

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Technologie



*Mémoire de fin d'études*

En vue de l'obtention de diplôme de **Master** en Automatique Et Informatique Industrielle

**Spécialité** : Automatique et informatique industrielle

## Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

**Présenté par :**

- *Biskri Hamza*
- *Abdouni Moussa*

**Devant le jury :**

Mr. Kerraci Abdelkader	Président	(U.D.B Khemis Miliana)
Mr. Sid-Ali Blaifi	Promoteur	(U.D.B Khemis Miliana)
Mr. Ikni Samir	Examineur	(U.D.B Khemis Miliana)

**Année universitaire : 2022/2023**

## Remerciement

*Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, qui nous a guidés et soutenus tout au long de ce parcours académique.*

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur SID-ALI BLAIFI, de l'Université DJILLALI BOUNAAMA\_KHEMIS-MILLIANA, pour nous avoir proposé ce sujet passionnant qui a été à l'origine de ce mémoire. Nous sommes extrêmement reconnaissants d'avoir eu l'opportunité de bénéficier de ses précieux conseils, de sa guidance et de ses encouragements tout au long de ce travail.*

*Nous aimerions exprimer notre profonde reconnaissance envers les membres du jury qui ont consacré leur temps et leurs compétences à l'évaluation de notre mémoire. Leur expertise et leurs commentaires constructifs ont grandement enrichi notre travail.*

*Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps pédagogique du département de Sciences et Technologie, ainsi qu'à tous les membres du personnel qui ont contribué à notre formation et à notre épanouissement académique. Leur dévouement et leur engagement envers notre réussite ont été une source d'inspiration.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos camarades de classe et nos amis qui nous ont soutenus, encouragés et accompagnés tout au long de ce parcours. Leur soutien moral et leur camaraderie ont été d'une valeur inestimable.*

*Enfin, nous souhaitons dédier ce mémoire à nos parents, dont l'amour, le soutien indéfectible et les sacrifices ont été la fondation de notre réussite. Leur confiance en nous et leur encouragement constant ont été une source inépuisable de motivation.*

*Nous sommes profondément reconnaissants envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien inestimable restera gravé dans nos cœurs et notre parcours professionnel à venir.*

## Résumé :

Ces dernières années, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque, ont suscité un intérêt considérable. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, les batteries sont largement utilisées pour stocker l'énergie et alimenter les charges. Cependant, les batteries sont sensibles à différents phénomènes tels que la surcharge, la décharge profonde, les variations de température et de courant. Pour assurer leur protection, il est essentiel d'associer un régulateur au banc de batteries.

Dans ce travail, nous avons développé une carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie, en utilisant le logiciel PROTEUS. L'algorithme de surveillance a été programmé avec le logiciel MikroC pour le microcontrôleur PIC18 F45 K22. Le régulateur mesure la température, le courant et la tension de la batterie pour déterminer l'état de charge. L'efficacité et la précision de cette méthode de surveillance ont été vérifiées par des tests expérimentaux.

**Mots clés :** Régulateur solaire, Système photovoltaïque autonome, Batterie solaire, État de charge(SOC).

## Abstract:

In recent years, there has been a growing interest in renewable energies, particularly solar photovoltaic power. In autonomous photovoltaic systems, batteries play a crucial role in storing energy and supplying power to various loads. However, batteries are susceptible to various factors such as overcharging, deep discharging, temperature fluctuations, and current variations. To ensure the batteries' safety and optimal performance, it is essential to incorporate a regulator within the battery bank. In this study, we have developed an intelligent control card for the Battery Management System using "PROTEUS software". The monitoring algorithm has been programmed using "MikroC software" and integrated into the "PIC18F45K22" microcontroller. By measuring parameters such as temperature, current, and voltage, the regulator accurately determines the battery's State of Charge. Through extensive experimental testing, we have verified the effectiveness and precision of this monitoring method.

**Keywords:** Solar regulator, Autonomous photovoltaic system, Solar battery, State of Charge, SOC.

## ملخص:

في السنوات الأخيرة، لوحظ اهتمام متزايد بالطاقات المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية. في أنظمة الطاقة الشمسية المستقلة، تقوم البطاريات بدور هام في تخزين الطاقة وتوفيرها لمختلف الأحمال.. ومع ذلك، تتأثر البطاريات بعوامل متعددة مثل التحميل الزائد والتفريغ العميق وتقلبات درجات الحرارة والتغيرات الحالية. لذلك من الضروري توفير منظم لحماية البطاريات وضمان أدائها الأمثل. في هذه الدراسة، قمنا بتطوير بطاقة تحكم ذكية لنظام إدارة البطارية باستخدام برنامج "PROTEUS". حيث تمت برمجة خوارزمية المراقبة باستخدام برنامج "MIKRO C" ودمجها في المتحكم الدقيق "PIC18F45K22". من خلال قياس معطيات البطارية مثل درجة الحرارة والتيار والجهد، يحدد المنظم بدقة حالة الشحن للبطارية. تم التحقق من كفاءة ودقة هذا النظام من خلال اختبارات تجريبية واسعة النطاق.

الكلمات الرئيسية: منظم شمسي، نظام شمسي كهروضوئي مستقل، بطارية شمسية، حالة الشحن.

## Liste des figures

### Chapitre I :

Figure I.1 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage

Figure I.2 : Exemple de système photovoltaïque connectés au réseau

Figure I.3 :Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

Figure I.4 :Schéma de principe d'un micro-réseaux dans système PV autonome

Figure I.5 : Exemple d'une batterie solaire

Figure I.6 : Exemple de Principe de fonctionnement d'une batterie solaire

Figure I.7 : Exemple de Principe d'installation d'une batterie

Figure I.8 : Exemple d'une batterie au plomb

Figure I.9 : Composants d'une batterie lithium-ion

Figure I.10 : Batterie AGM

### CHAPITRE II :

Figure II.1 : Batterie acide plomb

Figure II.2 : la décharge et le recharge d'une batterie au plomb

Figure II.3 : charge à tension constante (CV ou ABSORPTION)

Figure II.4 : charge à courant constant(CC ou BULK)

Figure II.5 :Une batterie qui a une profondeur de décharge de 30% à un état de charge de 70%.

Figure II.6 :une tendance d'état de charge une batterie

Figure II.7 :le schéma d'état de charge une batterie

Figure II.8 :l'influence de  $T_i$  et de  $K_i$  avec les régulateurs PI

Figure II.9 :Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique

Figure II.10 :le schéma de régulateurs de charge dans les systèmes photovoltaïques

Figure II.11 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge

Figure II.12 : schéma de régulateur de charge à régulation de tension

Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'un régulateur MPPT

## CHAPITRE III :

Figure III.1 : Tableau d'identification d'un microcontrôleur PIC.

Figure III.2 Configuration du PIC-18F45K22

Figure III.3 : Brochage du PIC18F45K22.

Figure III.4 : Brochage du LCD 20\*4

Figure III.4 : Capture de courant ACS712-30A

Figure III.6 : Pont diviseur de tension.

Figure III.7 : Brochage du capteur de température DS18B20

Figure III.8 : MOSFET IRFz44n

Figure III.9 : Symboles du relais

Figure III.10 : Transistor bipolaire NPN

Figure III.11 : L'environnement IDE du compilateur MikroC PRO

Figure III.12 : Carte de développement EasyPicV7

Figure III.13 : Module MikroC Pro

Figure III.14 : La fenêtre principale de travail sur ISIS PROTEUS

Figure III.15 : Signal de commande MLI (PWM)

Figure III.16 : Circuit minimale du PIC18F45K22

Figure III.17 : Partie mesures et afficher les paramètres de la batterie

Figure III.18 : Partie du signal PWM et driver de la carte puissance

Figure III.19 : Contrôle de la charge et le régulateur 5v (VCC)

Figure III.20 : Schéma final du circuit de commande de la carte de régulation

Figure III.21 : Organigramme résumant le fonctionnement du système de charge de la batterie

Figure III.22 : Ecran d'affichage et signale PWM

Figure III.23 : Un échantillon de résultat

Figure III.24 : Un échantillon de résultat

Figure III.25 : Un échantillon de résultat

Figure III.26 : La tension aux bornes de sortie d'un convertisseur buck

Figure III.27 : Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

Figure III.28 : visualisation en 3D de la carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	2
<b>Chapitre I :Généralité sur les batteries dans l'application photovoltaïque autonomes</b> .....	6
<b>I. Introduction :</b> .....	6
<b>Histoire :</b> .....	7
<b>II. Généralité sur les types des systèmes photovoltaïques :</b> .....	7
<b>1. Systèmes Connectés au Réseau :</b> .....	8
<b>1.1. Avantages des systèmes connectés au réseau :</b> .....	8
<b>1.2. Inconvénients des systèmes connectés au réseau :</b> .....	9
<b>2. Systèmes Autonomes :</b> .....	9
<b>2.1. Avantages des systèmes autonomes :</b> .....	9
<b>2.2. Inconvénients des systèmes autonomes :</b> .....	10
<b>3. Micro-réseaux :</b> .....	10
<b>3.1. Avantages de Micro-réseaux:</b> .....	10
<b>3.2. Inconvénients de Micro-réseaux:</b> .....	11
<b>III. Batteries et systèmes de stockage utilisés dans les centrales photovoltaïques :</b> .....	11
<b>1. Stockage d'énergie :</b> .....	12
<b>2. Une batterie solaire :</b> .....	13
<b>3. Principe de fonctionnement du circuit de stockage d'une batterie solaire :</b> .....	13
<b>4. Batterie dans un système photovoltaïque :</b> .....	14
<b>5. Types de batteries :</b> .....	14
<b>5.1. Batterie au plomb :</b> .....	14
<b>5.1.1. Avantages de la batterie au plomb :</b> .....	15
<b>5.1.2. Inconvénients de la batterie au plomb :</b> .....	15
<b>5.2. Batterie Lithium :</b> .....	16
<b>5.2.1. Avantages de la batterie lithium-ion :</b> .....	16
<b>5.2.2. Inconvénients de la batterie lithium-ion :</b> .....	17
<b>5.3.1. Avantages :</b> .....	18
<b>5.3.2. Inconvénients :</b> .....	18
<b>5.4. Comment sélectionner la bonne batterie pour un système solaire photovoltaïque ?</b> ....	19
<b>6. Gestion de l'énergie :</b> .....	19
<b>6.1 Intégration des systèmes de stockage</b> .....	20
<b>6.2 Optimisation de la gestion de la charge</b> .....	20
<b>6.3 Intégration d'autres sources d'énergie renouvelable</b> .....	20
<b>IV. Conclusion :</b> .....	20

<b>Chapitre II : Batterie et régulation dans les systèmes PV autonomes .....</b>	<b>23</b>
<b>I. Introduction :.....</b>	<b>23</b>
<b>II. Définition d'une batterie acide plomb :.....</b>	<b>23</b>
<b>1. Caractéristiques techniques d'une batterie acide-plomb : .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1. Composition et structure :.....</b>	<b>23</b>
<b>1.2. Capacité et tension nominale :.....</b>	<b>24</b>
<b>1.3. Cycle de vie et durée de vie :.....</b>	<b>24</b>
<b>1.4. Rendement et autodécharge : .....</b>	<b>24</b>
<b>1.5. Contraintes de température et de charge :.....</b>	<b>24</b>
<b>2. Principe de fonctionnement d'une batterie acide-plomb :.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Réactions chimiques lors de la charge et de la décharge :.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Rôles des électrodes, de l'électrolyte et du séparateur :.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. Mécanismes de charge et de décharge :.....</b>	<b>26</b>
<b>III. Causes de dégradation d'une batterie acide au plomb :.....</b>	<b>26</b>
<b>1. Effets de la sulfatation :.....</b>	<b>26</b>
<b>2. Corrosion et corrosion interne :.....</b>	<b>26</b>
<b>3. Effets de l'acidité et des températures élevées :.....</b>	<b>26</b>
<b>4. Effets de la surcharge et de la sous-charge :.....</b>	<b>27</b>
<b>5. Effets du vieillissement et des cycles de charge/décharge : .....</b>	<b>27</b>
<b>IV. Les différents algorithmes de charge d'une batterie Acide-plomb appliquées dans les systèmes PV :.....</b>	<b>27</b>
<b>1. Charge en tension constante (CCCV) :.....</b>	<b>27</b>
<b>2. Charge en courant constant (CCC) : .....</b>	<b>28</b>
<b>V. Les différentes méthodes de détermination de l'état de charge de la batterie :.....</b>	<b>29</b>
<b>1. Méthodes basées sur la tension : .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Méthodes basées sur la capacité :.....</b>	<b>30</b>
<b>4. Le régulateur PI .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. Définition : .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Principe générale : .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3. Influence des performances sur les régulateurs PI :.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.1. Influence de KP :.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2. Influence de Ki :.....</b>	<b>34</b>
<b>4.4. Méthodes de réglages des paramètres P et I :.....</b>	<b>34</b>
<b>VI. Régulateur de charges appliquées dans les systèmes PV :.....</b>	<b>35</b>
<b>1. Rôle d'un régulateur de charge : .....</b>	<b>35</b>
<b>2. Régulateurs de charge à régulation de tension :.....</b>	<b>36</b>

<b>VII. Le régulateur MPPT intégré dans le régulateur de charge pour les systèmes PV autonomes :</b>	37
1. Principe de fonctionnement du régulateur MPPT :	37
2. Avantages du régulateur MPPT intégré :	37
3. Impact du régulateur MPPT sur les performances du système PV autonome :	38
<b>VIII. Conclusion :</b>	39
<b>Chapitre III : Conception d'une Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS :</b>	41
<b>I. Introduction :</b>	41
<b>II. Choix et description des matériels utilisés :</b>	41
1. Composition de système PV autonome :	41
2. Choix et description des matériels utilisés dans notre carte de commande :	42
2.1. Microcontrôleur :	42
a) Introduction :	42
b) Microcontrôleur PIC18F45K22 :	42
c) Identification d'un microcontrôleur PIC :	43
d) Caractéristiques techniques :	44
e) Architecture interne d'un microcontrôleur PIC18F45K22 :	45
f) Configuration Minimale Du PIC18F45K22	45
2.2. Afficheur LCD 20*4 :	45
2.3. Capteur de courant ACS712 :	46
2.4. Capteur de tension (diviseur de tension) :	47
2.5. Capteur de température DS18B20	47
2.6. MOSFET de puissance :	48
2.7. Contrôleur de charge :	48
2.7.1. Relais électronique :	48
2.7.2. Transistor bipolaire NPN :	49
3. Description des logiciels utilisés :	49
3.1. Langage MikroC PRO pour PIC :	49
a. Caractéristiques du MikroC PRO pour PIC :	50
3.2. Carte de développement EasyPIC :	51
3.3. PROTEUS	52
<b>III. Signal Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI):</b>	52
<b>IV. Réalisation du circuit de commande sur Isis :</b>	54
1. Circuit minimal du PIC :	54
2. Partie mesures et affichages des paramètres de la batterie :	55

<b>3. Partie du signal PWM et driver de la carte puissance :</b>	56
<b>4. Contrôle de la charge et le régulateur 5v (VCC) :</b>	56
<b>5. Schéma final du circuit de commande de la carte de régulation :</b>	57
<b>6. Programmation du régulateur de charge :</b>	59
<b>V. Tests et résultats :</b>	61
<b>VI. Conception de la carte de commande :</b>	63
<b>VII. Conclusion :</b>	65
<b>Conclusion générale :</b>	67
<b>Référence bibliographique :</b>	69

# **Introduction générale**

### Introduction Générale

La consommation mondiale d'électricité observée au cours des dernières décennies est étroitement liée au développement de l'industrie, des transports et des communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique provient de ressources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, ce qui entraîne un risque non négligeable d'épuisement de ces ressources à plus ou moins court terme.

Avec l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, les crises économiques causées par la flambée des prix du pétrole et les accidents dans les centrales nucléaires tels que « Three Mile Island (États-Unis, 1979) » et « Tchernobyl (URSS, 1986) », l'intérêt du grand public pour les énergies renouvelables ne cesse de croître. En fait, il dépasse déjà l'offre disponible, ce qui entraîne des fluctuations importantes des prix mondiaux du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables, notamment l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Parmi celles-ci, l'énergie photovoltaïque occupe une place prépondérante. Grâce à sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un important potentiel solaire, notamment dans le sud du pays. L'énergie solaire représente certainement la ressource la plus abondante en Algérie, avec des quantités variant entre 4 kWh/m<sup>2</sup>/jour en hiver et pouvant atteindre 8,5 kWh/m<sup>2</sup>/jour en été. [53]

Une nouvelle tendance dans le domaine de l'électronique de puissance est le développement de systèmes d'énergie renouvelable avec génération distribuée. Les préoccupations environnementales sont parmi les facteurs qui incitent à explorer de nouvelles voies pour obtenir de l'énergie électrique. Les innovations technologiques et les réglementations environnementales ont suscité un intérêt croissant pour la production d'énergie renouvelable. La demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter, ce qui rend les énergies renouvelables indispensables. Elles jouent aujourd'hui un rôle essentiel dans la cogénération et la distribution d'énergie.

En raison de la nature non linéaire des systèmes photovoltaïques, il est difficile et complexe de les contrôler à l'aide de régulateurs standard. Ces régulateurs nécessitent souvent de nombreuses simplifications et linéarisations du système. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, les batteries sont largement utilisées pour alimenter les charges en l'absence d'ensoleillement. Cependant, ces batteries sont sensibles à des phénomènes tels que la surcharge, la décharge profonde, les variations de température et de courant. Il est donc nécessaire de les associer à un régulateur pour assurer la protection des batteries. L'importance d'un régulateur de charge dans un système photovoltaïque autonome est indéniable. Cependant, il doit être conçu avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de rentabilité, de simplicité et de fiabilité.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Gestion et Stockage de l'Énergie de la division de l'Énergie Solaire Photovoltaïque au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) à Bouzaréah, en Algérie. L'objectif principal de cette recherche est la conception de la Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS a basé sur un microcontrôleur PIC18F45K22.

Les fonctions de ce régulateur comprennent la mesure de la température, du courant et de la tension aux bornes de la batterie, afin de déterminer son état de la santé et les seuils de régulation compensés en fonction de la température. Le rôle principal du régulateur solaire est de contrôler en continu l'état de la batterie pour assurer sa protection contre la surcharge et la décharge excessive, en ajustant la quantité de courant à travers le convertisseur DC-DC qui fait partie de la carte de puissance du régulateur. De plus, il commande la décharge en bloquant ou en débloquant le transistor MOSFET en sortie pour éviter une décharge profonde ou des températures de congélation, ce qui prolonge la durée de vie de la batterie.

A partir de cette description, nous avons divisé notre mémoire en 03 chapitres :

- Nous commençons par une introduction historique sur l'importance croissante de l'électricité dans les secteurs de l'industrie, du transport et des communications, puis examinons les principes généraux des batteries dans les applications photovoltaïques autonomes. Nous examinons les avantages et les inconvénients des différents types de systèmes photovoltaïques, en se concentrant sur les réseaux, les systèmes autonomes et les micro-réseaux. Nous discutons des systèmes de stockage et des batteries utilisés dans les centrales photovoltaïques, ainsi que de la façon dont les batteries solaires fonctionnent et de leur importance dans les systèmes photovoltaïques. Nous discuterons également de la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes en examinant l'intégration des systèmes de stockage, l'optimisation de la gestion des charges et l'intégration d'autres sources d'énergie renouvelable.
- Dans le deuxième chapitre, Nous examinons les caractéristiques, la structure, la capacité, la tension nominale, la durée de vie, le rendement, l'autodécharge et les limites de température et de charge de la batterie au plomb-acide dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Nous étudions les réactions chimiques lors de la charge et de la décharge, ainsi que les rôles des électrodes, des électrolytes et des séparateurs. Nous abordons les causes de détérioration des batteries, telles que la sulfatation, la corrosion, l'acidité, la surcharge, la sous-charge, le vieillissement et les cycles de charge et de décharge. Nous proposons plusieurs algorithmes de charge, tels que la charge constante en courant-constante-tension (CCCV) et la charge constante en courant-constante (CCC), et nous explorons des méthodes d'estimation de l'état de charge en utilisant des mesures de tension et de capacité. Nous accordons également une attention particulière au rôle crucial des régulateurs de charge dans les systèmes photovoltaïques autonomes, en mettant en évidence leur importance dans la gestion de la charge de la batterie. Enfin, nous abordons le régulateur MPPT intégré, qui optimise les performances des systèmes photovoltaïques autonomes en recherchant le point de puissance maximal du panneau solaire.

## Introduction générale

---

- Dans le troisième chapitre consacré à la conception et à la réalisation d'une carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS, nous abordons les différents aspects liés à cette réalisation. L'introduction présente le contexte et les objectifs de ce chapitre. Ensuite, nous passons en revue les choix et la description des matériels utilisés, notamment la composition d'un système PV autonome et les caractéristiques des composants de notre carte de commande tels que le microcontrôleur PIC18F45K22, le capteur de courant ACS712, le capteur de tension (diviseur de tension), le capteur de température DS18B20, le MOSFET de puissance, le contrôleur de la charge comprenant le relais électronique et le transistor bipolaire NPN. Nous décrivons également les logiciels utilisés, tels que MikroC PRO pour PIC, la carte de développement EasyPIC et PROTEUS. Le chapitre aborde ensuite le signal PWM (modulation de largeur d'impulsion) et la réalisation du circuit de commande sur Isis, comprenant le circuit minimal du PIC, la partie mesures et affichage des paramètres de la batterie, la partie du signal PWM et le driver de la carte puissance, le contrôle de la charge et le régulateur 5V (VCC). Nous présentons le schéma final du circuit de commande de la carte de régulation et la programmation du régulateur de charge. Enfin, nous évoquons les tests réalisés ainsi que les résultats obtenus, et nous concluons en abordant la réalisation pratique de la carte de commande.

Enfin, nous présenterons une conclusion générale qui résumera notre étude dans ses aspects théoriques et de simulation.

**Chapitre I : Généralité  
sur les régulateurs de charge de  
la batterie dans l'application  
photovoltaïque autonomes.**

---

## Chapitre I :Généralité sur les batteries dans l'application photovoltaïque autonomes

### I. Introduction :

Le photovoltaïque est une technologie qui permet de transformer la lumière du soleil en électricité. Cette électricité peut ensuite être utilisée pour alimenter des équipements électriques, ou bien être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le stockage est particulièrement important dans les systèmes photovoltaïques autonomes, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas connectés au réseau électrique.

Dans les systèmes autonomes, le stockage permet d'assurer un approvisionnement continu en électricité, même lorsque la production photovoltaïque est insuffisante. Les batteries sont le principal moyen de stockage utilisé dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Il existe plusieurs types de batteries adaptées à ces applications, telles que les batteries au plomb-acide, les batteries au lithium-ion et les batteries au nickel-cadmium. Le choix de la batterie dépendra des spécificités de l'application et des contraintes de l'environnement.

Le stockage peut également être utilisé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, pour compenser les fluctuations de production et garantir un approvisionnement stable en électricité. Dans ces applications, les batteries peuvent être utilisées en combinaison avec des onduleurs et des systèmes de gestion de l'énergie pour optimiser la gestion du stockage.

En résumé, le stockage est un élément essentiel des systèmes photovoltaïques autonomes, et peut également être utile dans les systèmes connectés au réseau. Les batteries sont le principal moyen de stockage utilisé dans ces applications, et leur choix dépendra des spécificités de l'application et des contraintes de l'environnement.

En plus de leur utilisation dans les systèmes photovoltaïques autonomes et connectés au réseau, les batteries peuvent également être utilisées dans d'autres applications solaires telles que les éclairages publics solaires, les pompes solaires et les systèmes de surveillance solaires.

Les avantages du stockage dans les systèmes photovoltaïques sont nombreux. Tout d'abord, il permet d'assurer un approvisionnement continu en électricité, même lorsque la production photovoltaïque est insuffisante. Ensuite, il permet de réduire les coûts liés au surdimensionnement du système photovoltaïque pour compenser les fluctuations de production. Enfin, il permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire en stockant l'électricité produite pendant les périodes de production excédentaire pour une utilisation ultérieure.

Cependant, le stockage n'est pas sans limites. Les batteries ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées périodiquement, ce qui peut représenter un coût important. De plus, le stockage peut augmenter la complexité du système et nécessiter des systèmes de gestion de l'énergie sophistiqués pour optimiser les performances.

En somme, le stockage est un élément important des systèmes photovoltaïques et permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire. Cependant, il faut considérer les

---

avantages et les limites de cette technologie pour choisir la solution de stockage la plus adaptée à chaque application solaire. [53]

### **Histoire :**

L'énergie solaire est une source d'énergie gratuite disponible chaque jour, et la technologie photovoltaïque permet de convertir cette énergie solaire en électricité à travers des modules photovoltaïques composés de cellules solaires. Le terme « photovoltaïque » est dérivé du mot grec « photos » signifiant « lumière » et du nom du physicien italien « Alessandro Volta » qui a découvert la pile électrique en 1800. Le principe de la conversion de la lumière en électricité a été découvert en 1839 par « Alexandre Edmond Becquerel » qui a observé que certains matériaux produisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Il a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité. En 1875, « Werner Von Siemens » a présenté un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'Académie des Sciences de Berlin. En 1887, « Heinrich Rudolf Hertz » a compris et présenté l'effet photoélectrique dans la revue scientifique « Annalen der Physik ». En 1905, « Albert Einstein » a expliqué le phénomène photoélectrique et a reçu le prix Nobel de physique en 1921 pour ses travaux.

En 1913, « William Coblentz » a déposé le premier brevet pour une cellule photovoltaïque, mais elle ne fonctionnera jamais. En 1916, « Robert Millikan » a été le premier à produire de l'électricité grâce à une cellule photovoltaïque, mais il y a eu peu de progrès en énergie photovoltaïque au cours des 40 années suivantes car les cellules avaient un rendement trop faible. En 1954, trois chercheurs américains des laboratoires Bell Téléphone ont mis au point la première cellule photovoltaïque au silicium à haut rendement, avec environ 4% de rendement, au moment où l'industrie spatiale naissante cherchait de nouvelles solutions pour alimenter ses satellites. En 1958, une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9% a été mise au point, et les premiers satellites Vanguard alimentés par des cellules photovoltaïques ont été envoyés dans l'espace.

