

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

**Etude d'une nouvelle conception
de la batterie acide-au-plomb**

**Preparé par : M. ABDELHAMID ABDERRAHIM
M. BENSAID ISHAK**

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Université	Qualité
ADDA BENATIA Abderrahmen	MCB	U-Tiaret	Président
BELARBI Mustapha	MCA	U-Tiaret	Encadreur
SAHLI Belgacem	MCA	U-Tiaret	Co-Encadreur
NASRI Djillali	MCA	U-Tiaret	Examineur

PROMOTION : 2019/2020

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions DIEU le Tout Puissant, le miséricordieux de nous avoir donné, la santé, le courage, la patience et la volonté afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Nous souhaitons exprimer nos plus profonds remerciements à nos parents respectifs de nous avoir épaulés, encouragés, soutenus pendant toute notre vie et qui continueront sans aucun doute à nous aider dans toutes nos futurs projets.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs Dr Mustapha BELARBI et Dr Belgacem SAHLI pour nous avoir orientés et encadrés durant toute cette année, ainsi leur suivi, leur précieux conseils, leur disponibilité, leur travail constructif et pour toute la confiance qu'ils ont su nous témoigner durant cette année si bénéfique.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous les professeurs du département de génie électrique. Et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

GRAND MERCI à tous

DÉDICACE

Nous dédions ce modeste travail aux êtres les plus chers à nos yeux qui ont toujours été derrière nous depuis le début de nos études, c'est grâce à leurs encouragements et à leurs prières que nous sommes là aujourd'hui.

*À nos très chers parents,
À nos chers frères,
À nos chères sœurs,
À nos chers cousins et cousines,
À nos amis,*

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	2
1 CONTRÔLE DU STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE	5
1.1 Introduction	5
1.2 Vue générale sur le stockage d'énergie	5
1.2.1 Stockage hydraulique pompé (Pumped hydro storage (PHS))	6
1.2.2 Air comprimé (Compressed air)	6
1.2.3 Volants d'inertie (Flywheels)	7
1.2.4 Condensateur et supercondensateur (Capacitor and Supercapacitors)	8
1.2.5 Stockage d'énergie magnétique supraconducteurs (SMES)	8
1.2.6 Stockage d'hydrogène et pile à combustible (Hydrogen storage and fuel cell)	9
1.2.7 Stockage électrochimique (Electrochemical storage)	9
1.3 Historique d'énergie électrochimique	11
1.4 Les accumulateurs électrochimiques	13
1.5 Les Différents technologies d'accumulateur	13
1.5.1 Acide-au-plomb	13
1.5.2 Nickel-Cadmium	13
1.5.3 Nickel-Métal-Hydrure	14
1.5.4 Lithium	14
1.6 Généralités sur le PIC16F877A	16
1.6.1 Le module de conversion analogique numérique (ADC) :	18
1.6.2 Les temporisateurs du PIC16F877A	19
1.7 Capteur de température LM35	20
1.8 Le circuit MAX232	21
1.9 Conclusion	22
2 LA BATTERIE ACIDE-AU-PLOMB	24
2.1 Différents technologies des accumulateurs acide-au-plomb	24
2.1.1 L'accumulateur ouvert :	25
2.1.2 L'accumulateur à électrolyte immobilisé :	25
2.2 Domaine d'application des accumulateurs acide-au-plomb	26
2.2.1 Les batteries de démarrage ou SLI :	26
2.2.2 Les batteries industrielles stationnaires :	27
2.2.3 Les batteries industrielles de traction :	27
2.3 Constitution des accumulateurs acide-au-plomb	28
2.3.1 Les grilles :	28
2.3.2 L'électrode positive :	29
2.3.3 L'électrode négative :	29
2.3.4 Le séparateur microporeux :	30
2.3.5 L'électrolyte :	30
2.3.5.1 Électrolyte liquide (libre) :	30
2.3.5.2 Électrolyte gélifié ou absorbé (immobilisé) :	30
2.4 Processus de fabrication des accumulateurs acide-au-plomb	31
2.4.1 Atelier fonderie :	31

TABLE DES MATIÈRES

2.4.2	Atelier moulins et empâtement :	31
2.4.3	Curing :	32
2.4.4	Atelier Formation :	32
2.4.5	Atelier Séchage :	32
2.4.6	Atelier Ebarbage :	32
2.4.7	Atelier Enveloppement :	33
2.4.8	Atelier COS (Casting On the Strap) :	33
2.4.9	Chaîne de production :	33
2.5	Principe de fonctionnement des accumulateurs acide-au-plomb :	33
2.5.1	Principales réactions en charge/décharge :	33
2.5.2	Degrés d'oxydation :	35
2.5.3	Description qualitative des réactions en charge et décharge	36
2.6	Les caractéristiques des accumulateurs acide-au-plomb :	37
2.7	Les mécanismes de défaillance des accumulateurs acide-au-Plomb	39
2.7.1	Les dégradations catastrophiques :	39
2.7.2	Les dégradations progressives irréversibles :	39
2.7.2.1	La dégradation de la plaque positive :	40
2.7.2.2	La dégradation de la plaque négative :	41
2.7.2.3	La dégradation du séparateur :	42
2.7.2.4	La stratification :	42
2.7.2.5	La perte d'eau :	42
2.7.2.6	La réorganisation du sulfate de plomb en stockage (sulfatation) :	43
2.7.2.7	Désulfatation :	43
2.7.3	Les pertes de capacité réversibles :	43
2.7.3.1	L'autodécharge en stockage :	43
2.7.3.2	L'effet mémoire :	44
2.7.3.3	Les poches de gaz :	44
2.8	La modélisation de la batterie acide-au-plomb	45
2.8.1	La résistance interne de la batterie	45
2.8.2	État de charge SOC de la batterie et niveau d'énergie LOE	46
2.9	Technique de charge d'une batterie acide-au-plomb	46
2.9.1	Charge classique ON-OFF :	47
2.9.2	Charge avec un courant constant :	47
2.9.3	Charge avec tension constante :	47
2.10	Conclusion :	48
3	RÉALISATION PRATIQUE	50
3.1	Principe de liaison des différents outils :	50
3.2	Le logiciel LabVIEW :	50
3.3	Réalisation d'un programmeur PICKIT2 :	52
3.3.1	Test du programmeur sur plaque d'essais :	53
3.3.2	Développement du PCB du programmeur :	54
3.4	La surveillance de la batterie :	55
3.4.1	Mesure de la tension de la batterie :	56
3.4.2	Mesure des courants de charge / décharge de la batterie :	57
3.4.3	Mesure de température des éléments de la batterie :	57
3.5	Contrôle des cycles charge/décharge de la batterie :	58
3.6	Liaison entre le PIC16F877A et l'interface LabVIEW :	60

TABLE DES MATIÈRES

3.6.1	Emission des données du microcontrôleur vers l'interface :	60
3.6.2	Emission des données de l'interface vers le microcontrôleur :	62
3.6.3	Echange des données entre le microcontrôleur et l'interface LabVIEW :	63
3.6.4	Intégration de la mesure de température :	64
3.7	Connections avec la base de données :	66
3.8	Analyse de données :	68
3.9	Conception d'une nouvelle batterie :	68
3.10	Conclusion :	71
Conclusion générale		73
 BIBLIOGRAPHIE		 75

