délivré n'est pertinent que si le système est capable de déterminer si ce niveau correspond au maximum pouvant être délivré par le PV.

#### 5.3.4.1. Schéma de principe :

La figure 5.17 montre le schéma de principe de la commande MPPT numérique, nous notons que nous utilisons un microcontrôleur PIC de la série 16F pour la mise en œuvre de l'algorithme de recherche. Nous pouvons voir sur cette figure que nous n'avons plus besoin des comparateurs et transistors, indispensable pour la commande analogique. D'un autre côté, l'algorithme de recherche génère un signal alpha ( $\alpha$ ) qui permet de charger la batterie.



**Figure5.17** : Schéma de principe de la commande MPPT numérique.

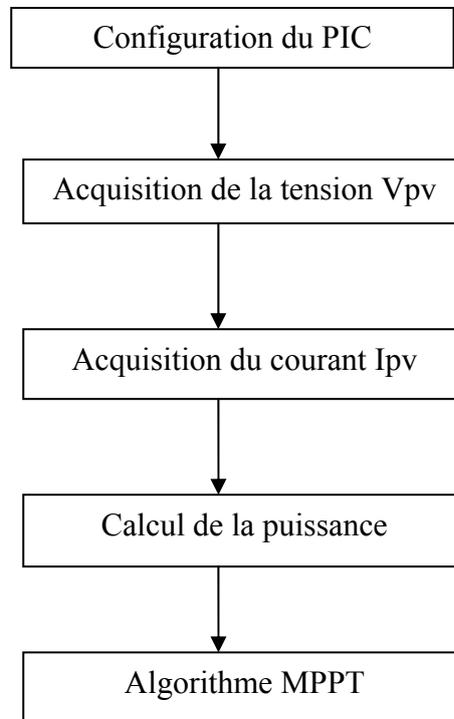
La figure 5.18 montre le diagramme de blocks de l’algorithme de recherche intégré dans le microcontrôleur PIC. Le fonctionnement de cet algorithme est le suivant. Dans un premier temps nous configurons les registres du microcontrôleur PIC16F. Nous effectuons l’acquisition de la valeur de tension du PV ( $V_{pv}$ ) suivit de celle du courant du PV ( $I_{pv}$ ).

L’acquisition de ces variables doit se faire de manière simultanée car le microcontrôleur dispose de plusieurs convertisseurs analogique-numériques (CAN). Une fois que nous avons obtenu la valeur de ces deux variables, nous les multiplions pour obtenir une image de la puissance fournie par le PV.

A partir de cette puissance nous calculons la dérivée de puissance par rapport au temps afin de connaître les variations de la puissance du PV. Ainsi nous pouvons déterminer avec

exactitude quand la puissance du PV augmente ou quand elle diminue, de manière à savoir si on s'approche ou si on s'éloigne du PPM.

A partir du signe de la dérivée de puissance nous pouvons déterminer le sens de recherche du point de puissance maximal (défini par le paramètre alpha) à l'aide de ce que nous notons dans la figure 5.18 « Algorithme MPPT »



**Figure5.18:** Diagramme de blocks de la MPPT numérique

#### 5.3.4.2 Structure de l'algorithme MPPT< P&O> :

Ici nous décrivons le fonctionnement de l'algorithme MPPT. C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires.

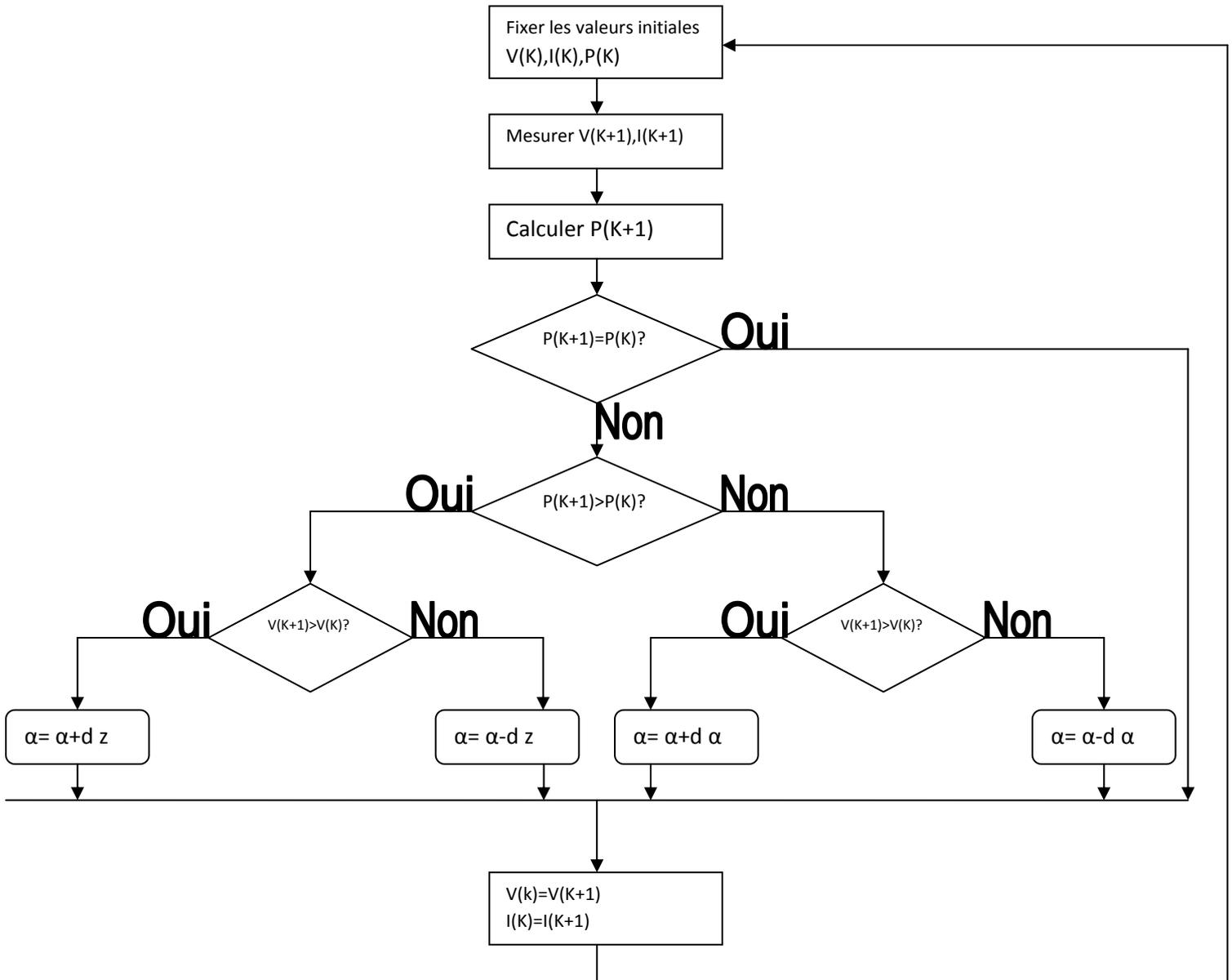
Le signe de la dérivée de puissance nous permet d'exécuter cet algorithme. Si la dérivée est positive et la variable  $\alpha$  (cette variable nous indique le sens de la recherche du PPM), cette dernière reste identique puisque le signe positif de la dérivée indique que nous nous approchons du PPM.

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité; une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant la perturbation.

Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est élevée du fait que la perturbation et la perturbation suivante sont dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

De cette manière le point de fonctionnement du module PV oscille de manière permanente autour du PPM.

La figure 5.19 montre en détail le schéma de principe de l'algorithme MPPT implémenté.



**Figure5.19:** Schéma de l'algorithme MPPT P&O

Légende :

- \_  $V_{panneau}(k)$  : tension en sortie du panneau à l'itération k
- \_  $I_{panneau}(k)$  : intensité en sortie du panneau à l'itération k
- \_  $P_{panneau}(k)$  : puissance en sortie du panneau à l'itération k

### 5.3.5 Configuration des entrées sorties pour le PIC:

Le programme complet en C de la commande MPPT est inclus dans l'annexe 1.

Dans un premier temps nous devons configurer le CAN afin de capturer les valeurs de la tension et du courant du PV. La tension de référence du CAN est de 5V, un capteur de courant et un pont diviseur de tension sont nécessaires du côté du convertisseur boost pour adapter les grandeurs du panneau solaire ( $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ ) à cette tension de référence (voir figure 5.5).

De cette manière nous obtenons les équivalences suivantes sur les deux ports d'entrées. La tension et le courant maximaux que peut fournir le panneau sont :

- $V_{PV}$  0 à 17V
- $I_{PV}$  0 à 4A

Capteur de courant(LEM) : 0 5A -----0 5V PIN4 (CAN)

Capteur de tension : 0 17V -----0 5V PIN2 (CAN)

Tension batterie :0 16V-----0 5V PIN3 (CAN)

La tension est connectée sur le PORTA.RA0, configurée en entrée analogique du CAN (AN0), tandis que la tension de la batterie est sur le PORTA. (AN1) et le courant est sur le PORTA.RA2 (AN2).

La conversion peut se faire sur 8 bits ou 10 bits.

Pour chercher le point de puissance maximal, nous comparons un point de puissance ( $P_2$ ) mesuré à l'instant ( $t$ ) avec un point de puissance ( $P_1$ ) mesuré à l'instant ( $t-1$ )

Si  $P_1 < P_2$ , la dérivée est positive, cela signifie que nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale.

Pour éviter de perdre le point de puissance maximal, lors de changements brutaux d'éclairement et lors des transitoires du convertisseur boost, l'algorithme de recherche inverse le sens de poursuite que si un certain temps s'est écoulé après le dernier changement. Ce temps est fixé à une valeur constante préalablement. Si le signe de la dérivée de puissance est positif, le sens de poursuite reste inchangé

### 5.3.6 Le programme :

#### 5.3.6.1 Détail du programme :

Nous décrivons par la suite le fonctionnement du programme présent dans l'annexe1.

Dans un premier temps nous incluons les bibliothèques nécessaires pour le bon fonctionnement du programme :

- p16F877.h (bibliothèque du PIC16F877)
- stdio.h
- math.h
- configuration du watch-dog comme inactif
- utilisation d'une horloge de 20Mhz(HS)
- désactivation du mot de passe pour le PIC

Ensuite, nous déclarons toutes les variables globales. Ces variables sont toutes les variables qui sont actives pendant toute l'exécution du programme. Dans notre cas, nous en avons une quantité élevée car nous avons besoin de déterminer en permanence la dérivée de la puissance fournie par le module PV pour connaître si nous nous approchons ou nous nous éloignons du PPM. Pour le faire, nous devons capturer la tension et le courant du module PV pour effectuer la multiplication. Pour obtenir une bonne valeur de puissance nous effectuons plusieurs échantillons de la puissance pour obtenir une valeur de puissance moyenne en plus le programme de la commande MPPT est structuré dans une sous-routine car la régulation est faite avec deux types de commandes une pour la charge(MPPT) et l'autre pour la décharge. Mais le programme principale (void main) reste le même par rapport au 1<sup>er</sup> régulateur réalisé car on a changé juste la structure de la commande de charge.

### 5.3.6.2 Fonctionnement du programme

#### a) Choix du microcontrôleur PIC :

On a utilisé le même PIC utilisé dans la commande précédente le 16F877.

Pour une multiplication de deux mots non signé de 8 bits, le PIC 16F877 a besoin de 69 cycles d'instruction soit 13.8 $\mu$ s. ( $69 \times 0.2 = 13.8$ )

Le temps total pour obtenir une valeur de puissance pour une conversion sur 8 bits est de 138.2 $\mu$ s.

Pour effectuer une multiplication de deux mots non signés de 16 bits, le microcontrôleur a besoin de 48.4 $\mu$ s, soit 242 instructions.

Le temps total pour obtenir une valeur de puissance pour une conversion sur 10 bits est de 172.8 $\mu$ s.

Notre application n'a besoin que de deux entrées analogiques ( PV I et PV V ) et d'un signal de sortie (alpha).

En vue d'améliorer l'ergonomie Homme-Machine (mise en place d'un écran LCD) le PIC 16F877 doit être choisie à cause de sa taille mémoire plus importante, et de ces 5 ports (PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE) de communications.

#### b) Conversion sur 8 bits :

Nous prenons la tension de référence du microcontrôleur comme référence, pour calculer la puissance maximale de notre système. Pour faire la conversion sur 8 bits, la valeur maximale de tension et de courant est de 0xFF (les 8 bits de poids fort).

$$\left. \begin{array}{l} 5 \text{ V} \text{ ————— } 0\text{xFF} \\ 5 \text{ A} \text{ ————— } 0\text{xFF} \end{array} \right\} 0\text{xFF} \times 0\text{xFF} = 0\text{xFE01} = 65025 \quad (\text{V.1})$$

On calcule aussi la puissance maximale théorique du panneau pour obtenir la résolution en W/bit.

$$\text{Puissance panneau} = 22\text{V} \times 5\text{A} = 110\text{W} \quad (\text{V.2})$$

$$\text{Resolution} = 110/65025 = 1691 \mu\text{W/bit} \quad (\text{V.3})$$

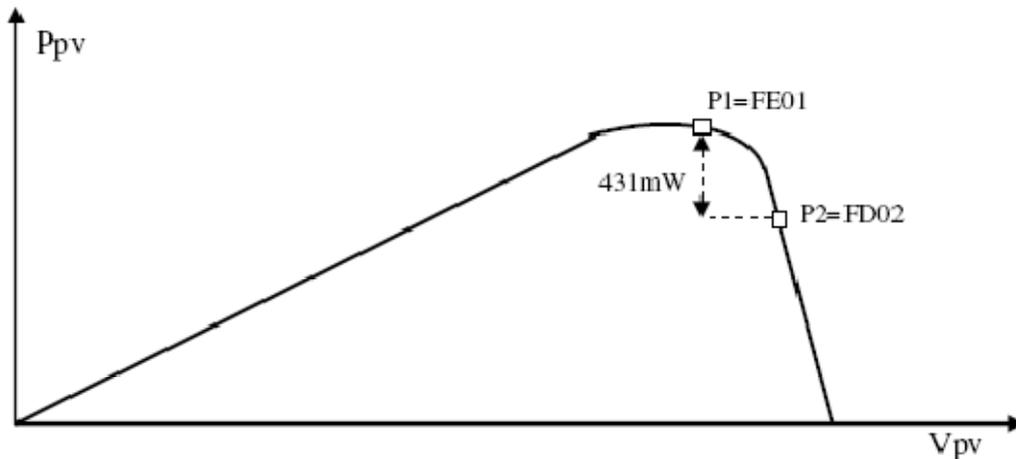
Avec la variation d'un bit :

$$\left. \begin{array}{l} 5 \text{ V} \text{ ————— } 0\text{xFE} \\ 5 \text{ A} \text{ ————— } 0\text{xFF} \end{array} \right\} 0\text{xFE} \times 0\text{xFF} = 0\text{xFD02} = 64077 \quad (\text{V.4})$$

$$65025 - 64077 = 255 \quad (\text{V.5})$$

$$255 * 1691 * 10^{-6} = 431 \text{mW} \quad (\text{V.6})$$

On détermine la différence des deux mesures consécutives (voir équation 3.16) que l'on multiplie par la résolution de la conversion (voir équation 3.17), pour obtenir la variation de puissance minimale (précision) réelle au niveau du panneau. La précision est pour ce cas de 431mW.



**Figure5.20 :** Figure qui montre la précision sur une conversion de 8 bits

En résumé, pour une conversion de 8 bits, il faut que la puissance du panneau varie de 431 mW (voir figure 5.20), pour que le calculateur s'en aperçoive, cela risque de poser des problèmes au niveau du calcul de la dérivée à faible puissance.

On effectue la même chose pour la conversion sur 10 bits.