En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques a été construite à l'Université de Wilmington dans l'État du Delaware, USA. En 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque a parcouru une distance de 4 000 km en Australie. Au début des années 90, la prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle a obligé les marchés photovoltaïques à s'ouvrir afin d'atteindre les campagnes de manière plus rentable. En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se sont généralisés depuis 2001.[8]

## **II. Généralité sur les types des systèmes photovoltaïques :**

Les systèmes photovoltaïques sont devenus une source d'énergie propre et renouvelable essentielle dans le domaine de l'énergie solaire. Ils convertissent l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules solaires, ou modules photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans une variété d'applications, allant des installations résidentielles et commerciales aux centrales électriques de grande envergure.[1]

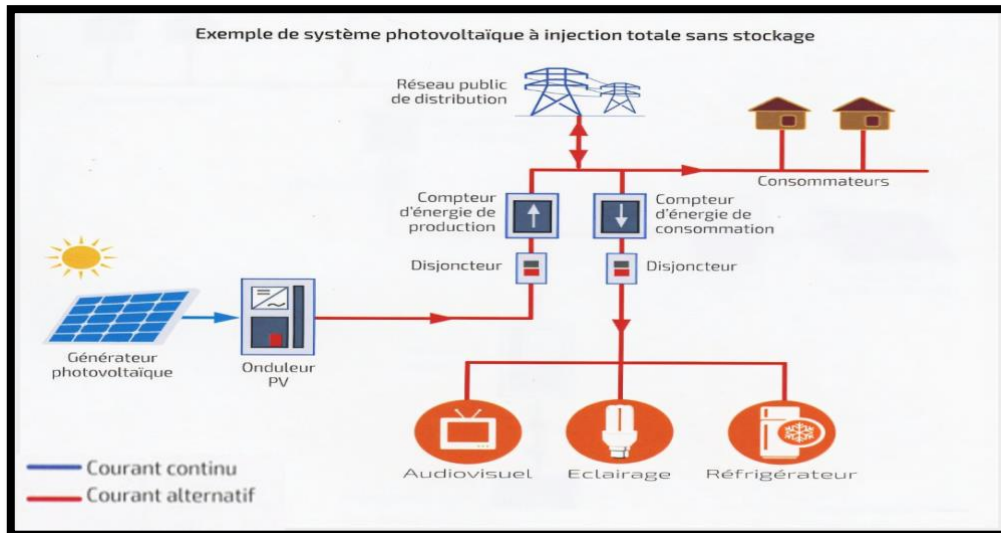


Figure I.1 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage.[8]

Dans ce titre, nous allons explorer en détail les trois principaux types de systèmes photovoltaïques :

### 1. Systèmes Connectés au Réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont conçus pour fonctionner en tandem avec le réseau électrique public. Ils sont les plus répandus et populaires en raison de leur simplicité d'installation et de leur capacité à fournir un approvisionnement en électricité continu. [10]

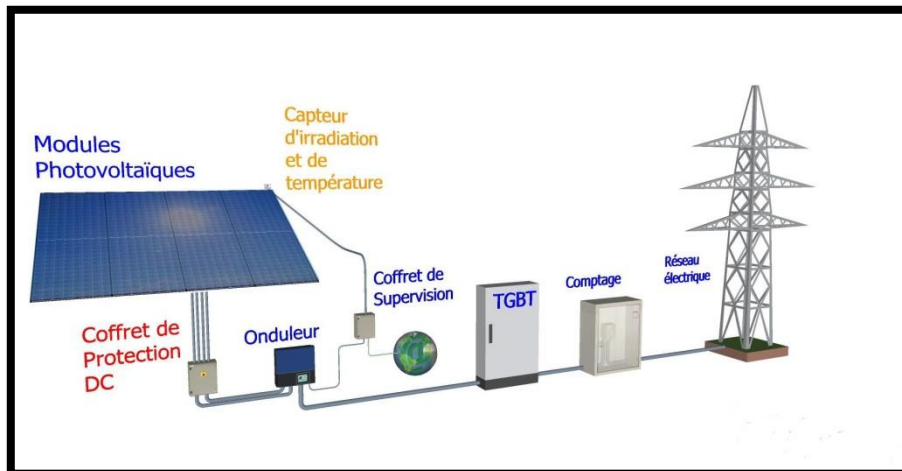


Figure I.2 : Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau

Voici quelques caractéristiques importantes des systèmes connectés au réseau :

#### 1.1. Avantages des systèmes connectés au réseau :

- Rentabilité : Les systèmes connectés au réseau permettent de réduire les factures d'électricité en utilisant l'énergie solaire pour alimenter les appareils électriques. Les propriétaires de ces systèmes peuvent également bénéficier de programmes d'incitation et de tarifs de rachat de l'électricité solaire injectée dans le réseau.

- Fiabilité : Étant connectés au réseau électrique, ces systèmes ont un accès constant à l'électricité, même en cas de faible production solaire. Cela garantit une alimentation électrique fiable pour les besoins quotidiens.
- Impact environnemental réduit : L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les systèmes connectés au réseau réduit la dépendance aux combustibles fossiles et contribue ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.[10]

### 1.2. Inconvénients des systèmes connectés au réseau :

- Dépendance au réseau : Les systèmes connectés au réseau dépendent du réseau électrique public pour leur fonctionnement. Par conséquent, en cas de panne de courant, ces systèmes ne peuvent pas fournir d'électricité.
- Coûts initiaux : Les systèmes connectés au réseau nécessitent un investissement initial plus important en raison des coûts des équipements supplémentaires, tels que les onduleurs, les compteurs intelligents et les dispositifs de surveillance, nécessaires pour l'intégration au réseau.[10]

### 2. Systèmes Autonomes :

Les systèmes photovoltaïques autonomes, également appelés systèmes hors réseau, sont conçus pour fonctionner de manière indépendante, sans connexion au réseau électrique public. Ces systèmes sont souvent utilisés dans les zones reculées où l'accès au réseau électrique est limité ou inexistant. [4]

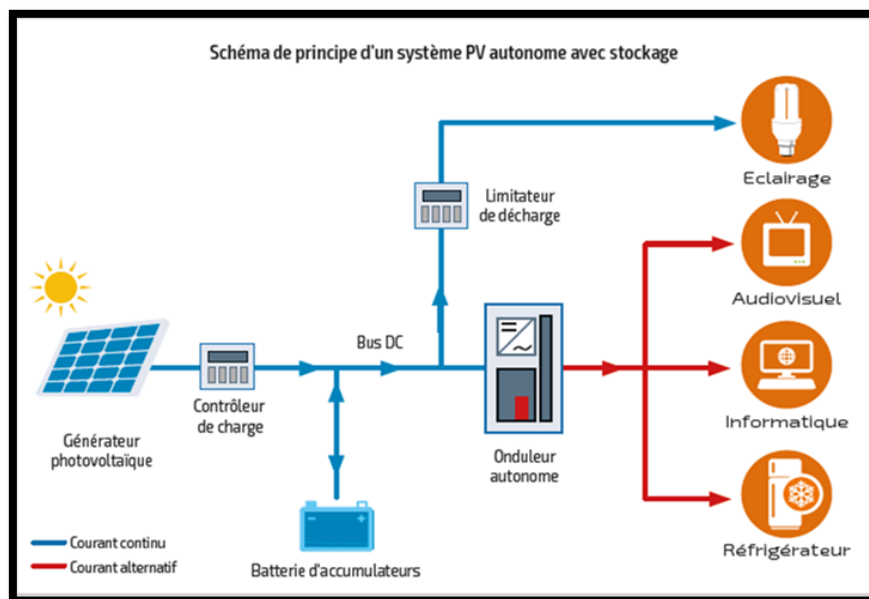


Figure I.3 :Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

Voici les caractéristiques principales des systèmes autonomes :

### 2.1. Avantages des systèmes autonomes :

- Indépendance énergétique : Les systèmes autonomes permettent aux utilisateurs de devenir autosuffisants sur le plan énergétique en utilisant l'énergie solaire pour répondre à leurs besoins en électricité. Cela est particulièrement avantageux dans les régions éloignées où l'accès au réseau électrique est difficile.

- Flexibilité : Les systèmes autonomes peuvent être dimensionnés en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur, ce qui permet une plus grande flexibilité en termes de conception et d'installation.
- Durabilité : Les systèmes autonomes réduisent l'empreinte carbone et sont plus respectueux de l'environnement en utilisant une source d'énergie renouvelable et en évitant l'utilisation de combustibles fossiles.[4]

## 2.2. Inconvénients des systèmes autonomes :

- Coûts initiaux élevés : Les systèmes autonomes nécessitent un investissement initial plus important en raison des coûts des batteries de stockage d'énergie et des équipements de régulation de charge nécessaires pour stocker l'énergie solaire pendant les périodes de faible production.
- Gestion de l'énergie : Les systèmes autonomes nécessitent une gestion efficace de l'énergie pour optimiser l'utilisation de l'électricité solaire et éviter les pannes d'alimentation.
- Limitations de capacité : En raison des contraintes de stockage d'énergie, les systèmes autonomes peuvent avoir des limitations de capacité et ne peuvent pas répondre aux besoins énergétiques élevés.[4]

## 3. Micro-réseaux :

Les micro-réseaux sont des systèmes photovoltaïques qui combinent les avantages des systèmes connectés aux réseaux et des systèmes autonomes. Ils sont conçus pour fonctionner de manière autonome lorsqu'ils sont déconnectés du réseau électrique public, tout en permettant une connexion au réseau lorsque cela est nécessaire.[5]

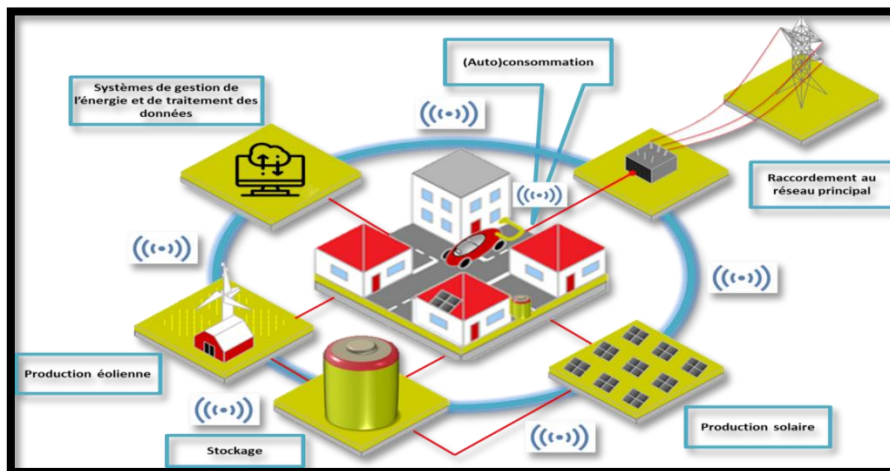


Figure I.4 :Schéma de principe d'un micro-réseaux dans système PV autonome

Voici quelques avantages et inconvénients des micro-réseaux :

### 3.1. Avantages de Micro-réseaux:

- Autonomie énergétique en cas de panne de courant du réseau, ce qui garantit un approvisionnement continu en électricité.
- Possibilité de vendre l'excédent d'électricité au réseau lorsque le système génère plus d'énergie que nécessaire.
- Flexibilité pour s'adapter aux fluctuations de la demande énergétique et aux conditions du réseau électrique.[5]

---

### **3.2. Inconvénients de Micro-réseaux:**

- Complexité accrue du système en raison de la nécessité de gérer les modes de fonctionnement connecté et autonome.
- Coûts initiaux plus élevés en raison de la nécessité de disposer d'équipements supplémentaires pour permettre la connexion au réseau.
- Nécessite une planification et une gestion efficaces pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et du réseau.[5]

Les systèmes photovoltaïques sont une technologie essentielle pour exploiter l'énergie solaire et contribuer à la transition énergétique vers des sources d'énergie propres et renouvelables. Les systèmes connectés aux réseaux, les systèmes autonomes et les micro-réseaux offrent tous des avantages spécifiques en fonction des besoins et des conditions locales. Il est essentiel de prendre en compte les avantages et les inconvénients de chaque type de système lors du choix de la solution appropriée. Avec des avancées continues dans le domaine des systèmes photovoltaïques, nous pouvons nous attendre à une plus grande utilisation de cette technologie dans le futur, contribuant ainsi à une production d'électricité plus durable et respectueuse de l'environnement

### **III. Batteries et systèmes de stockage utilisés dans les centrales photovoltaïques :**

Les batteries et les systèmes de stockage sont de plus en plus utilisés dans les centrales photovoltaïques pour stocker l'énergie solaire et la libérer lorsque la demande se présente. Les batteries permettent également de lisser la production d'énergie et de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire.

Les batteries utilisées dans les centrales photovoltaïques peuvent être classées en deux catégories principales : les batteries plomb-acide et les batteries lithium-ion. Les batteries plomb-acide sont moins chères mais ont une durée de vie plus courte et une capacité de stockage d'énergie plus faible. Les batteries lithium-ion ont une durée de vie plus longue, une capacité de stockage d'énergie plus élevée et sont plus légères, mais sont également plus chères.

Les systèmes de stockage d'énergie peuvent également être classés en deux catégories principales : les systèmes de stockage à grande échelle et les systèmes de stockage décentralisés. Les systèmes de stockage à grande échelle sont généralement utilisés dans les centrales photovoltaïques de grande taille et peuvent stocker des quantités massives d'énergie. Les systèmes de stockage décentralisés sont plus petits et sont souvent utilisés dans les installations résidentielles et commerciales.

Il convient également de noter que les systèmes de stockage d'énergie peuvent être configurés de différentes manières. Les systèmes peuvent être connectés au réseau électrique, être autonomes ou être utilisés dans des installations hybrides. Les systèmes de stockage d'énergie peuvent également être équipés de logiciels de gestion d'énergie pour optimiser l'utilisation de l'énergie stockée.

---

En plus, les batteries et les systèmes de stockage sont de plus en plus utilisés dans les centrales photovoltaïques pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire et lisser la production d'énergie. Les batteries plomb-acide et les batteries lithium-ion sont les types de batteries les plus couramment utilisés, tandis que les systèmes de stockage à grande échelle et les systèmes de stockage décentralisés sont les principales catégories de systèmes de stockage d'énergie. La configuration de chaque système dépend des besoins spécifiques de l'installation et de l'objectif du système de stockage.

Nous avons besoin d'une réserve d'énergie électrique pour faire fonctionner les systèmes photovoltaïques en raison de l'absence permanente d'énergie solaire pour diverses raisons, notamment la météo, les saisons, le temps de la journée, etc. Pour garantir une disponibilité constante et permanente de l'énergie, quels que soient les conditions atmosphériques ou l'horaire, l'utilisation des batteries solaires est nécessaire. Le stockage est la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque dans une installation photovoltaïque.

La gestion de l'énergie solaire nécessite des stockages adaptés aux conditions météorologiques pour répondre à deux objectifs principaux :

Fournir de l'électricité lorsque le générateur de photovoltaïque n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)

Fournir à l'installation de puissances supérieures à celles du générateur PV.

Le système de stockage représente 40 à 50 % du coût de l'installation photovoltaïque, ce qui en fait un élément économique et technique crucial. En raison de l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb, qui est la plus abordable par rapport aux autres types de batteries. C'est quoi donc une batterie ? Quelles sont ces personnes ? Comment fonctionne une cellule photovoltaïque ?[2]

### **1. Stockage d'énergie :**

Les systèmes de stockage d'énergie sont utilisés à grande échelle dans les centrales photovoltaïques de grande taille, principalement basés sur des batteries lithium-ion. Ces systèmes ont une capacité de stockage massive, allant de plusieurs mégawattheures à plusieurs centaines de mégawattheures. En revanche, les systèmes de stockage décentralisés sont plus petits et couramment utilisés dans les installations résidentielles et commerciales, pouvant être basés sur des batteries lithium-ion ou d'autres technologies telles que les super condensateurs.

La configuration des systèmes de stockage dépend des besoins spécifiques de chaque installation. Par exemple, un système de stockage peut être utilisé comme source d'énergie de secours en cas de panne de courant, pour réduire la demande sur le réseau électrique pendant les heures de pointe, ou pour stocker l'énergie solaire produite pendant la journée en vue d'une utilisation ultérieure.

Dans les installations photovoltaïques, les panneaux solaires stockent l'énergie produite dans des batteries solaires. Ces batteries assurent une alimentation électrique continue en

---

toutes circonstances, que ce soit pendant le jour, la nuit ou par temps couvert. Les batteries solaires destinées aux panneaux solaires ou aux éoliennes diffèrent des batteries de voiture. Les batteries solaires à décharge lente sont conçues pour supporter des décharges fréquentes et peu profondes, car elles se déchargent lentement.

Il est important de ne pas brancher directement une batterie solaire sur un panneau solaire, car cela pourrait endommager la batterie si son niveau de charge dépasse 90 %. Pour éviter cela, un régulateur est installé entre le panneau solaire et la batterie, assurant la protection de la batterie contre la surcharge, entre autres fonctions. En effet, le niveau de charge des batteries solaires doit rester dans une plage optimale, ni trop bas (pas en dessous de 40 %) ni trop élevé (ne pas dépasser 95 %), pour préserver leur durée de vie. En résumé, les systèmes de stockage d'énergie dans les centrales photovoltaïques peuvent être à grande échelle ou décentralisés, utilisant des batteries lithium-ion ou d'autres technologies. Les batteries solaires utilisées dans les installations photovoltaïques garantissent une alimentation électrique continue et leurs caractéristiques diffèrent des batteries de voiture. La présence d'un régulateur est essentielle pour protéger les batteries solaires contre la surcharge et maintenir leur état de charge optimal.[11]

## **2. Une batterie solaire :**

Une batterie solaire est un dispositif conçu pour stocker l'énergie électrique générée par les panneaux solaires photovoltaïques. Il doit y avoir un courant continu (DC) et non un courant alternatif (AC, comme dans le réseau électrique domestique). Dans les installations autonomes, les batteries sont essentielles car les modules photovoltaïques ne fonctionnent que lorsqu'il y a de la lumière. Pour consommer de l'électricité le soir ou la nuit, les batteries doivent avoir accumulé de l'électricité tout au long de la journée.[10]



Figure I.5 : Exemple d'une batterie solaire. [8]

## **3. Principe de fonctionnement du circuit de stockage d'une batterie solaire :**

Pendant les heures ensoleillées, les panneaux solaires génèrent de l'énergie. Il faudra stocker l'énergie si elle n'est pas directement utilisée sur place. Les batteries solaires stockent l'excédent de production et peuvent être utilisées la nuit ou les jours de mauvais temps. La batterie ne doit pas être directement branchée sur les panneaux

car cela pourrait l'endommager. Il est nécessaire d'installer un régulateur entre le module solaire et la batterie. Lorsqu'on souhaite augmenter l'autonomie, les batteries sont fréquemment utilisées. De plus, ce système de stockage fournit une source d'électricité fiable et continue pour les endroits isolés qui ne peuvent pas être connectés au réseau public. [9]



Figure I.6 : Exemple de Principe de fonctionnement des batteries.

#### 4. Batterie dans un système photovoltaïque :

L'installation d'une batterie peut augmenter le taux d'autoconsommation d'un projet photovoltaïque en autoconsommation totale ou partielle. Lorsque la production est supérieure à la consommation, l'électricité supplémentaire est stockée dans la batterie. Lorsque la consommation est supérieure à la production, l'électricité supplémentaire est déstockée. [5]

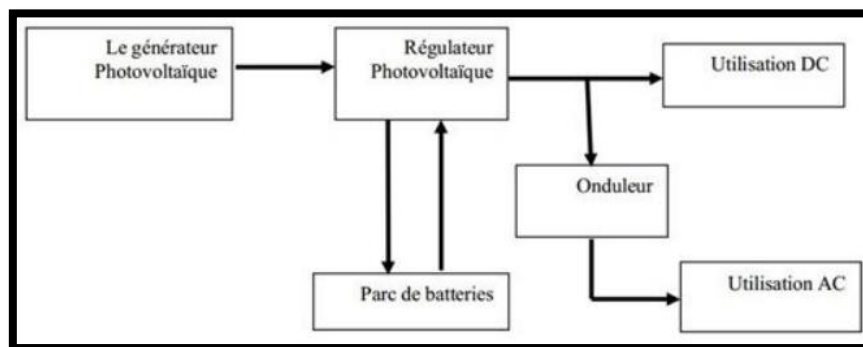


Figure I.7 : Exemple de Principe d'installation d'une batterie. [8]

#### 5. Types de batteries :

##### 5.1. Batterie au plomb :

La seule technologie de batterie pratique pour stocker l'électricité solaire était la batterie à plomb ouvert jusqu'à tout récemment. En particulier, ce type de batterie fonctionne avec une solution d'acide sulfurique liquide. Les versions de stockage solaire sont beaucoup plus volumineuses, mais c'est le même type de batterie que vous avez dans votre voiture. La chaleur réduit considérablement sa durée de vie, donc on l'entrepose plutôt dans des endroits frais ou climatisés. De plus, le lieu doit être aéré car la batterie à plomb ouvert libère de l'hydrogène lorsqu'elle est chargée. Evitez également de la placer en plein air car elle pourrait geler à cause du froid. [9]



Figure I.7 : Exemple d'une batterie au plomb

La batterie au plomb présente plusieurs avantages et inconvénients :

#### **5.1.1. Avantages de la batterie au plomb :**

- Coût abordable : Les batteries au plomb sont généralement moins chères par rapport à d'autres types de batteries, ce qui les rend accessibles et économiques pour de nombreuses applications.
- Disponibilité : Les batteries au plomb sont largement disponibles sur le marché, ce qui facilite leur acquisition et leur remplacement si nécessaire.
- Résistance aux surcharges : Les batteries au plomb sont relativement robustes et peuvent résister à des surcharges accidentelles sans subir de dommages graves.
- Capacité de décharge élevée : Les batteries au plomb peuvent fournir une grande quantité d'énergie sur une courte période, ce qui en fait un choix approprié pour les applications nécessitant des décharges rapides et intenses.[7]

#### **5.1.2. Inconvénients de la batterie au plomb :**

- Durée de vie limitée : Comparées à d'autres types de batteries, les batteries au plomb ont une durée de vie plus courte. Elles peuvent nécessiter un remplacement plus fréquent, ce qui augmente les coûts à long terme.
- Poids et encombrement : Les batteries au plomb sont relativement lourdes et volumineuses, ce qui les rend moins adaptées aux applications où la compacité et le poids sont des facteurs importants.
- Faible densité d'énergie : Les batteries au plomb ont une capacité de stockage d'énergie inférieure par rapport à d'autres technologies plus récentes, ce qui limite leur utilisation dans des applications nécessitant une densité d'énergie élevée.
- Effet mémoire : Les batteries au plomb peuvent présenter un effet mémoire, c'est-à-dire une perte de capacité si elles sont régulièrement utilisées sans être complètement déchargées et rechargées.

Il est important de noter que malgré leurs inconvénients, les batteries au plomb restent largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leur coût abordable, de leur robustesse et de leur disponibilité. Cependant, pour certaines applications nécessitant une durée de vie plus longue, une densité d'énergie élevée ou une meilleure performance globale, d'autres types de batteries, tels que les batteries lithium-ion, peuvent être préférables.[7]

## 5.2. Batterie Lithium :

Il n'est pas un hasard que les batteries lithium soient les plus populaires. Cette technologie est en expansion et peut être trouvée dans de nombreux éléments de notre vie quotidienne, tels que nos Smartphones et nos voitures. La nouvelle batterie lithium Powerwall de Tesla témoigne de l'innovation d'aujourd'hui et de demain. Les batteries au plomb pèsent plus que les batteries au lithium. De plus, elles sont capables d'être déchargées plus profondément que les batteries au plomb. Leur durée de vie prolongée, qui peut atteindre 6000 cycles et un taux de décharge de 80 %, les rend particulièrement appréciées.[6]

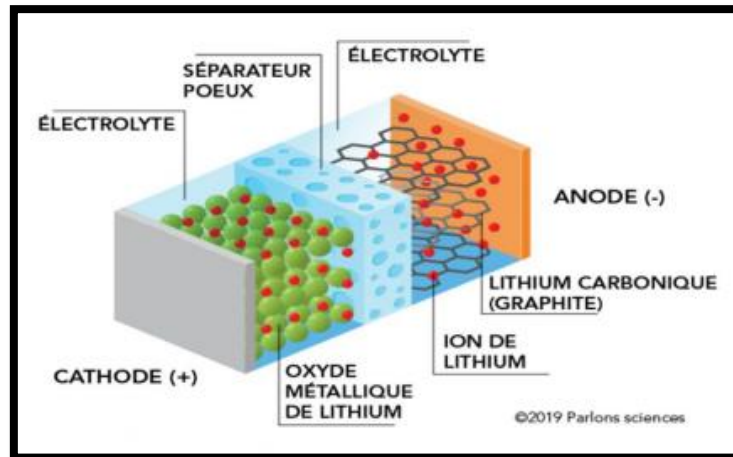


Figure I.8 : Composants d'une batterie lithium-ion

Les batteries lithium-ion présentent plusieurs avantages et inconvénients. Voici une liste des principaux :

### 5.2.1. Avantages de la batterie lithium-ion :

- Haute densité énergétique : Les batteries lithium-ion offrent une densité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker une grande quantité d'énergie dans un volume réduit. Cela les rend idéales pour les applications nécessitant une grande capacité de stockage dans un espace limité.
- Longue durée de vie : Les batteries lithium-ion ont une durée de vie plus longue par rapport à d'autres types de batteries. Elles peuvent généralement supporter un plus grand nombre de cycles de charge et de décharge avant de nécessiter un remplacement. Cela les rend économiquement avantageuses à long terme.
- Faible taux d'autodécharge : Les batteries lithium-ion ont un taux d'autodécharge beaucoup plus faible par rapport à d'autres types de batteries. Elles conservent donc leur charge pendant de plus longues périodes d'inactivité, ce qui est pratique dans les applications où elles ne sont pas utilisées régulièrement.
- Pas d'effet mémoire : Contrairement à certaines batteries, les batteries lithium-ion n'ont pas d'effet mémoire significatif. Elles peuvent être rechargées partiellement sans subir de perte de capacité, ce qui permet une utilisation plus flexible et une gestion plus aisée.
- Faible poids : Les batteries lithium-ion sont relativement légères par rapport à d'autres types de batteries, ce qui les rend adaptées aux applications mobiles, telles que les véhicules électriques et les appareils portables.[6]

---

### **5.2.2. Inconvénients de la batterie lithium-ion :**

- Coût élevé : Les batteries lithium-ion sont généralement plus coûteuses à produire par rapport à d'autres types de batteries. Cela peut rendre leur acquisition initiale plus onéreuse, bien que leurs coûts aient tendance à diminuer au fil du temps grâce aux avancées technologiques et à la demande croissante.
- Sensibilité aux températures élevées : Les batteries lithium-ion peuvent être sensibles aux températures élevées. Une exposition prolongée à des températures élevées peut réduire leur durée de vie et affecter leurs performances. Une gestion thermique adéquate est donc nécessaire pour préserver leur intégrité.
- Risque de surchauffe ou d'incendie : Bien que les batteries lithium-ion soient généralement sûres, il existe un risque potentiel de surchauffe ou d'incendie en cas de court-circuit, de mauvaise manipulation ou de dommages physiques. Un contrôle strict de la sécurité et des mesures de prévention sont essentiels pour minimiser ces risques.
- Impact environnemental : La production et l'élimination des batteries lithium-ion peuvent avoir un impact environnemental négatif. Elles contiennent des métaux lourds et des produits chimiques potentiellement toxiques, nécessitant une gestion appropriée des déchets et des processus de recyclage pour réduire leur impact environnemental.

Il est important de noter que malgré ces inconvénients, les batteries lithium-ion restent l'une des technologies de stockage d'énergie les plus avancées et largement utilisées dans de nombreuses applications en raison de leurs nombreux avantages.[6]

### **5.3. Batterie AGM (Absorbent Glass Mat):**

"Absorbed Glass Mat" est la désignation du sigle AGM. Cela signifie que les buvards en fibre de verre absorbent ou stabilisent l'électrolyte de la batterie étanche AGM, qui est composé de 70 % d'eau et 30 % d'acide. Ces derniers, appelés boron-silicates, sont attachés entre les plaques. En d'autres termes, la batterie contient un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

À la différence des batteries ouvertes, la batterie AGM étanche n'a pas besoin d'eau distillée car elle se forme après que le gaz soit conduit vers l'électrode négative en traversant les buvards des borosilicates, puis recombine pour former de l'eau. Ce type de batterie étanche, comme les batteries GEL, est beaucoup plus résistant aux erreurs de manipulation. Son taux d'émission d'hydrogène est inférieur à 4 %. On peut donc dire qu'elle respecte les normes de sécurité sans réserve. De plus, par rapport à de nombreux autres types de batteries, les batteries AGM sont plus résistantes aux chocs et aux vibrations. Cela est possible grâce à ses plaques fixées et serrées étroitement à la partie supérieure et inférieure de la batterie.[9]



Figure I.9 :Batterie AGM

La batterie AGM (Absorbed Glass Mat) présente plusieurs avantages et inconvénients :

**5.3.1. Avantages :**

- Étanchéité : La conception de la batterie AGM la rend étanche, ce qui élimine le besoin d'ajouter de l'eau distillée régulièrement. Cela facilite l'entretien et réduit les risques de fuite d'électrolyte.
- Faible taux d'émission d'hydrogène : La batterie AGM émet un taux d'hydrogène inférieur à 4 %, ce qui en fait une option plus sûre par rapport à d'autres types de batteries. Elle respecte donc les normes de sécurité sans réserve.
- Résistance aux chocs et aux vibrations : Les plaques de la batterie AGM sont fixées et serrées étroitement, ce qui lui confère une résistance accrue aux chocs et aux vibrations. Elle est donc plus durable et adaptée aux applications nécessitant une certaine robustesse.
- Utilisation polyvalente : La batterie AGM peut être utilisée dans diverses applications, notamment les systèmes de stockage d'énergie solaire, les systèmes de secours, les véhicules de loisirs, les bateaux, les véhicules de golf, etc.
- Maintenance réduite : Grâce à sa conception scellée, la batterie AGM nécessite peu d'entretien. Elle ne nécessite pas de vérification régulière du niveau d'électrolyte ni de remplissage d'eau distillée.