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	Schéma du principe d'une PHS	6
FIGURE 1.2	Schéma de principe du fonctionnement avec air comprimé.	7
FIGURE 1.3	Schéma du principe Flywheels.	7
FIGURE 1.4	Schéma de principe d'un supercondensateur.	8
FIGURE 1.5	Schéma du principe de SMES	9
FIGURE 1.6	Schéma du principe d'hydrogène et pile à combustible.	9
FIGURE 1.7	Schéma de principe du stockage électrochimique.	10
FIGURE 1.8	Gravure ancienne représentant une des expériences pratiquées par Galvani sur des grenouilles.	11
FIGURE 1.9	Pile de Volta.	11
FIGURE 1.10	La batterie de Planté.	12
FIGURE 1.11	Pile de Leclanché.	12
FIGURE 1.12	Répartition des parts de vente suivant le type d'accumulateur ou de pile dans le monde en 2009	15
FIGURE 1.13	Les différents circuits de brochage	16
FIGURE 1.14	Architecture interne d'un microcontrôleur PIC16F877 [6]	17
FIGURE 1.15	Brochage du capteur de température LM35	20
FIGURE 1.16	Le composant MAX232	21
FIGURE 1.17	Circuit de brochage du composant MAX232	22
FIGURE 2.1	Classification des différentes technologies des accumulateurs acide-au-plomb.	24
FIGURE 2.2	Différentes technologies de l'accumulateur ouvert	25
FIGURE 2.3	Différentes technologies des accumulateurs étanches (VRLA).	26
FIGURE 2.4	Répartition du marché mondial des batteries d'accumulateurs acide-au-plomb. A gauche : en 1992 - 8,5 milliards d'euros, A droite : en 2002 - 12 milliards d'euros	27
FIGURE 2.5	Vue éclatée d'un accumulateur acide-au-plomb.	28
FIGURE 2.6	Les réactions chimiques à la décharge	34
FIGURE 2.7	Degrés d'oxydation du plomb.	35
FIGURE 2.8	Vieillesse de la matière active positive par changement de morphologie.	40
FIGURE 2.9	Corrosion de la plaque positive	41
FIGURE 2.10	Circuit équivalent de batterie [13]	45
FIGURE 3.1	Schéma de principe de la liaison entre les différents outils de développement	50
FIGURE 3.2	Exemple d'une interface LabVIEW	51
FIGURE 3.3	Exemple de programmation en langage G sur LabVIEW	51
FIGURE 3.4	Le programmeur PICKit2	52
FIGURE 3.5	Interface de contrôle du programmeur PICKIT2	52
FIGURE 3.6	Schéma de la version clone du programmeur PICKit2	53
FIGURE 3.7	Test du programmeur sur plaque d'essais	53
FIGURE 3.8	Le typon du programmeur	54
FIGURE 3.9	Gravure du typon sur face cuivre en utilisant du papier photo	54

TABLE DES FIGURES

FIGURE 3.10	Développement finale du PCB	55
FIGURE 3.11	Version finale du programmeur PICKit2 (version maison)	55
FIGURE 3.12	Mesure de tension des éléments de la batterie	56
FIGURE 3.13	Schéma de branchement du capteur de courant ACS712.	57
FIGURE 3.14	Circuit de cyclage entre charge / décharge de la batterie.	58
FIGURE 3.15	Circuit de régulation du courant de charge.	58
FIGURE 3.16	Schéma générale de la carte de contrôle et d'acquisition.	59
FIGURE 3.17	Test de la communication entre le microcontrôleur et l'interface. . .	59
FIGURE 3.18	Acquisition des données sur LabVIEW	61
FIGURE 3.19	Le contrôle de PIC par le PC (LabVIEW)	62
FIGURE 3.20	Interface LabVIEW de test de la communication bidirectionnelle . .	63
FIGURE 3.21	Bloque diagramme sur LabVIEW	64
FIGURE 3.22	Montage sur plaque d'essais pour tester l'acquisition de la température	65
FIGURE 3.23	L'acquisition de température sur LabVIEW	65
FIGURE 3.24	Configuration de la connexion à la Base de Donnée.	66
FIGURE 3.25	Exemple de stockage de données dans une base de données Access. .	66
FIGURE 3.26	Bloc diagramme d'insertion des mesures dans une base de données Access	67
FIGURE 3.27	Bloc diagramme de récupération des données à partir d'une base de données.	67
FIGURE 3.28	Analyse des données stockées dans la base de données.	68
FIGURE 3.29	Nouvelle conception de la batterie acide-au-plomb.	69
FIGURE 3.30	Carte de contrôle de la batterie.	69
FIGURE 3.31	Un élément constituant la batterie.	70
FIGURE 3.32	Ouverture de la batterie pour remplacement des éléments défectueux.	70
FIGURE 3.33	Imagination de la nouvelle conception des batteries acide-au-plomb.	71

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 1.1	Moyens de stockage de l'énergie électrique	10
TABLE 1.2	Configuration des entrées analogiques [6]	19
TABLE 2.1	Composition de la pâte.	31

LISTINGS

3.1	Code pour la mesure des tensions élémentaires de la batterie.	56
3.2	Configuration de l'ADC et le RS-232 dans le microcontrôleur	60
3.3	L'envoi des données de PIC vers PC	61
3.4	Réception et exécution des ordres de l'interface LabVIEW	62
3.5	Mesure et transfert de la température à l'interface LabVIEW	64

ACRONYMS

ADC	Analog to Digital Converter
AGM	Absorbed Glass Mat
AJS	Acid Jellying Separator
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BMS	Batterie Management System
CCA	Cold Cranks Amps
COS	Casting On the Strap
DIL	Dual In-Line
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
f.e.m	Force électro motrice
HCMOS	High-Density Complimentary Metal Oxide Semiconductor
ICSP	In-Circuit Serial Programming
I ² C	Inter-Integrated Circuit
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LOE	Level of energy
PHS	Pumped Hydro Storage
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RS-232	Recommended Standard 232(computer serial interface, IEEE)
SLI	Starting", "Lighting", "Ignition"
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
SOC	State Of charge
SOF	State Of function
SOH	State Of Health
SQL	structured query language
SSP	Synchronous Serial Port
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver Transmitter
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
VRLA	Valve Regulated Lead Acid

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Depuis l'invention de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté en 1859, les batteries ne cessent pas de s'imposer par leurs usages. Du véhicule thermique au véhicule électrique, de l'électronique portable aux systèmes de secours stationnaires en passant par le stockage des énergies renouvelables intermittentes, les diverses applications des batteries sont autant de marchés colossaux, en forte croissance, ou à très fort potentiel de croissance.

Bien que les batteries occupent un rôle essentiel dans ces applications, elles en constituent toujours le maillon faible à cause de : leurs durées de vie limitées, la difficulté de prévoir leur fin d'usage et la complexité d'estimer de façon fiable leur réserve énergétique disponible à chaque instant. Il en résulte une suspicion de l'utilisateur vis-à-vis de cette "boîte noire". Bien qu'il n'y ait pas une bonne connaissance, il est donc facile de lui faire porter les moindres défaillances des systèmes.

À cet effet, la détermination de l'état de charge et de l'état de santé des batteries est devenue une préoccupation de plus en plus importante dans la majorité des cas. Si cette problématique dépasse ainsi largement le cadre d'un seul type d'accumulateur électrochimique ou d'une seule application, le cadre de ce mémoire vise à répondre aux besoins soulevés par l'utilisation des systèmes photovoltaïques, dont la partie stockage est essentiellement assurée par des batteries acide-au-plomb.

Conformément à la volonté des pays développés de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et d'établir de façon plus générale une politique de développement durable, le recours aux énergies renouvelables devrait s'intensifier dans les années à venir.

Le développement de la filière photovoltaïque devra néanmoins passer par une amélioration du coût et de la fiabilité de chacun de ses composants, ce qui est particulièrement vrai pour la partie stockage. Dans les systèmes photovoltaïques, le stockage permet en effet non seulement de prolonger les heures de service électrique aux périodes nocturnes et de donner au système une autonomie de plusieurs jours sans production photovoltaïque, mais également de répondre à des besoins de puissance nettement supérieurs à ce que pourrait fournir instantanément le générateur photovoltaïque.

Or, si la batterie acide-au-plomb est à la fois la technologie la plus mature et la plus attractive d'un point de vue économique pour répondre à ce besoin de stockage, sa durée de service limitée et particulièrement réduite dans ce type d'application en fait malgré tout l'élément le plus faible et le plus coûteux du système.