### c) Conversion sur 10 bits:

La résolution dans ce cas est de 107 mW. Ce qui est plus approprié pour les faibles puissances.

$$\left. \begin{array}{l} 5 \text{ V} \text{ ————— } 0x3FF \\ 5 \text{ A} \text{ ————— } 0x3FF \end{array} \right\} 0x3FF \times 0x3FF = 0xFF801 = 1046529 \quad (3.18)$$

$$\text{Puissance panneau} = 22 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 110 \text{ W} \quad (3.19)$$

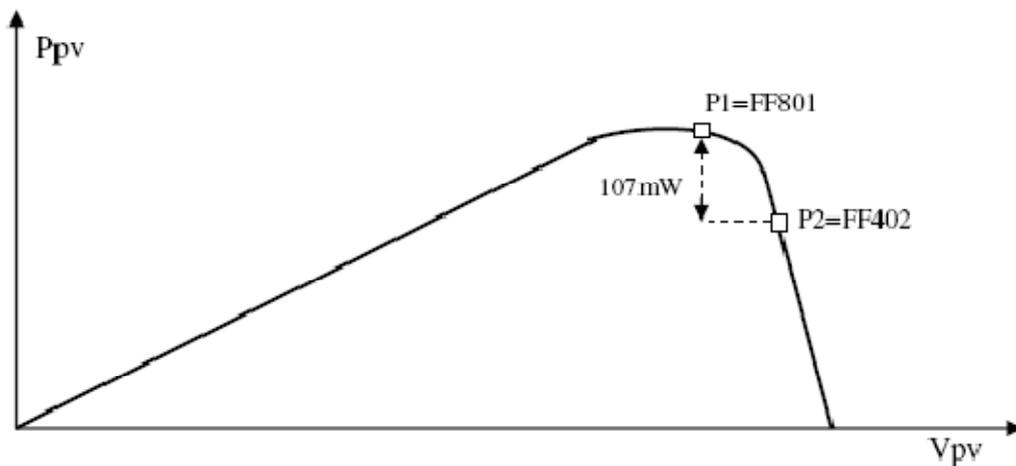
$$\text{Précision} = \frac{110}{1046529} = 105 \text{ } \mu\text{W} / \text{bit} \quad (3.20)$$

Avec la variation d'un bit :

$$\left. \begin{array}{l} 5 \text{ V} \text{ ————— } 0x3FE \\ 5 \text{ A} \text{ ————— } 0x3FF \end{array} \right\} 0x3FE \times 0x3FF = 0xFF402 = 1045506 \quad (3.21)$$

$$1046529 - 1045506 = 1023 \quad (3.22)$$

$$1023 \cdot 105 \cdot 10^{-6} = \mathbf{107 \text{ mW}} \quad (3.23)$$



**Figure5.21** : Figure qui montre la précision sur une conversion de 10 bits

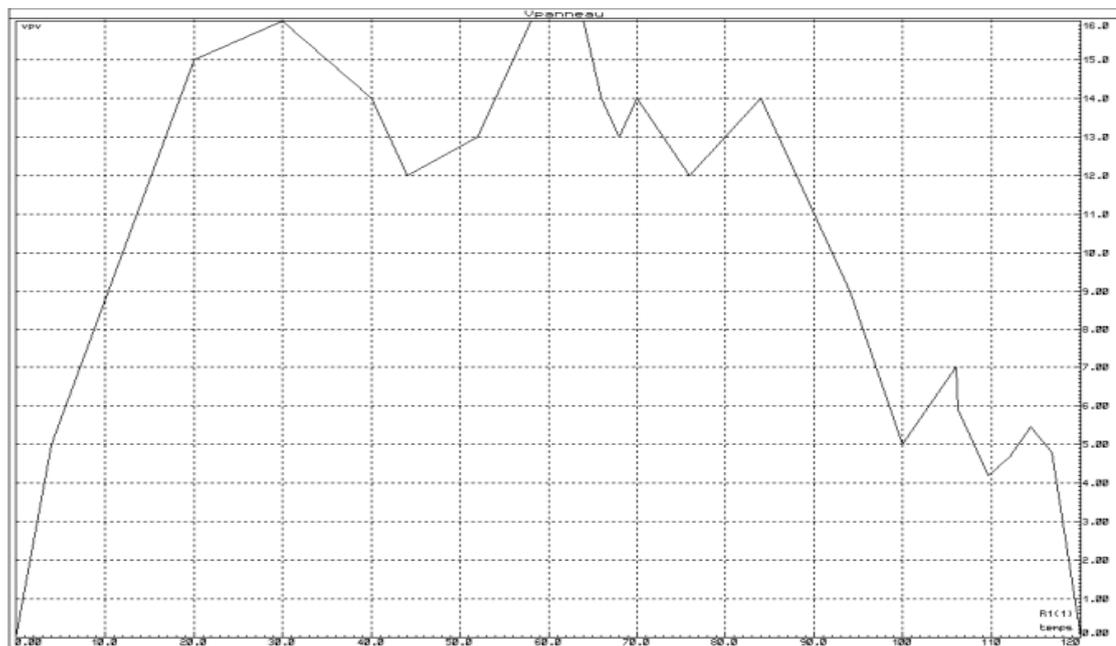
La précision pour une conversion sur 8 bits est de 431mW, tandis qu'elle est de 107mW pour 10 bits (voir figure 5.21). Comme vu précédemment, le problème de la conversion sur 8 bits, est qu'à faible puissance sa précision est trop grande, donc difficulté à détecter la variation de puissance par rapport à 2 échantillons, ce qui risque d'engendrer des erreurs au niveau du signe de la dérivée. Par contre une conversion sur 10 bits risque d'être sensible aux bruits à forte puissance.

### 5.4 Simulations et résultats :

Les résultats figurant dans les schémas (5. 25a,b,c) nous permettent de valider les concepts théoriques de chaque commande et d'évaluer les techniques MPPT d'analyser leur comportement sous les mêmes conditions de fonctionnement. Cette étude nous permet de valider la technique la plus appropriée à une application qui répondra aux exigences de la rapidité de convergence vers un nouveau PPM causé par un changement éventuel dans les conditions climatiques.

Pour effectuer la simulation nous avons utilisé le logiciel ISIS 7 Professional qui est un standard dans le domaine de l'ingénierie.

Pour une valeur bien déterminée de l'éclairement ( $E$ ) et de la température ( $T$ ), le module solaire possède un point de puissance maximale unique, pour se situer en ce point il apparaît très évident d'appliquer une tension  $V_{pv}$  et un courant  $I_{pv}$  bien déterminés aux entrées du régulateur (figure).



**Figure5.22** : Variation de la tension du panneau solaire

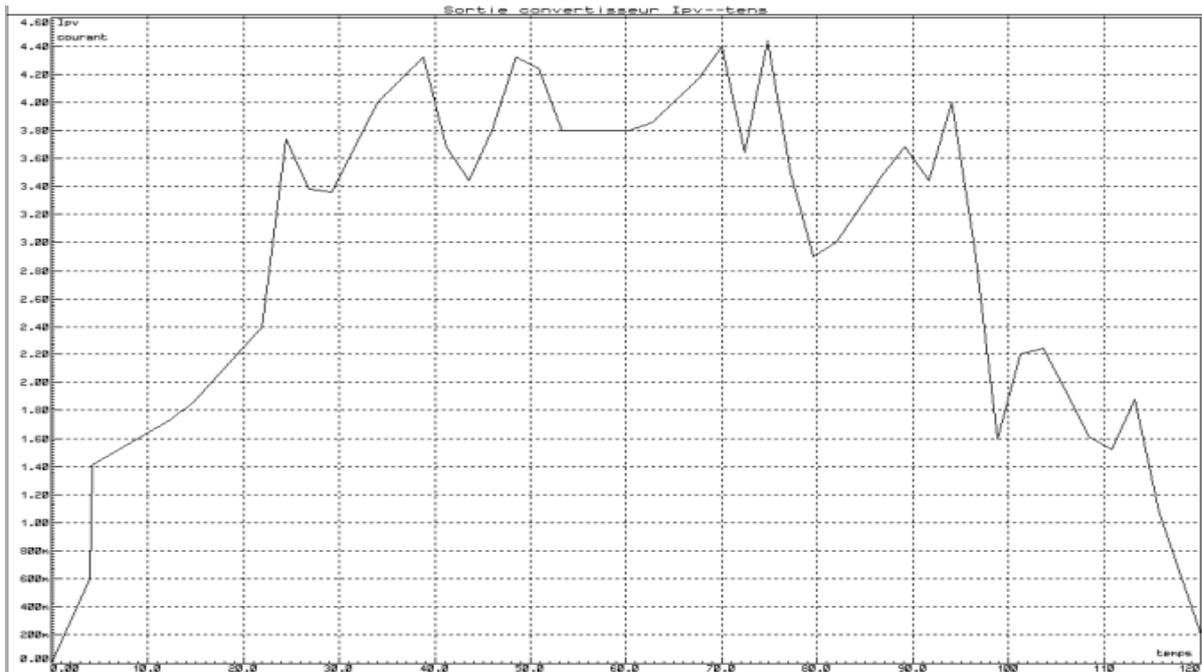


Figure5.23 : Variation du courant  $I_{pv}$

Et pour la batterie on va mètre le système sous les mêmes changements de tension du régulateur numérique.

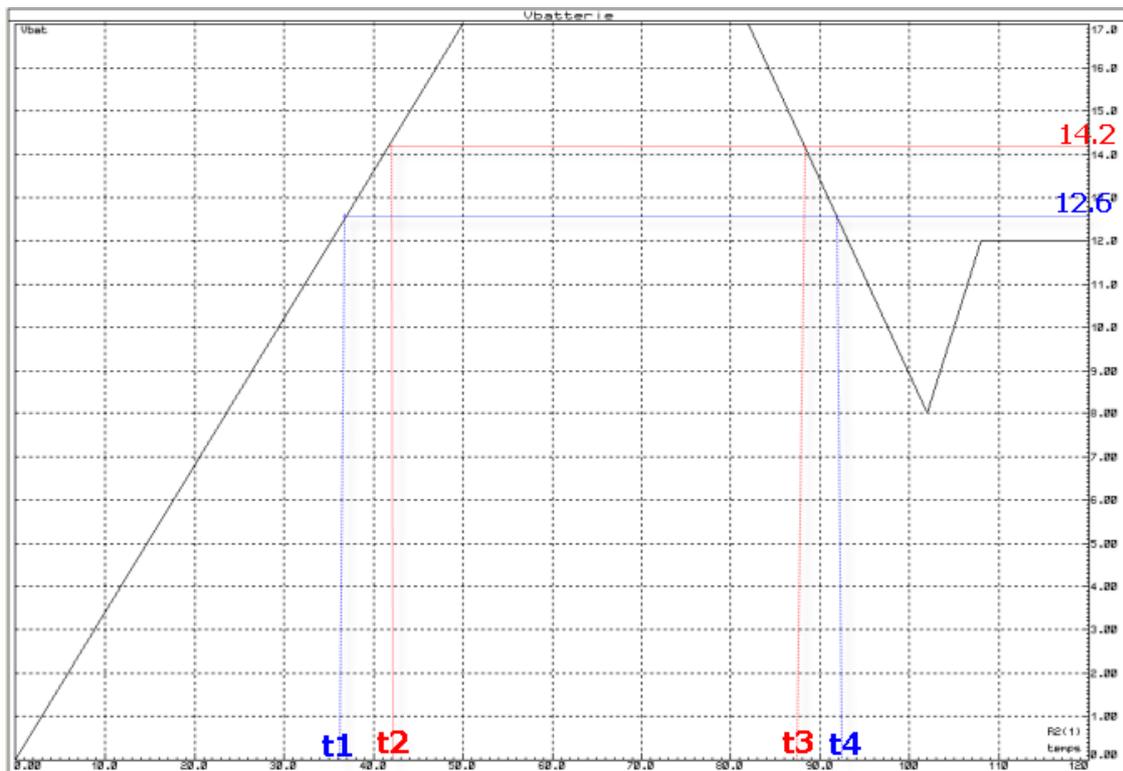


Figure5.24 : Variation de la tension  $V_{batterie}$

Voici les variations de la tension des sorties du contrôleur numérique avec la commande MPPT (P&O).

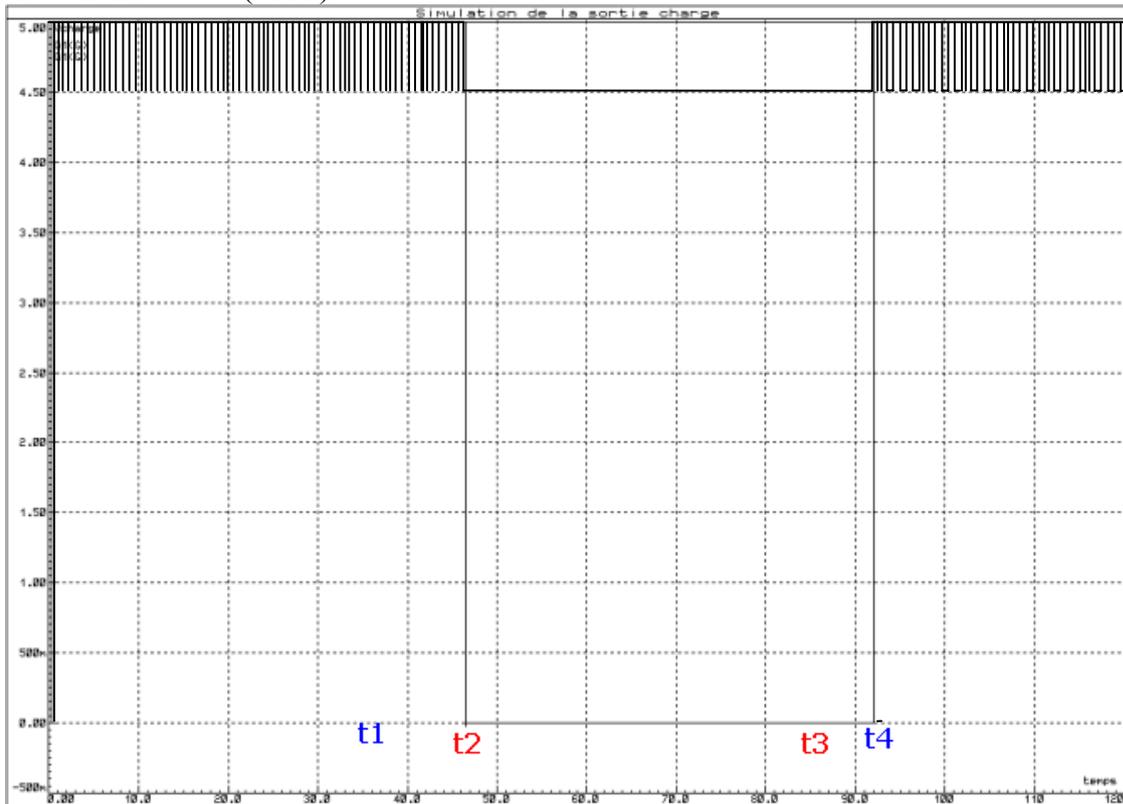


Figure5.25 a : Variation de la sortie charge du régulateur

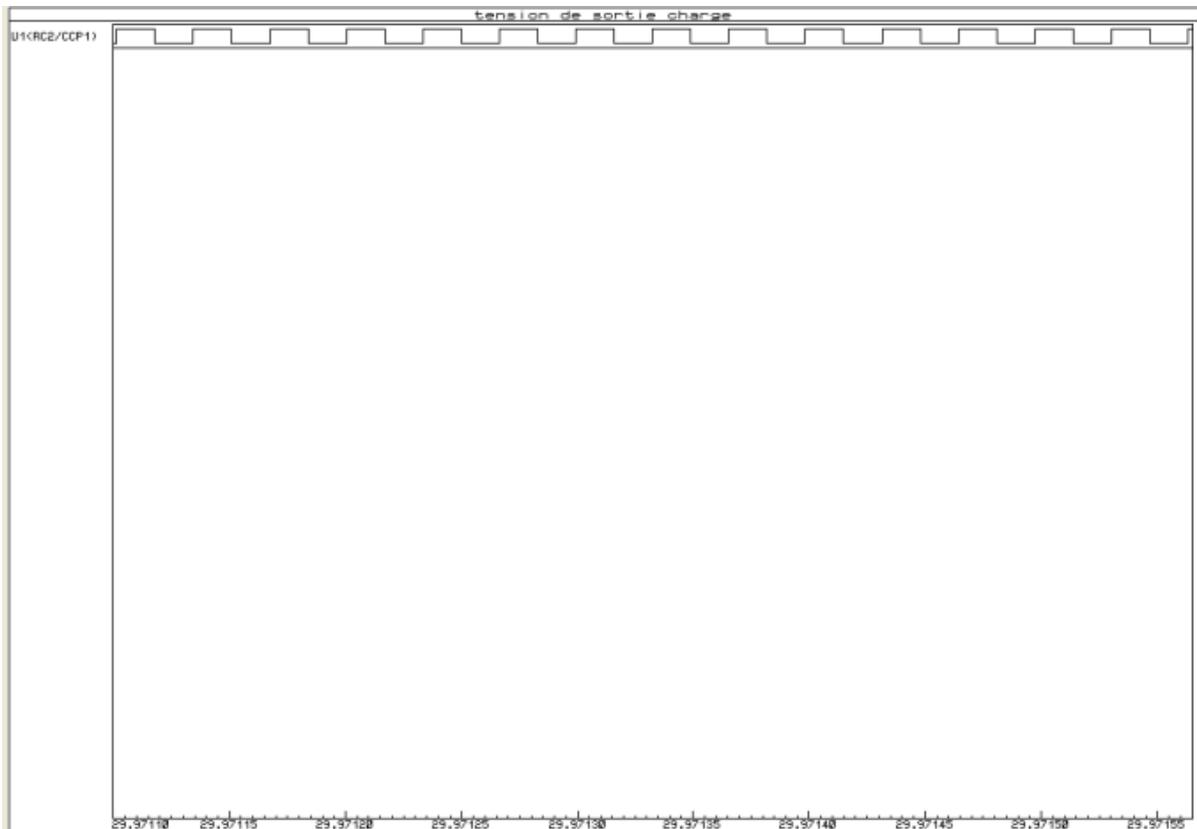


Figure2.25b : Variation de la sortie charge du régulateur avec un pas de 0.005 seconds