**5.3.2. Inconvénients :**

- Coût : Comparée à d'autres types de batteries, la batterie AGM peut être relativement plus coûteuse à l'achat initialement. Son prix peut être un facteur limitant pour certaines applications.
- Sensibilité à la surcharge : La batterie AGM peut être sensible à la surcharge. Il est important de veiller à ne pas dépasser les limites recommandées en termes de tension de charge afin de préserver sa durée de vie.
- Capacité de décharge limitée : La batterie AGM peut avoir une capacité de décharge plus limitée par rapport à d'autres types de batteries, ce qui signifie qu'elle peut ne pas convenir aux applications nécessitant de fortes décharges.

- 
- Sensibilité à la chaleur : Comme pour la plupart des batteries, la batterie AGM est sensible à la chaleur excessive. Il est recommandé de l'installer dans des endroits frais ou climatisés pour éviter toute détérioration prématurée.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients de la batterie AGM peuvent varier en fonction de l'application spécifique et des besoins de chaque utilisateur. Il est donc essentiel de prendre en compte ces facteurs lors du choix de la batterie appropriée pour une application donnée.

#### **5.4. Comment sélectionner la bonne batterie pour un système solaire photovoltaïque ?**

Les caractéristiques techniques essentielles pour choisir la batterie la plus appropriée pour une installation sont les suivantes :

Poids et volume : Bien que les batteries au plomb, qui sont les plus courantes, soient au moins cinq fois plus lourdes que les batteries Li-ion, il est important de garder à l'esprit que ces batteries ne sont pas sélectionnées en fonction de leur poids ou de leur volume. Le principal avantage d'utiliser une batterie légère est sa facilité de transport. Étant donné qu'une batterie légère est souvent moins résistante, il vaut mieux ne pas se concentrer sur le poids ou le volume pour faire son choix, à moins de devoir respecter des contraintes très particulières.

Tension : Les composants de base d'une batterie ont une tension nominale de 2 volts (en réalité entre 1,9 et 2,1 volts selon l'état de charge). Bien entendu, les batteries 6 V, 12 V et 24 V existent, mais ce n'est qu'une combinaison de plusieurs composants (3 x 2 V, 6 x 2 V et 12 x 2 V). On ne voit pas cet assemblage de l'extérieur sauf pour les batteries à électrolyte liquide, qui ont des bouchons pour la remise à niveau sur chaque élément.

Capacité : La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie qu'elle peut restituer pendant une période donnée. La capacité est représentée en ampères-heures (Ah) et est notée C. Elle est l'une des données les plus importantes car elle indique la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker dans la batterie. À condition que les modules soient suffisamment grands pour la recharger, une batterie à grande capacité vous donnera plus d'autonomie.

Durée de vie : La durée de vie d'une batterie est rarement indiquée car elle dépend fortement de la façon dont elle est utilisée. En général, on parle d'une durée de vie de 300 cycles, chacun correspondant à une décharge et à une recharge. Il ne s'agit pas de 300 jours. Le taux maximum de décharge qu'on lui fera subir est ce qui conditionnera le plus l'espérance de vie de la batterie. Par conséquent, une batterie ne peut pas tenir 300 cycles à 100 % de décharge, 600 cycles à 50 %, 900 cycles à 33 % et ainsi de suite.[2]

### **6. Gestion de l'énergie :**

Les centrales photovoltaïques produisent de l'électricité lorsque les panneaux solaires captent la lumière du soleil et la convertissent en courant continu. Cependant, la production d'électricité des centrales photovoltaïques est soumise à des variations en fonction des conditions météorologiques, de l'heure de la journée et des saisons. Par conséquent, une gestion efficace de l'énergie est nécessaire pour assurer un approvisionnement électrique continu et stable.[4]

---

## **6.1 Intégration des systèmes de stockage**

Les systèmes de stockage peuvent être intégrés aux centrales photovoltaïques pour stocker l'excès d'énergie produite pendant les périodes de forte irradiation solaire. Ces systèmes de stockage, généralement des batteries, permettent de lisser la production d'électricité et de fournir de l'énergie lorsqu'il y a une faible production solaire ou une demande élevée. Les batteries permettent ainsi de réduire la dépendance à l'égard du réseau électrique traditionnel et d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.

Les systèmes de stockage peuvent également être intégrés à des systèmes de gestion de l'énergie plus larges, qui peuvent inclure des sources d'énergie renouvelable supplémentaires, des générateurs diesel, des charges électriques et d'autres éléments du réseau électrique. Cette intégration permet une gestion plus flexible de l'énergie, en utilisant différentes sources en fonction des besoins et des conditions.

## **6.2 Optimisation de la gestion de la charge**

Dans les centrales photovoltaïques, la gestion de la charge fait référence à l'optimisation de l'utilisation de l'énergie produite. Cela implique d'ajuster la production d'électricité en fonction de la demande en énergie, en tenant compte des variations de la production solaire et de la consommation. Des techniques de gestion avancées, telles que la prédiction de la production solaire et l'utilisation de modèles de charge, peuvent être utilisées pour optimiser la gestion de la charge et réduire les pertes d'énergie.

## **6.3 Intégration d'autres sources d'énergie renouvelable**

En plus des systèmes de stockage, les centrales photovoltaïques peuvent être intégrées à d'autres sources d'énergie renouvelable, telles que l'éolien ou l'hydroélectricité. Cette intégration permet de diversifier les sources d'énergie et de réduire la dépendance à l'égard d'une seule source. Les systèmes de gestion de l'énergie dans les centrales photovoltaïques peuvent coordonner l'utilisation de ces différentes sources pour maximiser l'utilisation des énergies renouvelables disponibles.

## **IV. Conclusion :**

Les systèmes photovoltaïques sont une technologie essentielle pour exploiter l'énergie solaire et contribuer à la transition énergétique vers des sources d'énergie propres et renouvelables. Les systèmes connectés aux réseaux, les systèmes autonomes et les micro-réseaux offrent tous des avantages spécifiques en fonction des besoins et des conditions locales. Il est essentiel de prendre en compte les avantages et les inconvénients de chaque type de système lors du choix de la solution appropriée. Avec des avancées continues dans le domaine des systèmes photovoltaïques, nous pouvons nous attendre à une plus grande utilisation de cette technologie dans le futur, contribuant ainsi à une production d'électricité plus durable et respectueuse de l'environnement.

La gestion de l'énergie dans les centrales photovoltaïques joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production d'électricité et la fourniture d'une alimentation électrique stable. L'intégration de systèmes de stockage, la gestion efficace de la charge et l'intégration d'autres sources d'énergie renouvelable permettent d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et de réduire la dépendance aux réseaux électriques traditionnels. En développant des stratégies de gestion de l'énergie avancées et en exploitant les technologies

---

émergentes, les centrales photovoltaïques peuvent contribuer de manière significative à la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Il convient également de souligner que l'utilisation de régulateurs de charge de batterie dans les applications photovoltaïques autonomes joue un rôle essentiel. Ces régulateurs de charge permettent d'optimiser le processus de charge de la batterie en surveillant et en régulant le flux d'énergie provenant des panneaux solaires. Ils garantissent une charge efficace et sûre de la batterie, prolongeant ainsi sa durée de vie et assurant une alimentation électrique fiable dans les applications autonomes.

En résumé, les systèmes photovoltaïques autonomes, combinés à une gestion avancée de l'énergie et à l'utilisation de régulateurs de charge de batterie, offrent une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques dans les endroits éloignés ou non connectés au réseau électrique. Ces technologies contribuent à la transition vers un avenir énergétique durable, réduisant notre dépendance aux combustibles fossiles et préservant notre environnement pour les générations futures.

**Chapitre II :**  
**Batterie et régulation**  
**dans les systèmes PV**  
**autonomes**

### Chapitre II : Batterie et régulation dans les systèmes PV autonomes

#### I. Introduction :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont essentiels pour l'approvisionnement en énergie dans les zones reculées et les emplacements non connectés au réseau électrique. La batterie, un composant essentiel qui stocke l'énergie solaire pour les futures utilisations, est au cœur de certains systèmes. En raison de ses caractéristiques techniques et de son faible coût, la batterie au plomb est l'un des types de batteries les plus couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Dans cet article, nous allons détailler la batterie Plomb, son fonctionnement, les causes de sa dégradation, les algorithmes de charge utilisés, les méthodes de détermination de son état de charge, et l'utilisation des régulateurs de charge dans les systèmes photovoltaïques autonomes.[13]

#### II. Définition d'une batterie acide plomb :

Les batteries acide-plomb jouent un rôle essentiel en tant que système de stockage d'énergie utilisé dans diverses applications, y compris les systèmes photovoltaïques. Leur fiabilité, leur amorçabilité et leur capacité à stocker efficacement l'énergie en font un choix populaire. Dans ce texte, nous explorerons les caractéristiques techniques des batteries acide-plomb ainsi que leur principe de fonctionnement.[14]

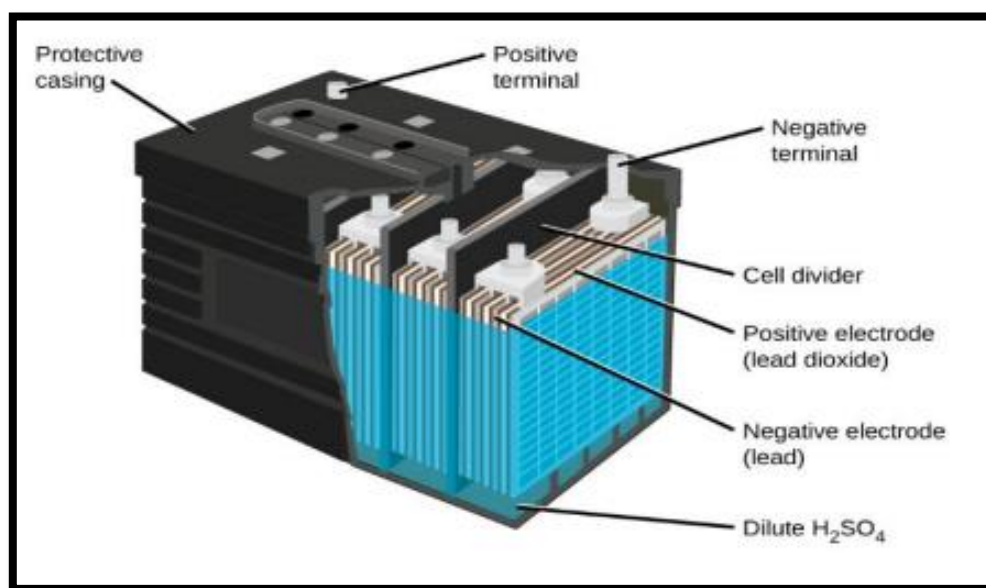


Figure II.1 :Batterie acide plomb

#### 1. Caractéristiques techniques d'une batterie acide-plomb :

##### 1.1. Composition et structure :

Une batterie acide-plomb est composée de plusieurs éléments essentiels qui travaillent ensemble pour stocker et libérer l'énergie. Les principaux composants comprennent les électrodes positives et négative, l'électrolyte, le séparateur et le boîtier. L'électrode positive est généralement constituée de dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ), tandis que l'électrode négative est composée de plomb spongieux (Pb). L'électrolyte est un acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) dilué qui permet la circulation des ions entre les électrodes.[14]

### 1.2. Capacité et tension nominale :

La capacité d'une batterie acide-plomb est exprimée en ampères-heures (Ah) et représente la quantité d'énergie qu'elle peut stocker. La tension nominale d'une batterie acide-plomb est généralement de 2 volts par cellule, et les batteries sont souvent assemblées en séries pour obtenir des tensions plus élevées, telles que 12 volts ou 24 volts.

### 1.3. Cycle de vie et durée de vie :

Le cycle de vie d'une batterie acide-plomb se réfère au nombre de cycles de charge et de décharge complets qu'elle peut subir avant de perdre une partie de sa capacité. La durée de vie d'une batterie acide-plomb dépend de divers facteurs, notamment du nombre de cycles, des conditions de charge, de la température et de l'utilisation correcte. Une maintenance appropriée peut prolonger la durée de vie de la batterie.

### 1.4. Rendement et autodécharge :

Le rendement d'une batterie acide-plomb est la mesure de l'efficacité avec laquelle elle stocke et libère l'énergie. Il est généralement exprimé en pourcentage et dépend de nombreux facteurs tels que le taux de charge et de décharge, la température et l'âge de la batterie. De plus, les batteries acide-plomb ont une autodécharge, ce qui signifie qu'elles perdent progressivement de leur charge lorsqu'elles ne sont pas utilisées. La quantité de décharge automatique varie en fonction de la température ambiante.

### 1.5. Contraintes de température et de charge :

Les performances d'une batterie acide-plomb sont fortement influencées par les contraintes de température et de charge. Les températures extrêmes peuvent réduire la capacité de la batterie et affecter négativement sa durée de vie. De plus, les batteries acide-plomb nécessitent des courants de charge spécifiques pour éviter une surcharge ou une sous-charge, ce qui pourrait endommager la batterie ou réduire ses performances.

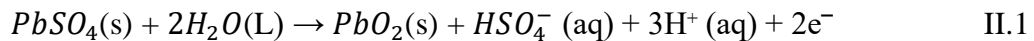
## 2. Principe de fonctionnement d'une batterie acide-plomb :

Le principe de fonctionnement d'une batterie acide-plomb repose sur des réactions chimiques réversibles qui se produisent lors de la charge et de la décharge. Lors de la charge, l'énergie électrique est utilisée pour inverser les réactions chimiques, tandis que lors de la décharge, l'énergie stockée est libérée sous forme d'énergie électrique.[15]

### 2.1. Réactions chimiques lors de la charge et de la décharge :

Lors de la charge d'une batterie acide-plomb, l'électrode positive ( $PbO_2$ ) réagit avec l'électrolyte acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) pour former du plomb tétra hydrate ( $PbSO_4$ ) et libérer des ions d'hydrogène ( $H^+$ ). En même temps, l'électrode négative en plomb spongieux (Pb) réagit également avec l'électrolyte pour former du sulfate de plomb ( $PbSO_4$ ). Ces réactions chimiques inverses se produisent lorsque la batterie est connectée à une source d'énergie externe, les réactions électrochimiques aux électrodes étant les suivantes :

- Borne positive : anode (oxydation) :



- Borne négative : cathode (réduction) :

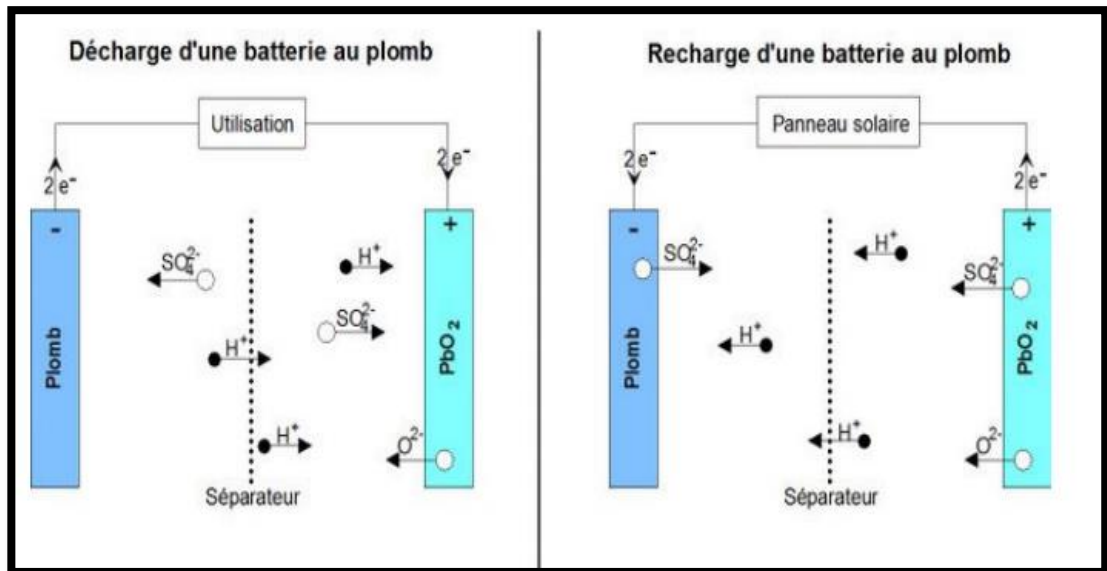
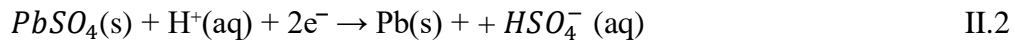


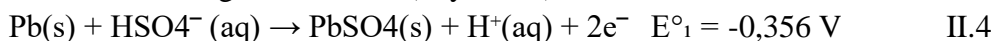
Figure II.2 : la décharge et le recharge d'une batterie au plomb

Lors de la décharge de la batterie, les réactions chimiques se déroulent dans la direction opposée. Le sulfate de plomb présent dans les électrodes réagit avec l'acide sulfurique pour reformer du plomb spongieux à l'électrode négative et du dioxyde de plomb à l'électrode positive. Les ions d'hydrogène libérés lors de la charge se combinent avec les ions sulfate pour reformer de l'acide sulfurique cette réaction est un média mutation spontanée, les réactions électrochimiques aux électrodes étant les suivantes:

- Borne positive : cathode (réduction) :



- Borne négative : anode (oxydation) :



## 2.2. Rôles des électrodes, de l'électrolyte et du séparateur :

Les électrodes positive et négative d'une batterie acide-plomb jouent des rôles clés dans les réactions chimiques de charge et de décharge. L'électrode positive en dioxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>) réagit avec les ions hydrogène pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O) lors de la décharge. L'électrode négative en plomb spongieux (Pb) réagit avec les ions sulfate pour former du sulfate de plomb (PbSO<sub>4</sub>) lors de la décharge.

L'électrolyte, composé d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dilué, facilite le transport des ions entre les électrodes lors des réactions chimiques. Il permet également la conductivité électrique à l'intérieur de la batterie.

Le séparateur est une mince feuille poreuse qui sépare les électrodes positive et négative tout en permettant le passage des ions. Il empêche les courts-circuits entre les électrodes tout en maintenant la fonctionnalité de la batterie.

### **2.3. Mécanismes de charge et de décharge :**

Lors de la charge d'une batterie acide-plomb, un courant électrique est appliqué à la batterie, ce qui provoque des réactions chimiques inverses et la restauration des réactifs chimiques d'origine. La charge peut être effectuée à des courants spécifiques pour assurer une charge complète sans endommager la batterie.

Lors de la décharge, la batterie fournit de l'énergie électrique à un appareil ou à un système. Les réactions chimiques libèrent des électrons qui circulent à travers un circuit externe, produisant ainsi un courant électrique.

### **III. Causes de dégradation d'une batterie acide au plomb :**

Dans cette étude, nous explorerons les causes de dégradation d'une batterie acide au plomb, largement utilisée comme système de stockage d'énergie dans de nombreuses applications. Comprendre les facteurs qui contribuent à la dégradation des batteries acide au plomb est essentiel pour optimiser leur durée de vie et leurs performances. [16]

#### **1. Effets de la sulfatation :**

La sulfatation est l'un des principaux mécanismes de dégradation des batteries acide au plomb. Ce phénomène se produit lorsque des cristaux de sulfate de plomb se forment sur les plaques positives et négatives de la batterie, réduisant ainsi la surface active disponible pour les réactions électrochimiques. La sulfatation peut être causée par une sous-charge prolongée, une surcharge excessive, des températures élevées ou une acidité inadéquate de l'électrolyte. Lorsque les plaques sont fortement sulfatées, la capacité de la batterie diminue et sa performance se détériore. [23]

#### **2. Corrosion et corrosion interne :**

La corrosion est un autre facteur de dégradation des batteries acide au plomb. Les plaques positives et négatives sont exposées à un environnement corrosif en raison de la présence d'acide sulfurique dans l'électrolyte. Au fil du temps, cela peut entraîner une détérioration des matériaux des plaques, une formation de dépôts indésirables et une perte de capacité. De plus, la corrosion interne peut se produire lorsque des particules de matériau se détachent des plaques et se déplacent à l'intérieur de la batterie, entraînant un court-circuit partiel et une réduction de la performance. [26]

#### **3. Effets de l'acidité et des températures élevées :**

L'acidité de l'électrolyte et les températures élevées ont un impact significatif sur la durée de vie et les performances des batteries acides au plomb. Une acidité excessive peut endommager les plaques et provoquer une autodécharge accrue. D'autre part, une acidité insuffisante peut entraîner une formation de sulfate de plomb indésirable sur les plaques. Les températures élevées accélèrent les réactions chimiques indésirables à l'intérieur de la batterie, ce qui peut entraîner des dommages structurels, une augmentation de la sulfatation

et une réduction de la durée de vie de la batterie. Maintenir des conditions d'acidité et de température optimales est essentiel pour prolonger la durée de vie de la batterie.[26]

#### **4. Effets de la surcharge et de la sous-charge :**

La surcharge et la sous-charge sont des facteurs qui peuvent contribuer à la dégradation prématurée des batteries acide au plomb. La surcharge excessive peut provoquer une formation excessive de gaz, une corrosion accrue des plaques, un échauffement excessif et un vieillissement accéléré des matériaux. La sous-charge prolongée peut entraîner une sulfatation des plaques, réduisant ainsi la capacité de la batterie. Il est essentiel de surveiller et de contrôler les processus de charge et de décharge pour éviter la surcharge et la sous-charge, afin de maximiser la durée de vie de la batterie.

#### **5. Effets du vieillissement et des cycles de charge/décharge :**

Le vieillissement naturel et les cycles répétés de charge et de décharge ont également un impact sur la dégradation des batteries acide au plomb. Au fil du temps, les matériaux des plaques subissent des changements structurels et chimiques qui conduisent à une perte de capacité progressive. De plus, les cycles répétés de charge/décharge peuvent entraîner une accumulation de sulfate de plomb, réduisant ainsi la capacité de la batterie au fil du temps. Le vieillissement et les cycles de charge/décharge sont des processus inévitables, mais une utilisation et une maintenance appropriées peuvent minimiser leur impact sur la performance de la batterie.

### **IV. Les différents algorithmes de charge d'une batterie Acide-plomb appliqués dans les systèmes PV :**

Dans cette titre, nous explorerons les différents algorithmes de charge utilisés pour les batteries acide-plomb dans les systèmes photovoltaïques (PV). Ces algorithmes jouent un rôle crucial dans la gestion de la charge de la batterie, garantissant une charge optimale pour prolonger sa durée de vie et maximiser son rendement. Nous examinerons les principaux algorithmes utilisés et discuterons de leurs avantages et limitations.

Algorithmes de charge pour les batteries acide-plomb dans les systèmes PV :

#### **1. Charge en tension constante (CCCV) :**

L'algorithme de charge en tension constante (CCCV) est l'un des plus couramment utilisés dans les systèmes PV. Il consiste à appliquer une tension constante à la batterie jusqu'à ce que sa tension atteigne un seuil prédéterminé, puis à réduire la tension pour maintenir une charge constante. Ce mode de charge permet de limiter la tension maximale de la batterie et d'éviter la surcharge. Il convient aux batteries acide-plomb, car il permet de charger efficacement la batterie tout en évitant les dommages liés à une tension excessive[21].