De ce fait, l'objectif de ce mémoire est l'étude d'une nouvelle conception de la batterie acide-au-plomb. Dans le premier chapitre, on trouve des généralités sur les différents types de stockage électrochimique. Comme on cherche à modifier la méthode de conception des batteries par l'ajout de l'électronique programmable, nous avons cité quelques généralités sur le microcontrôleur PIC16F877A .

Dans le second chapitre, une attention particulière a été accordée aux batteries acide-au-plomb, afin de développer les connaissances requises pour bien comprendre son principe de

fonctionnement, et dont l'objectif est de déterminer l'état de charge et l'état de santé avec une bonne précision.

En dernier chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes utilisées pour commencer la première partie du projet, à savoir la partie acquisition et stockage des données mesurées dans une base de données ACCESS. Cette base de données va servir comme base de connaissances sur les mesures externes effectuées sur la batterie telles que : le courant de charge et de décharge, la tension à vide, et la température de fonctionnement.

CHAPITRE 1

Contrôle du stockage électrochimique

CONTRÔLE DU STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

1.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes de stockage de l'énergie électrique sous forme électrochimique, préciser les notions d'électrochimie nécessaires à la compréhension du chapitre qui suit. Il est tout d'abord précisé dans quel contexte s'inscrivent les recherches actuelles : place des batteries selon les domaines, améliorations technologiques récentes ... Ensuite, nous allons présenter les principales fonctionnalités du microcontrôleur PIC16F877A qui ayant une relation avec les systèmes de stockage.

1.2 VUE GÉNÉRALE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE

L'énergie ne se produit pas, ni se consomme, elle se transforme où se convertit d'une forme en une autre. Assurer un service nécessite des transformations, donc une « dépense » d'énergie primaire prélevée dans l'environnement. Les services correspondant à nos besoins font appel à une forme d'énergie directement consommable et commercialisée : l'énergie finale. Celle-ci est elle-même obtenue par transformation de ressources primaires disponibles dans la nature. Du point de vue de la soutenabilité, on peut distinguer deux catégories d'énergie primaire : d'une part les fossiles et les fissiles dont les stocks sont non renouvelables et, d'autre part, les flux renouvelables que sont le rayonnement solaire, mais aussi le vent, la biomasse, la géothermie...

La part de l'énergie électrique croissante à l'échelle mondiale ainsi que l'émergence de sa production par des ressources renouvelables et variables, donnent au stockage d'énergie électrique un rôle plus important que jamais.

L'énergie électrique se stocke rarement directement, mais se convertit aisément en d'autres formes (potentielle gravitaire, cinétique, chimique...) elles-mêmes parfaitement stockables. Les excellents rendements de conversion dans les deux sens de transformation, aussi bien lors de la charge que de la décharge, permettent de la restituer, dans la plupart des cas, sans limite thermodynamique majeure. En effet si les transformations ne sont pas trop rapides ni excessivement lentes, les pertes énergétiques peuvent être suffisamment faibles pour considérer un stockage à haut niveau de réversibilité.

De nombreuses technologies de stockage d'énergie électrique existent, nous mentionnons :

1.2.1 Stockage hydraulique pompé (Pumped hydro storage (PHS)) [11]

Les stations de transfert d'énergie par pompage sont des installations constituées de réservoirs d'eau positionnés à des altitudes différentes et d'un dispositif de pompage réversible (pompage/turbinage) permettant le transfert de masses d'eau entre ces réservoirs, et ainsi d'exploiter de façon réversible leur énergie potentielle (Figure 1.1). L'énergie stockée s'exprime par :

$$E = mgh \quad (1.1)$$

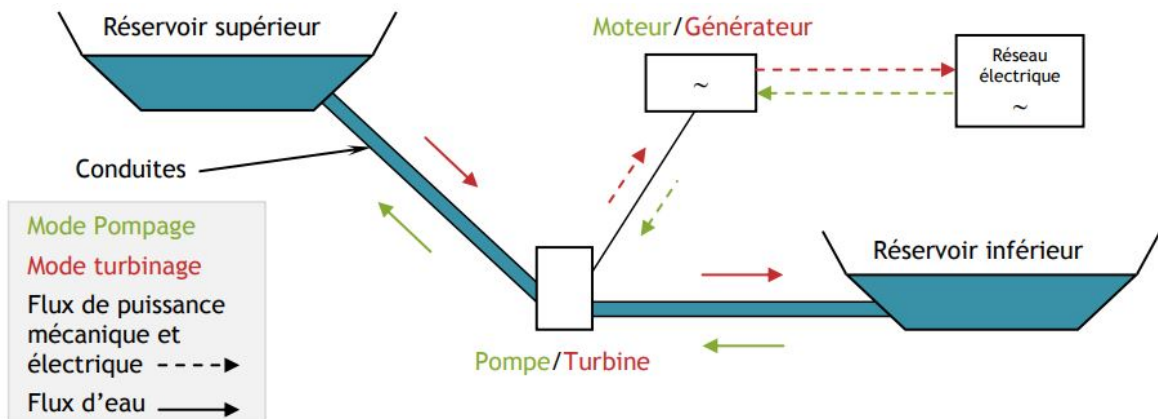


FIGURE 1.1 : Schéma du principe d'une PHS.

1.2.2 Air comprimé (Compressed air) [11]

Dans cette technologie de stockage de masse, peu répandue (deux grandes installations au monde : en Allemagne et aux USA), le cycle de fonctionnement consiste à utiliser de l'énergie électrique bon marché (disponible en heures creuses) pour comprimer de l'air, via un compresseur électrique de grande puissance, au sein de cavernes profondes (anciennes mines de sel). Lors de la décharge (déstockage), la détente de l'air vient alimenter le compresseur d'une turbine à gaz dans laquelle du gaz naturel est brûlé au moment où la demande électrique est forte (heures de pointe). En réalité, il s'agit donc plutôt d'une turbine à gaz (TAG) hybridée par un stockage pneumatique. L'utilisation d'air comprimé lors de la détente permet en effet d'améliorer le rendement de la turbine qui habituellement consomme une partie importante de sa puissance mécanique pour entraîner son compresseur. Ce système, loin d'être un dispositif de stockage réversible, permettrait de trouver une place dans un modèle économique particulier. Mais il n'y a eu aucune nouvelle réalisation depuis le début du siècle en cours et il est peu probable que cela change.

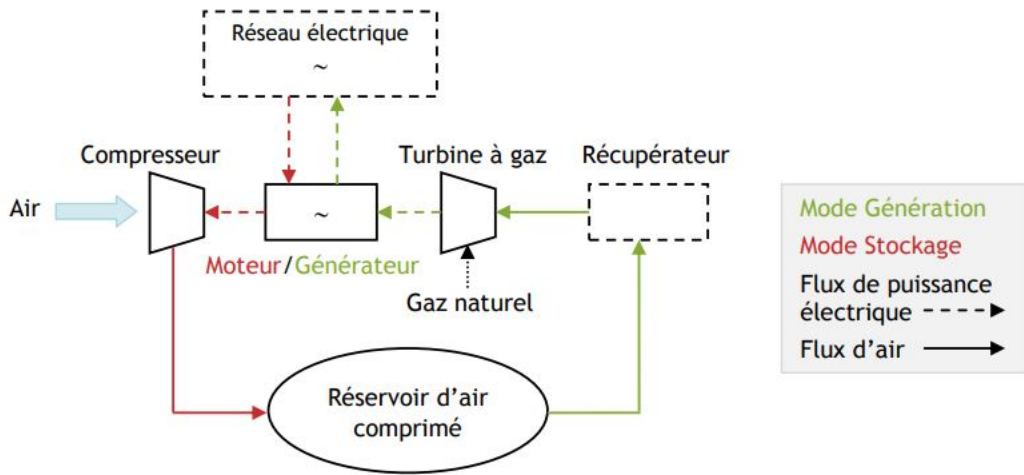


FIGURE 1.2 : Schéma de principe du fonctionnement avec air comprimé.