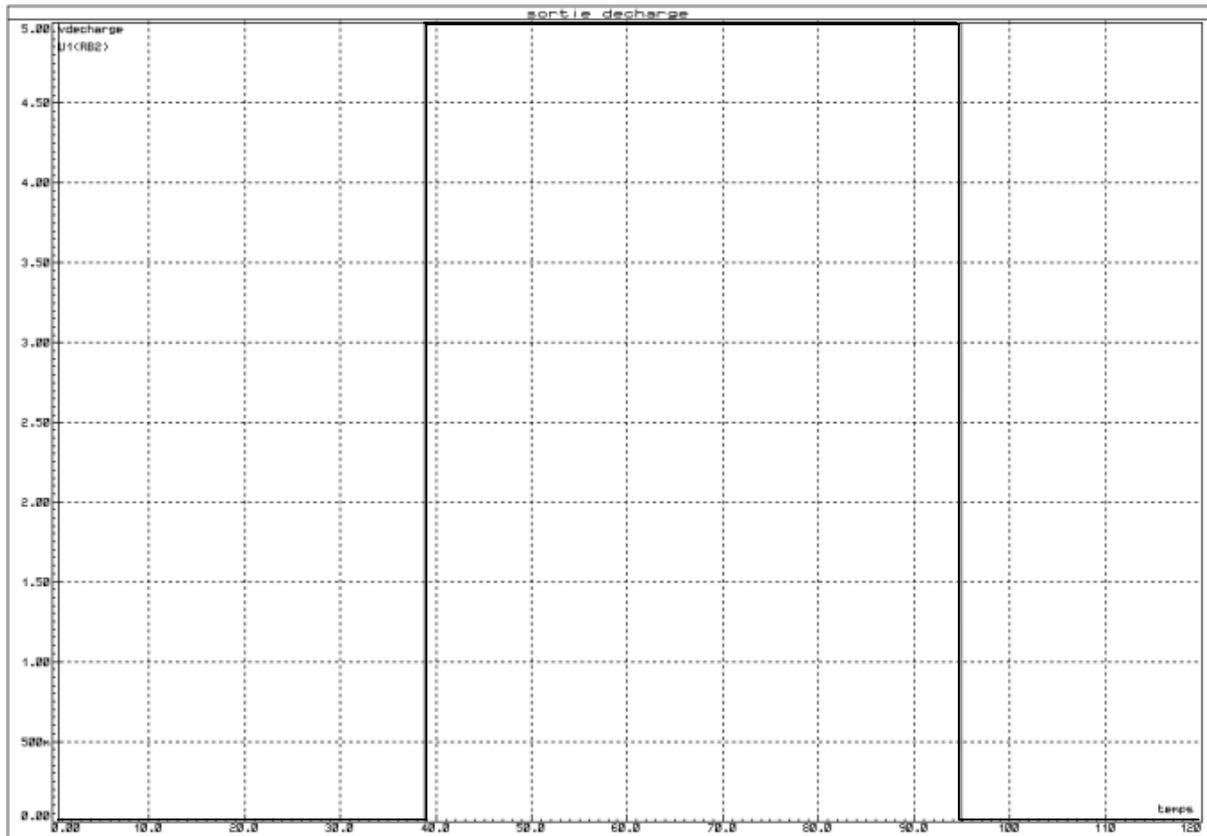


Figure2.25c : Variation de la tension de sortie décharge.

**Interprétation des résultats obtenus :**

On remarque sur la (figure5.25a) que le comportement de la variation Vcharge est identique par rapport au régulateur numérique le seul changement c'est qu'ici la réponse est sous forme MLI.

On remarque sur la figure5.25b que le pas d'incrémentation du rapport cyclique est constant (on l'a fixé à 1% de la valeur de puissance max),Le contrôleur converge donc lentement vers le MPP(0.6s)Une fois le point MPP atteint, la valeur de  $d\alpha$ (le pas de variation du pwm voir annexe1 progarmme2)continuera à osciller autour de la valeur idéale Pmax comme cela a été expliqué dans ce chapitre. Ces ondulation causent une perte d'énergie et représentent un des plus grands inconvénients de cette méthode, mais elle reste acceptables puisqu'elles ne dépassent pas les 5% de Pmax.

Dans la première commande du régulateur numérique nous avons introduit une méthode simple de la régulation (charge) ce qui permet une perte de l'énergie transféré a la batterie, Mais cette adaptation avec la commande MPPT (P&O) force le MOSFET à

fonctionner à une fréquence optimale qui transfère le maximum d'énergie fournit par le panneau solaire, qui engendre un fonctionnement optimale du système photovoltaïque, les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'introduction du MPPT.

Pour la 2ème partie du bloc décharge (figure2.25c) le régulateur fonctionne avec la commande utilisé dans le régulateur numérique simple donc les résultats de cette partie ne change pas par rapport au premier régulateur (voir chapitre 3).

### 5.5 Améliorations possibles :

L'avantage de cet algorithme est que l'on converge toujours vers le point de puissance maximal, pour ensuite osciller autour de ce dernier.

Plusieurs améliorations peuvent être apportées au système actuel (voir figure 5.27):

1 - Centrer les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM), pour réduire le P et améliorer le rendement de la MPPT.

2- Réduire le temps du délai, afin de diminuer la période d'oscillation (rapprochement des extrémités des oscillations vers le PPM).

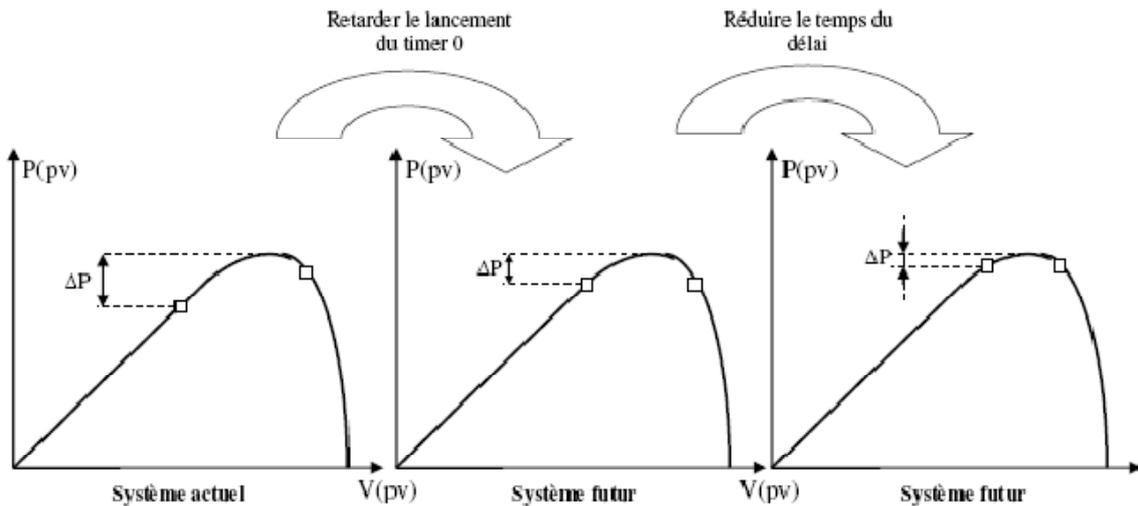


Figure5.27 : Améliorations possibles

Pour centrer les oscillations autour du point de puissance maximale, il faut retarder le lancement du délai, pour que les extrémités des oscillations avoisinent les mêmes valeurs de puissance et de bien choisis la perturbation  $d\alpha$  (voir figure 5.28).

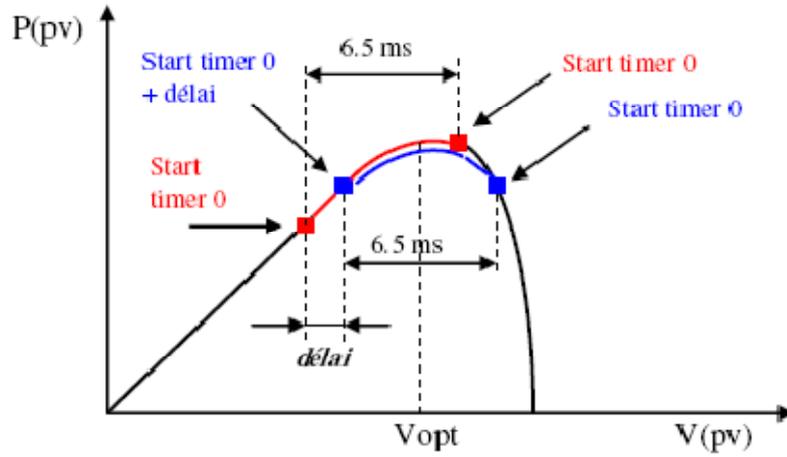


Figure5.28 : Schéma des améliorations

Une fois les oscillations centrées pour améliorer le rendement de la MPPT il suffira de réduire la durée du délai et la valeur de  $d\alpha$ .



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# CONCLUSION

# GENERALE

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale :

Le travail que nous avons effectué avait comme objectif d'améliorer le rendement du régulateur des systèmes photovoltaïques avec batteries qui a un objectif de contrôle et supervision de la charge et décharge d'unité de stockage pour une durée de vie maximale.

Nous avons procédé à une étude globale et une extraction du modèle mathématique des différents organes constituant le système photovoltaïque à savoir : les cellules photovoltaïques et leurs comportements lors des changements environnementaux, les batteries, les régulateurs et leurs types ainsi que les différents types de stratégies utilisées dans ces contrôleurs.

Il ya deux groupes principaux des régulateurs, ceux qui utilisent les circuits analogiques et le contrôle par des méthodes classiques, et d'autre qui utilisent un microprocesseur pour ajuster les paramètres des systèmes comme la puissance, tension, température et éclairement. Les systèmes analogiques ont l'avantage d'avoir des composants à prix réduit, mais sont plus problématiques pour le contrôle. Il est difficile de développer un système stable qui peut mettre la batterie dans des états bien définis avec exactitude dans des conditions extrêmes telles que les variations larges de la température et d'éclairément qui se produisent dans un système photovoltaïque. Les systèmes avec régulation numérique ont l'avantage qu'un algorithme de contrôle et de supervision de la batterie peu avoir des différents sous algorithmes qui change avec les paramètres du système photovoltaïques (température, nombre de batteries, nombre et branchement des panneaux solaire, type d'utilisation...) avec ce type de contrôleur numérique on peu avoir des options en plus comme dans notre cas l'affichage de la tension du PV et la batterie.

En se basant sur les modèles des composants du système photovoltaïque déjà extraits, on a effectué avec le logiciel PROTEUS 7 PROFESSIONAL et MATLAB SIMULINK une étude et simulation du système photovoltaïque avec contrôleurs analogique et numérique, puis avec la version numérique améliorée où on a utilisé la commande MPPT.

Les résultats obtenus de cette simulation et réalisation étaient satisfaisants à savoir que le premier régulateur (analogique) simulée n'atteindrait jamais à un cycle d'hystérésis bien défini. et qu'il présentait une anomalie de précision. En outre, malgré l'amélioration de la plage d'hystérésis, le problème de la précision reste un inconvénient remarquable pour le régulateur analogique. Mais le test du régulateur numérique réalisé ne posse pas ces problèmes mais il ya un petit retard par rapport à la réponse du contrôleur analogique à cause de temps d'exécution du programme implémenté dans le microcontrôleur.

La poursuite de ces travaux va se faire afin de valider le fonctionnement de la commande MPPT numérique étudiée au chapitre4 et 5 pour différents types de convertisseurs statiques (Buck, Boost/Buck, flyback,...). De plus, il est prévu de faire des améliorations du programme afin qu'il puisse effectuer des fonctions en plus de supervision, comme par exemple, le choix de la méthode du contrôle de l'état de charge et décharge de la batterie.

Il existe donc des possibilités pour l'exploitation et l'application de ce prototype du régulateur dans de nombreux systèmes photovoltaïques au terrain pour permettre un bon fonctionnement et une longue durée de vie pour leurs batteries.

## BIBLIOGRAPHIE

---

### Ouvrage :

- [1] Anne Labouret, Michel Villos « Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel », édition Dunod, 2003.
- [2] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi « Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque », édition ETSF.
- [3] Luc Chancellier, Eric Laurent « L'électricité photovoltaïque », collection « Le point sur », 1995.
- [4] Alain Ricaud « Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés », édition Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [5] Jacques Bernard « Energie solaire, calculs et optimisation », édition Ellipses
- [6] Bernard Equer « Energie solaire photovoltaïque, vol 1 et 2 », édition Ellipses
- [7] Dépliant du module HF, présent dans le classeur des documentations mis à notre disposition
- [8] Dépliant du moteur, présent dans le classeur des documentations mis à notre disposition
- [9] Dépliant de la girouette, présent dans le classeur des documentations mis à notre disposition
- [10] UNI-SOLAR, Solar Electric Module US-5, Owner.s Manual & Installation Guide
- [11] Undergraduate thesis Solar Panel Maximum Power Point Tacker de NGuyen (Université de Queensland, Australie)
- [12] Jérémy Duny, Paul Chaubet, Nicolas Leclert, Pierre Duval « Voiture solaire radiocommandée », année 2004-2005
- [13] Mickhail Bessakhi, "Conception d'un chargeur de batterie pour système photovoltaïque" LAAS-CNRS, rapport de stage de DEA. Septembre 2005
- [14] J. P. Ferrieux, F. Forest. Dunod "Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance".
- [15] Angel Cid Pastor "Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques", Rapport de stage du projet de fin d'études au LAAS-CNRS, 2002
- [16] A. F Boehinger "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, AES-4, n°1, pp 102-111
- [17] M. DAOUD Housseyn " Implémentation d'une commande MPPT floue sur FPGA " Rapport de stage du projet de fin d'études à l'école nationale polytechnique 2006.