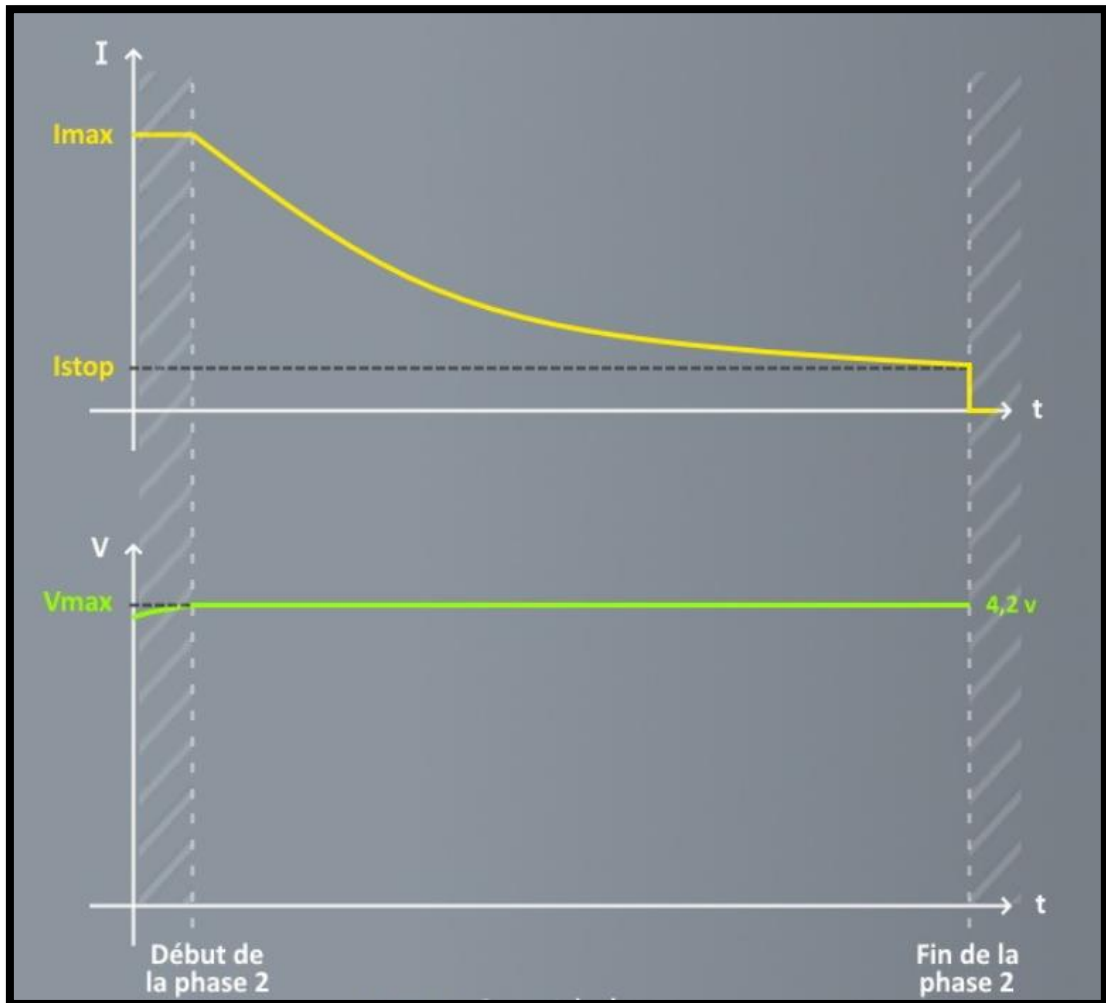


Figure II.3 :charge à tension constante (CV ou ABSORPTION)[21]

### 2. Charge en courant constant (CCC) :

L'algorithme de charge en courant constant (CCC) implique l'application d'un courant constant à la batterie jusqu'à ce qu'elle atteigne une tension spécifiée. Cette méthode est utilisée pour recharger rapidement les batteries déchargées. Elle permet d'augmenter le courant de charge pour accélérer la recharge, mais elle nécessite une surveillance étroite pour éviter une surcharge de la batterie. Le CCC est adapté aux batteries acide-plomb lorsqu'une recharge rapide est nécessaire, par exemple après une décharge profonde.[21]

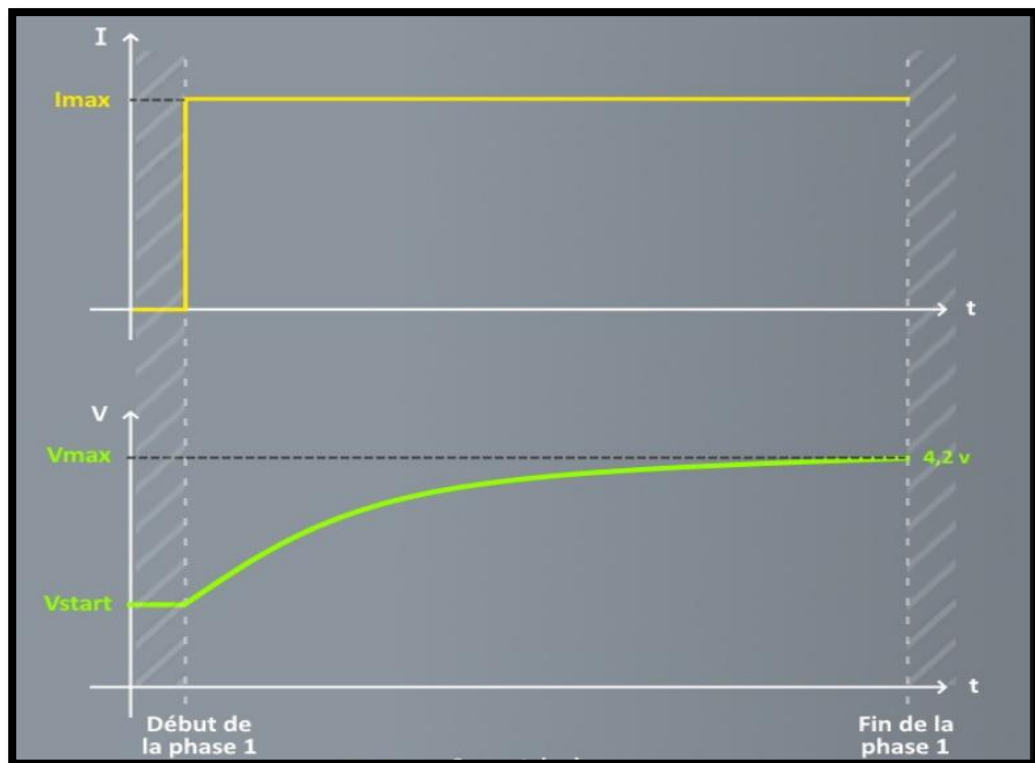


Figure II.4 : charge à courant constant(CC ou BULK)[21]

### V. Les différentes méthodes de détermination de l'état de charge de la batterie :

L'état de charge (SOC) d'une batterie est une mesure cruciale pour évaluer la quantité d'énergie stockée dans la batterie à un moment donné. Dans cette étude, nous explorons les différentes méthodes utilisées pour déterminer l'état de charge des batteries. Ces méthodes sont essentielles pour optimiser l'utilisation de la batterie, améliorer sa durée de vie et garantir un fonctionnement fiable des systèmes de stockage. Nous examinerons les principes et techniques principaux utilisés pour évaluer l'état de charge de la batterie.

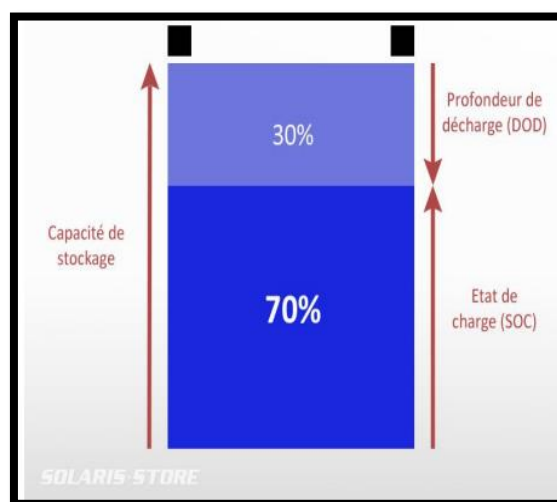


Figure II.5 :Une batterie qui a une profondeur de décharge de 30% a un état de charge de 70%. [24]

#### 1. Méthodes basées sur la tension :

Les méthodes basées sur la tension utilisent la mesure de la tension de la batterie pour estimer son état de charge. Ces méthodes reposent sur des relations empiriques entre la tension de la batterie et son niveau de charge. Elles exploitent les variations de tension caractéristiques des batteries à différents niveaux de charge. Cependant, ces méthodes peuvent être influencées par des variations de tension liées à d'autres facteurs, tels que la température, l'âge de la batterie et la charge ou la décharge récente.[33]

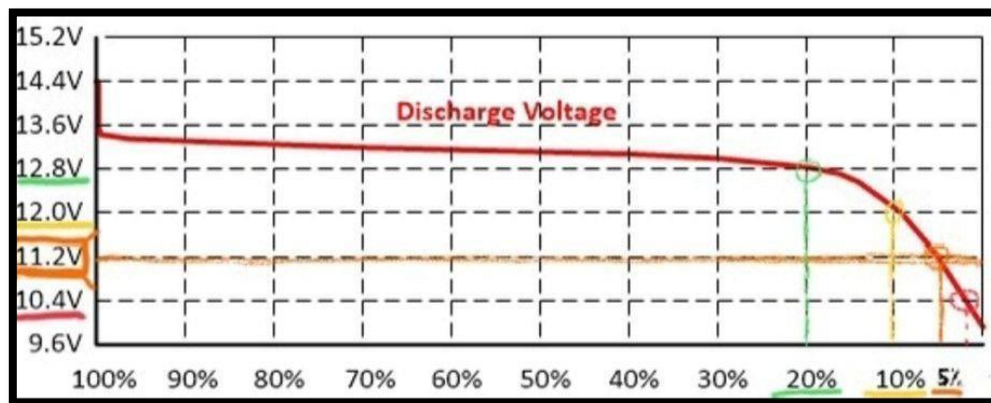


Figure II.6 :La tendance d'état de charge une batterie [35]

### 2. Méthodes basées sur la capacité :

Les méthodes basées sur la capacité mesurent la quantité d'énergie entrant et sortant de la batterie pour estimer son état de charge. Ces méthodes utilisent des techniques telles que l'intégration du courant, la mesure de la capacité nominale et l'utilisation de modèles mathématiques pour estimer la capacité restante de la batterie. Elles sont basées sur le principe que la capacité de la batterie diminue à mesure que l'énergie est prélevée et augmente lorsqu'elle est rechargée. Cependant, ces méthodes peuvent être affectées par des variations de capacité dues à l'usure de la batterie et à d'autres facteurs environnementaux.[35]

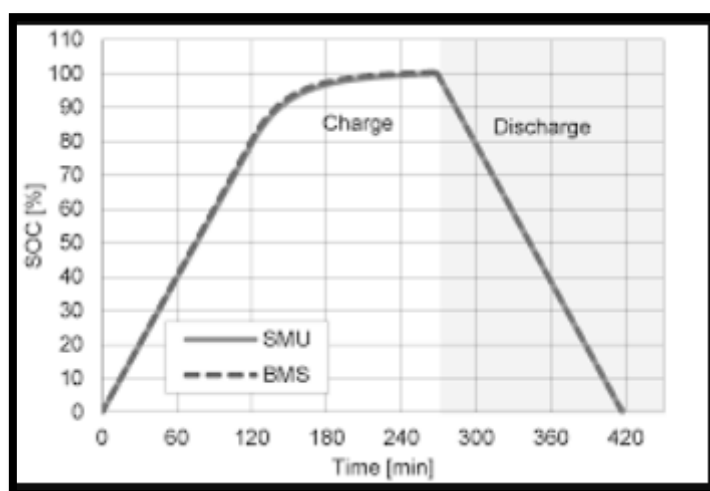


Figure II.7 :le schéma d'état de charge une batterie[44]

### 3. La méthode de coulomb Counting :

La méthode de Coulomb Counting est basée sur l'intégration du courant pour estimer la capacité restante d'une batterie. Voici les étapes clés avec les équations correspondantes :

- Mesure du courant : Le courant est mesuré à intervalles réguliers à l'aide d'un capteur de courant. On le note "I(t)", où "t" représente le temps.
- Intégration du courant : Le courant mesuré est intégré au fil du temps pour obtenir une estimation de la charge totale transférée vers ou depuis la batterie. L'intégrale du courant "I(t)" donne la quantité de charge "Q(t)":
- 

$$Q(t) = \int I(t) dt$$

L'intégration peut être réalisée à l'aide de méthodes numériques, telles que la méthode des trapèzes ou la méthode de Simpson.

- Compensation des pertes : Pour tenir compte des pertes dues à l'efficacité de la batterie et aux courants de fuite, des facteurs de correction sont appliqués à l'estimation de la charge. On les note "C\_loss".

$$Q_{corrigée}(t) = Q(t) \cdot C_{loss}$$

Les facteurs de correction sont déterminés expérimentalement ou à l'aide de modèles spécifiques à la batterie.

- Suivi de la capacité : L'estimation de la capacité restante est mise à jour en continu en suivant les variations du courant. La capacité restante " $C_{restante}(t)$ " peut être obtenue en soustrayant la charge estimée " $Q_{corrigée}(t)$ " de la capacité totale initiale " $C_{totale}$ ".

$$C_{restante}(t) = C_{totale} - Q_{corrigée}(t)$$

La capacité restante peut également être exprimée en pourcentage de la capacité totale :

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C(t)} \int_0^t \eta_{c(t)} \cdot I(t) dt$$

$$C(t) = \frac{C_{nominal} \cdot c_{tcoef}}{1 + A_{CAP} \left( \frac{|I(t)|}{I_{nominal}} \right)^{B_{cab}}} (1 + \alpha_C dt + \beta_C d(t)^2)$$

$$I_{nominal} = \frac{C_{nominal}}{\eta_{c(t)}}$$

En notation française, nous avons :

- $C(t)$  : la capacité instantanée de la batterie
- $\eta_{c(t)}$  : l'efficacité de Coulomb
- $I(t)$  : le courant instantané de charge/décharge de la batterie
- $t$  : coefficient
- A cap, B cap, ac et bc : les paramètres empiriques à identifier
- C nominal et I nominal : capacité nominale et courant nominal respectivement pris pour 10 heures

Ils sont définis comme suit :

$C(t)$  est la capacité instantanée de la batterie. Elle représente la quantité d'énergie électrique que la batterie peut stocker à un moment donné.

" $\eta_{c(t)}$ " est l'efficacité de Coulomb, qui mesure la quantité d'énergie réellement stockée par rapport à l'énergie théoriquement disponible lors de la charge et de la décharge de la batterie.

" $I(t)$ " est le courant instantané de charge ou de décharge de la batterie. Il indique le flux d'électricité entrant ou sortant de la batterie à un moment précis.

" $t$ " est un coefficient qui peut être utilisé pour ajuster certains paramètres du modèle.

"A cap", "B cap", "ac" et "bc" sont des paramètres empiriques qui doivent être identifiés à partir de données expérimentales ou de modélisation spécifique à la batterie. Ils sont utilisés pour ajuster les performances du modèle de la batterie.

"C" nominal et "I" nominal sont la capacité nominale et le courant nominal de la batterie respectivement. Ils sont généralement définis pour une période de 10 heures, ce qui permet de comparer les performances des différentes batteries.

Il est important de noter que ces notations sont spécifiques au contexte de la modélisation de la batterie et peuvent varier en fonction des études et des modèles utilisés.

Ces équations permettent d'estimer la restante d'une batterie en utilisant la méthode de Coulomb Counting. Il est important de noter que la précision de l'estimation dépend de la qualité des mesures de courant, des facteurs de correction appliqués et de la calibration du système.

Méthode de Coulomb Counting et l'état de charge (SOC) sont des concepts étroitement liés dans le domaine des batteries. L'état de charge représente le niveau de

charge d'une batterie par rapport à sa capacité totale. En utilisant la méthode de Coulomb Counting, il est possible d'estimer l'état de charge en fonction de la quantité de charge transférée et de la capacité totale de la batterie.

La méthode de Coulomb Counting est largement utilisée dans les systèmes de gestion de batteries pour surveiller l'état de charge, optimiser les performances des batteries et assurer des opérations de charge et de décharge sûres et efficaces. [44]

### 4. Le régulateur PI

#### 4.1. Définition :

Le régulateur PI, appelé aussi correcteur PI (proportionnel, intégrateur, ou proportionnel, intégral) est un système de contrôle, permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé ». C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques.

#### 4.2. Principe générale :

Le PI est une correction dite "série", c'est-à-dire qu'elle agit à la sortie du comparateur, sur l'erreur. L'erreur est la différence entre la consigne et la mesure. Le correcteur PI agit de 3 manières :

- **Action Proportionnelle (P)** : Elle assure la rapidité. L'erreur est multipliée par un gain  $K_p$ .
- **Action Intégrale (I)** : Elle annule l'erreur statique. L'erreur est intégrée et divisée par un gain  $K_i$ .

Le régulateur PI classique relie directement le signal de commande  $u(t)$  au signal d'écart  $e(t)$ . Sa description temporelle est la suivante :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)$$

L'écart se définit par ;

$$e(t) = y'(t) - y(t)$$

Où  $y'(t)$  est la consigne

Et  $y(t)$  est la sortie mesurée par le capteur.

En prenant la transformée de Laplace de l'équation on obtient la fonction de transfert du correcteur

$$C(p) = K_p + \frac{1}{p} K_i$$

Cette combinaison des termes P et I est aussi désignée sous le nom de forme parallèle ou non-interactive. Le schéma fonctionnel d'un processus réglé à l'aide d'un tel régulateur est donné à la figure suivante :

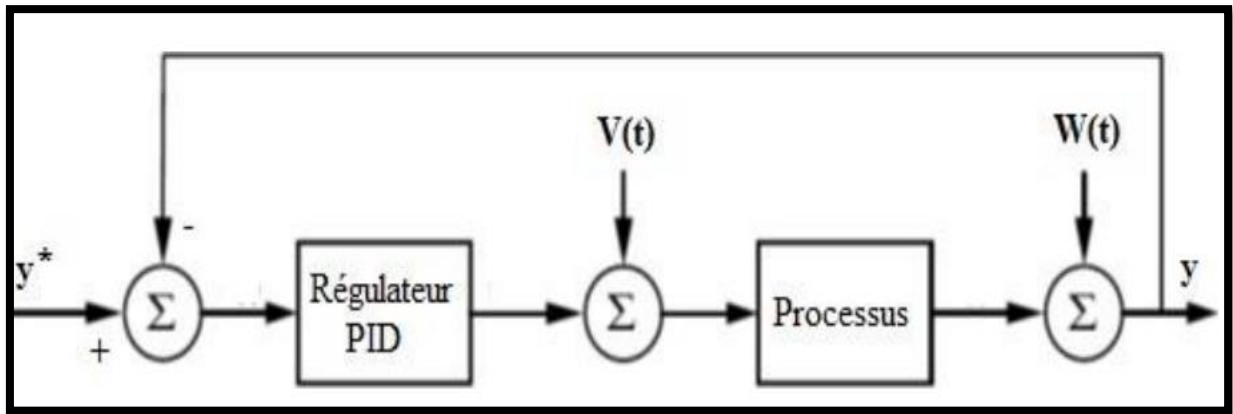


Figure II.8 :Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique

La figure II.8 illustre le principe général d'un processus réglé par PID où on y trouve les perturbations  $V(t)$  et  $W(t)$ . Ces bruits sont généralement issus des capteurs et des actionneurs du système.

### 4.3. Influence des performances sur les régulateurs PI :

#### 4.3.1. Influence de $K_p$ :

Lorsque  $K_p$  augmente la réponse du procédé sera accélérée, mais rend la mesure instable.

#### 4.3.2. Influence de $K_i$ :

Lorsque  $\frac{1}{K_i}$  augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.

Quand augmente	Stabilité	rapidité	précision
$K_p$	Diminue	augmente	Pas d'influence
$K_i$	augmente	Diminue	Pas d'influence

Figure II.9 :l'influence de  $K_p$  et de  $K_i$  avec les régulateurs PI

### 4.4. Méthodes de réglages des paramètres P et I :

Il existe plusieurs méthodes pour régler une boucle de régulation dont les plus courantes Sont :

- La méthode par identification de procédé : L'identification du procédé permet d'établir les caractéristiques du procédé (gain statique, constante de temps, temps mort). Les actions P, I sont calculées en fonction de ces caractéristiques. Cette méthode convient aux procédés à grande inertie.
- La méthode de Ziegler et Nichols : L'observation de la réponse du procédé permet de déduire les caractéristiques du procédé et d'en déduire, en fonction des règles de calcul définies par Ziegler et Nichols, les paramètres P et I .

- La méthode par approches successives : Elle consiste à modifier progressivement les paramètres et observer la réaction de manière à s'approcher de la réponse optimale. Cette méthode est simple et adaptée aux procédés rapides où le temps mort est négligeable

Le régulateur PI permet de réaliser des performances telles que la stabilité, la rapidité en P, I Ceci peut se faire en ajustant les paramètres associés à ces actions

### VI. Régulateur de charges appliquées dans les systèmes PV :

Les régulateurs de charge jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques (PV) en assurant une gestion efficace de la charge des batteries. Dans cette étude, nous explorerons les différents types de régulateurs de charge utilisés dans les systèmes PV, leurs principes de fonctionnement et leurs avantages. Les régulateurs de charge sont essentiels pour maximiser l'efficacité du système, prolonger la durée de vie de la batterie et garantir le bon fonctionnement fiable du système PV.[45]

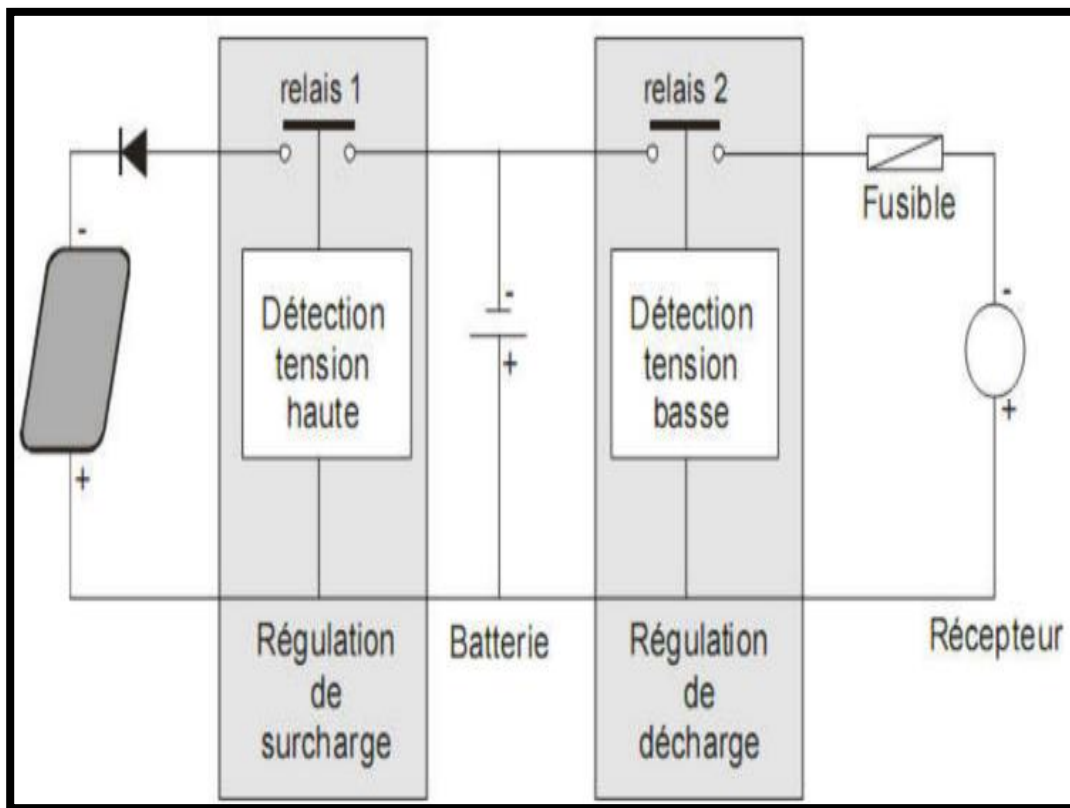


Figure II.10 :le schéma de régulateur de charge dans les systèmes photovoltaïques. [47]

#### 1. Rôle d'un régulateur de charge :

Les régulateurs de charge sont responsables de contrôler le flux d'énergie provenant des panneaux solaires vers les batteries, en régulant la tension et le courant de charge. Leur fonction principale est de prévenir les surcharges et les décharges excessives de la batterie, ce qui peut endommager la batterie et réduire sa durée de vie. De plus, les régulateurs de

charge assurent une charge optimale en adaptant la tension et le courant de charge aux besoins spécifiques de la batterie.

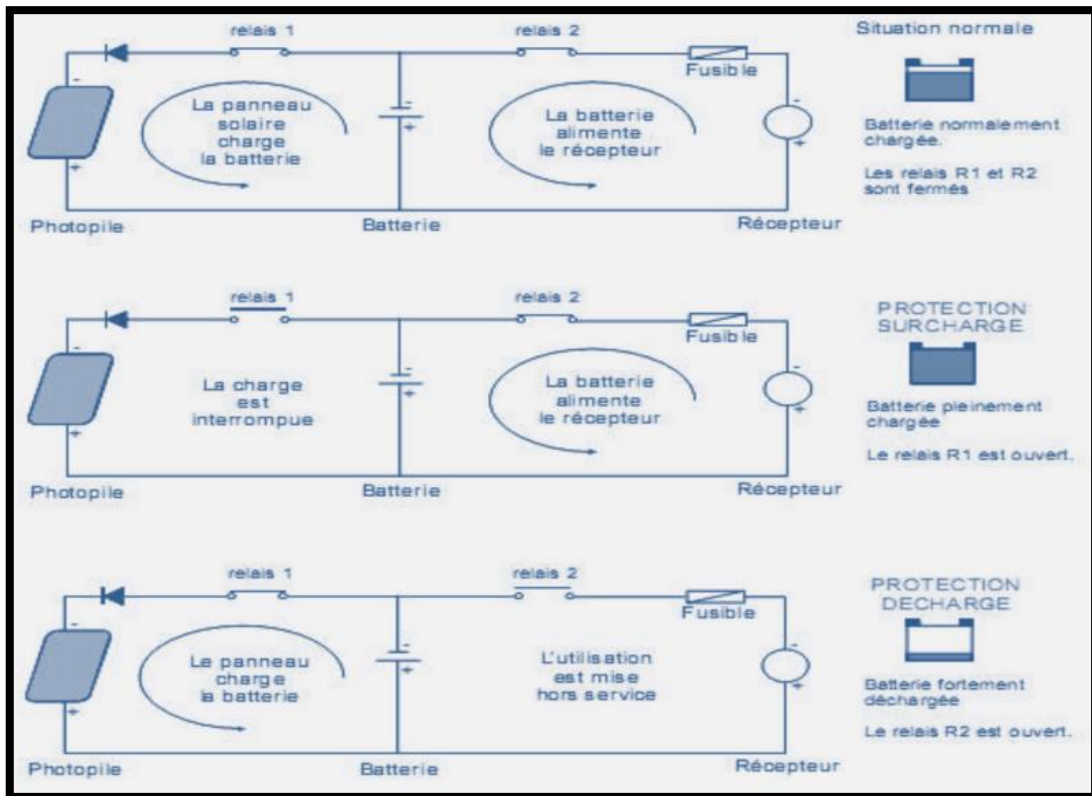


Figure II.11 : diagramme des trois états de fonctionnement d'un régulateur de charge/décharge.[47]

## 2. Régulateurs de charge à régulation de tension :

Les régulateurs de charge à régulation de tension sont les régulateurs les plus couramment utilisés dans les systèmes PV. Ils maintiennent une tension de charge constante pour la batterie en ajustant automatiquement la puissance des panneaux solaires. Lorsque la tension de la batterie atteint un seuil prédéterminé, le régulateur réduit la puissance fournie par les panneaux solaires pour maintenir la tension de charge constante. Cela permet de protéger la batterie contre une surcharge tout en garantissant une charge optimale.[46]

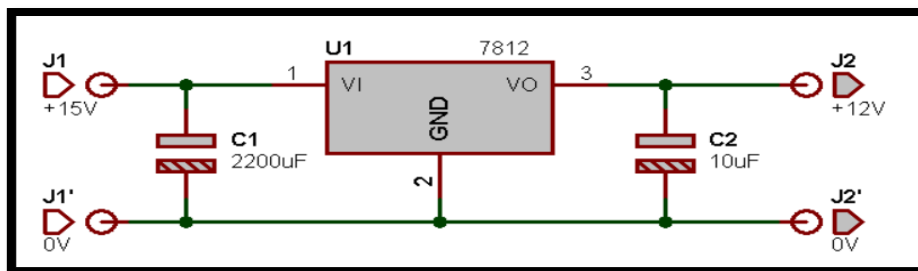


Figure II.12 : schéma de régulateur de charge à régulation de tension

### VII. Le régulateur MPPT intégré dans le régulateur de charge pour les systèmes PV autonomes :

Les systèmes photovoltaïques autonomes utilisent des régulateurs de charge pour contrôler la charge des batteries et optimiser l'utilisation de l'énergie solaire. Parmi les différents types de régulateurs de charge, ceux intégrant la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking) offrent des avantages significatifs en termes d'efficacité de conversion et de rendement énergétique. Dans cette étude, nous examinerons le régulateur MPPT intégré dans le régulateur de charge, son fonctionnement, ses avantages et son importance dans les systèmes PV autonomes.[49]

#### 1. Principe de fonctionnement du régulateur MPPT :

Le régulateur MPPT est conçu pour extraire le maximum de puissance disponible à partir des panneaux solaires en ajustant la tension et le courant de charge. Il suit le Point de Puissance Maximum (MPPT) en fonction des conditions d'ensoleillement et des caractéristiques des panneaux solaires. Le régulateur MPPT utilise des algorithmes avancés pour trouver le point de fonctionnement optimal des panneaux solaires, où la puissance de sortie est maximisée. Cela permet d'optimiser l'efficacité de conversion et de capturer davantage d'énergie solaire pour charger les batteries.

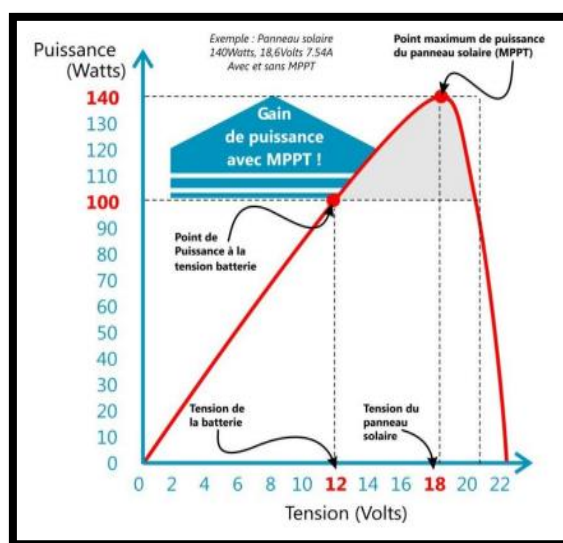


Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'un régulateur MPPT[50]

#### 2. Avantages du régulateur MPPT intégré :

Le régulateur MPPT intégré dans le régulateur de charge présente plusieurs avantages par rapport aux régulateurs conventionnels. Tout d'abord, il améliore l'efficacité énergétique en permettant une conversion plus efficace de l'énergie solaire en énergie électrique. En suivant précisément le point de puissance maximum, le régulateur MPPT optimise la conversion et minimise les pertes d'énergie.