1.2.3 Volants d'inertie (Flywheels) [11]

Le stockage par volant d'inertie consiste à faire tourner à très grande vitesse un volant massique (cylindrique, tubulaire ou autres formes) emmagasinant ainsi de l'énergie cinétique. L'énergie cinétique est proportionnelle au moment d'inertie du volant J , et au carré de la vitesse angulaire Ω :

$$E = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2 \quad (1.2)$$

Une machine électrique, fonctionnant en moteur ou en générateur, freine ou accélère le volant afin de réaliser les charges et les décharges du système avec un haut rendement. La machine électrique est pilotée par un convertisseur électronique de puissance, la variation de la vitesse étant à la base du fonctionnement.

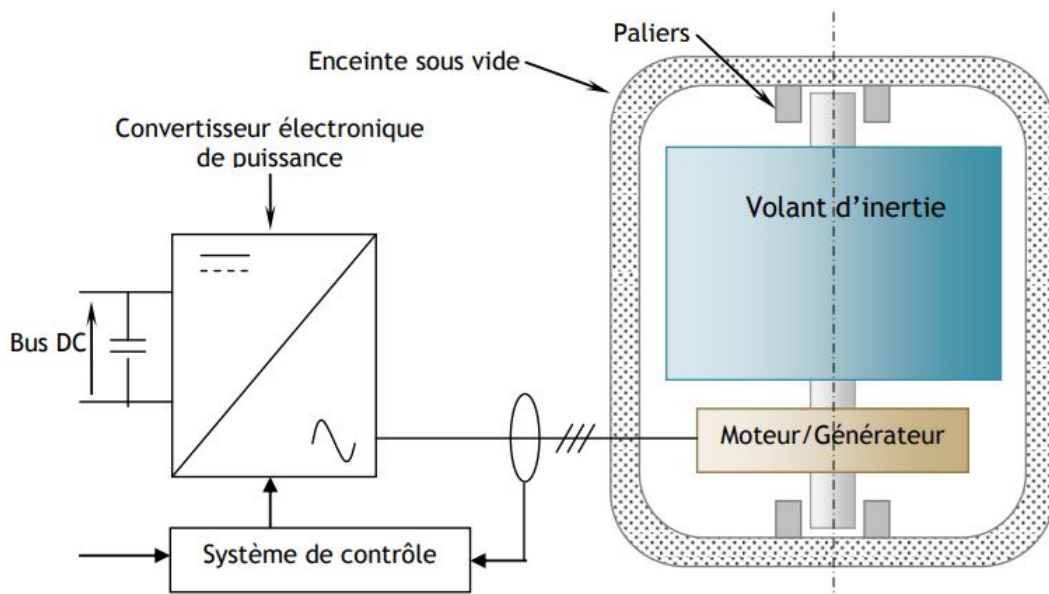


FIGURE 1.3 : Schéma du principe Flywheels.

1.2.4 Condensateur et supercondensateur (Capacitor and Supercapacitors) [11]

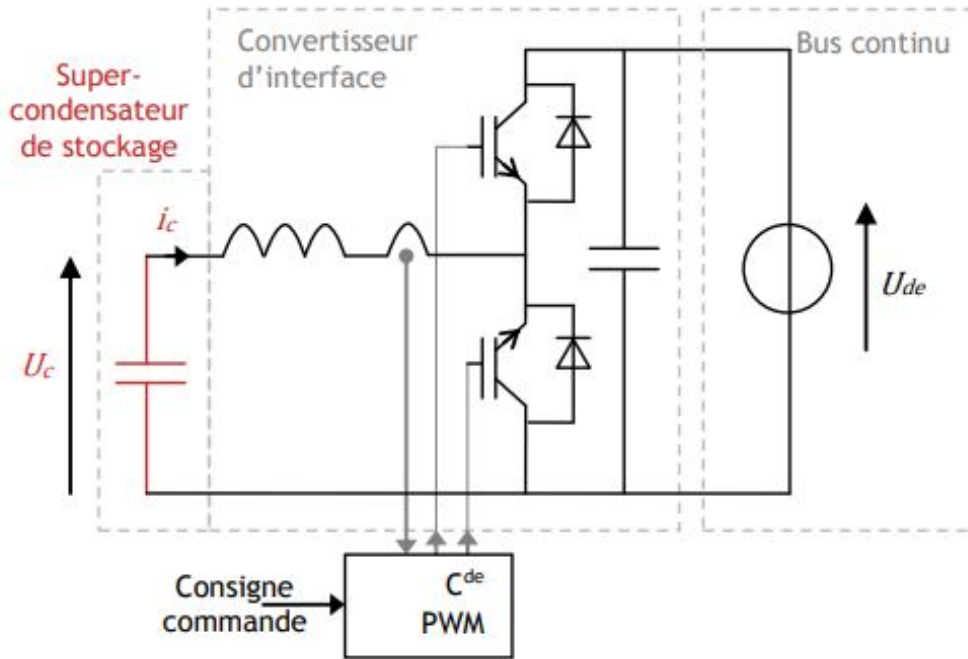


FIGURE 1.4 : Schéma de principe d'un supercondensateur.

Le stockage d'électricité par condensateurs constitue l'un des moyens les plus directs de stockage. L'énergie accumulée est proportionnelle au carré de la tension, la tension varie donc avec l'état énergétique, ce qui implique l'utilisation d'un convertisseur électronique de puissance d'adaptation.

$$E = \frac{1}{2} C U_C^2 \quad (1.3)$$

1.2.5 Stockage d'énergie magnétique supraconducteurs (SMES) [11]

Les systèmes de stockage inductif supraconducteurs (SMES) sont adaptés à des charges/décharges très rapides (quelques secondes ou inférieures à la seconde). Ils sont constitués d'une inductance avec un bobinage en matériau supraconducteur sans noyau ferromagnétique et associé à des structures mécaniques porteuses permettent de supporter les efforts électrodynamiques intenses. Pour le maintien à très basse température (environ 4 K pour les matériaux basse température critique et 70 K pour ceux à haute température), un cryostat est nécessaire ainsi qu'un cryocooler (réfrigérateur très basse température) et un convertisseur électronique de puissance d'interface est requis pour réaliser et contrôler les charges/décharges. L'interrupteur de mise en court-circuit permet de minimiser l'autodécharge durant des phases longues sans transfert et de protéger le convertisseur électronique en cas de dysfonctionnement (équivalent au disjoncteur dans le cas d'une source de tension).

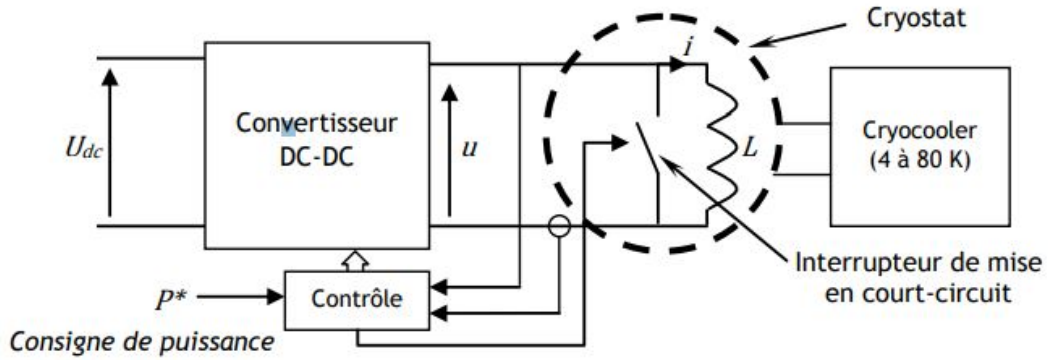


FIGURE 1.5 : Schéma du principe de SMES.