### Sites internet :

#### **Pour les panneaux solaires**

- [A] <http://www.pv-forum.net/fhtml/fze03.htm>
- [B] <http://www.planete-sciences.org/midi-pyrenees/solaire/ProjetType/ProjetType.php>
- [C] <http://www.sunware.de/>

#### **Pour les batteries :**

- [D] <http://wiki.generationmp3.com/index.php/Batterie>
- [E] <http://www.linternaute.com/hightech/batteries/types-batteries.shtml>
- [F] [http://perso.wanadoo.fr/pl65/dossiers\\_techniq/solaire/batterie.htm](http://perso.wanadoo.fr/pl65/dossiers_techniq/solaire/batterie.htm)
- [G] <http://www.ni-cd.net/accusphp/accueil/baba/plomb/charge.php>
- [H] <http://www.yuasa.fr/environnement.htm>

## BIBLIOGRAPHIE

---

### **Etude MOSFET :**

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

[J] [http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/elec/chap\\_tr3.htm](http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/elec/chap_tr3.htm)

### **Programmation en C :**

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

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

[M] <http://www.accreteil.fr/Lycees/94/larmandnogent/enseigne/ressources/techno/bourse%20cours/COURS/E1%E9ments%20constitutifs%20et%20synth%E8se%20des%20cvs.PDF>



ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE

# Annexe

DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE SPECIALITE  
AUTOMATIQUE

AUTOMATIQUE/2008

## I. Programme en C du contrôleur numérique pour un PIC16F877 :

```
#include <16F877.h>

#device ADC=10
#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#use delay(clock=20000000)
#use delay(oscillator=20M)
#include <lcd.c>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

int i;
int16 value;
float V[2];
float decharge;
float charge;
float Vpv;
float Vbat;
float ss;
float s;

void mesure(int i)
{
set_adc_channel( i );
delay_us(200);
    value = Read_ADC();
    V[i]=value;
    V[i]=V[i]/1024*5;
    Vpv=V[0];
    Vbat=V[1];
}

void main()
{
    SET_TRIS_A(0xFF);
    SET_TRIS_B(0x00);
    SET_TRIS_C(0x00);
    SET_TRIS_D(0x00);
    SET_TRIS_E(0x00);

    Vpv=0;
    Vbat=0;
    decharge=2;
    charge=3;

    for (i=0;i<=1;++i)
    {
        V[i]=0;
```

## Annexe1

---

```
    }
    setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);
    lcd_init();
    lcd_putc("\f");
    while (TRUE)
    {
        for (i=0;i<=1;++i)
        {
            mesure(i);
            delay_ms(100);
        }
        s=V[1]/0.2578;
        ss=V[0]/0.2941;
        lcd_putc("\f");
        printf(LCD_PUTC, "% fpv,% fbat ",ss,s);
        delay_ms(30);

        if (3.66<V[1]) // charge
        {
            output_bit( PIN_B4,0) ; //charge=1
            charge=4;
        }
        if(V[1]<3.24)
        {
            output_bit( PIN_B4,1);
            charge=3;
        }
        if(3.24<=V[1]<=3.66)
        {
            switch(charge)
            {
                case 4:output_bit( PIN_B4, 1);
                break;
                case 3:output_bit( PIN_B4, 0);
                break;
            }
        }

        }

    //////////////////////////////////////
    if (V[1]<2.99)
    {
        output_bit( PIN_B2, 0); // décharge=1
        decharge=1;
    }

    if (3.32<V[1])
    {
        output_bit( PIN_B2, 1);
    }
}
```

```
    decharge=2;
    }

    if(2.99<=V[1]<=3.32)
    {
        switch(decharge)
        {
            case 1:output_bit( PIN_B2, 0);
            break;
            case 2:output_bit( PIN_B2, 1);
            break;
        }
    }

}
}
```

### **II. Programme en C du contrôleur numérique avec la commande de charge MPPT(P&O) pour un PIC16F877 :**

```
#include <16F877.h>

#int_timer1
#int_timer2

#device ADC=10

#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP

#use delay(clock=20000000)

#include <lcd.c>

int i;

//float duty;

int16 value;

float V[4];

int decharge;

int charge;

float Vbat;

float ss;

float s;

int16 courant1,tension1;

int32 d=100;
```

# Annexe1

---

```
int32 courant,tension,puissance,puissance1;
int x1,x2;
void mesure(int i)
{
set_adc_channel( i);
delay_us(200);
    value = Read_ADC();
    V[i]=value;
V[i]=V[i]/1024*5;
tension1=V[0];
Vbat=V[1];
courant1=V[2];
}
void mppt()
{
puissance=courant*tension;////////// charge=1 avec mppt
    V[0]=tension;
    V[2]=courant;
    x1=(puissance>=puissance1);
    x2=(tension>=tension1);
    if((x1)&&(!x2))
    {
d+=5;
        if(d==0) d=3;
    }
else
    {
        d-=5;
        if(d<=3) d=100;
    }
}
```

# Annexe1

---

```
set_pwm1_duty (d);
    puissance1=puissance;
    tension1=tension;
    courant1=courant;
}
void main()
{
enable_interrupts(INT_TIMER1);
enable_interrupts(INT_TIMER0);
SET_TRIS_A(0xFF);
SET_TRIS_B(0x00);
SET_TRIS_C(0x00);
SET_TRIS_D(0x00);
SET_TRIS_E(0x00);
Vbat=0;
courant1=0;
tension1=0;
decharge=2;
charge=3;
for (i=0;i<=2;++i)
{
V[i]=0;
}
setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIV_2);
//configuration de la période T du signal MLI 30khz
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,164,1);
set_pwm1_duty (0);
```

# Annexe1

---

```
lcd_init();
lcd_putc('\f');
while (TRUE)
{
for (i=0;i<=2;++i)
{
measure(i);
delay_ms(100);
}
s=V[1]/0.2578;
ss=V[0]/0.2941;
lcd_putc('\f');
printf(LCD_PUTC, "%fpv,%fbat ",ss,s);
delay_ms(100);

if (4.05<V[1]) // charge sans mppt
{
set_pwm1_duty (0);  /// charge=0 ; //charge=1 sans mppt
charge=4;
}
if(V[1]<3.24)
{
mppt();
charge=3;
}
if(3.24<=V[1]<=4.05)
{
switch(charge)
{
case 4: mppt();
```

```
break;
case 3:set_pwm1_duty (0);  /// charge=0;
break;
}}
/////*****//
if (V[1]<2.99)
{
output_bit(PIN_B2, 0); // décharge=1 sans mppt
decharge=1;
}
if (3.32<V[1])
{ output_bit(PIN_B2, 1);
decharge=2;
}
if(2.99<=V[1]<=3.32)
{
switch(decharge)
{
case 1:output_bit( PIN_B2, 0);
break;
case 2:output_bit( PIN_B2, 1);
break;
}}
set_timer0(111);
}}
```

### III. Le jeu d'instructions du PIC 16F877

Si vous examinez le jeu d'instructions du 16F876 dans le détail, vous allez vous apercevoir qu'il est strictement identique à celui du 16F84, et, de ce fait, présente les mêmes limitations.

## Classement par lettre alphabétique :

ADDLW	ADD Literal to W
ADDWF	ADD W to File
ANDLW	AND Literal and W
ANDWF	AND W and File
BCF	Bit Clear File
BSF	Bit Set File
BTFSC	Bit Test File, Skip if Clear
BTFSS	Bit Test File, Skip if Set
CALL	CALL subroutine
CLRF	CLear File
CLRW	CLear W
CLRWDT	CLear Wach Dog Timer
COMF	COMplement File
DECF	DECrement File
DECFSZ	DECrement File, Skip if Zero
GOTO	
INCF	INCrement File
INCFSZ	INCrement File, Skip if Zero
IORLW	Inclusive OR Literal with W
IORWF	Inclusive OR W with File
MOVF	MOVE File
MOVLW	MOVE Literal to W
MOVWF	MOVE W to File
NOP	No Operation
OPTION	load OPTION register
RETFIE	RETurn From IntErrupt
RETLW	RETurn from subroutine with Literal in W
RETURN	RETURN from subroutine
RLF	Rotate Left File
RRF	Rotate Right File
SLEEP	
SUBLW	SUBtract Literal with W
SUBWF	SUBtract W from File
SWAPF	SWAP File
TRIS	TRISate port
XORLW	eXclusive OR Literal and W
XORWF	eXclusive OR W and File

## Annexe2

### I. Datasheet du régulateur de tension(LM7805) :



## LM78XX/LM78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

### Features

- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

### General Description

The LM78XX series of three terminal positive regulators are available in the TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

### Ordering Information

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature
LM7805CT	±4%	TO-220	-40°C to +125°C
LM7806CT			
LM7808CT			
LM7809CT			
LM7810CT			
LM7812CT			
LM7815CT			
LM7818CT			
LM7824CT			
LM7805ACT			
LM7806ACT			
LM7808ACT			
LM7809ACT			
LM7810ACT			
LM7812ACT			
LM7815ACT			
LM7818ACT			
LM7824ACT			

## Annexe2

### Block Diagram

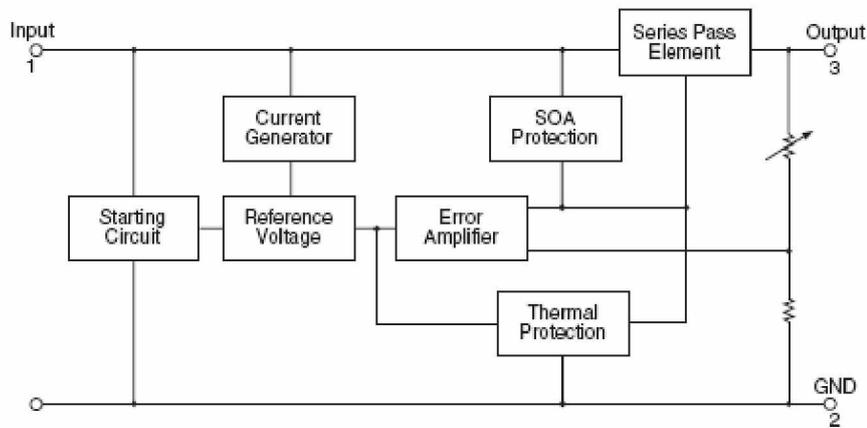


Figure 1.

### Pin Assignment

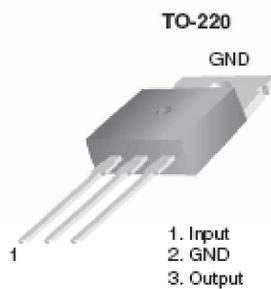


Figure 2.

### Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. The datasheet specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside datasheet specifications.

Symbol	Parameter		Value	Unit
$V_I$	Input Voltage	$V_O = 5V$ to $18V$	35	V
		$V_O = 24V$	40	V
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance Junction-Cases (TO-220)		5	$^{\circ}C/W$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction-Air (TO-220)		65	$^{\circ}C/W$
$T_{OPR}$	Operating Temperature Range	LM78xx	-40 to +125	$^{\circ}C$
		LM78xxA	0 to +125	
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		-65 to +150	$^{\circ}C$

## Annexe2

### II. Datasheet du comparateur (TLC272) :

#### TLC272, TLC272A, TLC272B, TLC272Y, TLC277 LinCMOS™ PRECISION DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS0915 – OCTOBER 1987 – REVISED AUGUST 1994

- **Trimmed Offset Voltage:**  
TLC277 . . . 500  $\mu\text{V}$  Max at 25°C,  
 $V_{\text{DD}} = 5\text{ V}$
- **Input Offset Voltage Drift . . . Typically**  
0.1  $\mu\text{V}/\text{Month}$ , Including the First 30 Days
- **Wide Range of Supply Voltages Over**  
**Specified Temperature Range:**  
0°C to 70°C . . . 3 V to 16 V  
-40°C to 85°C . . . 4 V to 16 V  
-55°C to 125°C . . . 4 V to 16 V
- **Single-Supply Operation**
- **Common-Mode Input Voltage Range**  
**Extends Below the Negative Rail (C-Suffix,**  
**I-Suffix types)**
- **Low Noise . . . Typically 25  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  at**  
 $f = 1\text{ kHz}$
- **Output Voltage Range Includes Negative**  
**Rail**
- **High Input impedance . . .  $10^{12}\ \Omega$  Typ**
- **ESD-Protection Circuitry**
- **Small-Outline Package Option Also**  
**Available in Tape and Reel**
- **Designed-in Latch-Up Immunity**

#### description

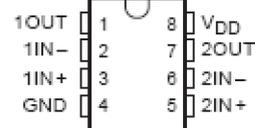
The TLC272 and TLC277 precision dual operational amplifiers combine a wide range of input offset voltage grades with low offset voltage drift, high input impedance, low noise, and speeds approaching that of general-purpose BiFET devices.

These devices use Texas instruments silicon-gate LinCMOS™ technology, which provides offset voltage stability far exceeding the stability available with conventional metal-gate processes.

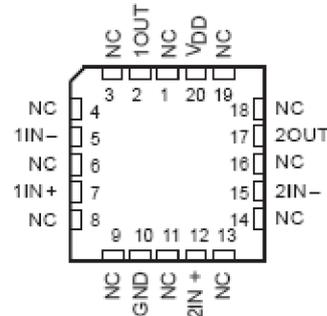
The extremely high input impedance, low bias currents, and high slew rates make these cost-effective devices ideal for applications which have previously been reserved for BiFET and NFET products. Four offset voltage grades are available (C-suffix and I-suffix types), ranging from the low-cost TLC272 (10 mV) to the high-precision TLC277 (500  $\mu\text{V}$ ).

These advantages, in combination with good common-mode rejection and supply voltage rejection, make these devices a good choice for new state-of-the-art designs as well as for upgrading existing designs.

D, JG, P, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)

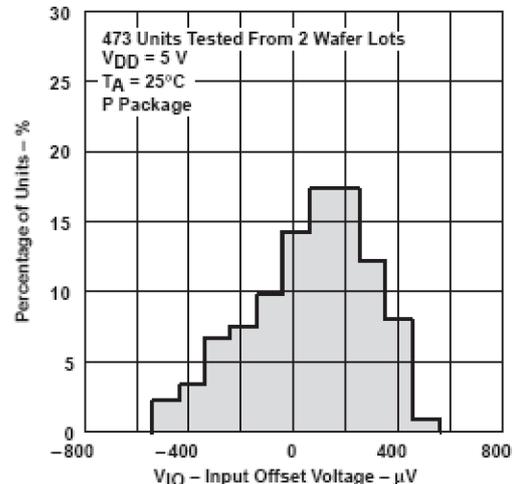


FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

DISTRIBUTION OF TLC277  
INPUT OFFSET VOLTAGE





## III.Datasheet du transistor (2N3906) :



2N3906

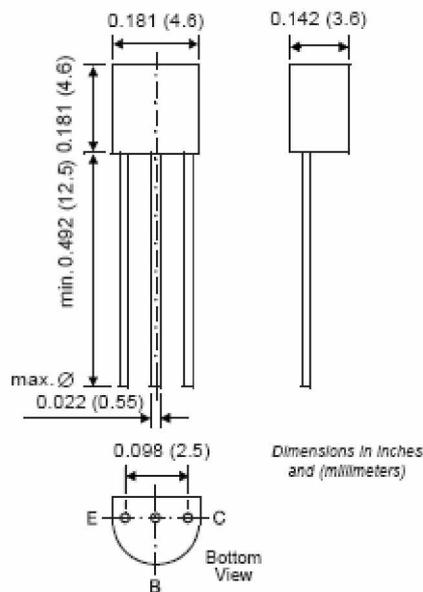
New Product

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

## Small Signal Transistor (PNP)



TO-226AA (TO-92)



## Features

- PNP Silicon Epitaxial Planar Transistor for switching and amplifier applications.
- As complementary type, the NPN transistor 2N3904 is recommended.
- On special request, this transistor is also manufactured in the pin configuration TO-18.
- This transistor is also available in the SOT-23 case with the type designation MMBT3906.

## Mechanical Data

Case: TO-92 Plastic Package

Weight: approx. 0.18g

Packaging Codes/Options:

E6/Bulk – 5K per container, 20K/box

E7/4K per Ammo mag., 20K/box

Maximum Ratings & Thermal Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$-V_{CE0}$	40	V
Collector-Base Voltage	$-V_{CB0}$	40	V
Emitter-Base Voltage	$-V_{EB0}$	5.0	V
Collector Current	$-I_C$	200	mA
Power Dissipation	$P_{tot}$	625 1.5	mW W
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	$R_{\theta JA}$	250 <sup>(1)</sup>	°C/W
Junction Temperature	$T_J$	150	°C
Storage Temperature Range	$T_S$	-65 to +150	°C

Note: (1) Valid provided that leads are kept at ambient temperature.