De plus, le régulateur MPPT intégré offre un rendement de conversion plus élevé par rapport aux régulateurs conventionnels. Il permet d'extraire davantage de puissance des

panneaux solaires, même dans des conditions de faible ensoleillement ou de températures élevées. Cela se traduit par une production d'énergie accrue et une meilleure utilisation de la ressource solaire disponible.

Le régulateur MPPT intégré est également compatible avec différents types de panneaux solaires. Il peut s'adapter à des panneaux solaires ayant des caractéristiques différentes, tels que des tensions nominales et des courants de court-circuit variés. Cela offre une plus grande flexibilité dans le choix des panneaux solaires et facilite l'intégration du régulateur dans différents systèmes PV autonomes.

Enfin, le régulateur MPPT intégré permet une gestion avancée de l'énergie. Il peut surveiller et contrôler la charge des batteries de manière intelligente, en prenant en compte les conditions d'ensoleillement, les demandes d'énergie et l'état de charge des batteries. Cela permet d'optimiser la gestion de l'énergie, de prolonger la durée de vie des batteries et de garantir une alimentation électrique fiable.[47]

### **3. Impact du régulateur MPPT sur les performances du système PV autonome :**

Le régulateur MPPT joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances des systèmes PV autonomes, Il a un impact significatif sur plusieurs aspects du système:

- le régulateur MPPT contribue à améliorer la productivité du système en maximisant la production d'énergie solaire. En suivant le point de puissance maximum, il permet d'extraire le maximum d'énergie des panneaux solaires, ce qui se traduit par une production d'énergie accrue.
- le régulateur MPPT contribue à prolonger la durée de vie de la batterie. En régulant efficacement la charge des batteries, il évite les surcharges et les décharges excessives qui peuvent endommager les batteries. Cela permet d'optimiser la durée de vie des batteries et de réduire les coûts de remplacement.
- le régulateur MPPT réduit les pertes d'énergie. En optimisant l'efficacité de conversion, il minimise les pertes d'énergie lors de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cela permet d'utiliser de manière plus efficace la ressource solaire disponible et de réduire les coûts d'exploitation.
- Le régulateur MPPT contribue également à assurer la stabilité du système PV autonome. En ajustant dynamiquement la tension et le courant de charge, il maintient une alimentation électrique stable et évite les fluctuations indésirables. Cela garantit un fonctionnement fiable du système et une alimentation électrique continue.
- le régulateur MPPT améliore la fiabilité de l'alimentation électrique. En optimisant la charge des batteries, il assure une alimentation électrique constante et fiable, même dans des conditions changeantes. Cela est particulièrement important pour les applications critiques où une alimentation ininterrompue est nécessaire. [50]

### VIII. Conclusion :

En conclusion, les batteries et les régulateurs de charge jouent un rôle crucial dans les systèmes PV autonomes. Comprendre les caractéristiques techniques des batteries acide-plomb, les différents algorithmes de charge, les méthodes de détermination de l'état de charge, ainsi que l'importance des régulateurs de charge, en particulier le régulateur MPPT, est essentiel pour maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes PV autonomes. Avec une attention continue à la maintenance et à l'optimisation de ces composants, il est possible de réaliser des systèmes PV autonomes performants et durables.

# **Chapitre III :**

**Conception d'une Carte de contrôle  
intelligente pour le système de  
gestion de batterie BMS**

### **Chapitre III : Conception d'une Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS :**

#### **I. Introduction :**

Dans ce chapitre se concentre sur la conception d'une carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS. Cette carte de contrôle joue un rôle crucial dans le suivi et la régulation de la batterie, en veillant à son bon fonctionnement et à sa protection contre les phénomènes de surcharge et de décharge excessive.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail les étapes de conception et de réalisation de cette carte de contrôle. Pour ce faire, nous nous appuyons sur différentes technologies et composants, notamment le microcontrôleur PIC18F45K22, qui constitue le cœur de la carte et assure le contrôle et la gestion des paramètres de la batterie.

Un aspect essentiel de cette conception est l'intégration de la technologie de l'état de charge (SOC) dans la carte de contrôle. L'état de charge (SOC) permet de mesurer et d'estimer avec précision la quantité d'énergie restante dans la batterie, ce qui est essentiel pour optimiser son utilisation et prévenir les décharges excessives ou les surcharges.

Nous aborderons également le concept de contrôle proportionnel-intégral (PI) dans le contexte de la régulation de la batterie. Le contrôleur PI permet d'ajuster en temps réel la charge et la décharge de la batterie en fonction de son état de charge et des besoins énergétiques du système. Cela garantit une utilisation efficace de la batterie tout en maintenant son intégrité et en prolongeant sa durée de vie utile.

Au cours de ce chapitre, nous détaillerons les choix de composants, les spécifications techniques, ainsi que les différentes étapes de réalisation de la carte de contrôle intelligente. Nous présenterons également les tests réalisés pour évaluer les performances de la carte et les résultats obtenus.

La conception de cette carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS sont essentielles pour assurer un fonctionnement optimal et fiable du système photovoltaïque autonome, en maximisant l'utilisation de l'énergie stockée dans la batterie et en préservant sa durée de vie.

#### **II. Choix et description des matériels utilisés :**

##### **1. Composition de système PV autonome :**

Le développement du système de monitoring a été effectué au niveau du banc de test des régulateurs solaires dans les systèmes photovoltaïques autonomes situé au niveau du « laboratoire de régulation et stockage de l'énergie » de la division énergie solaire photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER.

Le régulateur solaire joue le rôle d'une interface de protection et de commande entre le générateur PV et la batterie de stockage. Le banc de test des régulateurs solaires est constitué principalement par :

- 1- Un générateur photovoltaïque GPV.
- 2- Un régulateur solaire muni d'un convertisseur DC-DC Buck et d'un circuit de commande qui control l'état de la batterie. Le circuit de commande est muni principalement des capteurs de mesure des différentes paramètres internes de la batterie, d'un microcontrôleur PIC18F45K22 et d'un afficheur LCD.
- 3- Une batterie solaire 12V en plomb-acide.
- 4- Une lampe à LED (charge).

## **2. Choix et description des matériels utilisés dans notre carte de commande :**

### **2.1. Microcontrôleur :**

#### **a) Introduction :**

Un microcontrôleur est un composant similaire à un microprocesseur, mais nécessitant une programmation (en assembleur ou en langage C) pour exécuter automatiquement des commandes (code machine). Cependant, contrairement à un microprocesseur, un microcontrôleur est une unité de traitement et d'exécution de l'information qui intègre des périphériques internes, éliminant ainsi le besoin de composants externes supplémentaires. Une fois programmé, un microcontrôleur PIC peut fonctionner de manière autonome. Il regroupe plusieurs modules dans une seule puce, comprenant une mémoire flash pour stocker le programme d'exécution, une mémoire statique pour les constantes, variables et tableaux de travail, une horloge pour synchroniser son fonctionnement, ainsi que des ports d'entrée/sortie E/S. [48]

Avec l'évolution des microcontrôleurs, de nouveaux modules importants ont été ajoutés, tels que des convertisseurs analogiques-numériques (CAN) de 8 et 10 bits, des modulateurs à largeur d'impulsion variable (PWM), des circuits à horloges multiples (Timer0, Timer1 et Timer2) de 8 bits et 16 bits, des modules de communication série synchrones (SPI et I2C) et asynchrones (USART), etc. Une fois que le prix des microcontrôleurs est devenu abordable, la plupart des concepteurs les utilisent dans la conception de circuits électroniques en raison de leurs nombreux avantages, tels que :

- Réduction du nombre de composants, ce qui entraîne une diminution de l'encombrement, des coûts et du poids.
- Robustesse face aux perturbations.
- Facilité d'utilisation : les paramètres de réglage peuvent être modifiés par programmation plutôt que de modifier le câblage dans une régulation analogique.
- Amélioration de l'algorithme implémenté.
- Possibilité d'utiliser facilement des algorithmes complexes. [48]

#### **b) Microcontrôleur PIC18F45K22 :**

Le fameux microcontrôleur PIC18F45K22 de la firme MICROCHIP va être utilisé vu les performances qu'il présente. D'autres microcontrôleurs peuvent être utilisés, l'important est que le microcontrôleur utilisé dispose d'un convertisseur analogique-numérique ADC.

## Chapitre III : Conception d'une Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

Pour que le développement du schéma de la carte soit clair le plus possible, nous préférons de donner quelques détails essentiels que le microcontrôleur qu'on a choisi doit les avoir :

- L'unité de traitement et de contrôle,
- L'unité d'acquisition analogique-numérique,
- La liaison RS232 pour assurer la communication entre le micro-ordinateur et la carte,
- Un afficheur LCD est lié directement à la carte pour l'affichage des données.

### c) Identification d'un microcontrôleur PIC :

La dénomination d'un microcontrôleur PIC est généralement composée de trois parties: NN LLL XXX.

- NN représente la famille à laquelle appartient le circuit.
- LLL est un groupe de une, deux ou trois lettres qui identifient le type de mémoire de programme et la plage de tension d'alimentation utilisée.
- XXX est un ensemble de deux ou trois chiffres qui constitue la référence spécifique du circuit.

Les microcontrôleurs PIC sont regroupés en trois grandes familles sont :

<b>La famille Base-Line</b>	Utilise des mots d'instruction codés sur 12 bits
<b>La famille Mid-Range</b>	Utilise des mots d'instruction codés sur 16 bits
<b>La famille High-End</b>	Utilise des mots d'instruction codés sur 18 bits

Figure III.1 :Tableau d'identification d'un microcontrôleur PIC.

Il est important de souligner que les microcontrôleurs PIC sont des composants électroniques statiques, ce qui signifie qu'ils peuvent fonctionner à des fréquences d'horloge très basses, voire être arrêtés complètement, sans perdre de données ni rencontrer de problèmes de fonctionnement. Le PIC18F45K22, développé par Microchip, appartient à la famille Mid-Range. Sa mémoire programme est de type Flash et il peut fonctionner à des fréquences d'horloge allant de 1 à 64 MHz.

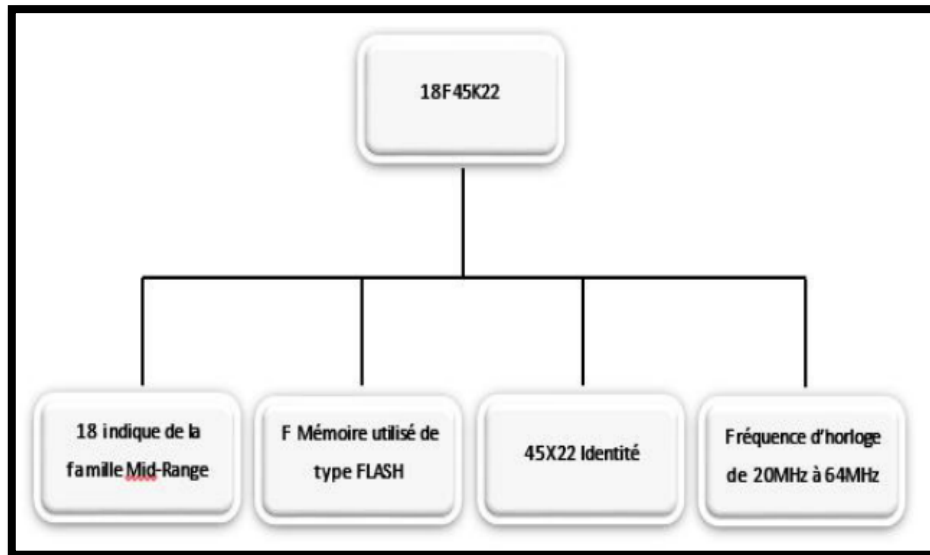


Figure III.2 Configuration du PIC-18F45K22

On peut noter que les PICs sont des composants statiques, c'est à dire la fréquence d'horloge peut être abaissée jusqu'à l'arrêt complet sans perte de données et sans dysfonctionnement.

**d) Caractéristiques techniques :**

Le PIC18F45K22 présente toute une série de composants, ces principales caractéristiques sont :

- Compilation par C
- Jusqu'à 1024 octets de données EEPROM : on trouve généralement 10 bits d'ADC donc :  $2^{10} = 1024$
- Tension d'alimentation de fonctionnement de 2.3V à 5.5V
- Bloc d'oscillateur interne de précision 16 Mhz
- Fréquences sélectionnables de 31 Khz à 16Mhz
- Mémoire programme de type Flash de 32 Kmots ;
- RAM de 368 octets ;
- EPROM de 256 octets ;
- 33 E/S réparties en 5 ports bidirectionnels ;
- 8 convertisseurs A/N de 10 bits
- 26 sources d'interruption ;
- Chien de garde WDT (Watch Dog Timer);
- Debugger ICD ;
- (E)CCP : (Enhance) Capture/Compare/PWM
- Capture : permet la mesure de temps ;
- Compare : permet la production des signaux rectangulaires.
- Des interfaces de communication séries synchrone (SSP/SPI/I2C/MSSP);
- Jeu de 70 instructions ;
- Une interface de communication série asynchrone et synchrone (A/E/USART);
- Trois temporisations (TIMER0, TIMER1, TIMER2).

e) **Architecture interne d'un microcontrôleur PIC18F45K22 :**

Les entrées/sorties du microcontrôleur peuvent être groupées par fonction comme suit :

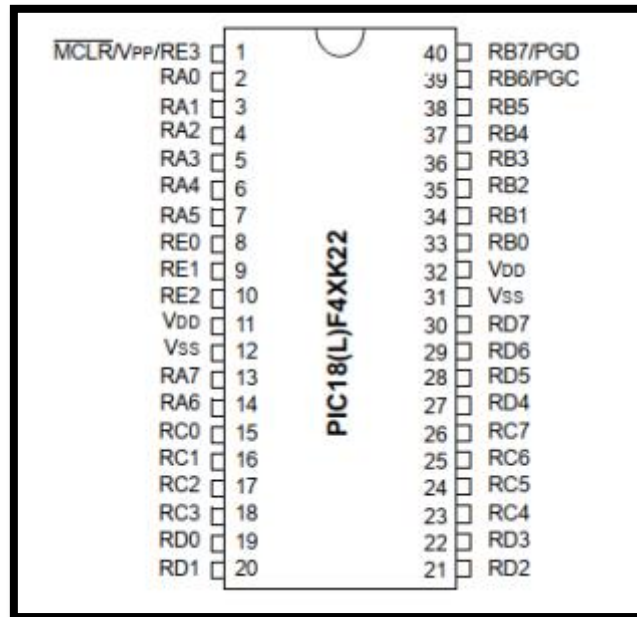


Figure III.3 :Brochage du PIC18F45K22.

Pour le PIC18F45K22, nous allons considérer plusieurs types d'oscillateurs : le boîtier du PIC18F45K22 décrit par la figure ci-dessus comprend 40 pins : 33 pins d'entrées/sorties, 4 pins pour l'alimentation, 2 pins pour l'oscillateur et une pour le Reset (MCLR).

**Les ports :** le PIC18F45K22 dispose de 33pins d'E/S pour communiquer avec l'environnement extérieur. Celles-ci sont répartis en 5 ports parallèles bidirectionnels :

- 6 lignes pour le port A.
- 8 lignes pour le port B.
- 8 lignes pour le port C.
- 8 lignes pour le port D.
- 3 lignes pour le port E.

f) **Configuration Minimale Du PIC18F45K22**

Pour réaliser une carte à base d'un PIC18F45K22, il faut au moins configurer son alimentation, le MCLR et l'horloge.

**L'alimentation :** Le PIC fonctionne dans la plage de tension qui s'étend de 2,3 à 5.5V.

**Le circuit d'initialisation :** Le MCLR est habituellement relié au 5V. Ce pin étant utilisé pour effectuer un Reset du composant en cas de connexion à la masse.

**L'Oscillateur :** L'oscillateur est le cœur du microcontrôleur, c'est lui qui cadence le déroulement du programme. Il doit fournir un signal carré périodique au microcontrôleur.

**2.2.Afficheur LCD 20\*4 :**

Un afficheur LCD 20\*4 est un type d'écran à cristaux liquides (LCD) utilisé pour afficher des informations sur quatre lignes comportant chacune vingt caractères. Cet afficheur est souvent utilisé dans des applications où une quantité plus importante d'informations doit être affichée.

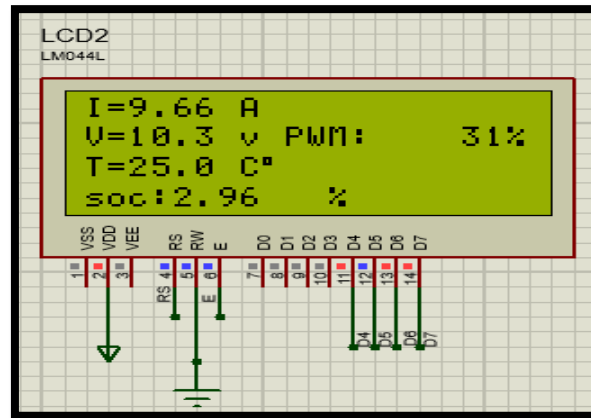


Figure III.4 :Brochage du LCD 20\*4

Les différentes broches externes de l'afficheur LCD sont les suivantes :

- **VCC, masse** : alimentation de l'afficheur LCD avec 5 V, 0V respectivement.
- **Contraste (VEE)** : entrée permettant de régler le contraste de l'afficheur LCD. Il faut appliquer une tension continue réglable entre 0 V et 5 V à l'aide d'un potentiomètre.
- **VLED** : différence de potentiel permettant de commander le rétro éclairage.
- **E (ENABLE)** : entrée de validation, elle permet de valider les données sur un front descendant.
- **RS (Registre Select)**: cette entrée permet d'indiquer à l'afficheur si l'on souhaite réaliser une commande (RS=0) par des instructions spécifiques ou écrire une donnée sur le bus (RS=1).
- **R/W** : entrée de lecture (R/W=1) et d'écriture (R/W=0). Lorsqu'on commande l'afficheur LCD, il faut se placer en mode écriture.

**D7...D0** : bus de données bidirectionnel, il permet de transférer les instructions ou les données à l'afficheur LCD.

### 2.3. Capteur de courant ACS712 :

Pour la mesure de courant, nous avons utilisés le capteur de courant à effet Hall de type ACS712 qui nous fournit une tension exploitable. Les capteurs de courant ACS712 ont plusieurs gammes de mesure de  $\pm 5A$ ,  $\pm 20A$  et  $\pm 30A$ . La seule différence entre ces gammes de mesure est dans leur sensibilité. Dans notre travail nous avons utilisés l'ACS712-30A montré dans la Figure 3.8 qui mesure le courant allant de -30A à +30A avec une sensibilité de 0.066V/A (66mV/A) pour une tension d'alimentation de 5V DC.

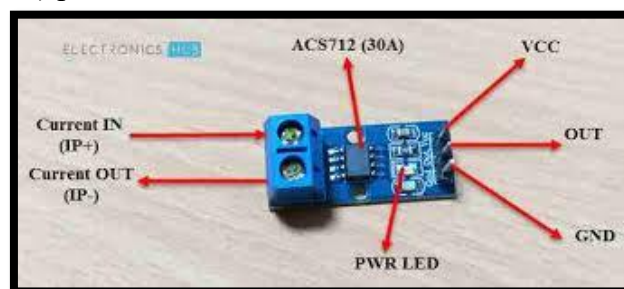


Figure III.5 :Capture de courant ACS712-30A

#### 2.4. Capteur de tension (diviseur de tension) :

Le diviseur de tension est un simple circuit électronique qui permet de diviser la tension d'entrée, constitué de deux résistances en séries, Il est couramment utilisé pour créer une tension de référence ou comme un atténuateur de signal à basse fréquence.

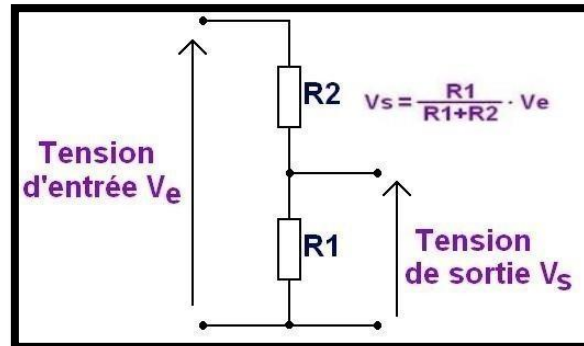


Figure III.6 :Pont diviseur de tension.

#### 2.5. Capteur de température DS18B20

Mesure de la température est l'une des tâches les plus courantes effectuées par le microcontrôleur. Généralement, le capteur de température analogique LM35 est utilisé avec des microcontrôleurs pour mesurer la température avec précision, il donne des valeurs analogiques et facile de le lire en utilisant un CAN. Aujourd'hui, nous utilisons le capteur de température numérique DS18B20 qui est un excellent capteur pour détecter avec précision la température. Ce capteur fournit une résolution de 9 bits à 12 bits sur la détection de température. Il communique avec un seul fil et n'a pas besoin d'ADC pour acquérir des températures analogiques et les convertir en numérique.

Le capteur DS18B20 du fabricant Maxima (anciennement Dallas Semi-conducteur) est un capteur de température numérique (il envoie une série de 0 et de 1) intégrant tout le nécessaire requis pour faire la mesure : capteur analogique, convertisseur analogique / numérique, électronique de communication et alimentation.

Il communique via un bus 1-Wire et possède une résolution numérique de 12 bits programmable avec la spécification suivante :

- Mesure des températures de :  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$  ( $-67^{\circ}\text{F}$  à  $+257^{\circ}\text{F}$ ).
- Précision de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $+85^{\circ}\text{C}$
- Résolution programmable de 9 bits à 12 bits.
- Le capteur utilise l'interface 1-Wire : il se connecte avec seulement 3 fils (5V, 0V, et une ligne de données) ce qu'on appelle le bus 1-wire.
- Un seul composant externe est nécessaire pour faire fonctionner un bus 1-Wire : une simple résistance de  $4.7\text{ K}\Omega$  est reliée entre l'alimentation et la broche de données du capteur.

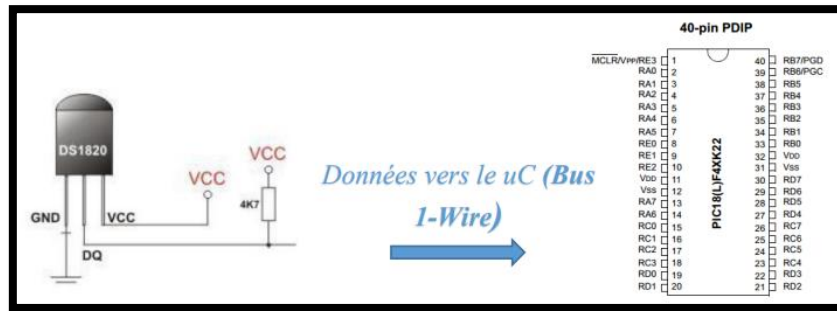


Figure III.7 :Brochage du capteur de température DS18B20.

Nous trouvons dans la fiche technique du DS18B20 la tension d'alimentation nominale du capteur est de +3,0 V à +5,5 V. Pour le but de transférer des données vers le microcontrôleur, un type particulier de communication série appelé 1-wire (1-fil) est utilisée. Cela signifie qu'il communique avec une carte maître au moyen d'un bus 1-Wire. Plusieurs capteurs peuvent être reliés sur un même bus 1-Wire. De plus, chaque capteur dispose d'une adresse unique gravée lors de la fabrication, il n'y a donc pas de risque de conflit.

### 2.6. MOSFET de puissance :

Nous utilisons une MOSFET de type IRFz44n dans notre projet car ils offrent plusieurs avantages. Tout d'abord, ils sont capables de fonctionner sous des tensions élevées pouvant atteindre 600V. De plus, ce MOSFET ont une faible résistance interne ( $R_{DS(on)}$ ), ce qui signifie qu'ils présentent une perte de puissance réduite lorsqu'ils sont activés, ce qui les rend efficaces en termes de consommation d'énergie. Ils sont également capables de commuter rapidement entre les états de marche et d'arrêt, ce qui est important pour le pilotage à haute fréquence. Enfin, les MOSFETs IRFz44n sont largement disponibles sur le marché et ont fait leurs preuves en termes de fiabilité et de performances.

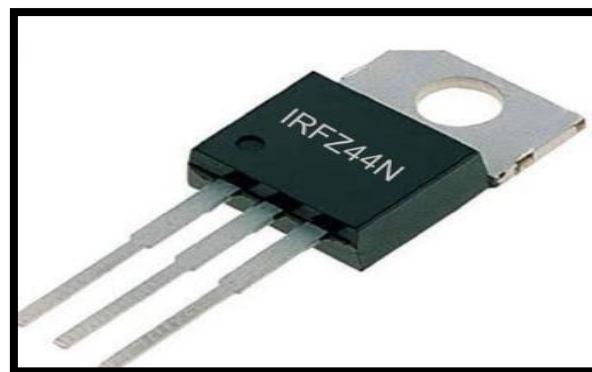


Figure III.8 : MOSFET IRFz44n

### 2.7. Contrôleur de charge :

#### 2.7.1. Relais électronique :

Un relais est un dispositif qui permet la commutation On / Off d'un élément mécanique ou électronique en utilisant un phénomène électrique tel que le courant ou la tension. Il existe deux types de relais : les relais électromécaniques, où un phénomène électrique contrôle un élément mécanique, et les relais statiques, où un phénomène

électrique contrôle un élément électronique. Le relais agit comme un interrupteur pouvant être activé à distance, où la fonction de coupure est séparée de la fonction de commande. Les caractéristiques de tension, de courant de commande (partie "Commande") et de pouvoir de commutation (partie "Puissance") dépendent du relais, et il est important de choisir les paramètres appropriés en fonction de l'application souhaitée. Différents relais sont utilisés en fonction de la nature des signaux à commuter, tels que des signaux audio ou des tensions et courants importants. Étant donné que la commande peut être réalisée à faible puissance (basse tension, faible courant) tandis que la partie de coupure peut gérer des puissances élevées, on peut considérer ce composant comme un amplificateur de courant. [49]

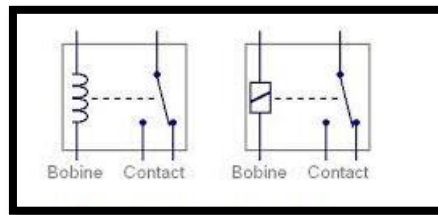


Figure III.9 : Symboles du relais. [49]

### 2.7.2. Transistor bipolaire NPN :

Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur de la famille des transistors. Son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN, l'une en direct et l'autre en inverse. La polarisation de la jonction PN inverse par un faible courant électrique (parfois appelé effet transistor) permet de « commander » un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant. Il est à noter qu'aucun électron n'est effectivement « créé » : la polarisation appropriée permet à un réservoir d'électrons libres de circuler différemment. [51]

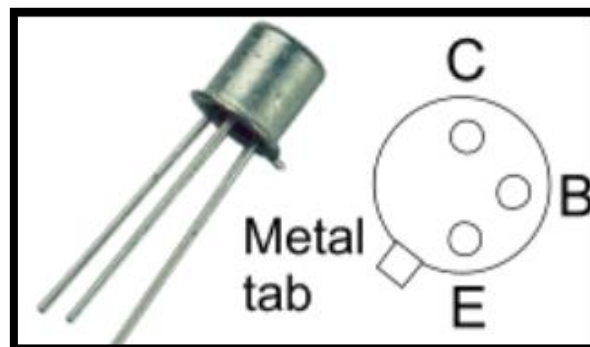


Figure III.10 : Transistor bipolaire NPN. [51]

## 3. Description des logiciels utilisés :

### 3.1. Langage MikroC PRO pour PIC :

Est un outil de développement puissant et riche en fonctionnalités pour les microcontrôleurs PIC. Il est conçu pour fournir au programmeur la solution la plus simple possible pour développer des applications des systèmes embarqués, sans compromettre les performances ou le contrôle. [50]

Les PIC et le langage C s'intègrent bien, le microcontrôleur PIC sur 8 bits est le plus répandu au monde, utilisé dans une grande variété d'applications, apprécié pour son efficacité, est le choix naturel pour le développement de systèmes embarqués.