1.2.6 Stockage d'hydrogène et pile à combustible (Hydrogen storage and fuel cell) [11]

Le stockage d'électricité via l'hydrogène consiste à associer un électrolyseur pour convertir l'électricité en hydrogène, un dispositif de stockage d'hydrogène et une pile à combustible pour la conversion en électricité de l'hydrogène et de l'oxygène récupéré lors de l'électrolyse ou pris dans l'air. Les tensions appliquées par cellule de l'électrolyseur sont de l'ordre de 2 V, ce qui est supérieur à la tension théorique réversible de 1,23 V, le rendement théorique d'électrolyse est donc de l'ordre de 62%. Le procédé alcalin est le plus mature, cependant le procédé PEM8, bien que plus coûteux (catalyseurs en platinoïdes), tend à se généraliser. En effet, aucun électrolyte circulant n'est nécessaire, le système en est simplifié, l'hydrogène est directement produit à haute pression (plusieurs centaines de bar). Le rendement s'élève alors de 70 à 80% pour une densité de $1 A/cm^2$.

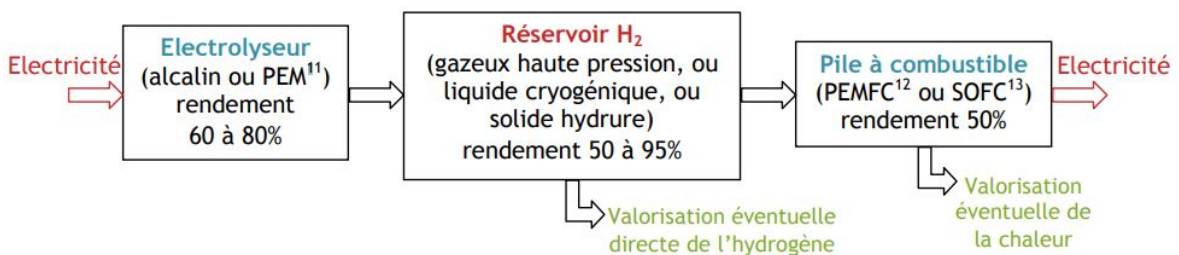


FIGURE 1.6 : Schéma du principe d'hydrogène et pile à combustible.

1.2.7 Stockage électrochimique (Electrochemical storage)

De nombreuses technologies électrochimiques existent, présentant divers compromis performances/coût et une maturité variable, citons, entre autres, les technologies aïce-au-plomb, nickel-cadmium (NiCd), nickel-métal-hydrures (NiMH), lithium-ion (nombreuses variantes) et sodium-soufre (haute température : $350^{\circ}C$).

Une batterie est constituée de cellules connectées en série et comprenant deux électrodes baignant dans un électrolyte ; une positive, la cathode, et une autre négative, l'anode. Les

valeurs d'énergie massique vont de 30 à 200 Wh/kg environ, avec relativement une faible durée de vie en cyclage allant de quelques centaines à quelques milliers de cycles profonds.

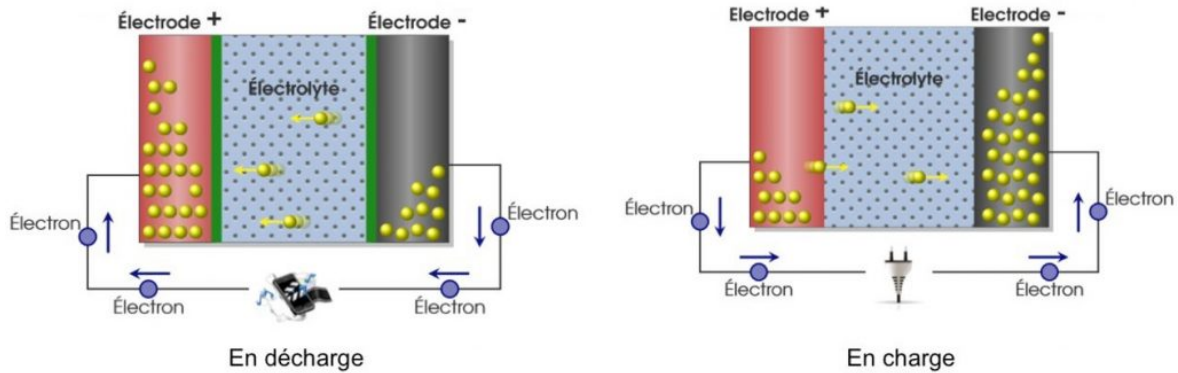


FIGURE 1.7 : Schéma de principe du stockage électrochimique.

Moyen de stockage	Densité énergétique Wh/kg	Durée de stockage	Rend %	Coût euro/kWh	Inconvénient	Avantage
Electrochimie (Acide-au-plomb)	25 à 45	> 1 mois	60 à 98	50 à 200	Durée de vie	Facilité de mise en œuvre, Temps de mobilisation court.
Electrique (Super-capacité)	0.1 à 5	Quelques heures	80 à 100	16000	Faible durée de stockage - Coût	Densité de puissance élevée.
Mécanique (Volant inertie)	30 à 100	Quelques min	90	1000 à 5000	Faible durée de stockage - Coût	Densité de puissance élevée.
Thermique (Chaleur latente)	5 à 50 Wh/L	Quelques heures	90	Centaines d'euros	Lourd à mettre en œuvre séparément	Mise en œuvre naturelle pour une unité de production thermique.
Hydraulique	0.1 à 1 Wh/L	Quelques mois	60 à 80	70-150 (pompage)	Gros investissement Impact environnemental. Risque	Faible coût pour un stockage de masse.
Air comprimé	1 à 5 Wh/L	Quelques jours	< 50%	20 à 150	Rendement faible (conventionnel) Sites spécifiques	Technologie traditionnelle. Faible coût.

TABLE 1.1 : Moyens de stockage de l'énergie électrique [4]

1.3 HISTORIQUE D'ÉNERGIE ÉLECTROCHIMIQUE

L'électrochimie se rapporte à l'étude des procédés chimiques qui sont responsables du mouvement des électrons dans l'électricité. L'histoire de l'électrochimie est remplie de plusieurs découvertes importantes depuis le 16ème siècle.

En 1791, Luigi Galvani montre que la contraction des membres inférieurs de la grenouille peut produire un courant électrique. Ce brillant physicien et médecin italien vient de mettre au jour l'une des facettes de l'électrochimie : la production d'énergie électrique à partir d'une réaction d'oxydoréduction spontanée (Figure 1.8).

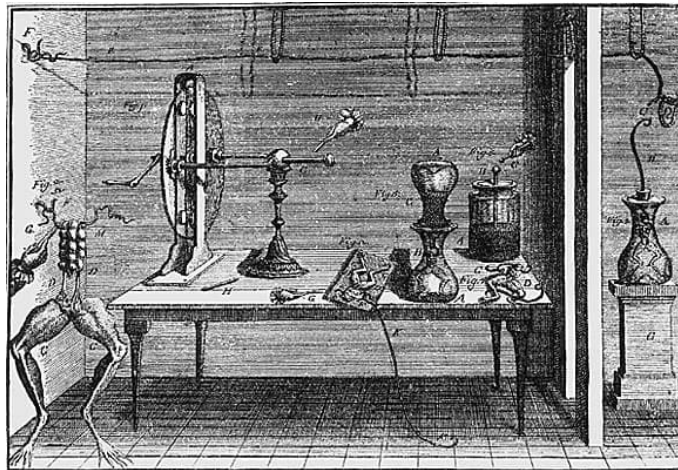


FIGURE 1.8 : Gravure ancienne représentant une des expériences pratiquées par Galvani sur des grenouilles.

En 1800, son compatriote Alessandro Volta interprète de manière rationnelle la découverte de Galvani en mettant au point la première pile électrique (pile voltaïque) et devient l'un des précurseurs de toute l'électrochimie (Figure 1.9).