## Annexe2

### Electrical Characteristics ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Noise Figure	F	$-V_{CE} = 5\text{ V}$ , $-I_C = 100\ \mu\text{A}$ , $R_G = 1\ \text{k}\Omega$ , $f = 10\dots 15000\ \text{Hz}$	—	—	4	dB
Delay Time (see fig. 1)	$t_d$	$-I_{B1} = 1\ \text{mA}$ , $-I_C = 10\ \text{mA}$	—	—	35	ns
Rise Time (see fig. 1)	$t_r$	$-I_{B1} = 1\ \text{mA}$ , $-I_C = 10\ \text{mA}$	—	—	35	ns
Storage Time (see fig. 2)	$t_s$	$I_{B1} = -I_{B2} = 1\ \text{mA}$ , $-I_C = 10\ \text{mA}$	—	—	225	ns
Fall Time (see fig. 2)	$t_f$	$I_{B1} = -I_{B2} = 1\ \text{mA}$ , $-I_C = 10\ \text{mA}$	—	—	75	ns

Fig. 1: Test circuit for delay and rise time  
\* total shunt capacitance of test jig and connectors

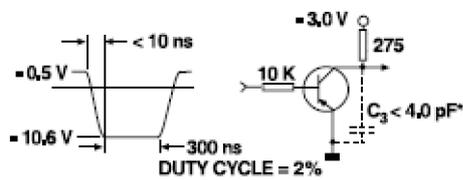
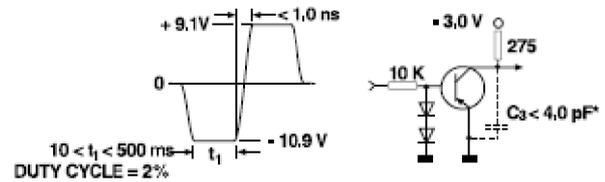


Fig. 2: Test circuit for storage and fall time  
\* total shunt capacitance of test jig and connectors



## III.Datasheet du mosfet(BUK9508):

Philips Semiconductors

Product specification

**TrenchMOS™ transistor  
Logic level FET****BUK9508-55****GENERAL DESCRIPTION**

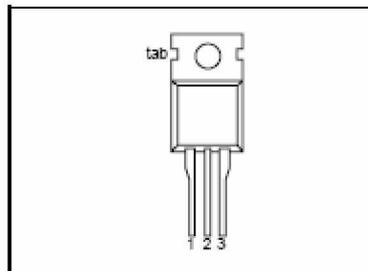
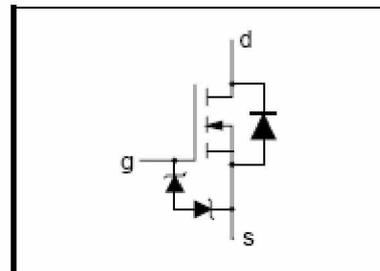
N-channel enhancement mode logic level field-effect power transistor in a plastic envelope using 'trench' technology. The device features very low on-state resistance and has integral zener diodes giving ESD protection up to 2kV. It is intended for use in automotive and general purpose switching applications.

**QUICK REFERENCE DATA**

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
$V_{DS}$	Drain-source voltage	55	V
$I_D$	Drain current (DC)	75	A
$P_{tot}$	Total power dissipation	187	W
$T_J$	Junction temperature	175	°C
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance $V_{GS} = 5\text{ V}$	8	mΩ

**PINNING - TO220AB**

PIN	DESCRIPTION
1	gate
2	drain
3	source
tab	drain

**PIN CONFIGURATION****SYMBOL****LIMITING VALUES**

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{DS}$	Drain-source voltage	-	-	55	V
$V_{DGR}$	Drain-gate voltage	$R_{GS} = 20\text{ k}\Omega$	-	55	V
$\pm V_{GS}$	Gate-source voltage	-	-	10	V
$I_D$	Drain current (DC)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	75	A
$I_{DM}$	Drain current (DC)	$T_{mb} = 100\text{ }^\circ\text{C}$	-	65	A
$I_{DM}$	Drain current (pulse peak value)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	240	A
$P_{tot}$	Total power dissipation	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	187	W
$T_{stg}, T_J$	Storage & operating temperature	-	- 55	175	°C

**ESD LIMITING VALUE**

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_C$	Electrostatic discharge capacitor voltage	Human body model (100 pF, 1.5 kΩ)	-	2	kV

**THERMAL RESISTANCES**

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYP.	MAX.	UNIT
$R_{th-jmb}$	Thermal resistance junction to mounting base	-	-	0.8	K/W
$R_{th-ja}$	Thermal resistance junction to ambient	in free air	60	-	K/W

**STATIC CHARACTERISTICS** $T_J = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

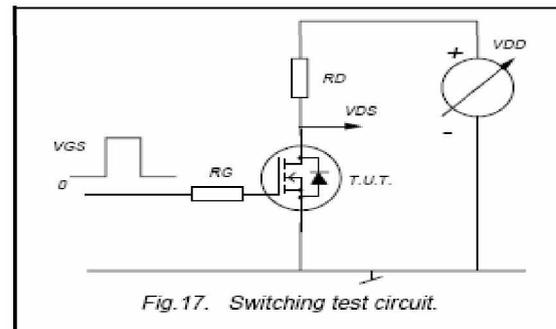
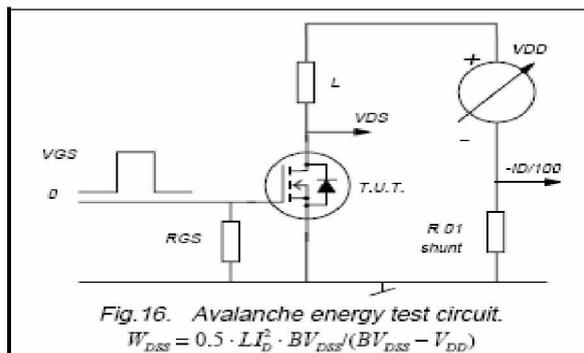
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}; I_D = 0.25\text{ mA}; T_J = -55^\circ\text{C}$	55	-	-	V
$V_{GS(TH)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}; I_D = 1\text{ mA}; T_J = 175^\circ\text{C}$	1.0	1.5	2.0	V
$I_{DSS}$	Zero gate voltage drain current	$V_{DS} = 55\text{ V}; V_{GS} = 0\text{ V}; T_J = -55^\circ\text{C}$	-	-	2.3	V
$I_{GSS}$	Gate source leakage current	$V_{GS} = \pm 5\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}; T_J = 175^\circ\text{C}$	-	0.05	10	$\mu\text{A}$
$\pm V_{(BR)GSS}$	Gate-source breakdown voltage	$I_G = \pm 1\text{ mA}; T_J = 175^\circ\text{C}$	10	-	-	V
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance	$V_{GS} = 5\text{ V}; I_D = 25\text{ A}; T_J = 175^\circ\text{C}$	-	6.5	8	$\text{m}\Omega$
			-	-	17	$\text{m}\Omega$

**DYNAMIC CHARACTERISTICS** $T_{mb} = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$g_{fs}$	Forward transconductance	$V_{GS} = 25\text{ V}; I_D = 25\text{ A}$	40	90	-	S
$C_{iss}$	Input capacitance	$V_{GS} = 0\text{ V}; V_{DS} = 25\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	5200	6900	pF
$C_{oss}$	Output capacitance		-	840	1000	pF
$C_{rss}$	Feedback capacitance		-	350	480	pF
$t_{d\text{ on}}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 30\text{ V}; I_D = 25\text{ A}; V_{GS} = 5\text{ V}; R_G = 10\ \Omega$	-	45	60	ns
$t_r$	Turn-on rise time		-	120	170	ns
$t_{d\text{ off}}$	Turn-off delay time		-	225	300	ns
$t_f$	Turn-off fall time		-	100	135	ns
$L_d$	Internal drain inductance	Measured from contact screw on tab to centre of die	-	3.5	-	nH
$L_d$	Internal drain inductance	Measured from drain lead 6 mm from package to centre of die	-	4.5	-	nH
$L_s$	Internal source inductance	Measured from source lead 6 mm from package to source bond pad	-	7.5	-	nH

**REVERSE DIODE LIMITING VALUES AND CHARACTERISTICS** $T_J = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

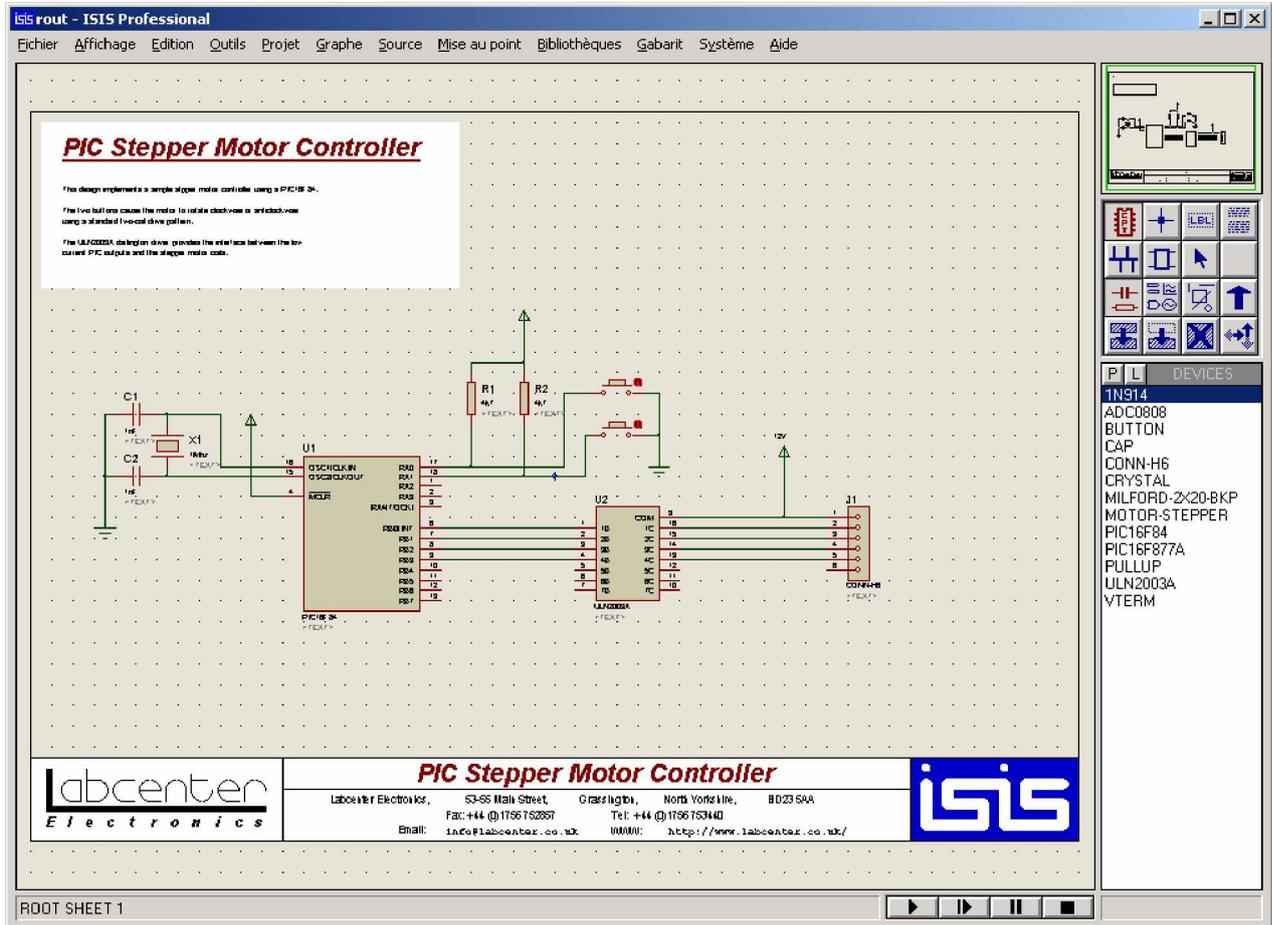
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$I_{DR}$	Continuous reverse drain current		-	-	75	A
$I_{DRM}$	Pulsed reverse drain current		-	-	240	A
$V_{SD}$	Diode forward voltage	$I_F = 25\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}$	-	0.85	1.2	V
		$I_F = 75\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}$	-	1.0	-	V
$t_{rr}$	Reverse recovery time	$I_F = 75\text{ A}; -di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}; V_{GS} = -10\text{ V}; V_R = 30\text{ V}$	-	65	-	ns
$Q_{rr}$	Reverse recovery charge		-	0.18	-	$\mu\text{C}$

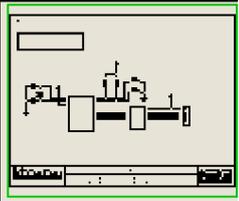
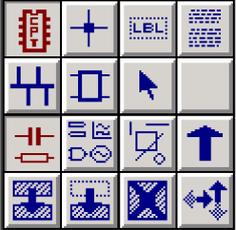


## I. Présentation du logiciel proteus 7 professional

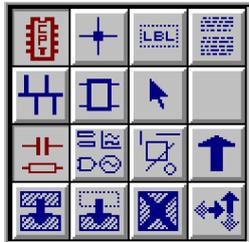
### 1 Démarrer

#### 1.1 L'écran Isis



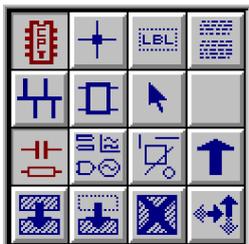
	Nom du fichier	ROOT SHEET 1	Message
Fichier Affichage Edition Outils Projet Graphe	Menu		Touches magnéscope
	Vue d'ensemble		Boite à outils

## 1.2 La boîte à outils



	Mode principal
	Mode gadget
	Mode graphique
	Rotation
	Miroir
	Effacement bloc
	Déplacement bloc
	Copie de bloc

### 1.2.1 Mode principal

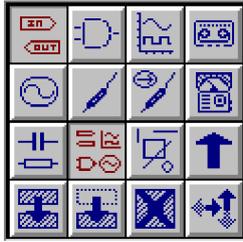


	Composant
	Point de connexion
	Label
	Texte
	Bus
	Sous-circuit
	Edition

### 1.2.2 Mode gadget

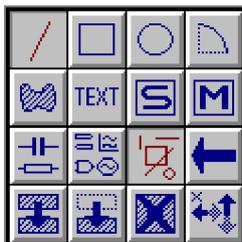
	Terminaisons
--	--------------

## Annexe3



	Broches pour créer des sous-circuits
	Graphes pour affichage de la simulation
	Cassette pour séparer l'analogique du numérique
	Générateurs
	Sonde de tension
	Sonde de courant
	Point de fonctionnement d'un composant

### 1.2.3 Mode graphique



	Ligne
	Rectangle
	Cercle
	Arc de cercle
	Forme fermée
	Texte
	Symboles
	Marqueur

## 2 Quelques actions

### 2.1 Sélectionner un composant

Cliquer sur le composant avec le bouton **DROIT** de la souris. Le composant sélectionné devient rouge

Si on clique avec le bouton droit sur un composant déjà sélectionné : il s'efface !!

Pour le récupérer cliquer sur : « *Edit / Undo* »

### 2.2 Désélectionner un composant

Cliquer hors du composant avec le bouton **DROIT** de la souris.

### 2.3 Sélectionner une zone de composants

Maintenir le bouton **DROIT** de la souris enfoncé et encadrer la zone. Les composants sélectionnés deviennent rouge.

### 2.4 Annuler la dernière action

Cliquer sur : « *Edit / Undo* » ou la touche **U**

### 2.5 Effacer

Cliquer **deux fois** sur l'élément à supprimer avec le bouton **DROIT** de la souris.

### 2.6 Zoom

Pour voir les composants **plus grands** : Cliquer sur « *View / Zoom In* » ou la touche **F6**. Le zoom est centré sur la position de la souris. (Pour se déplacer vers les zones hors écran, cliquer sur la vue d'ensemble.)

REMARQUE : Autre méthode pour agrandir une zone : maintenir la touche « majuscule » du clavier enfoncée et sélectionner la zone avec la souris (clic gauche maintenu pendant le déplacement de la souris).