Le MikroC PRO pour PIC offre une correspondance réussie avec un compilateur IDE (Integrated Development Environment) hautement avancé conforme à la norme ANSI (American National Standards Institute). Il contient un vaste ensemble de bibliothèque, une documentation complète et de nombreux exemples. [50]

C'est sûr que vous obtenez lorsque vous démarrez l'IDE MikroC PRO pour la première fois.

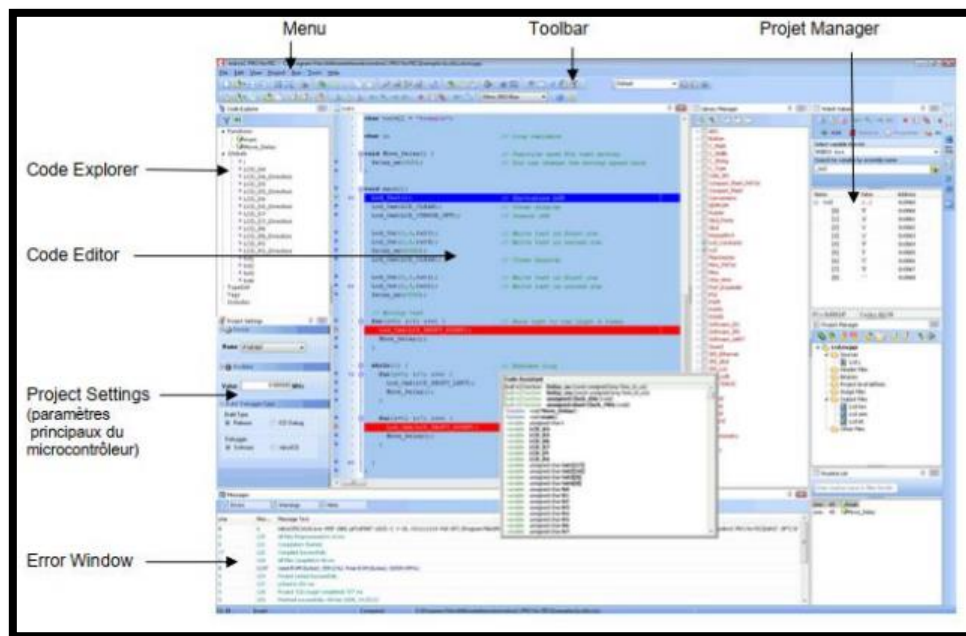


Figure III.11 :L'environnement IDE du compilateur MikroC PRO. [50]

### a. Caractéristiques du MikroC PRO pour PIC :

MikroC PRO pour PIC vous permet de développer et de déployer rapidement des applications complexes :

- Ecrivez votre code source C à l'aide de l'éditeur de code intégré (assistant de code et de paramètres, pliage de code, mise en évidence de la syntaxe, correction automatique, modèles de code, etc..).
- Utilisez MikroC PRO pour les bibliothèques PIC pour accélérer considérablement le développement : acquisition de données, mémoire, affichages, conversion, etc.
- Surveillez la structure, les variables et les fonctions de votre programme dans l'explorateur de code.
- Générez un assemblage commenté, lisible par l'homme et un HEX standard compatible avec tous les programmeurs.
- Utilisez l'outil de débogage en temps réel MikroICD (In-Circuit Debugger) intégré pour surveiller l'exécution du programme et déboguez la logique exécutable avec le simulateur de logiciel intégré.

- Les commentaires actifs vous permettent de rendre vos commentaires vivants et interactifs.

### 3.2. Carte de développement EasyPIC :

La carte de développement EasyPic est une carte de développement pour microcontrôleurs PIC à 8 bits attractive. Elle offre tous les périphériques attendus d'un tel produit. Les possibilités d'extension sont nombreuses et l'interfaçage aisé.

La présence du 3.3V la rend compatible avec les composants et périphériques à basse tension.[Annexe A]

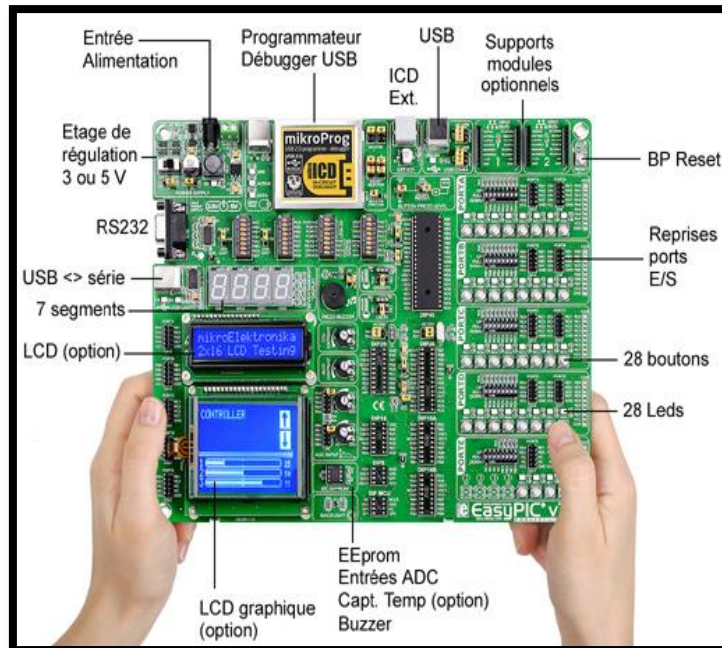


Figure III.12 : Carte de développement EasyPicV7.[Annexe A]

La carte de développement EasyPic de la famille MikroElektronidka est une plateforme innovante qui prend en charge la gamme de microcontrôleurs à boîtier DIP (Dual Inline Package) de Microchip.

Le programmeur mikroProg intégré est un programmeur rapide avec du matériel MikroICd débogueur en circuit. L'ingénierie intelligente permet à mikroProg de prendre en charge tous les appareils PIC10, PIC12, PIC16 et PIC18 dans un seul programmeur, ce prend en charge plus de 250 microcontrôleurs de Microchip. Les performances et la facilité d'utilisation font partie de ses principales caractéristiques.[Annexe A]



Figure III.13 : Module mikroProg. [Annexe A]

### 3.3. PROTEUS

Proteus est une suite logicielle de CAO électronique éditée par la société LABCENTER ELECTRONICS. Il est actuellement la seule CAO électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le code des microcontrôleurs. Pour ce faire, elle inclut un éditeur de schéma (ISIS), un outil de placement-routage (ARES), un simulateur analogique numérique, un environnement de développement intégré pour microcontrôleurs ainsi qu'un module de programmation par algorithmes. La fenêtre principale de travail sur le logiciel Proteus est la suivante:

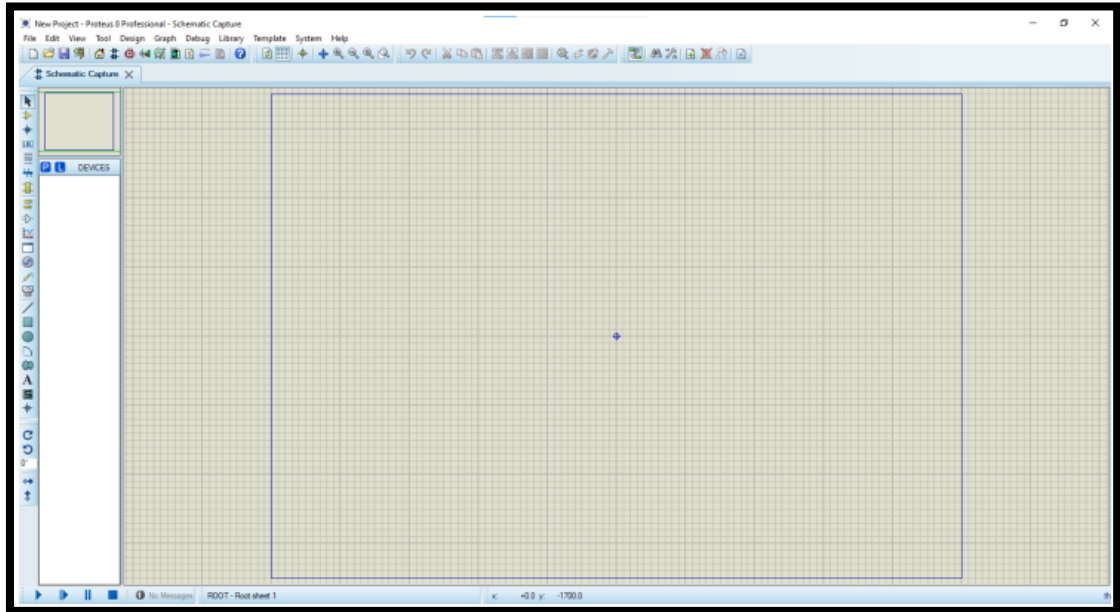


Figure III.13 :La fenêtre principale de travail sur ISIS PROTEUS

Proteus est composé de différents packages qui sont :

#### **Proteus PCB :**

Ce package permet de concevoir puis de fabriquer des circuits imprimés. Selon la formule choisie, le package offre plus ou moins de fonctionnalité à l'environnement de routage (ARES).

#### **Proteus VSM :**

Ce package est utilisé pour simuler totalement un circuit avec microprocesseurs. Il contient un environnement de développement très puissant qui autorise un suivi pas à pas des instructions contenues dans le programme. Plusieurs familles de microprocesseurs (PIC16, PIC18, AVR, Arduino, ARM, etc.) sont simulables.

### **III. Signal Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI):**

Le PIC18F45K22 est équipé de deux modules CCP1 et CCP2. Ces modules sont étroitement liés aux timers 1, timers 2 et au CAN. Ils sont essentiellement identiques, à l'exception de la capacité du module CCP2 à démarrer automatiquement la conversion A/N. Les deux modules CCP sont capables de générer un signal PWM avec une période  $T_{pwm}$  fixe et un rapport cyclique variable. La résolution peut atteindre 10 bits.

Le principe de fonctionnement consiste à créer un signal logique à fréquence fixe (valeur de 0 ou 1), dont le rapport cyclique est contrôlé numériquement. La valeur moyenne de ce signal représente une grandeur analogique, calculée en multipliant le rapport cyclique par l'amplitude maximale du signal.

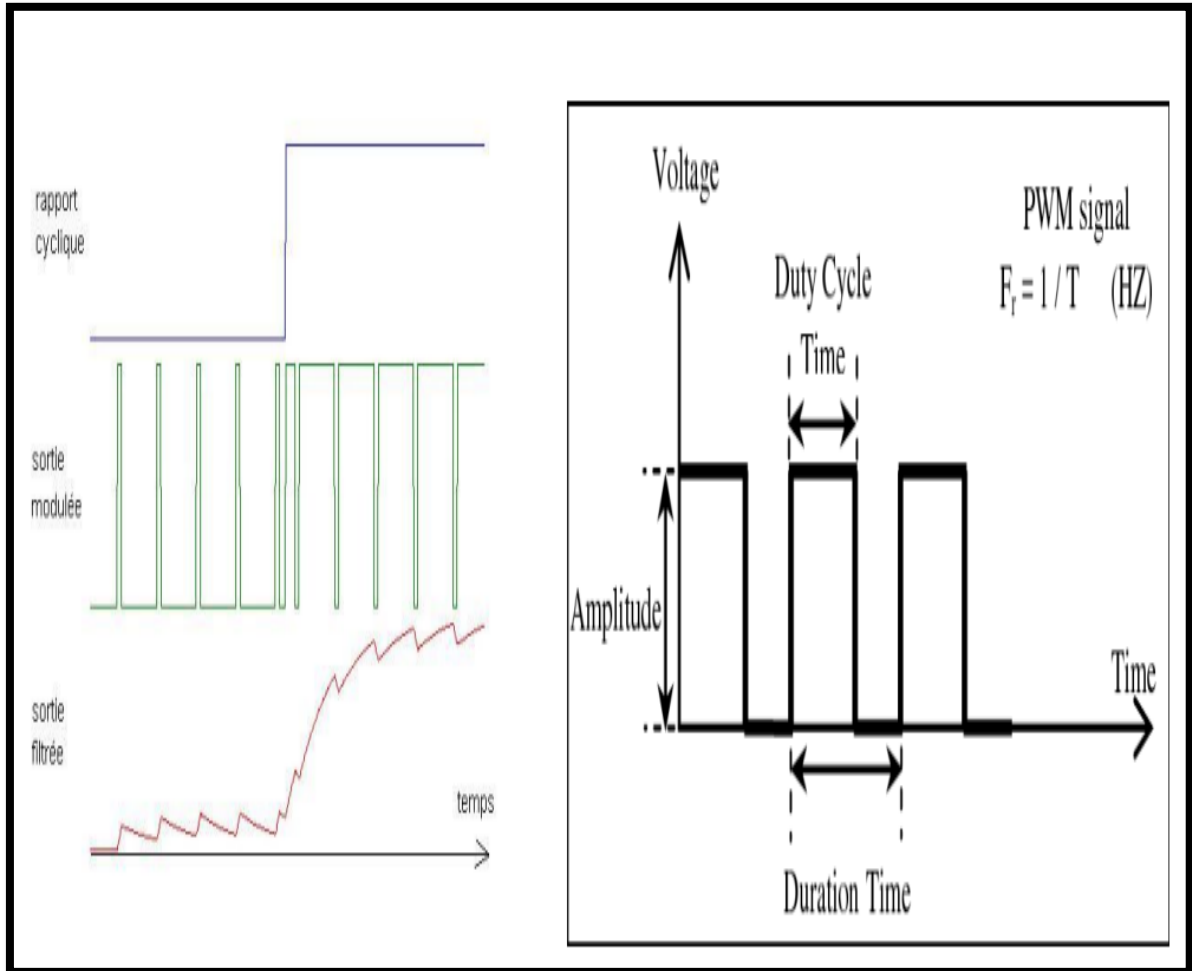


Figure III.15 : Signal de commande MLI (PWM)

En électronique, le rapport cyclique est utilisé pour décrire un signal PWM (Pulse With Modulation). Il représente le rapport entre la durée pendant laquelle le signal est à l'état actif (généralement haut ou "1") et la durée totale de la période du signal.

Mathématiquement, le rapport cyclique ( $\alpha$ ) est calculé en divisant la durée de l'état actif ( $T_{actif}$ ) par la période totale du signal ( $T_{periode}$ ) et en multipliant le résultat par 100 pour obtenir un pourcentage :

$$\alpha = \frac{T_{actif}}{T_{periode}}$$

Le rapport cyclique peut varier de 0 à 1, ou de 0 % à 100 % s'il est exprimé en pourcentage. La valeur moyenne de la tension ou de l'intensité dans le circuit est obtenue en multipliant la valeur à l'état haut par le rapport cyclique.

#### IV. Réalisation du circuit de commande sur Isis :

##### 1. Circuit minimal du PIC :

Le circuit minimal pour faire fonctionner le PIC est représenté sur la figure ci-dessous [Annexe B]

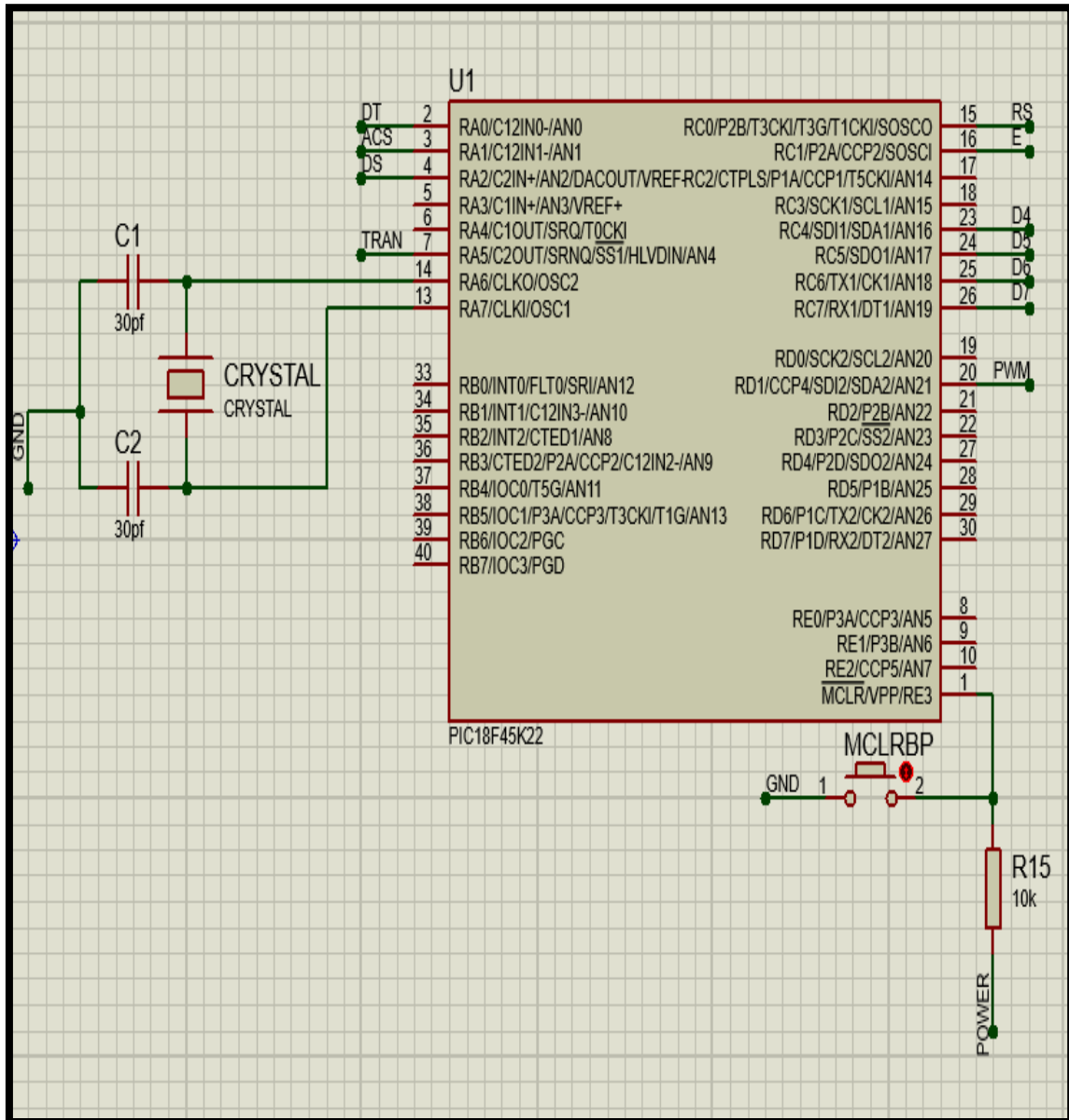


Figure III.16 : Circuit minimale du PIC18F45K22

2. Partie mesures et affichages des paramètres de la batterie :

Dans la section de mesure de notre système, nous utilisons un pont diviseur de tension ainsi qu'un capteur de courant ACS712 30A pour mesurer la tension et le courant de la batterie. De plus, nous utilisons un capteur de température DS18B20 qui est connecté au microcontrôleur 18F45K22. Les résultats des mesures, y compris le pourcentage de PWM et l'état de charge de la batterie, sont affichés sur un écran LCD.

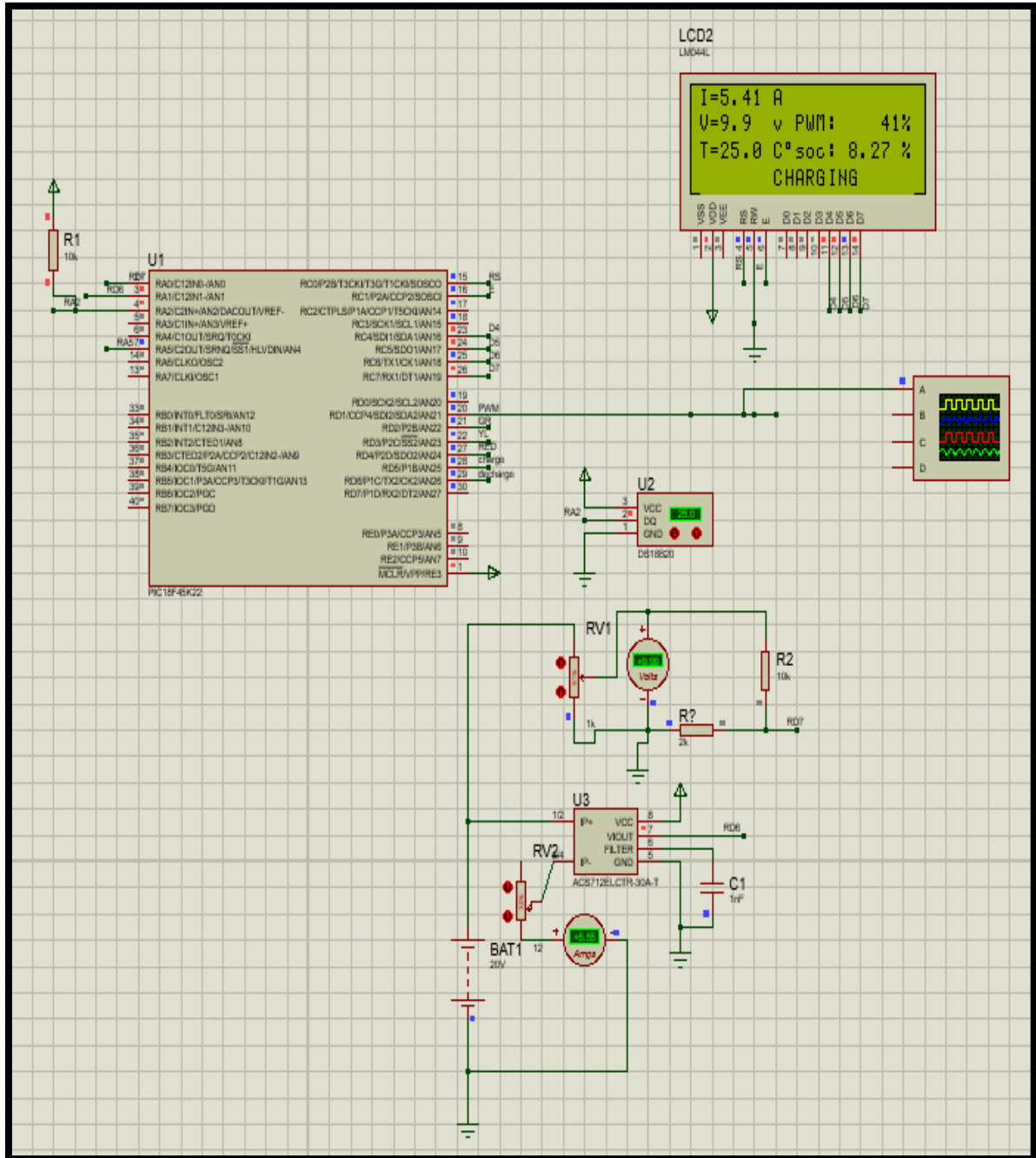


Figure III.17 : Partie mesures et afficher les paramètres de la batterie (température, courant et tension)

### 3. Partie du signal PWM et driver de la carte puissance :

Le signal PWM sera généré par le module CCP4 du microcontrôleur. Ce module est capable de produire un signal PWM avec une période  $T_{pwm}$  fixe et un rapport cyclique variable. Ce signal sera directement connecté à la partie puissance du régulateur, le driver IR2112.

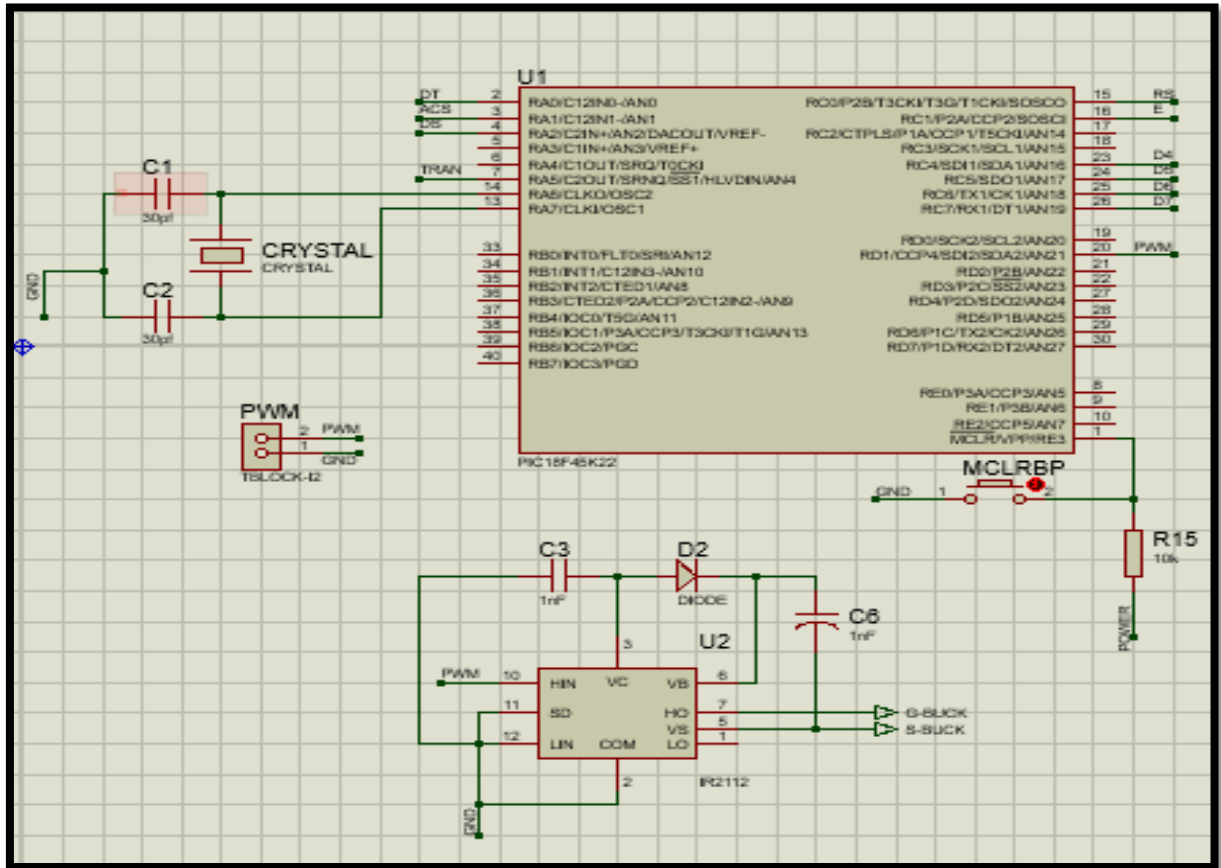


Figure III.18 : Partie du signal PWM et driver de la carte puissance.