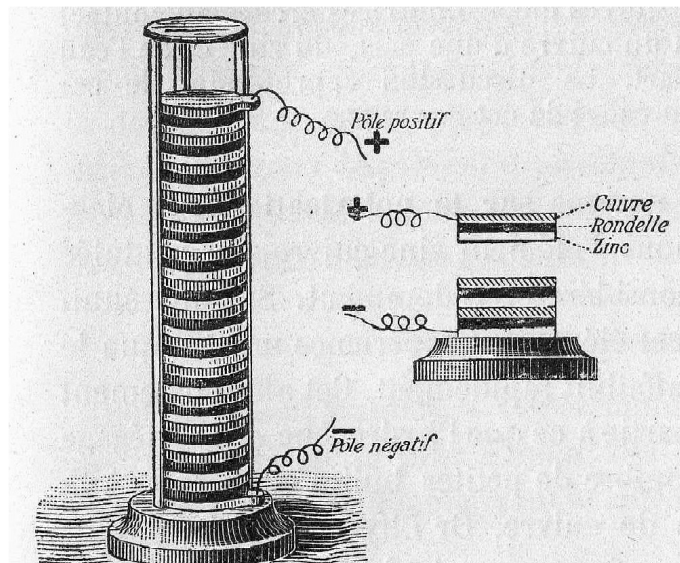


FIGURE 1.9 : Pile de Volta.

En 1859, le physicien français Gaston Planté inventa la première batterie rechargeable au plomb (Figure 1.10), selon un principe qui est toujours utilisé de nos jours.

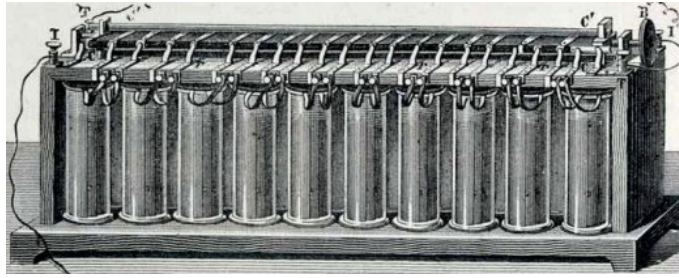


FIGURE 1.10 : La batterie de Planté.

En 1868, le français Georges Leclanché (1839-1882) créa la première pile dite « sèche » : l'électrolyte y était gélifié, ce qui la rendait plus maniable. La pile Leclanché ne nécessitait aucun entretien. Comme le dira la publicité : « Elle ne s'use que si l'on s'en sert ». Dans sa forme moderne, elle est encore actuellement la pile la plus utilisée. Elle est à l'origine de la pile saline au zinc et au bioxyde de manganèse.

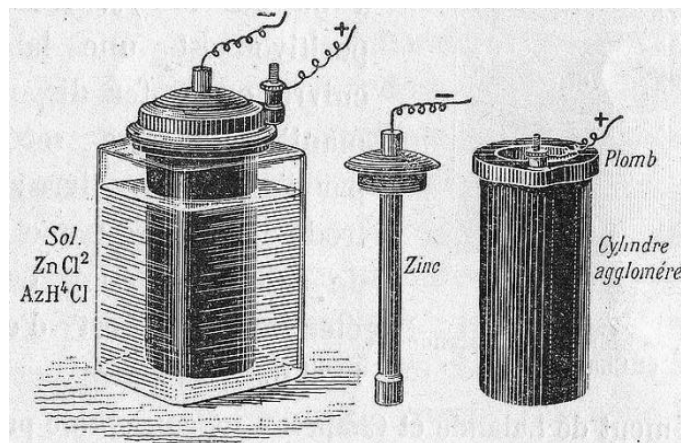


FIGURE 1.11 : Pile de Leclanché.

En 1899, Waldmar Jungner, un Suédois, inventa la batterie ou accumulateur au nickel-cadmium. Presque 50 ans après, Neumann réussit à étanchéifier complètement l'accumulateur, ce qui conduisit à la batterie moderne étanche au nickel-cadmium.

En 1939, Durant la seconde guerre mondiale, Samuel Ruben et Philip Rogers Mallory créent la pile alcaline.

En 1959, l'américain Lewis Urry conçoit la première pile alcaline grand public.

En 1970, les premières piles au lithium, qui permettent de remplacer le zinc par un métal plus réducteur, sont mises au point.

De 1980 à 1990, la technologie au lithium se développe fortement avec l'invention des batteries lithium-ion et d'une multitude de dérivés.

1.4 LES ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES

Le stockage électrochimique d'énergie est sans doute le plus emblématique car il constitue la solution, de très loin la plus utilisée, dans les applications embarquées et portables grâce à ses performances en énergie massique.

Un accumulateur est un système physico-chimique réversible pouvant convertir l'énergie chimique en énergie électrique grâce à des réactions d'oxydoréduction. L'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie chimique lorsque le système est en mode accumulateur (le système est en mode charge) puis restituée sous forme d'énergie électrique lorsqu'il se trouve en mode générateur (le système est alors en décharge) (Figure 1.7).

Une batterie est définie en général par l'association de plusieurs accumulateurs. Le terme « batterie » est utilisé comme synonyme de courant de regroupement d'accumulateurs. D'ailleurs, le mot « battery » est à l'origine un mot perse qui signifie le regroupement de plusieurs pièces de même type.

1.5 LES DIFFÉRENTS TECHNOLOGIES D'ACCUMULATEUR [1]

En s'appuyant sur les notions rappelées précédemment, nous revenons sur la présentation de systèmes types de stockage électrochimique listés au paragraphe 1.2.7.

1.5.1 Acide-au-plomb

- Électrodes :
 - Cathode (borne +) : Bioxyde de plomb (PbO_2)
 - Anode (borne -) : Plomb (Pb)
- Électrolyte : Acide sulfurique (H_2SO_4)
- Tension nominale d'une cellule : 2.1V
- Variation de la tension de la cellule entre 1.75V et 2.15V
- Utilisation : Batterie auxiliaire et de démarrage automobile rechargée par un alternateur, Engins de manutention et petits véhicules (poids < 600 kg), stockage de l'énergie produite par intermittence comme l'énergie solaire ou éolienne, ...
- Inconvénients majeurs : cause de dégradation principale est la décharge profonde, oxydation des électrodes si manque d'électrolyte.

1.5.2 Nickel-Cadmium

- Électrodes :

- Cathode (borne +) : hydroxyde de nickel
- Anode (borne -) : hydroxyde de cadmium
- Électrolyte alcalin : hydroxyde de potassium (KOH) : potasse, soude et lithine.
- Tension de base de cellule : 1.2V.
- Variation de la tension de la cellule entre 0.85V et 1.3V.
- Utilisation : premières versions des véhicules électriques, ferroviaires, systèmes de secours avionique, matériel électroportatif, ...
- Inconvénients majeurs : Effet mémoire, Mauvaise tenue dans le temps sans utilisation, Interdiction d'utilisation depuis 2006 pour les applications portatives.

1.5.3 Nickel-Métal-Hydrure

- Électrodes :
 - Cathode (borne +) : hydroxyde de nickel
 - Anode (borne -) : hydrure métallique + hydrogène
- Électrolyte alcalin : hydroxyde de potassium (KOH) : potasse, soude et lithine
- Tension de base de cellule : 1.2V.
- Variation de la tension de cellule entre 0.9V et 1.35V.
- Utilisation : véhicules électriques et hybrides, matériel électroportatif, ...
- Inconvénients majeurs : Effet mémoire, Mauvaise tenue dans le temps sans utilisation.

1.5.4 Lithium

- Accumulateur Lithium-Ion :
 - Cathode (borne +) : Oxyde de Cobalt + Lithium
 - Anode (borne -) : Graphite + Lithium.
 - Électrolyte : sel de Lithium en solution dans un solvant organique.
- Accumulateur Lithium-Phosphate :
 - Cathode (borne +) : Phosphate de fer en général ou Magnésium
 - Anode (borne -) : Carbone.
 - Électrolyte : sel de Lithium en solution dans un solvant organique.
- Accumulateur Lithium-Polymère :

- Cathode (borne +) : Oxyde de manganèse + Lithium
- Anode (borne -) : Graphite + Lithium.
- Électrolyte : Polymère + solvants + antioxydants ...
- Accumulateur Lithium-Métal Polymère :
 - Cathode (borne +) : Oxyde de vanadium, Polymère, Carbone
 - Anode (borne -) : Lithium métal.
 - Électrolyte : Polymère + sels de Lithium.
- Tension de base de la cellule : 3.6V
- Utilisation : équipements portables, petite série de véhicules...
- Avantages majeurs : Aucun effet mémoire, Faible autodécharge, Pas de maintenance, Formes fines et variées (Lithium-Polymère), Faible poids, Plus de cycles de vie.
- Inconvénients majeurs : l'électrolyte liquide présente des dangers si une fuite se produit et que celui-ci entre en contact avec de l'air ou de l'eau avec risque de brûlures ou d'explosions (Lithium-Ion), charge soumise à des règles strictes sous peine de risque d'inflammation (Lithium-Polymère), fonctionnement optimal à température élevée (Lithium-Métal-Polymère).