Pour agrandir le champ de vision (voir les composants **plus petits**) : Cliquer sur « *View / Zoom Out* » ou la touche **F7**

Pour afficher tout le schéma à l'écran : Cliquer sur « *View / Zoom All* » ou la touche **F8**

### 2.7 Grille de placement des composants

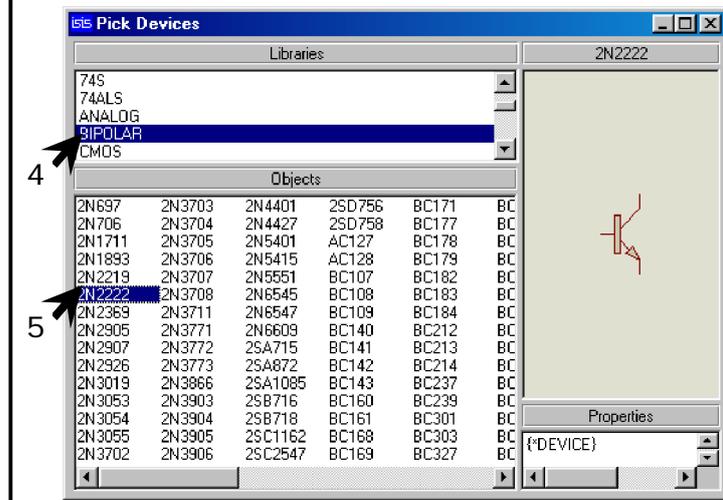
Pour aligner correctement les composants en sélectionnant un pas de grille : Cliquer sur « *View / Snap XX* » (XX étant la taille de la grille)

REMARQUE : Pour que la grille soit visible il faut cocher l'option « *View / Grid* »

## 3 Edition d'un nouveau circuit

### 3.1 Sélection des composants à utiliser

1.  Cliquer sur le bouton "Main mode".
2.  Cliquer sur le bouton "Component".
3.  Cliquer sur le bouton "Pick Device".



4. Choisir la librairie convenable.
5. Cliquer **deux fois** sur le composant pour l'ajouter à la sélection

#### 3.1.1 REMARQUE :

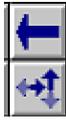
Pour ajouter d'autres composants refaire l'étape de 4 à 6

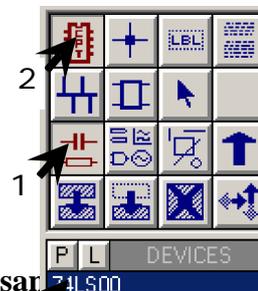
Pour choisir plus rapidement un composant :  
En mode saisie de schéma, appuyer sur la touche «P» du clavier puis taper le nom du composant !

### 3.2 Ajout d'un composant sur le schéma

1. Cliquer sur le bouton "Main mode".
2. Cliquer sur le bouton "Component".
3. Cliquer sur le composant choisi.

Placer la souris où le composant doit être positionné. Cliquer avec le bouton **gauche**. Le composant est placé

 Les boutons « Orientation » et « X/Y Mirror » permettent de positionner correctement le co

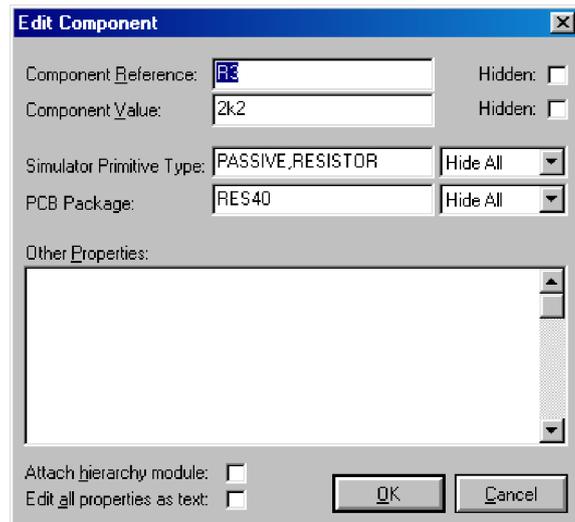


#### 3.2.1 Edition des caractéristiques d'un composant

- Sélectionner le composant
- Cliquer sur le corps du composant. La fenêtre de propriétés du composant s'ouvre.

Multiplicateurs de valeurs :

- $10^{12}$  (Téra) Ø T
- $10^9$  (Giga) Ø G
- $10^6$  (Méga) Ø M ou MEG
- $10^3$  (kilo) Ø k
- $10^0$  Ø pas de suffixe



Component Reference: R3	Référence
Component Value: 2k2	Valeur
PCB Package: RES40	Boîtier (pour le routage)

### 3.3 Connecter les composants

1. Cliquer sur la broche du 1<sup>er</sup> composant à relier (une croix s'ajoute à la souris lorsqu'elle est bien positionnée)
2. Cliquer sur la broche du 2<sup>ème</sup> composant à relier.

**REMARQUE :** Vérifier que l'option « Tool / Wire Auto Router » est bien sélectionnée pour que le cheminement de la connexion soit automatique.

### 3.4 Déplacer un composant

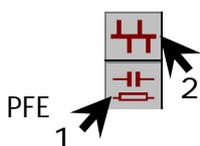
1. Sélectionner le composant
2. Maintenir le bouton gauche de la souris enfoncé jusqu'à la position choisie.

### 3.5 Copier, déplacer une zone

1. Sélectionner la zone
2.  Bouton « Block Copy » : Pour copier la zone
3.  Bouton « Block Move » : Pour déplacer la zone
4. Déplacer la souris vers la position choisie
5. Cliquer
6. Cliquer avec le bouton de droite pour sortir de ce mode

### 3.6 Placer un bus

1. entrer dans le mode « principal»

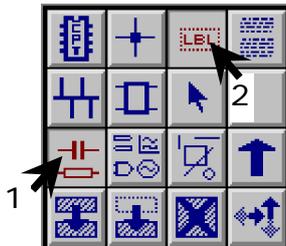


## Annexe3

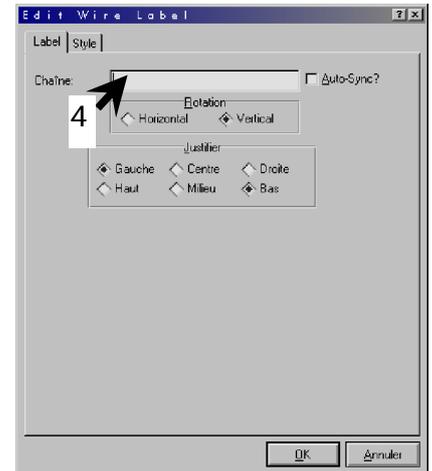
2. cliquer sur le bouton « bus »
3. cliquer sur le point de départ du bus
4. cliquer sur les points de passage du bus
5. cliquer sur le bouton **droit** de la souris pour terminer le bus

### 3.7 Affecter un label à une connexion

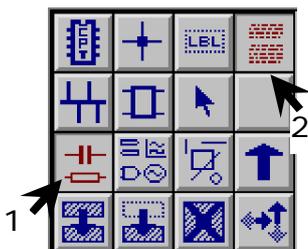
Un label permet d'affecter un même potentiel électrique à chaque fil du schéma (non connectés entre eux) portant le même label. C'est très utile pour les alimentations (par exemple un fil peut porter le label +12V)



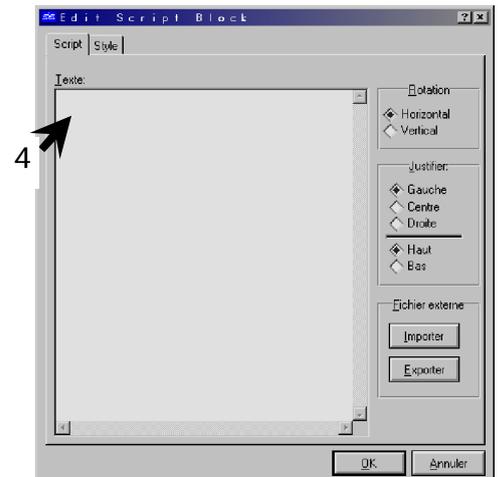
1. entrer dans le mode « principal»
2. cliquer sur « label de fil »
3. cliquer sur le fil de connexion
4. saisir le label



### 3.8 Ajouter du texte



1. entrer dans le mode « principal»
2. cliquer sur « script texte»
3. cliquer sur le schéma
4. saisir le texte



### 3.9 Vérification du respect des règles électriques

1. cliquer sur « Outils / Vérification des règles électriques »
2. consulter le compte rendu. Le message « *No ERC errors found* » signifie qu'aucune erreur n'a été détectée.

**REMARQUE :** Cette commande vérifie s'il n'y a pas de broches de composants non reliés, si des sorties de circuits intégrés ne sont pas court-circuitées... Mais il ne détecte pas les erreurs de principe ou de calculs de composants.

### 3.10 Génération de la nomenclature des composants

Cliquer sur « Outils / Liste du matériel / Défaut »

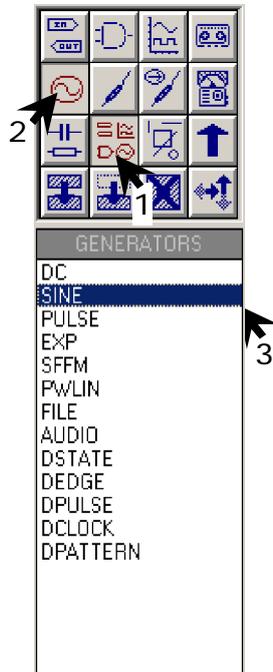
## 4 Simulation

Dans un premier temps, il faut saisir le schéma à partir de ISIS. Ensuite, il faut définir les types de générateurs, les types de graphes à utiliser et les types de sondes.

Tous les outils utiles se trouvent dans le mode **Gadget**.

## 4.1 Ajout d'un générateur

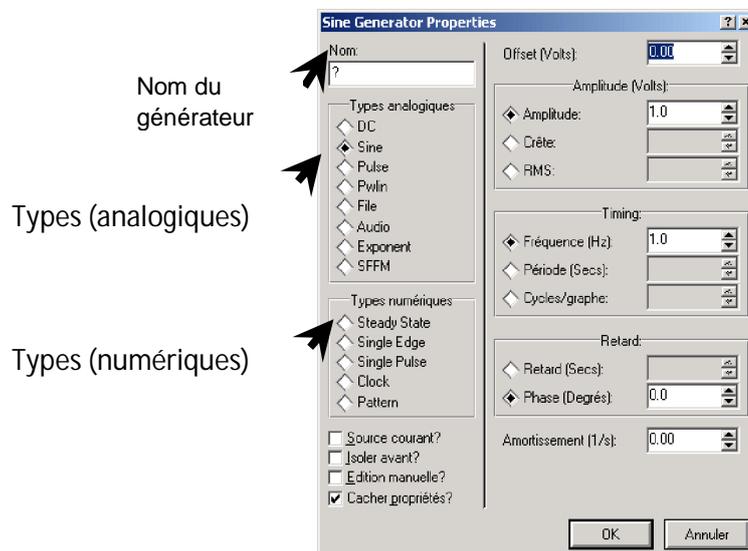
### 4.1.1 Placement



1. entrer dans le mode « gadgets »
2. cliquer sur « générateur »
3. choisir le générateur
4. placer le générateur dans le schéma

### 4.1.2 Edition des caractéristiques du générateur

Sélectionner le générateur puis cliquer sur le corps du générateur. La fenêtre de propriétés s'ouvre :



### 4.1.3 Différents types de générateurs

#### Générateurs de signaux analogiques

**DC** : Source de tension continue

**Sine** : Générateur de signal sinusoïdal, avec contrôle de l'amplitude, de la fréquence et de la phase.

**Pulse** : Générateur d'impulsion analogique, avec contrôle de l'amplitude, de la période et des temps de montée / descente.

## Annexe3

**Exp** : Générateur d'impulsion exponentielle qui produit une impulsion identique à la charge/décharge d'un circuit RC.

**SFFM** : Générateur de fréquence FM simple qui produit une onde définie par la fréquence de modulation d'une onde sinusoïdale par une autre.

**Pwlin** : Générateur linéaire Piece-Wise pour des signaux ou formes d'ondes arbitraires.

**File** : Comme ci-dessus, mais les valeurs sont contenues dans un fichier ASCII.

**Audio** : Utilise les fichiers WAV de Windows comme forme d'onde en entrée. Ils sont particulièrement utiles en relation avec les graphes Audio, ils permettent d'écouter les effets d'un circuit sur les signaux audio..

### Générateurs de signaux logiques

**DState** : Niveau logique constant.

**DEdge** : Transition logique simple ou front.

**DPulse** : Impulsion logique simple.

**DClock** : Signal d'horloge.

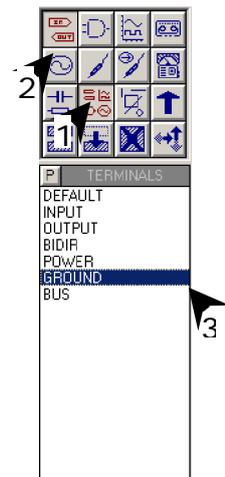
**DPattern** : Séquence arbitraire de niveaux logiques.

## 4.2 La masse

Toutes les mesures se font par rapport à la masse.

Il faut IMPERATIVEMENT la connecter.

1. entrer dans le mode « gadgets »
2. cliquer sur « terminals »
3. choisir la masse « ground »
4. placer la masse sur le schéma



## 4.3 Placer les sondes

### 4.3.1 Placement

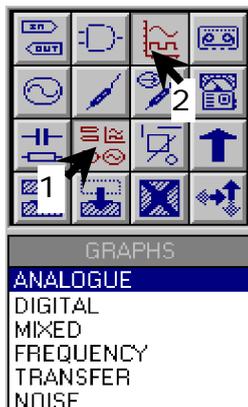


entrer dans le mode « gadgets »

1. cliquer sur  pour placer une sonde de tension ou sur  pour une sonde de courant
2. placer la sonde sur le schéma

## 4.4 Les graphes

### 4.4.1 Placement



1. entrer dans le mode « gadgets »
2. cliquer sur le bouton « graphe »
3. choisir le type de graphe
4. tracer un rectangle avec la souris où le graphe doit être positionné.

## 4.4.2 Propriétés

**Analogue** : Tensions, courants (ou valeurs calculées) en fonction du temps.

**Digital** : Signaux numériques en fonction de temps.

**Mixed** : Tensions, courants, signaux numériques en fonction du temps.

**Frequency** : Gains et phases en fonction de la fréquence.

**DC Sweep** : Tension ou courant à un point de fonctionnement donné en fonction d'un paramètre de contrôle.

**AC Sweep** : Gains et phases à une fréquence donnée en fonction d'un paramètre de contrôle.

**Transfer** : Tension DC en fonction de la valeur de une ou de deux tensions d'entrée de balayage.

**Noise** : Niveau de bruit en fonction de la fréquence.

**Distorsion** : Harmoniques de distorsion d'ordre 2 et 3 en fonction de la fréquence. Peut également être utilisé pour montrer la distorsion d'intermodulation entre deux fréquences en entrée.

**Fourier** : Analyse spectrale (contenu des harmoniques).

**Audio** : Identique au graphe 'analogue' avec la fonctionnalité supplémentaire que la forme d'onde résultante peut être écoutée via une carte son.

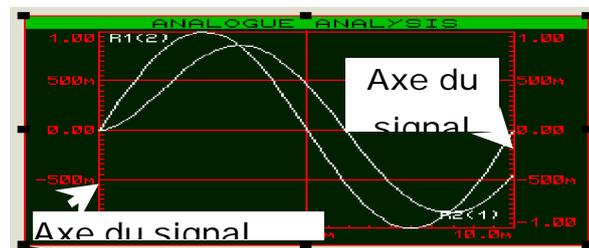
## 4.4.3 Lire un graphe

### 4.4.4 Affecter une sonde à un graphe

1. Sélectionner la sonde représentative du signal à visualiser.
2. Faire glisser la sonde dans le graphe.
3. Refaire cette manipulation pour chaque sonde.

**REMARQUE** : Pour visionner des signaux sur 2 échelles d'amplitude différentes, il est possible de faire glisser le nom des grandeurs à visualiser du haut-gauche vers le bas droite du graphe.

Pour agrandir



Poignée pour changer la dimension

#### 4.4.4.1 Changer les dimensions d'un graphe

1. Sélectionner le graphe.
2. Faire glisser les poignées jusqu'à la dimension souhaitée.

## 4.4.5 IMPORTANT :

Pour lancer la simulation :

Pointer le graphe et appuyer sur la **barre d'espace**

#### 4.4.5.1 Afficher un graphe en plein écran

**Pour agrandir** : Cliquer une fois sur le bandeau (vert) en haut de l'écran

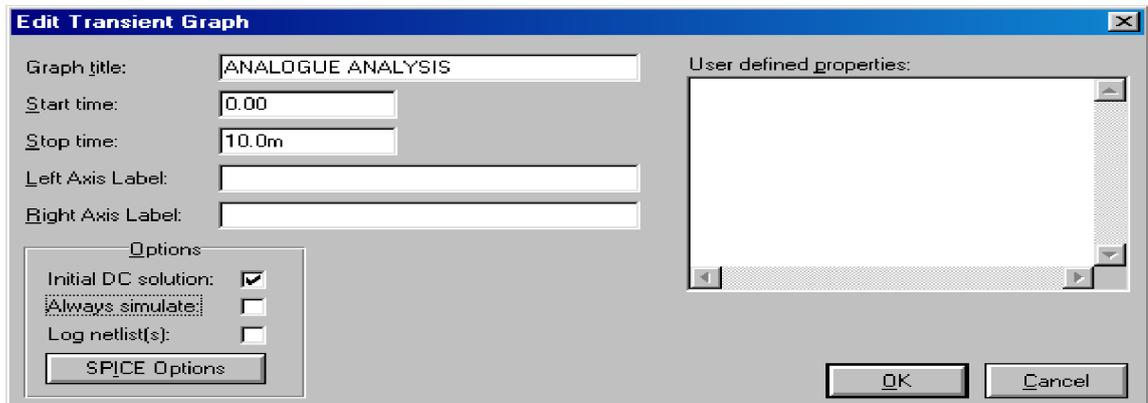
Dans ce mode, il suffit de cliquer sur l'écran pour placer un axe vertical. En bas s'affiche la valeur précise du signal à cet instant. Pour placer un 2<sup>ème</sup> axe, maintenir appuyé la touche « Ctrl » du clavier et cliquer sur l'écran.