### 4. Contrôle de la charge et le régulateur 5v (VCC) :

Le contrôleur de la charge est constitué d'un circuit comprenant un relais, un transistor bipolaire NPN, une diode d'anti-retour et une résistance reliée au microcontrôleur pour la commande du relais. Le fonctionnement de ce contrôleur est simple : lorsque la batterie est faible, le relais agit comme un interrupteur ouvert, déconnectant la charge de la batterie. En revanche, lorsque la batterie est pleine, le relais agit comme un interrupteur fermé, maintenant la charge connectée à la batterie.

Le régulateur 5V utilisé est un régulateur de tension (AMS1117). Il convertit une tension d'entrée de 12V provenant de la batterie de stockage en une tension de sortie de 5V. Ce régulateur alimente ensuite le microcontrôleur et les autres composants tels que l'écran LCD et les capteurs, en leur fournissant une tension stable de 5V.

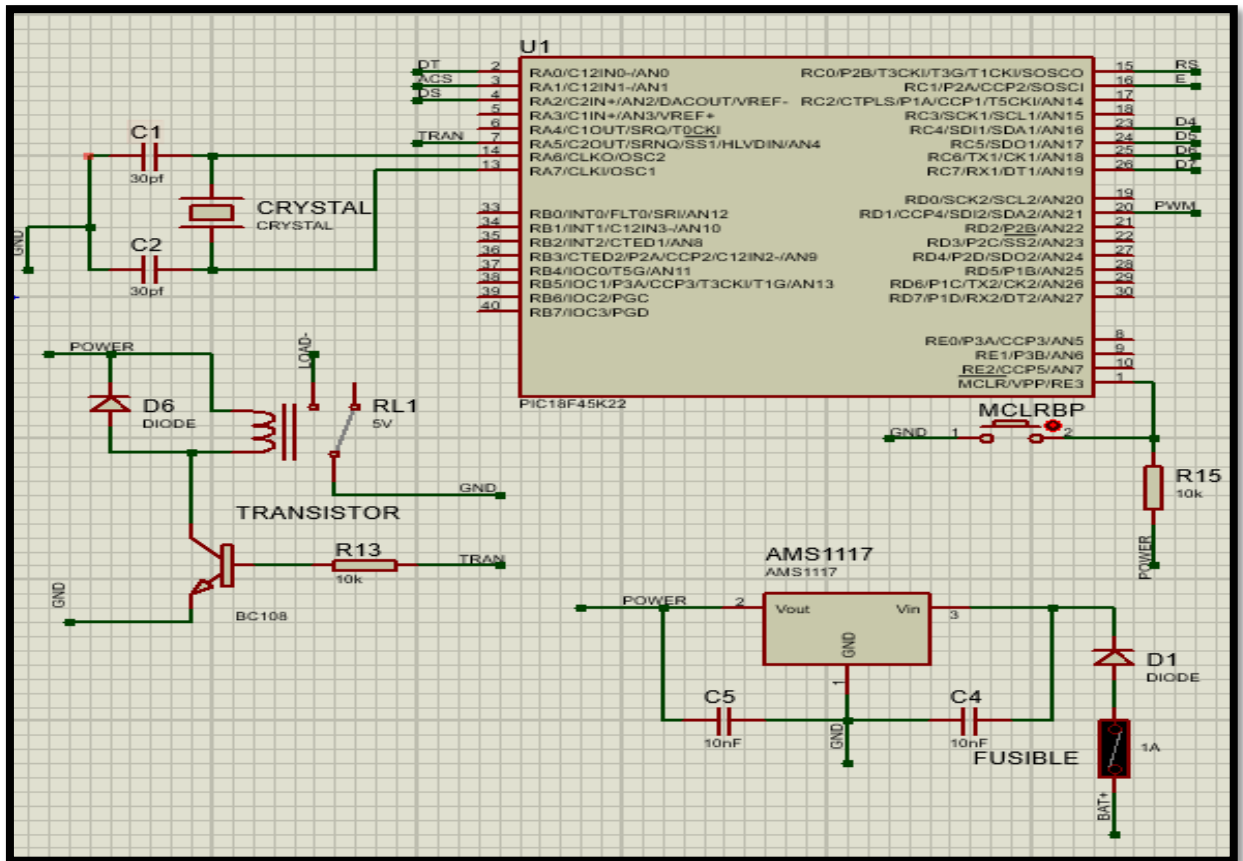


Figure III.19 : Contrôle de la charge et le régulateur 5v (VCC).

### 5. Schéma final du circuit de commande de la carte de régulation :

Après l'assemblage de toutes les composantes du régulateur de charge, nous serons en mesure de créer un schéma final qui illustrera les diverses connexions entre le PIC18F45K22, qui est le cœur de la carte, et les différents éléments qui lui sont associés.



Voici notre circuit final complet qui comprend la partie de commande (capteurs, régulateur de tension 5V, affichage LCD, contrôle de charge et signal PWM) que nous avons réalisée, et la partie de puissance (PWM-driver et convertisseur DC-DC Buck) qui a été réalisée par un autre binôme de notre groupe d'étude.

### 6. Programmation du régulateur de charge :

Nous avons utilisé le logiciel "Proteus ISIS" pour concevoir notre carte de régulation de charge. En se basant sur le schéma illustré dans la figure..., nous allons élaborer le programme du microcontrôleur afin qu'il puisse établir une communication avec les différents composants qui l'entourent.

- Initialement, Le microcontrôleur PIC18F45K22 mesure les différents paramètres de la batterie, tels que le courant, la tension et la température.
- Ensuite, il calcule pourcentage relatif à la capacité de la batterie Il est obtenu par l'addition des ampères entrants et sortants de et vers la batterie par rapport à sa capacité instantanée. L'évolution temporelle de l'état de charge et de la capacité réelle est exprimée par des équations selon la méthode du "Coulomb Counting".
- Ce système continue à charger la batterie. Lorsque le niveau de charge de la batterie atteint 95%, le microcontrôleur applique une commande PI en boucle pour réguler et maintenir la valeur de la tension du convertisseur Buck à 14,4 volts.
- Après que la batterie est complètement chargée, Le système passe en mode de charge terminée. Dans ce mode, le système peut basculer vers arrêter complètement la charge pour éviter une surcharge de la batterie.

Dans ce qui suit un organigramme résumant le fonctionnement du système de charge de la batterie :

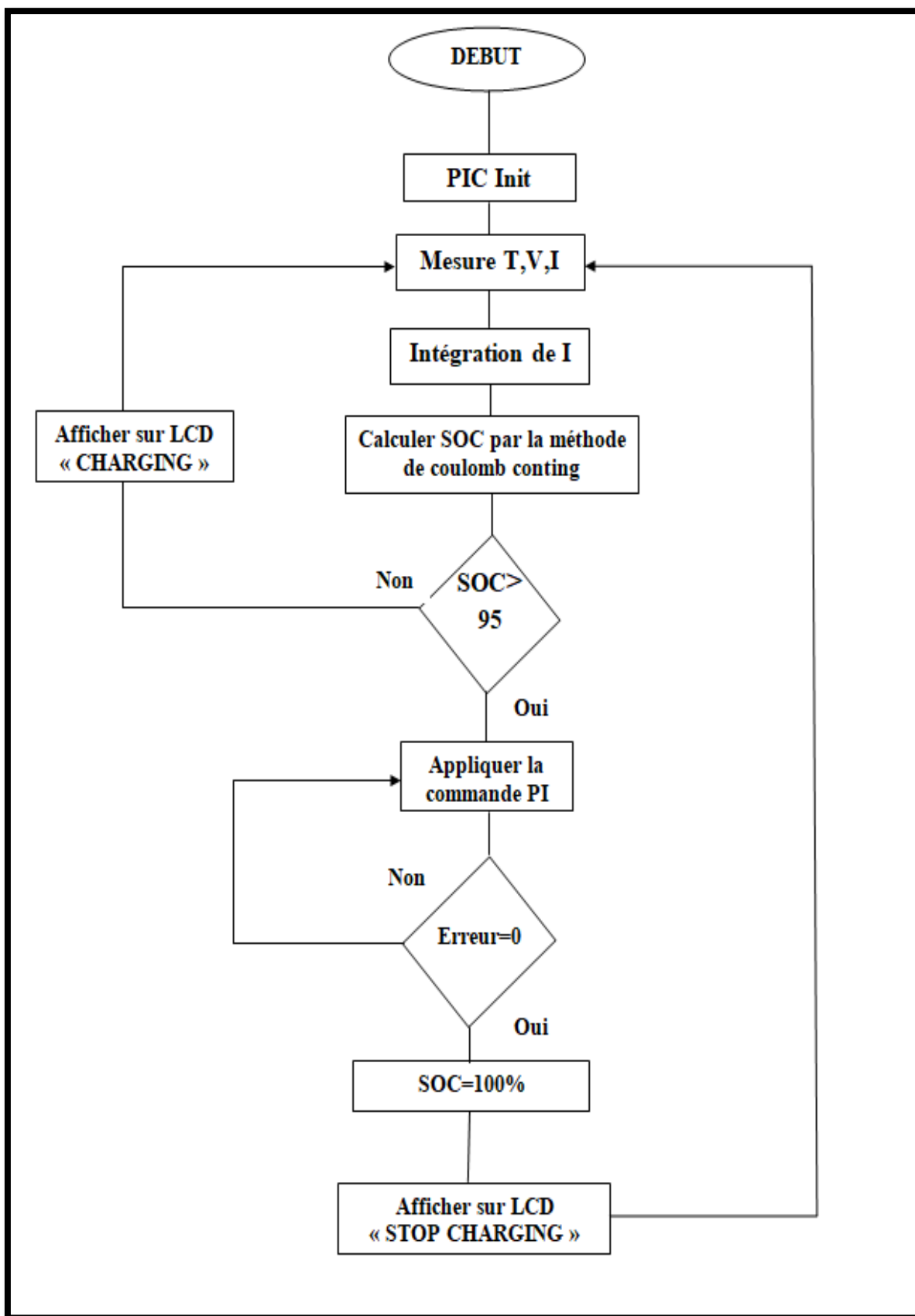


Figure III.21 :Algorithme de fonctionnement de la carte de régulation.

## V. Tests et résultats :

Dans cette section, nous avons effectué une simulation du fonctionnement du régulateur de charge en utilisant l'environnement virtuel du logiciel "Proteus ISIS". Cela nous a permis de vérifier le programme développé pour le microcontrôleur. Ce programme contrôle les différents états de charge de la batterie qui peuvent se produire la MOSFET est utilisée comme un interrupteur, le signal PWM est appliqué au terminal de commande de la MOSFET pour contrôler sa conductivité. En ajustant le rapport cyclique du signal PWM, on peut réguler la quantité de courant qui passe à travers la MOSFET et donc contrôler la charge ou la décharge de la batterie. Lors de la simulation de ce système, nous avons obtenu les résultats suivants :

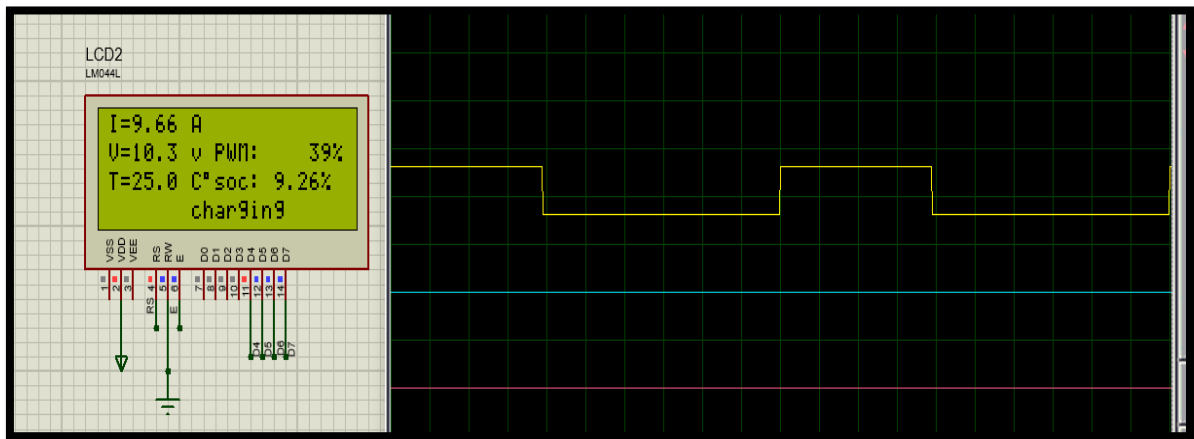


Figure III.22 :Ecran d'affichage et signale PWM

Ces résultats indiquent que la batterie est actuellement partiellement chargée.

L'augmentation du pourcentage de PWM suggère que le régulateur de charge est en train d'appliquer un courant de charge plus élevé pour augmenter la vitesse de chargement de la batterie. Cela peut être souhaitable si une recharge rapide est nécessaire, mais il est également important de surveiller la température de la batterie pour éviter une surchauffe due à un courant de charge excessif.

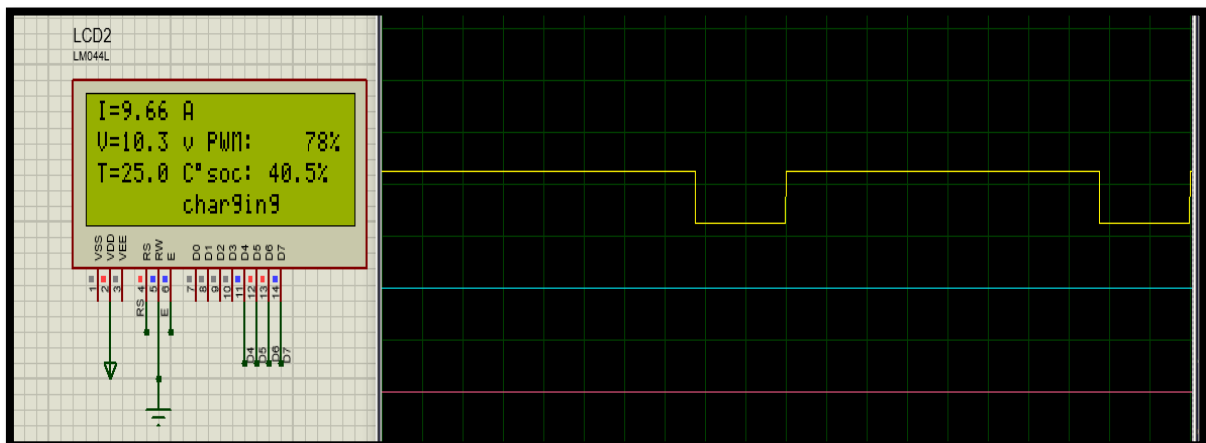


Figure III.23 : Un échantillon de résultat de signale MLI

État de charge partiel : Un de 40% signifie que la batterie est encore loin d'être complètement chargée.

## Chapitre III : Conception d'une Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

Le pourcentage de la largeur d'impulsion (PWM) continue à augmenter jusqu'à atteindre 100%, cela signifie que le régulateur de charge fournit la puissance maximale possible à la batterie.

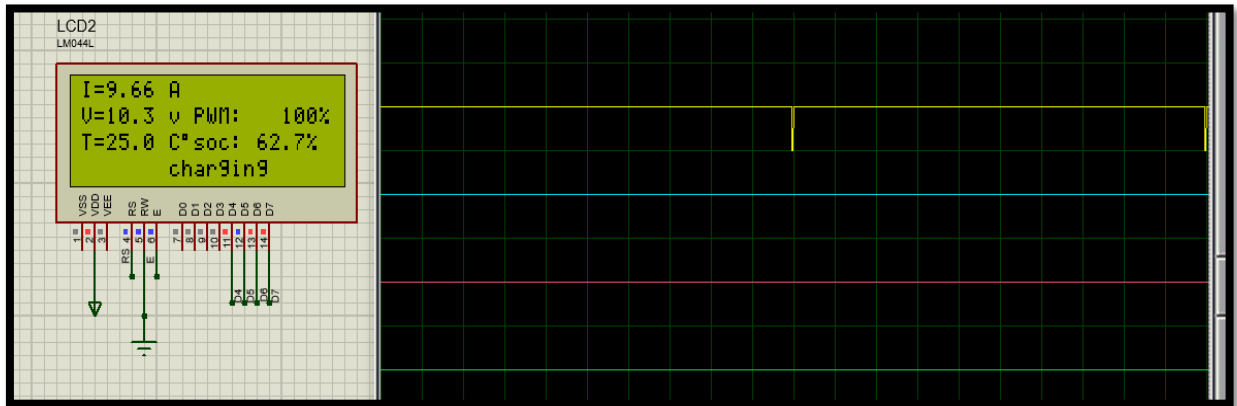


Figure III.24 : Un échantillon de résultat

En ce cas, il reste encore une capacité de charge substantielle disponible, le régulateur de charge fournit la puissance maximale possible pour accélérer le processus de charge.



Figure III.25 :Un échantillon de résultat

Le niveau de charge (SOC) de la batterie atteint 100% et le pourcentage de la largeur d'impulsion (PWM) est réglé à 0, cela signifie que la batterie est complètement chargée et que le régulateur de charge arrête la charge.

L'afficheur affiche un message "Stop Charging" pour indiquer que la charge de la batterie est terminée. Cela utile pour informer l'opérateur du système que la batterie est chargée à son niveau maximal et qu'il est sûr de déconnecter la source d'alimentation.

L'allure représente la tension de sortie d'un convertisseur buck.

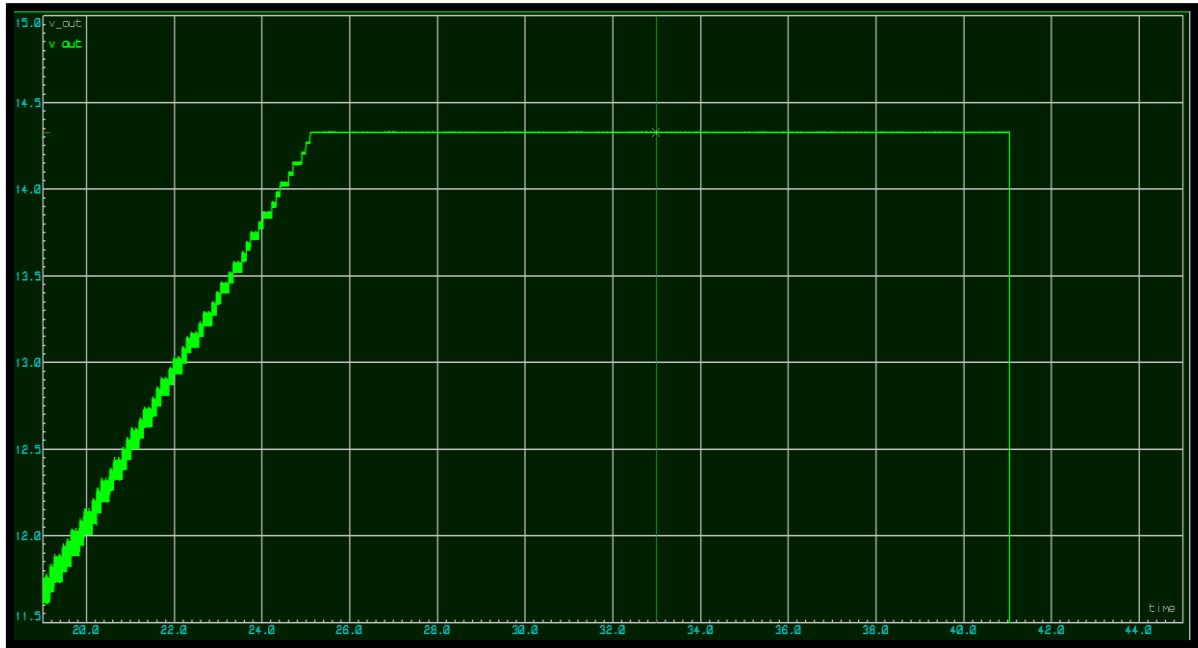


Figure III.26 : La tension aux bornes de sortie d'un convertisseur buck.

Dans un convertisseur buck, la tension de sortie est généralement régulée et maintenue à une valeur spécifique, indépendamment de la tension d'entrée.

Idéalement, l'allure de la tension de sortie devrait être relativement stable et lisse, sans grandes variations ni oscillations indésirables. Cela indiquerait que le convertisseur buck fonctionne efficacement pour fournir une tension de sortie constante.

## VI. Conception de la carte de commande :

Une fois la validation du bon fonctionnement en simulation effectuée, la dernière étape consiste à réaliser la carte de régulation pratique. Cette réalisation nécessite plusieurs étapes soigneusement suivies afin d'obtenir une carte électronique fiable.

Tout d'abord, il est essentiel de s'assurer que la partie schématique est opérationnelle. Ensuite, le schéma obtenu en simulation est converti en typon, qui représente l'emplacement des composants sur la carte réelle prévue, ainsi que les connexions entre ces composants.

Pour obtenir rapidement un typon de bonne qualité, nous avons utilisé la fonctionnalité "Proteus ARES". Après avoir placé manuellement les composants, un routage semi-automatique a été réalisé pour déterminer la bonne section des fils en fonction de nos besoins. À la fin de cette étape, nous avons obtenu le circuit imprimé.

Les connexions sont représentées en bleu, indiquant les connexions de la face arrière de la carte à réaliser, et la zone colorée en bleu représente le plan de masse (GND). Le plan de masse sur une carte de circuit imprimé est généralement une grande zone de cuivre connectée à la masse. Selon les besoins de la conception, cette zone peut couvrir une petite zone ou l'ensemble de la carte dans le cas d'une conception multicouche. [52]

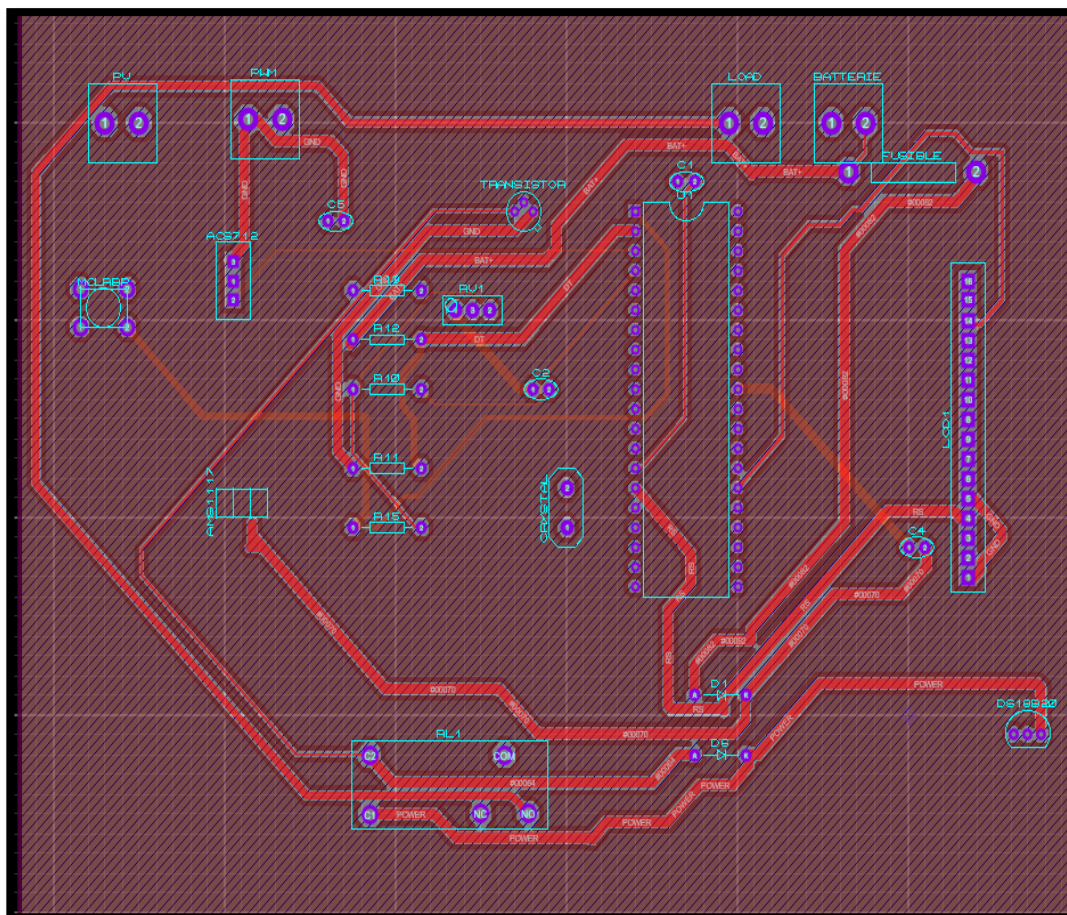


Figure III.27 : Carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

Le logiciel ISIS PROTEUS nous offre également la possibilité de visualiser en 3D le circuit électronique que nous avons conçu en cliquant sur l'option "Visualiser 3D" située en haut de l'interface d'ISIS PROTEUS.

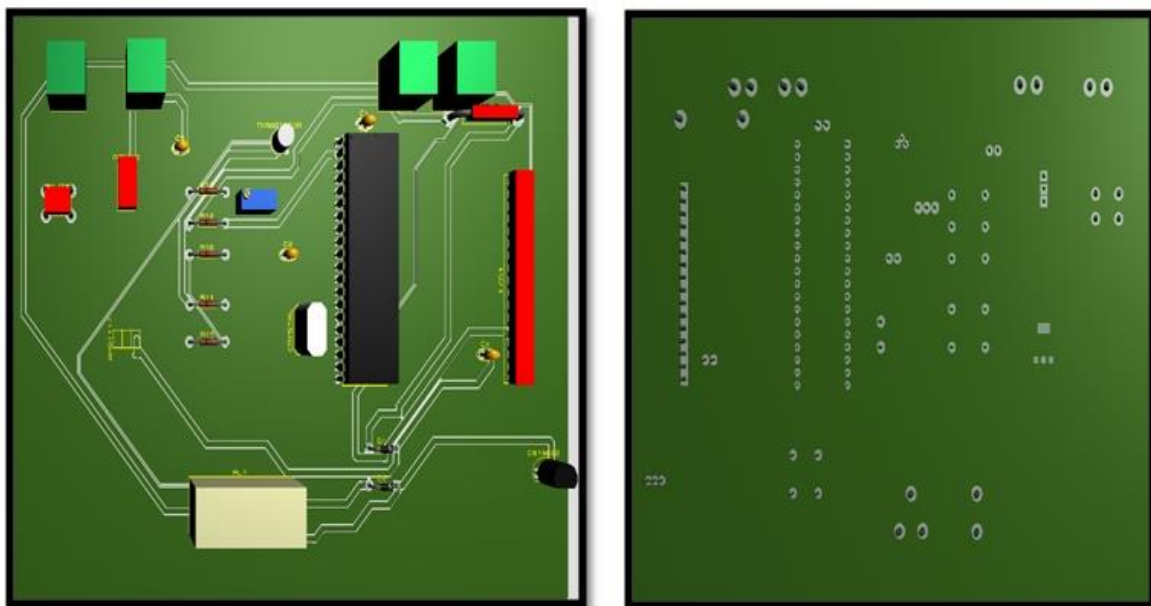


Figure III.28 : visualisation en 3D de la carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie BMS

## **VII. Conclusion :**

En conclusion, la conception et la réalisation de cette carte de contrôle intelligente représentent une avancée significative dans le domaine de la gestion de batterie pour les systèmes photovoltaïques autonomes. Elle offre une solution fiable, précise et efficace pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire tout en assurant la protection et la durabilité de la batterie.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale :

Le travail de recherche vise à :

- Augmenter l'efficacité des panneaux solaires et améliorer la durée de vie des batteries de stockage d'énergie électrochimique.