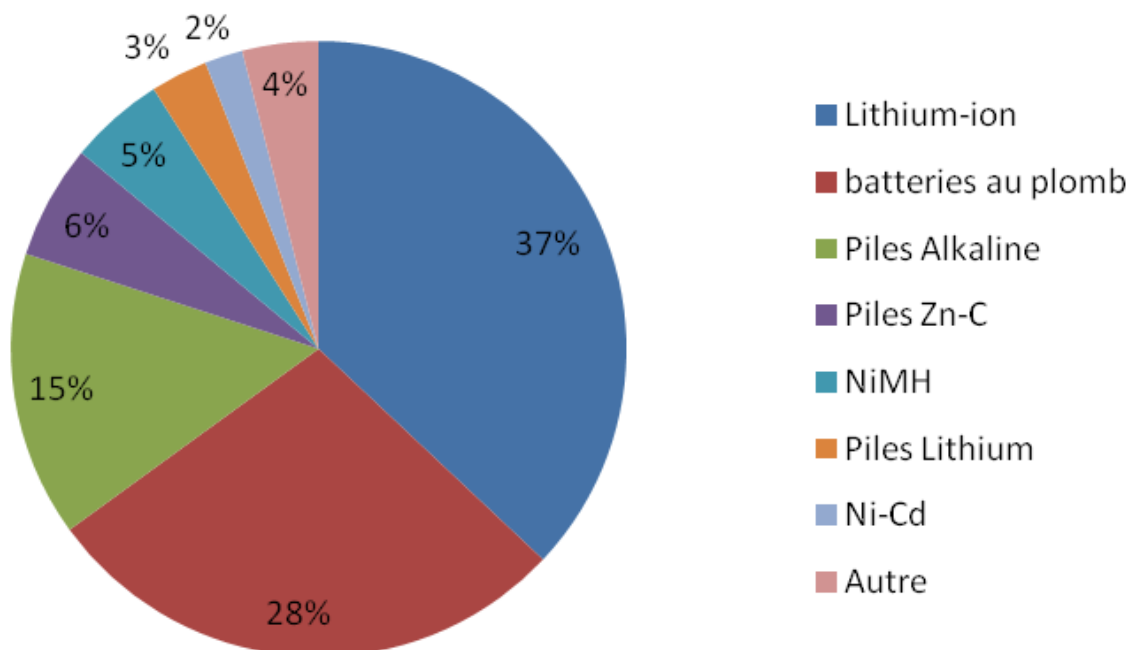


FIGURE 1.12 : Répartition des parts de vente suivant le type d'accumulateur ou de pile dans le monde en 2009 [14].

1.6 GÉNÉRALITÉS SUR LE PIC16F877A

Le PIC16F877A est l'un des microcontrôleurs de la firme Microship qui se présente sous plusieurs formes de boîtier, la plus connue est le DIL de 40 broches (Figure 1.13). La technologie de fabrication est HCMOS FLASH. Ce microcontrôleur peut être cadencé avec une horloge de 20 MHz. [6]

Le microcontrôleur PIC16F877A se trouve sous formes différentes comme le montre la figure suivante :

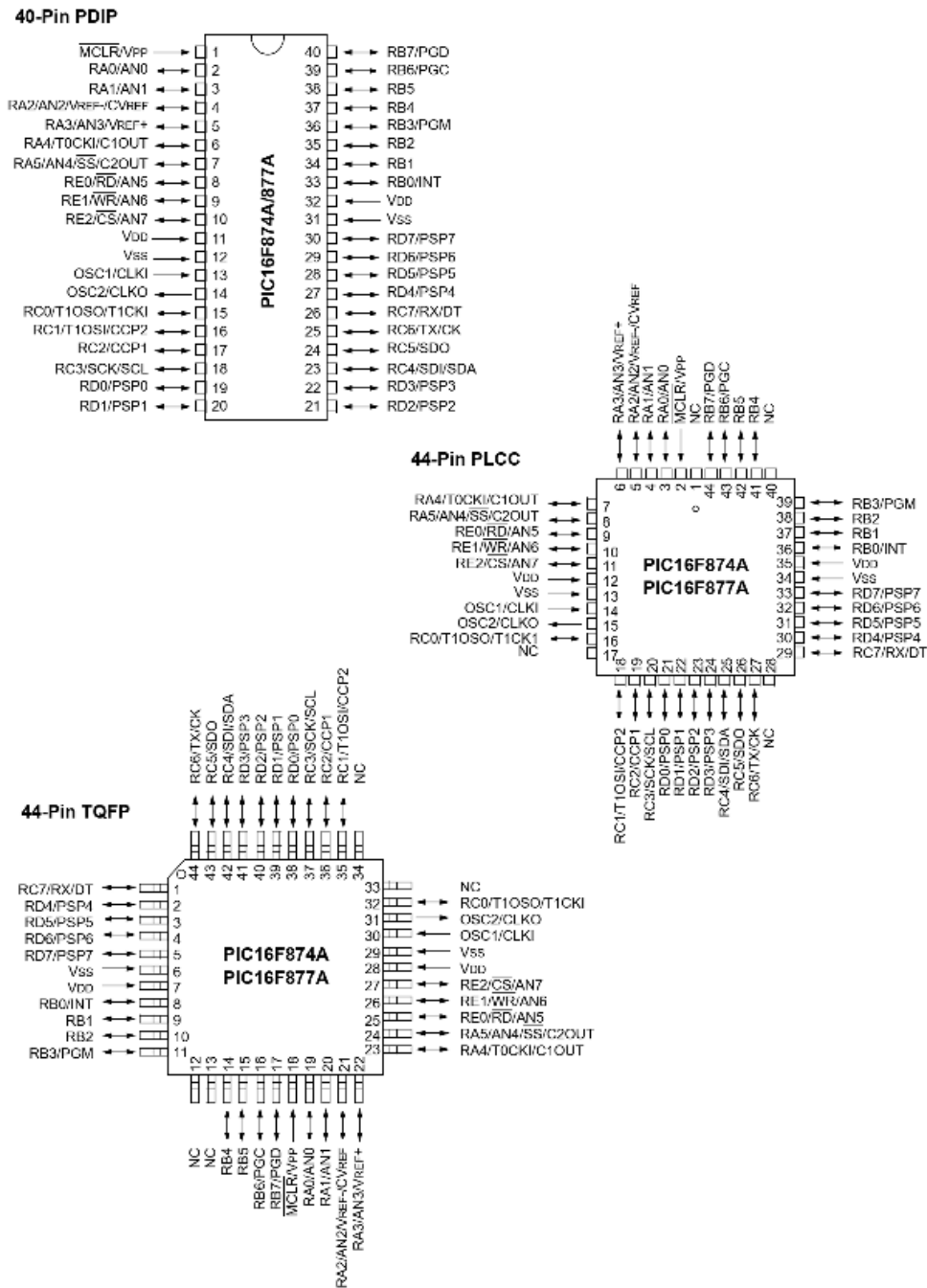


FIGURE 1.13 : Les différents circuits de brochage [6]

Trois familles de PIC existent ; à savoir [6] :

- La famille **Base-Line** avec instructions codées sur 12 bits,
- La famille **Mid-Range** avec instructions codées sur 14 bits,
- La famille **High-End** avec instructions codées sur 16 bits.