## Annexe3

Pour retrouver la taille normale : Cliquer une fois sur le bandeau (vert) en haut de l'écran

### 4.4.5.2 Changer les caractéristiques d'affichage

1. Sélectionner le graphe.
2. Cliquer sur le graphe. La fenêtre de propriétés s'ouvre.



Start time: 0.00	Instant de départ de l'affichage
Stop time: 10.0m	Instant de fin de l'affichage
Left Axis Label: Right Axis Label:	Nom des axes
SPICE Options	Paramètres de simulation avancée

## 4.5 Les appareils de mesure

Les appareils de mesurent sont des « éléments animés » qui se trouvent dans la librairie « ACTIVE »

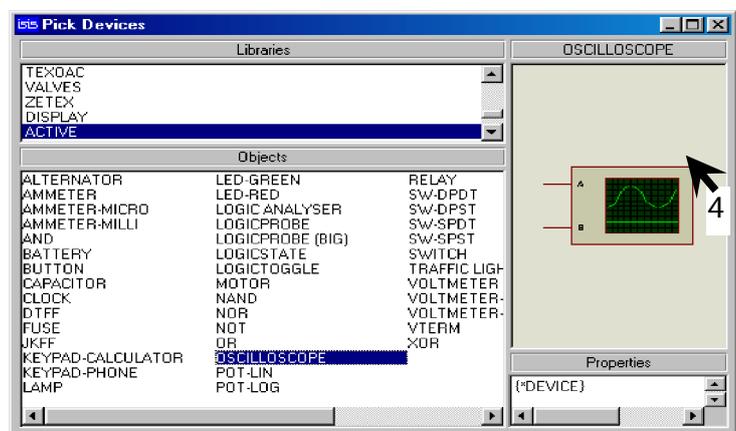
### 4.5.1 Exemple de placement d'un oscilloscope :

### 4.5.2 Ajouter l'oscilloscope à la bibliothèque :

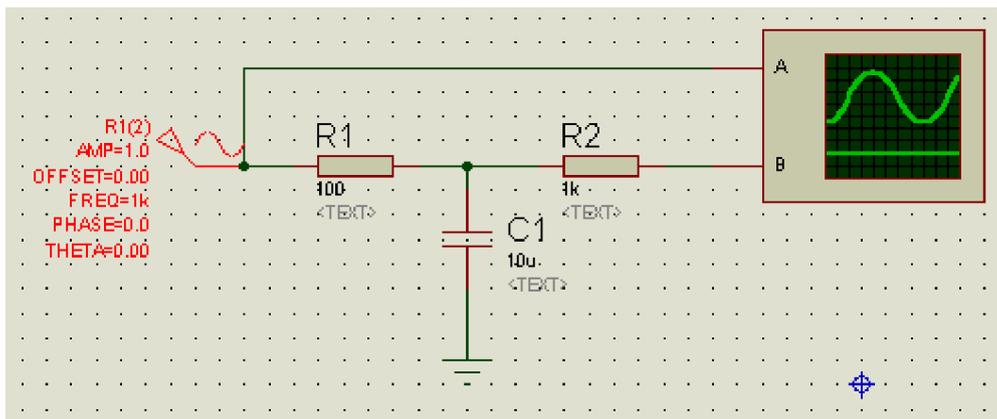
1. Cliquer sur le bouton "Pick Device".



2. Choisir la librairie « ACTIVE ».
3. Cliquer deux fois sur «Oscilloscope»
4. Fermer la fenêtre

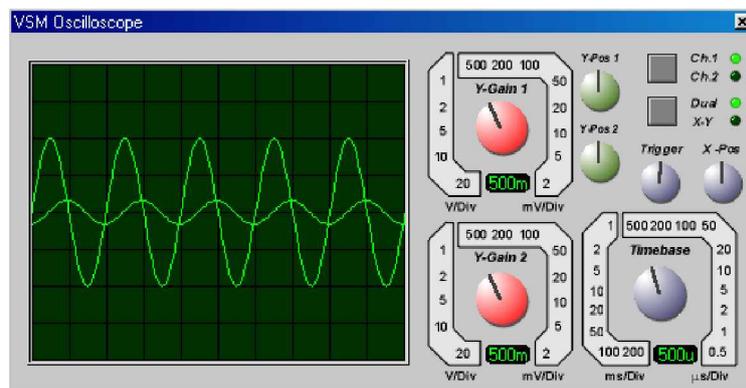


## 4.5.3 Placer et relier l'oscilloscope :



## 4.5.4 Lancer l'animation : Touche « Play » du magnétoscope

## 4.5.5 L'oscilloscope s'affiche



## 5 Préparation au routage

1. Lors de l'édition des propriétés d'un composant, affecter le boîtier convenable
2. Cliquer sur « Tools / Netlist to ARES » pour générer la liste des composants ainsi que le chevelu.

ARES se lance automatiquement.

Component Reference: <input type="text" value="R1"/>	Nom du boîtier
Component Value: <input type="text" value="1k"/>	Valeur donnée
PCB Package: <input type="text" value="RES40"/>	Type de boîtier

## 6 Exemple

### 6.1 Mettre en place un composant

#### 6.1.1 Cliquez sur le mode principal



#### 6.1.2 Cliquez sur P



#### 6.1.3 Choisissez le composant

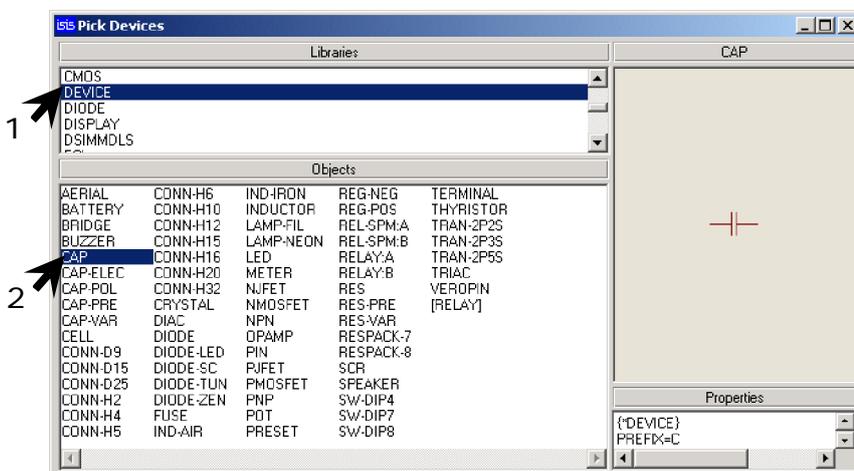
1. choisir la librairie
2. double cliquer sur le composant

#### Remarque :

Plusieurs composants peuvent être insérés en même temps.

Les condensateurs (CAP) et résistances (RES) se trouvent dans la librairie DEVICE

L'oscilloscope (OSCILLOSCOPE) se trouve dans la librairie ACTIVE

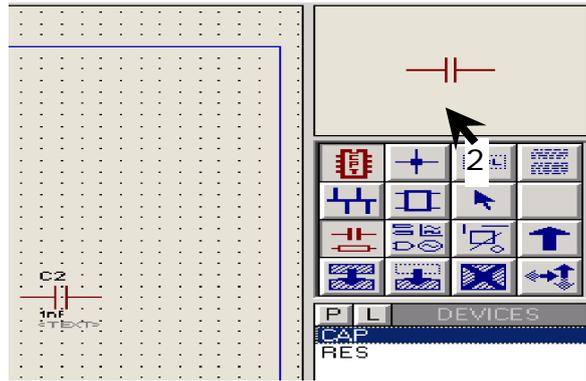


#### 6.1.4 Le composant sélectionné apparaît dans la fenêtre « device »



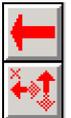
#### 6.1.5 Placer le composant

1. le sélectionner,
2. il apparaît dans la fenêtre
3. le placer à l'aide du cliquer gauche



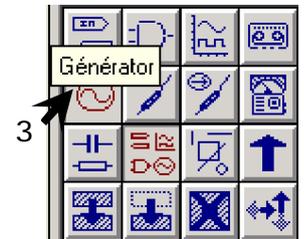
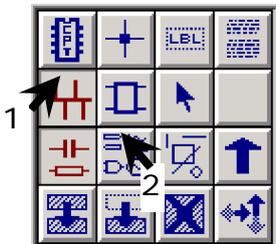
## 6.1.6 Remarque

1. On peut sélectionner un composant sur la fenêtre principale à l'aide du clic droit, il apparaît en rouge et peut être orienté à l'aide des flèches du menu
2. UN DOUBLE CLIQUE DROIT LE SUPPRIME

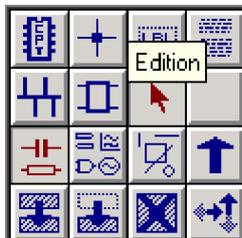


## 6.1.7 Réalisation du circuit

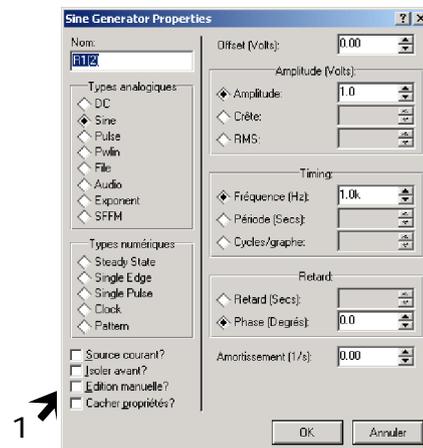
1. sélectionner les boutons bus afin de relier les composants entre eux
2. ajouter le masse GROUND qui se trouve dans le mode « gadget »
3. ajouter une source alternative qui se trouve dans le menu « gadget » - « Générateur »
4. ajouter l'oscilloscope qui se situe dans « Device » - « Active »



## 6.1.8 Modifier les valeurs des composants



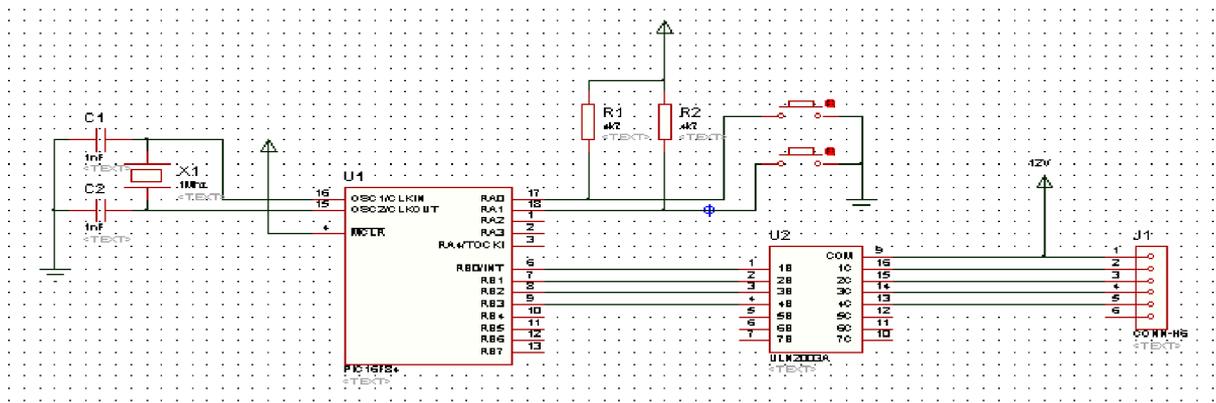
Aller dans le menu « Edition »  
Simple cliquer sur le composant voulu Modifier les valeurs



## Routage

### 6.1.9 Création du circuit

On reprend le circuit disponible dans le dossier « Samples » situé dans le répertoire d'installation du logiciel.  
C:\Program Files\Labcenter Electronics\Proteus 5.2 Professional\SAMPLES\Motor Examples\PICSTEPR.DSN



Remarque : le moteur a été remplacé par un connecteur de type H6.  
Il est aussi possible de placer une veropin sur chaque entrée sortie.

## 6.2 Exportation vers Arès



Arès s'ouvre automatiquement et demande de choisir les boîtiers des composants :



Nous choisissons :

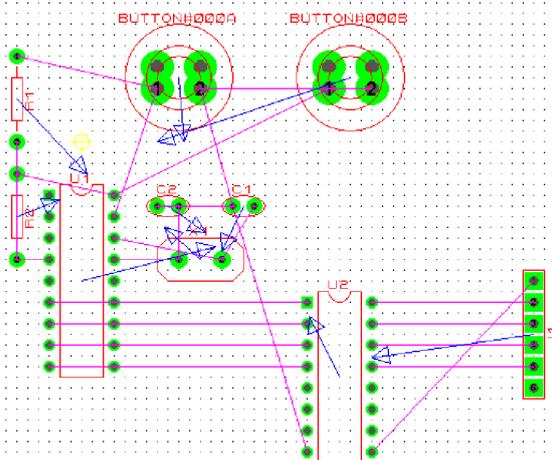
\*SW-PUSH1 pour les deux boutons

\*RES40 pour les résistances

Les autres boîtiers sont sélectionnés automatiquement.