- Des efforts sont déployés pour développer des stratégies de maintenance efficaces afin de prolonger la durée de vie de la batterie, garantissant ainsi des performances fiables et à long terme du système solaire photovoltaïque autonome.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit les concepts liés à l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants. Nous avons également abordé les cellules solaires et les performances d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale. Ensuite, nous avons fourni une vue d'ensemble des batteries et des systèmes de stockage, en expliquant leur principe de fonctionnement, leur emplacement dans un système solaire photovoltaïque, ainsi que les différents types et caractéristiques d'une batterie solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons approfondi l'étude de l'unité de stockage, c'est-à-dire la batterie, en examinant son principe de fonctionnement, ses caractéristiques, sa modélisation et sa différence par rapport à une batterie classique. Nous avons également examiné le couplage direct de la batterie avec un générateur photovoltaïque, en mettant en évidence les causes de dégradation spécifiques aux batteries acide au plomb. Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons abordé le rôle du régulateur de charge, ses paramètres, ses modes de fonctionnement, ses technologies de régulation, ainsi que le MPPT (Maximum Power Point Tracking).

En ce qui concerne le troisième chapitre, nous avons décrit en détail les composants de notre carte de contrôle intelligente pour le système de gestion de batterie (BMS). Nous avons présenté le signal PWM généré par le microcontrôleur qui commande le circuit de puissance, ainsi que la simulation de la carte dans le logiciel ISIS Proteus. Nous avons utilisé le logiciel MikroC PRO pour programmer le microcontrôleur PIC18F45K22, en suivant un organigramme bien défini.

En ce qui concerne les perspectives futures, nos objectifs incluent l'amélioration de la compatibilité entre la partie de mesure, la partie d'affichage et le signal PWM (algorithme de régulation) lors de la simulation sous MikroC. De plus, nous prévoyons d'implémenter diverses commandes dans notre système, d'établir une communication entre des applications distantes, et de résoudre les problèmes d'incertitude liés aux composants utilisés. Ces perspectives visent à renforcer les performances et les fonctionnalités de notre système, afin de répondre aux exigences techniques et de maximiser son efficacité.

Malgré les défis rencontrés, cette expérience en tant que domaine nouveau nous a été précieuse. Elle nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances et de développer des compétences en résolution de problèmes. De plus, cela nous a incités à approfondir notre recherche bibliographique, en la comparant à celle entreprise lors de la phase de simulation.

# **Références bibliographiques**

### Référence bibliographique :

- [1] Agence Internationale de l'Energie. (2021). Rapport sur la technologie photovoltaïque. [https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/01/IEA-PVPS-Report-2020\\_Final.pdf](https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/01/IEA-PVPS-Report-2020_Final.pdf)
- [2] EnergySage. (s.d.). Systèmes photovoltaïques : Tout ce que vous devez savoir. <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-systems/>
- [3] Solar Power World. (2019). Les cinq types de systèmes photovoltaïques. <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/06/the-five-types-of-solar-photovoltaic-systems/>
- [4] Agence Internationale de l'Energie. (2021). Rapport sur la technologie photovoltaïque. [https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/01/IEA-PVPS-Report-2020\\_Final.pdf](https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/01/IEA-PVPS-Report-2020_Final.pdf)
- [5] Khatib, T., & Al-Durra, A. (2019). Overview of Energy Storage Systems and Its Applications in Photovoltaic Power Generation. *Energies*, 12(7), 1391. <https://doi.org/10.3390/en12071391>
- [6] EnergySage. (s.d.). Systèmes de stockage d'énergie solaire : Tout ce que vous devez savoir. <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/>
- [7] EnergySage. (s.d.). Systèmes de stockage d'énergie solaire : Tout ce que vous devez savoir. <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/>
- [8] NREL. (2021). Les systèmes de stockage d'énergie solaire. <https://www.power-africa.com/systeme-photovoltaique-connecte-au-reseau/>
- [9] "History of Solar Energy" sur Energy
- [10] Manfra, L., Gracia, R., & Anglade, A. (2019). Systèmes photovoltaïques. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [11] SolarPower Europe. (2020). Rapport sur le marché européen du stockage d'énergie solaire 2020. <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/05/SolarPower-Europe-Energy-Storage-Market-Report-2020.pdf>
- [12] IEA. (2021). Rapport sur le stockage d'énergie : Mise à jour 2021. <https://www.iea.org/reports/energy-storage-report-2021-update>
- [13] Gachet, J.-M. (2018). Systèmes photovoltaïques autonomes. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [14] Markvart, T., & Castañer, L. (Eds.). (2005). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- [15] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2017). Solar cell efficiency tables (version 51). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(7), 668-676.
- [16] Hossain, M. S., Mekhilef, S., & Shah, N. A. (2019). A comprehensive review of MPPT techniques for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 41-59.
- [17] Zhu, L., Wu, X., Lin, Y., & Chen, G. (2019). A review of state-of-charge estimation methods for lead-acid and lithium-ion batteries used in electric vehicles. *Energies*, 12(14), 2787.

- [18] Pavlov, D., & Gancedo, J. R. (2000). *Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product*. Elsevier.
- [19] Linden, D., & Reddy, T. B. (Eds.). (2002). *Handbook of Batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [20] Baghurst, M., Walsh, F. C., & Pletcher, D. (2006). *The Chemistry of Batteries* (1st ed.). Royal Society of Chemistry.
- [21] <https://passionelectronique.fr/charger-une-batterie-lithium-ion-cccv/#principe-de-base-la-charge-cccv>
- [22] Tjong, S. C. (2017). *Materials for Lead-Acid Batteries*. CRC Press.
- [23] Sulfatation: Causes, Effects and How to Prevent It. (n.d.). Retrieved from <https://www.trojanbattery.com/tech-support/battery-maintenance/sulfation-causes-effects-and-how-to-prevent-it/>
- [24] <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>
- [25] Corrosion in Lead-Acid Batteries. (n.d.). Retrieved from <https://www.duracellbatteries.ca/en-ca/technology/corrosion>
- [26] Gocheva-Ilieva, S., & Makedonski, L. (2015). Temperature Influence on the Cycle Life of Lead-Acid Batteries. *Procedia Technology*, 19, 757-763.
- [27] Pistoia, G. (Ed.). (2014). *Aging of Li-Ion Batteries* (1st ed.). Elsevier.
- [28] Tiwari, G. N., & Dubey, S. (Eds.). (2019). *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications* (1st ed.). Springer.
- [29] Moseley, P. T. (2004). *Batteries for Photovoltaic Systems: A Guide for Installers and Engineers* (2nd ed.). Routledge.
- [30] Tjong, S. C. (2017). *Materials for Lead-Acid Batteries*. CRC Press.
- [31] Baghurst, M., Walsh, F. C., & Pletcher, D. (2006). *The Chemistry of Batteries* (1st ed.). Royal Society of Chemistry.
- [32] Pavlov, D., & Gancedo, J. R. (2000). *Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product*. Elsevier.
- [33] Zhu, J., Hu, H., Wang, H., & Zhao, D. (2016). A New Charging Strategy for Valve-Regulated Lead–Acid Batteries in Photovoltaic Power System. *Energies*, 9(5), 366.
- [34] Kaushika, N. D., & Verma, P. K. (2018). Comparative Study of Lead-Acid Battery Charging Techniques in Photovoltaic System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 346(1), 012030.
- [35] Pandiarajan, N., & Geetha, R. (2017). A Comparative Study of Battery Charging Techniques for Standalone Solar Photovoltaic System. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 8(3), 1179-1187.
- [36] Pandiarajan, N., & Geetha, R. (2018). Performance Analysis of Lead-Acid Battery Charging Techniques for Standalone Solar Photovoltaic System. In *2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)* (pp. 24-29). IEEE.
- [37] Hu, X., Li, H., Sun, F., & Sun, X. (2020). Review on State of Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries. *IEEE Access*, 8, 13468-13482.
- [38] Di Domenico, D., & Riegel, G. (2016). State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Kalman Filtering. *Energies*, 9(4), 301.

- [39] Li, W., Wang, J., Wei, X., & Zhang, Y. (2018). A Review on State of Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries Based on Grey Box Models. *Journal of Power Sources*, 375, 396-409.
- [40] Arbizzani, C., Benyoucef, B., & Dsoke, S. (2021). State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries: A Review on Recent Advances and Perspectives. *Batteries*, 7(2), 22.
- [41] Kim, J., Myung, J., Yoon, Y., Sun, Y. K., & Prakash, J. (2017). Estimating State of Charge and Health of Lithium-Ion Batteries. *ACS Energy Letters*, 2(3), 707-712.
- [42] Ravey, A., Teysot, A., & Vinassa, J. M. (2019). State of Charge Estimation Techniques for Li-ion Batteries in Electric Vehicles: A Review. *Journal of Power Sources*, 427, 98-114.
- [43] Zhang, J., Ouyang, M., Luo, Q., & Li, J. (2021). Review of State-of-Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries Based on Machine Learning. *Frontiers in Energy*, 15(3), 518-539.
- [44] Kim, G., Lee, J., & Kim, J. (2019). An Overview of Maximum Power Point Tracking Methods for Photovoltaic Systems. *Energies*, 12(20), 3819.
- [45] Patel, H., Agarwal, V., & Jain, P. K. (2019). A Review of Charge Controllers in Solar Photovoltaic Systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(2), 768-780.
- [46] Yu, C., Muyeen, S. M., & Ali, M. H. (2016). A Comprehensive Review on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 273-293.
- [47] Principe de fonctionnement d'un régulateur [https://www.memoireonline.com/07/10/3743/m\\_Outil-daide-au-dimensionnement-des-systemes-photovoltaiques-domestiques2.html](https://www.memoireonline.com/07/10/3743/m_Outil-daide-au-dimensionnement-des-systemes-photovoltaiques-domestiques2.html)
- [48] Microcontrôleur (définition et explication) <https://www.techno-science.net/definition/6737.html>
- [49] Relais électronique. <https://docplayer.fr/193255464-Les-relais-un-relais-electronique-est-un-interrupteur-qui-se-commande-avec-une-tension-continue-ou-alternatif-de-faible-puissance.html>
- [50] Langage MikroC PRO pour PIC. <https://www.mikroe.com/mikroc-pic/>
- [51] Transistor bipolaire. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_bipolaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_bipolaire)
- [52] Réalisation pratique de la carte de commande <https://www.artedas.fr/Blog/Articles/article-plan-de-masse-PCB.php>
- [53] L'estimation du potentiel de l'Algérie dans les énergies renouvelables en chiffres <https://www.algerie-eco.com/2022/04/20/lestimation-du-potentiel-de-lalgerie-dans-les-energies-renouvelables-en-chiffres/>
- [54] L'énergie solaire <https://sibelenergie.fr/fonctionnement-energie-solaire/>

## Annexe A :

SHERPA

# EasyPIC v7

## Carte de développement pour PIC, née sous le signe de la Connectivité



Lorsqu'il s'agit de cartes de développement pour micros, le fabricant serbe *MikroElektronika* (mE) a une réputation à tenir. Sa descendance est prolifique, la lignée prometteuse : récemment la septième (!) génération de leur carte de développement *EasyPIC* a vu le jour. Nous l'avons essayée pour vous.

Clemens Valens (Elektor)

Comme son nom l'indique, l'*EasyPIC* appartient à la famille des *easy* : *EasyAVR*, *EasydsPIC*, *EasyPSoC*, etc. mais cible, on s'en doute, les PIC à 8 bits de Microchip. Mon premier contact avec un *EasyPIC*, l'*EasyPIC4* à l'époque, date de quelques années. Il s'agissait déjà d'une carte complète et utile, et l'on se demande bien quelles améliorations ont bien pu conduire à une 7<sup>e</sup> génération !

Les deux cartes n'ont ni la même tête, la « 4 » étant bien plus petite que la « 7 » (26,5 x 22 cm) ni la même disposition, mais vues de près, les similitudes apparaissent : huit supports pour PIC en boîtier DIP de 8 à 40 pattes ; un afficheur à 7 segments de 4 chiffres, un emplacement pour un afficheur LCD à 2 lignes de 16 caractères, un autre pour un LCD graphique 128 x 64, des poussoirs, des LED, des résistances de rappel (masse et  $V_{cc}$ ) sur chaque E/S ainsi qu'un connecteur d'extension pour chaque port, un programmeur/débugueur intégré, une alimentation, des ports RS-232 et USB et quelques fioritures bien v(en)ues sur une telle carte.

Récapitulons l'évolution de l'*EasyPIC* à partir de la génération 4 : la nouveauté principale de la « 5 » est le contrôleur de dalle tactile. Le grand pas en avant, c'est la « 6 » : introduction de CMS, ajout d'interrupteurs DIP pour la sélection des résistances de rappel (masse ou  $V_{cc}$ ) sur chaque E/S, remplacement des afficheurs à 7 segments par un LCD *chip-on-glass* (COG), ajout d'extensions pour les ports, clavier 4 x 4, clavier pour menus à 6 touches et connecteur compatible avec les programmeurs de Microchip. Comparée à la « 6 », la « 7 » fait un retour aux sources avec le remplacement de l'afficheur COG par le bon vieux modèle à segments. Le changement le plus visible est toutefois la nouvelle disposition des composants que je trouve bien plus claire. Là où, sur les générations précédentes, les LED, boutons et autres résistances de polarisation des E/S, étaient groupés par type (p. ex. toutes les LED ensemble), ils le sont maintenant par ports.

Le mot d'ordre de la « 7 » est *connectivité*, comme le montre le coin inférieur droit de la carte. Tous les ports possèdent maintenant trois au lieu d'un connecteurs d'extension, deux sur le côté droit de la carte et un à gauche, plus un emplacement pour connecteur au pas

### EasyPIC v7 (149 \$)

- compatible avec plus de 250 microcontrôleurs PIC 8 bits
- programmeur/débugueur *mikroProg* intégré
- double alimentation (5 V & 3,3 V)
- 3 connecteurs d'extension par port + rangées de trous
- boutons poussoir, LED, résistances de polarisation configurables sur chaque E/S
- 2 emplacements *mikroBus*
- port RS-232 ou série/USB
- USB, ICD, buzzer, EEPROM I<sup>2</sup>C
- afficher à 7 segments à 4 chiffres
- LCD alphanumérique 2 x 16 (option)
- LCD graphique 128 x 64 avec dalle tactile (option)

[www.mikroe.com/eng/products/view/757/easypic-v7-development-system/](http://www.mikroe.com/eng/products/view/757/easypic-v7-development-system/)

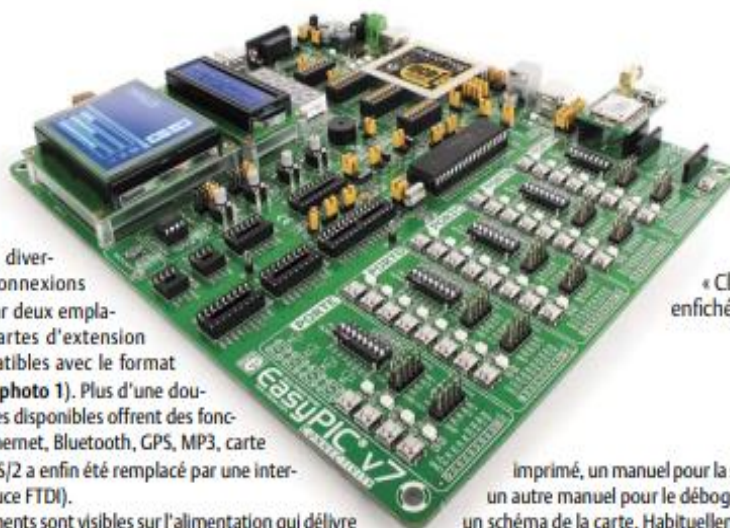


Photo 1. Une carte « Click » mikroBus EasyGPS enfilée dans l'emplacement n° 1.

de 2,54 mm. La diversification des connexions est confirmée par deux emplacements pour cartes d'extension (« Click ») compatibles avec le format mikroBus de mE (photo 1). Plus d'une douzaine de ces cartes disponibles offrent des fonctions telles qu'Ethernet, Bluetooth, GPS, MP3, carte SD, etc. Le port PS/2 a enfin été remplacé par une interface USB/série (puce FTDI). D'autres changements sont visibles sur l'alimentation qui délivre maintenant 5 V et 3,3 V (la tension de la carte est choisie à l'aide d'un cavalier), et sur le mikroCD, maintenant doté d'un capot métallique qui se retire facilement : on découvre alors un circuit entièrement nouveau (photo 2). Le schéma n'indique pas clairement comment la tension du micro est dérivée de la tension d'alimentation de la carte. Au registre des ajouts, un deuxième connecteur pour thermomètre ; il est maintenant possible de relier facilement un capteur LM35 en plus du traditionnel DS18B20, mais aussi un buzzer, une EEPROM I<sup>2</sup>C 8 Kbits, et ils n'ont pas oublié, ne riez pas, car c'est essentiel, un trou de montage de 5 mm à chaque coin (arrondi) de la carte. La qualité de fabrication de cette carte est d'ailleurs excellente. Le matériau, très épais (2,7 mm), ne plie pas facilement ; les sérigraphies des deux faces sont précises. Les supports mécaniques pour les LCD sont de premier choix et les résistances ajustables suffisamment espacées pour être manoeuvrées confortablement même sans doigts de fée.

## Déballons

J'aime l'emballage des produits mE : leurs boîtes en carton fort facilitent le rangement. Celle de l'EasyPIC v7 est plutôt grande pour la carte dans un sac antistatique, un câble USB (rouge), un DVD avec logiciels et documents, un Guide de l'utilisateur

imprimé, un manuel pour la suite mikroProg pour PIC, un autre manuel pour le débogueur mikroCD intégré et un schéma de la carte. Habituellement, les schémas de mE sont bien dessinés, complétés par des photos des composants ; cette fois, la feuille imprimée recto verso m'a paru inconfortable et difficile à lire.

La carte est équipée d'un PIC18F45K22, un micro 16 MIPS avec 32 Ko de mémoire Flash et 1,5 Ko de RAM. Comme elle est compatible avec plus de 250 PIC, si celui qui est fourni ne vous convient pas, changez-en.

Les LCD et les capteurs de température sont des options à commander séparément.

## Première mise sous tension

La carte peut être alimentée de trois manières : via le jack de 6,3 mm (+ au centre), un bornier ou l'USB. Il y a trois connecteurs USB, mais seul le connecteur mikroProg peut servir à l'alimentation. Le plus facile est d'utiliser le câble USB fourni. Assurez-vous que le cavalier J6 est

sur « USB », reliez le câble *ad hoc* à la carte et au PC puis basculez l'interrupteur d'alimentation sur ON. Sur l'afficheur à 7 segments apparaît d'abord une animation du texte « EP7 », puis un comptage à un rythme d'environ 20 Hz. Les LED reliées au port C s'illuminent de droite à gauche.

La carte devra être reconnue par le système d'exploitation du PC ; il va falloir installer un pilote. Notez que les pilotes (certifiés!) ne sont fournis que pour Windows Vista, XP et 7.



Photo 2. Sous le capot du programmeur/débogueur mikroProg intégré.

## SHERPA

### Installation des logiciels

Maintenant que la carte fonctionne, mettons-la hors tension et installons les logiciels, qui ne seront d'ailleurs pas nécessairement les compilateurs de mE. Un DVD est fourni, mais vous feriez aussi bien de télécharger la dernière version du compilateur de votre choix depuis le site de mE, où vous trouverez probablement une mise à jour plus récente. L'installation est directe et nécessite environ 185 Mo sur le disque, deux minutes et 16 clics de souris. Deux icônes seront créées sur le bureau, une pour le compilateur (*mikroC Pro dans mon cas*) et une pour *mikroProg suite for PIC*.

Après avoir lancé *mikroC*, il est facile de naviguer jusqu'aux exemples en utilisant le menu *Project* puis l'entrée *Open Examples Folder*. Sélectionnez ensuite le dossier *Development Systems*, qui contient un dossier *EASYPIC7*, contenant à son tour les dossiers d'exemples. Chargez le fichier de projet *LedBlinking.mcppi* du dossier *LED Blinking*, un simple bout d'essai du type *hello World*. Un clic devrait suffire pour le compiler et commencer à programmer l'exécutable dans le micro. Chez moi, la programmation n'a pas démarré faute de pilote pour le *mikroProg*. Celui-ci avait bien été copié sur le disque lors de l'installation, mais pas installé automatiquement, pour une raison sans doute valable, mais inconnue ; il faudra donc le faire à la main. Si, comme moi, vous avez fermé la fenêtre de l'explorateur de fichiers qui s'est ouverte après l'installation et que vous ne savez pas où se trouve le pilote, rendez-vous dans `C:\Program Files\Mikroelektronika\mikroC PRO for PIC\mikroProg Suite installer\Drivers` (remplacez « *mikroC PRO for PIC* » par le nom de votre compilateur). Si vous ignorez comment installer un pilote manuellement, lisez dans ce même dossier le PDF qui donne des instructions claires.

Une fois les pilotes installés, la compilation et la programmation de l'exemple *LedBlinking* prennent moins de 15 s. Toutes les LED reliées au port C et tous les segments de l'afficheur devraient commencer à clignoter à une fréquence d'environ 0,5 Hz.

Au final, le score `helloWorld!` de l'*EasyPIC v7* avec *mikroC PRO for PIC* est de 945, ce qui est très honorable.

Il est temps pour vous de vous frotter aux autres exemples puis de développer vos propres applications (voir l'encart « Mon premier

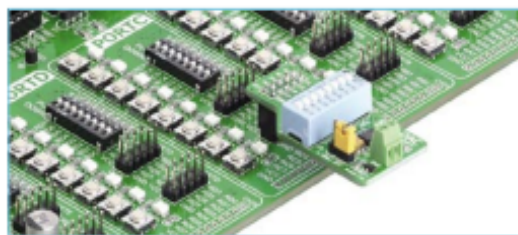


Photo 3. Une carte accessoire CNA reliée au port C.

programme »). La compilation de certains des exemples échouera avec les versions de démo en raison des restrictions de taille du code des compilateurs gratuits.

### Conclusion

L'*EasyPIC v7* est une carte de développement pour microcontrôleurs PIC à 8 bits attractive. Elle offre tous les périphériques attendus d'un tel produit. Les possibilités d'extension sont nombreuses et l'interfaçage aisé. Les connecteurs *mikroBus* et les connecteurs des ports attendent que vous vous fournissiez dans la vaste gamme de modules tout faits de mE (photo 3). La qualité de fabrication de la carte est excellente. Ses trous de montage facilitent sa mise en œuvre en dehors du labo. La présence du 3,3 V la rend compatible avec les composants et périphériques à basse tension, omniprésents de nos jours. Grâce au connecteur ICD compatible *Microchip*, l'utilisation d'outils de programmation d'autres fabricants est un jeu d'enfant. Si le développement de projets à base de PIC est votre dada, ne passez pas à côté de cette carte.

(120093, trad. Kévin PETIT)

[1] Nouveau critère pour les bancs d'essai de kits de développement, *Elektor* février 2012, [www.elektor.fr/120096](http://www.elektor.fr/120096)

## Mon premier programme


Comme mon exemplaire de la carte a été livré avec un module *EasyGPS Click* (photo 1), je l'ai utilisé pour écrire un petit programme. Le code *EasyGPS demo* téléchargé depuis le site de mE, prévu en fait pour leur carte *SmartGPS*, est destiné à un PIC18F4520 sur une carte *EasyPIC6*. Cela implique de changer le micro cible (dans la fenêtre *Project Settings* du menu *View*), d'activer le fusible PLL x 4 (*Project -> Edit Project*) et d'adapter les définitions pour le LCD graphique (copiées à partir d'un autre exemple). Le programme fonctionnait alors sur l'*EasyPIC v7* avec le LCD graphique, sauf l'entrée sérielle. Pour l'activer, j'ai découvert, après quelques recherches, qu'il faut

désactiver les entrées analogiques du PIC18F45K22 (ajoutez `ANSEL = 0` juste avant `UART1_Init(9600)`).

Le module *EasyGPS* fonctionne sous 3,3 V, mais le programme tourne parfaitement avec le PIC18F45K22 alimenté sous 5 V ou sous 3,3 V. Pour ceux qui utiliseront la démo du compilateur ou n'ont pas de LCD graphique, j'ai ajouté un peu de code pour l'afficheur alphanumérique LCD. Vous pourrez télécharger mon programme sur [www.elektor.fr/120093](http://www.elektor.fr/120093) ; deux exécutables pré-compilés sont fournis, un pour le LCD 2 x 16 et un pour le graphique.

## Annexe B :

### PIC18F45K22 DATASHEET



**MICROCHIP** **PIC18(L)F2X/4XK22**

---

**28/40/44-Pin, Low-Power, High-Performance  
Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology**

---

#### High-Performance RISC CPU:

- C Compiler Optimized Architecture:
  - Optional extended instruction set designed to optimize re-entrant code
- Up to 1024 Bytes Data EEPROM
- Up to 64 Kbytes Linear Program Memory Addressing
- Up to 3896 Bytes Linear Data Memory Addressing
- Up to 16 MIPS Operation
- 16-bit Wide Instructions, 8-bit Wide Data Path
- Priority Levels for Interrupts
- 31-Level, Software Accessible Hardware Stack
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier

#### Flexible Oscillator Structure:

- Precision 16 MHz Internal Oscillator Block:
  - Factory calibrated to  $\pm 1\%$
  - Selectable frequencies, 31 kHz to 16 MHz
  - 64 MHz performance available using PLL – no external components required
- Four Crystal modes up to 64 MHz
- Two External Clock modes up to 64 MHz
- 4X Phase Lock Loop (PLL)
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown if peripheral clock stops
  - Two-Speed Oscillator Start-up

#### Analog Features:

- Analog-to-Digital Converter (ADC) module:
  - 10-bit resolution, up to 30 external channels
  - Auto-acquisition capability
  - Conversion available during Sleep
  - Fixed Voltage Reference (FVR) channel
  - Independent input multiplexing
- Analog Comparator module:
  - Two rail-to-rail analog comparators
  - Independent input multiplexing
- Digital-to-Analog Converter (DAC) module:
  - Fixed Voltage Reference (FVR) with 1.024V, 2.048V and 4.096V output levels
  - 5-bit rail-to-rail resistive DAC with positive and negative reference selection
- Charge Time Measurement Unit (CTMU) module:
  - Supports capacitive touch sensing for touch screens and capacitive switches

#### Extreme Low-Power Management with nanoWatt XLP:

- Sleep mode: 100 nA, typical
- Watchdog Timer: 500 nA, typical
- Timer1 Oscillator: 500 nA @ 32 kHz
- Peripheral Module Disable

#### Special Microcontroller Features:

- Full 5.5V Operation – PIC18FXXXK22 devices
- 1.8V to 3.6V Operation – PIC18LFXXXK22 devices
- Self-Programmable under Software Control
- High/Low-Voltage Detection (HLVD) module:
  - Programmable 16-Level
  - Interrupt on High/Low-Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR):
  - With software enable option
  - Configurable shutdown in Sleep
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 4 ms to 131s
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™):
  - Single-Supply 3V
- In-Circuit Debug (ICD)

#### Peripheral Highlights:

- Up to 35 I/O Pins plus 1 Input-Only Pin:
  - High-Current Sink/Source 25 mA/25 mA
  - Three programmable external interrupts
  - Four programmable interrupt-on-change
  - Nine programmable weak pull-ups
  - Programmable slew rate
- SR Latch:
  - Multiple Set/Reset input options
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules
- Three Enhanced CCP (ECCP) modules:
  - One, two or four PWM outputs
  - Selectable polarity
  - Programmable dead time
  - Auto-Shutdown and Auto-Restart
  - PWM steering
- Two Master Synchronous Serial Port (MSSP) modules:
  - 3-wire SPI (supports all 4 modes)
  - I<sup>2</sup>C™ Master and Slave modes with address mask