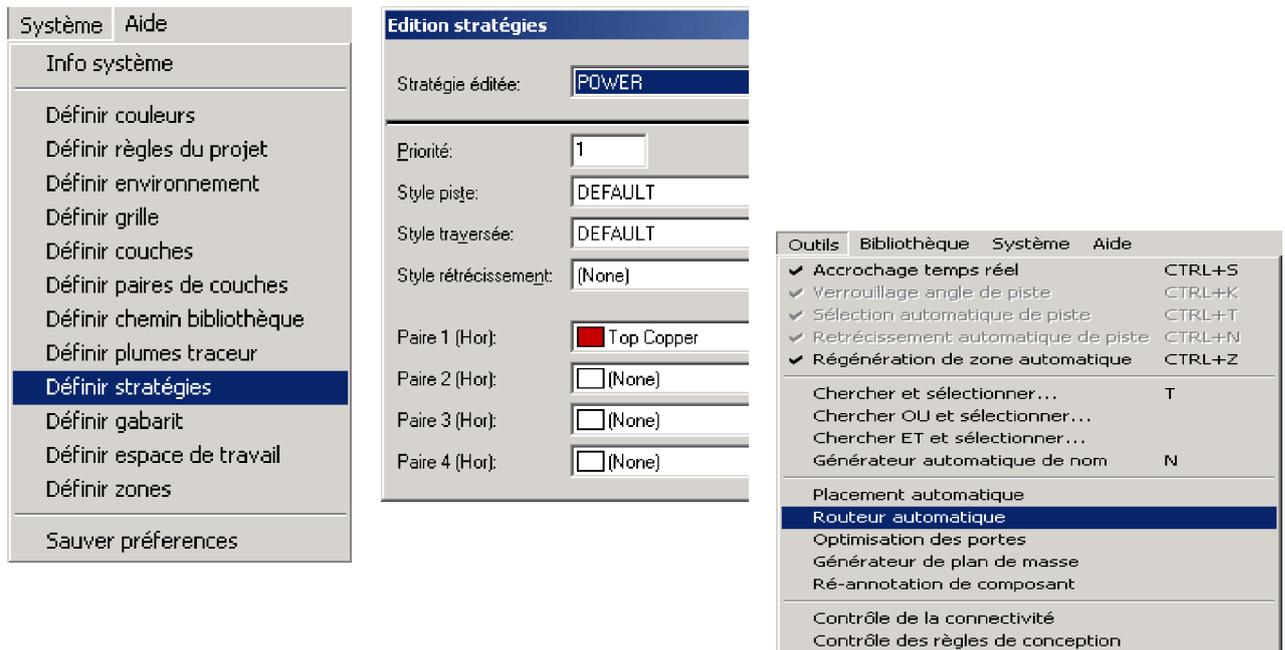
## 6.3 Routage

### 6.3.1 Placer les composants de manière optimale.



L'objectif est de démêler le chevelu

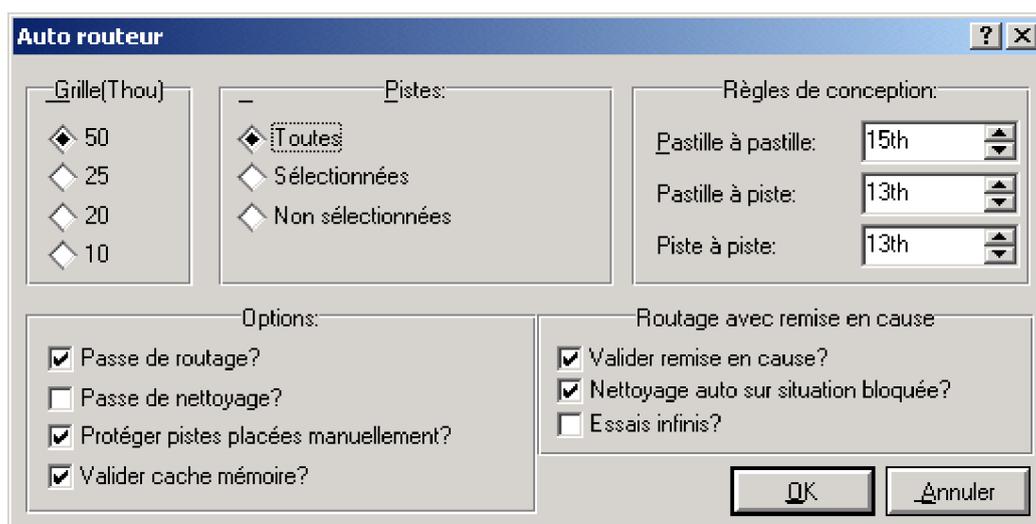
## 6.3.2 Configuration du routage :



Pour router en simple face choisir la même configuration horizontale (Hor.) et verticale (Vert.). Sélectionner Bottom Copper pour les 2 stratégies POWER et SIGNAL par exemple.  
 La largeur des pistes est choisie dans la fenêtre Style piste. Choisir taille 40 pour éviter tout problèmes lors de la gravure.

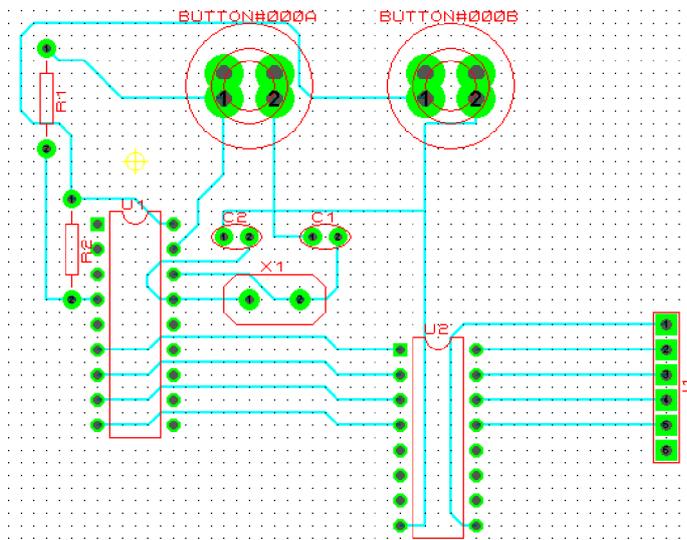
Pour router en double face laisser la configuration initiale.

Lancer le routage automatique :



# Annexe3

Le typon ci-dessous apparaît :



## II.Présentation du compilateur CCS C :

### Remarque :

A cause de la non disponibilité du temps pour ce projet on n'a pas pu de faire la traduction de cette présentation.

### 1. PCB, PCM and PCH Overview

The PCB, PCM, and PCH are separate compilers. PCB is for 12-bit opcodes, PCM is for 14-bit opcodes, and PCH is for 16-bit opcode PIC® microcontrollers. Due to many similarities, all three compilers are covered in this reference manual. Features and limitations that apply to only specific microcontrollers are indicated within. These compilers are specifically designed to meet the unique needs of the PIC® microcontroller. This allows developers to quickly design applications software in a more readable, high-level language.

When compared to a more traditional C compiler, PCB, PCM, and PCH have some limitations. As an example of the limitations, function recursion is not allowed. This is due to the fact that the PIC® has no stack to push variables onto, and also because of the way the compilers optimize the code. The compilers can efficiently implement normal C constructs, input/output operations, and bit twiddling operations. All normal C data types are supported along with pointers to constant arrays, fixed point decimal, and arrays of bits

### 2.Directories

The compiler will search the following directories for Include files.

- Directories listed on the command line
- Directories specified in the .PJT file
- The same directory as the source file

By default, the compiler files are put in C:\Program Files\PICC and the example programs and all Include files are in C:\Program Files\PICC\EXAMPLES.

The compiler itself is a DLL file. The DLL files are in a DLL directory by default in C:\Program Files\PICC\DLL. Old compiler versions may be kept by renaming this directory.

Compiler Version 4 and above can tolerate two compilers of different versions in the same directory. Install an older version (4.xx ) and rename the devices4.dat file to devices4X.dat where X is B for PCB, M is for PCM, and H is for PCH. Install the newer compiler and do the same rename of the devices4.dat file.

### 3.Standard C Include Files :

Erno.h, float.h, limits.h, local.h, stdio.h, setjmp.h, stdeff.h, stdlib.h

### 4. File Formats (formats des fichiers) :

The compiler can output 8-bit hex, 16-bit hex, and binary files. Three listing formats are available: 1) Standard format resembles the Microchip tools, and may be required by other Third-Party tools. 2) Simple format is generated by compiler and is easier to read. 3) Symbolic format uses names versus addresses for registers. The debug files may be output as Microchip .COD file, Advanced Transdata .MAP file, expanded .COD file for CCS debugging or MPLAB 7.xx .COF file. All file formats and extensions may be selected via Options File Associations option in Windows IDE.

.C This is the source file containing user C source code.

.H These are standard or custom header files used to define pins, register, register bits, functions and preprocessor directives.

.PJT This is the project file which contains information related to the project.

.LST This is the listing file which shows each C source line and the associated assembly code generated for that line.

.SYM This is the symbol map which shows each register location and what program variables are stored in each location.

.STA The statistics file shows the RAM, ROM, and STACK usage. It provides information on the source codes structural and textual complexities using Halstead and McCabe metrics.

.TRE The tree file shows the call tree. it details each function and what functions it calls along with the ROM and RAM usage for each function.

.HEX The compiler generates standard HEX files that are compatible with all programmers.

.COF This is a binary containing machine code and debugging information.

.COD This is a binary file containing debug information.

.RTF The output of the Documentation Generator is exported in a Rich Text File format

which can be viewed using the RTF editor or wordpad.

**.RVF** The Rich View Format is used by the RTF Editor within the IDE to view the Rich Text File.

**.DGR** The .DGR file is the output of the flowchart maker.

**.ESYM** This file is generated for the IDE users. The file contains Identifiers and Comment information. This data can be used for automatic documentation generation and for the IDE helpers.

**.OSYM** This file is generated when the compiler is set to export a relocatable object file. This file contains a list of symbols for that object.

### 5. EXAMPLE PROGRAMS:

A large number of example programs are included with the software. The following is a list of many of the programs and some of the key programs are re-printed on the following pages. Most programs will work with any chip by just changing the #INCLUDE line that includes the device information. All of the following programs have wiring instructions at the beginning of the code in a comment header. The SIOW.EXE program included in the program directory may be used to demonstrate the example programs. This program will use a PC COM port to communicate with the target.

Generic header files are included for the standard PIC® parts. These files are in the DEVICES directory. The pins of the chip are defined in these files in the form PIN\_B2. It is recommended that for a given project, the file is copied to a project header file and the PIN\_xx defines be changed to match the actual hardware. For example; LCDRW (matching the mnemonic on the schematic). Use the generic include files by placing the following in your main .C file:

```
#include <16C74.H>
```

#### 5.1 LIST OF COMPLETE EXAMPLE PROGRAMS (in the EXAMPLES directory)

##### **EX\_14KAD.C**

An analog to digital program with calibration for the PIC14000

##### **EX\_1920.C**

Uses a Dallas DS1920 button to read temperature

## Annexe3

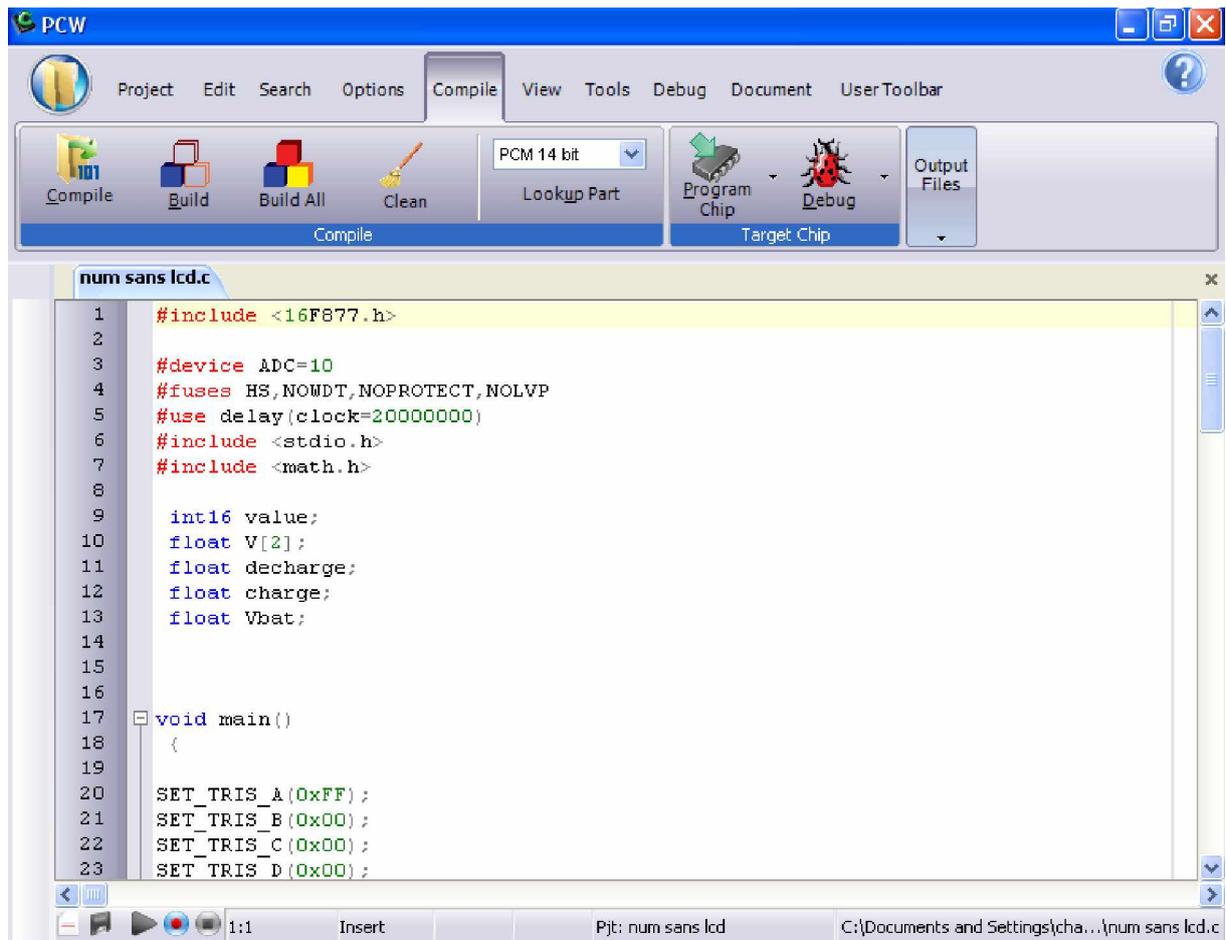
### EX\_8PIN.C

Demonstrates the use of 8 pin PICs with their special I/O requirements

### EX\_92LCD.C

Uses a PIC16C92x chip to directly drive LCD glass.....

Voici une figure qui montre l'interface du compilateur :



## I. Les différents régulateurs des batteries :



Régulateur PR à 12980,00 DA

Régulateur PR Sélection automatique de tension de 12 à 24 Volts. Puissance de 10 à 30 A. Régulation en trois phases par modulation de largeur d'impulsion (PWM).



Régulateur solsum à 4400,00 DA

Courant max.	6 A
Tension	12 / 24 Volts
Indice de protection	IP22
Section max. des câbles	4mm <sup>2</sup>
Affichage LCD	Non



Régulateur Tristar Solaire et éolien : 12/24V à 24200,00 DA



Régulateur Tarom : à 29920,00 DA



Régulateur solaire Solsum 6.6: 12/24 V/6A à 5209,6DA

## Annexe4

---



**Régulateur solaire Sunsafer à 8551,40 DA**

**Intensité nominale du courant d'origine solaire : 6,5 A**

**Charge nominale : 6A**

**Surcharge du courant de 25% : 5 min.**

**Batterie à bac hermétique : 14,1V**

**Batterie humide : 14,4 V**

**Point de délestage : 11,5 V**

**Réenclenchement (LVD) : 12,6 V**

**Compensation de température (mV/°C) : -28**

**Consommation : de 6 mA à 10 mA**

**Température de fonctionnement : -40 °C à + 85 °C**



**Régulateur solaire Sunsafer 10A/12 V à 8959,50 DA**



**Régulateur solaire Solarix Sigma 12/24 V/10A à 14544,2 DA**



**Régulateur solaire TAROM 235 : 12/24 V/35A à 34731,40 DA**



**TARCOM RS232 à 90736,80 DA**

## II. Fiche de la batterie NP7-12 :

**BATTERIE STATIONNAIRE ETANCHE  
AU PLOMB A RECOMBINAISON DE GAZ  
REGULEE PAR SOUPAPES**



**NP7-12 12V 7Ah**

**Tension nominale** 12V

**Capacité nominale**

20 h à 0.350 A : 7.0 Ah, Tension d'arrêt : 10.50 V  
 10 h à 0.650 A : 6.05 Ah, Tension d'arrêt : 10.50 V  
 5 h à 1.190 A : 5.95 Ah, Tension d'arrêt : 10.20 V  
 1 h à 4.200 A : 4.200 Ah, Tension d'arrêt : 9.60 V

**Poids** 2.650 kg

**Résistance interne batterie chargée** 25 mΩ

**Courant de décharge maximum :**

en 1 minute 40 A  
 en 1 seconde 210 A

**Tension de charge (à 20°C)**

en floating 13.6 V  
 (Pas de limitation de courant nécessaire)  
 en cycles 14.7 V  
 (Courant maximum limité à 0.25C)

**Température d'utilisation**

en charge -15°C à 50°C  
 en décharge -20°C à 60°C

**Auto-décharge (à 20°C)**

1 mois 3%  
 3 mois 9%  
 6 mois 15%

**Durée de vie (à 20°C) (Conditions standards d'utilisation)**

**Application floating** 3 / 5 ans  
**Application cyclique :**  
 100% de profondeur de décharge 180 cycles  
 50% de profondeur de décharge 440 cycles  
 30% de profondeur de décharge 1200 cycles

**Fabrication étanche**

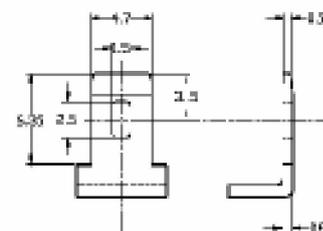
Les batteries peuvent être stockées et utilisées dans toutes les positions sans risque de fuites, (excepté en utilisation permanente à l'envers)

**Bac et couvercle** ABS UL94-HB



**2. DIMENSIONS**

Longueur (+/- 1 mm) = 151 mm  
 Largeur (+/- 1 mm) = 65 mm  
 Hauteur totale (+/- 2 mm) = 97.5 mm



FASTON 4.7