Le principe de fonctionnement est donné pas le schéma bloc suivant :

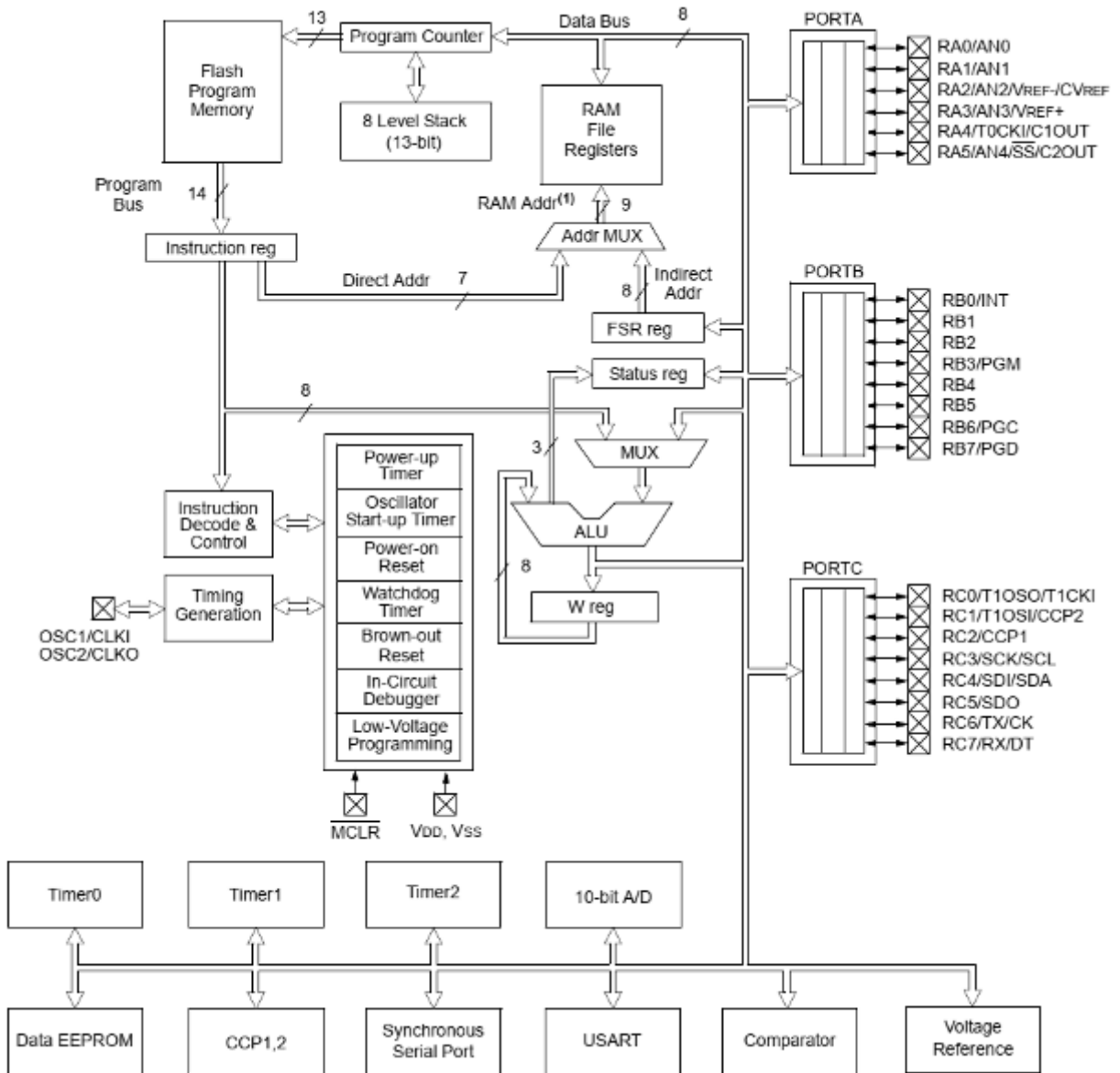


FIGURE 1.14 : Architecture interne d'un microcontrôleur PIC16F877 [6]

Le microcontrôleur PIC16F877A appartient à la famille Mid-Range et ces principales caractéristiques sont :

- Mémoire programme de type **EEPROM** flash de 8 K mots de 14 bits
- Mémoire de données de type **RAM** de 368 octets

- Mémoire de données de type **EEPROM** de 256 octets
- Cinq ports d'entrée / sortie : A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits), D (8 bits), E (3bits)
- Convertisseur Analogique-Numérique avec 8 entrées analogiques multiplexées, dont la résolution est de 8 ou 10 bits
- Port série universel **USART**, fonctionnant en mode asynchrone (**RS-232**) ou mode synchrone
- Port série synchrone **SSP** supportant le mode de communication **I²C**.
- Trois Temporisateurs avec leurs prescale : TMR0, TMR1, TMR2
- Deux circuit Capture, Compare, PWM
- Un chien de garde
- Fonctionnement en mode Sleep pour diminuer la consommation
- Possibilité de programmation en mode **ICSP**
- Tension de fonctionnement +5V.

1.6.1 Le module de conversion analogique numérique (**ADC**) :

Parmi les grandeurs à mesurer, on cherche à acquérir la tension de la batterie. Ce signal analogique doit être numérisé par le module **ADC**.

Le microcontrôleur PIC16F877A possède un convertisseur analogique numérique capable d'échantillonner 8 signaux analogiques avec une résolution de 10 bits ; d'où, le signal numérique résultant peut prendre 1024 valeurs possibles.

Pour acquérir une grandeur, il faut connaître sa plage de variation ; de la valeur minimale à la valeur maximale. Les microcontrôleurs PIC considèrent par défaut que la valeur minimale correspond à leur V_{SS} d'alimentation, tandis que la valeur maximale correspond à la tension positive d'alimentation V_{DD} . Mais il est possible d'utiliser d'autres valeurs [2].

Le module ADC du microcontrôleur PIC16F877A est constitué des 4 registres suivants [6] :

- Premier registre de contrôle (**ADCON0**)
- Second registre de contrôle (**ADCON1**)
- Deux registres pour récupérer le résultat de conversion (**ADRESH & ADRESL**)

La configuration des entrées d'acquisition des signaux se fait avec le registre **ADCON1** avec la manipulation des bits **PCFG3 :PCFG0** selon le tableau suivant :

PCFG3: PCFG0	AN7 ⁽¹⁾ RE2	AN6 ⁽¹⁾ RE1	AN5 ⁽¹⁾ RE0	AN4 RA5	AN3 RA3	AN2 RA2	AN1 RA1	AN0 RA0	VREF+	VREF-	CHAN/ Refs ⁽²⁾
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	RA3	RA2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O

TABLE 1.2 : Configuration des entrées analogiques [6]

La conversion analogique numérique doit passer par des étapes suivantes [2] :

- La configuration du module ADC :
 - Configuration des broches d’entrée et les tensions de référence (ADCON1)
 - Sélection de l’entrée d’acquisition (ADCON0)
 - Sélection de l’horloge de conversion (ADCON0)
 - Activation du module ADC
- Configuration des bits d’interruption si on les a besoin,
- Attente du temps nécessaire pour commencer l’acquisition,
- Début de conversion avec la mise du bit GO/DONE en 1 (ADCON0)
- Attente de la fin de conversion et la récupération du résultat à partir des registre (ADRESH-ADRESL)

1.6.2 Les temporisateurs du PIC16F877A

Le microcontrôleur PIC16F877 comporte trois timers (0, 1 et 2). Chacun d’eux peut générer une interruption. Ils peuvent aussi être associés à d’autres modules fonctionnels

comme les compteurs ou **PWM**, qui permettent de réaliser la capture de donnée en entrée, la comparaison de donnée en sortie et la modulation de largeur d’impulsion [2].

Le **Timer0** est le plus simple des trois, il est capable de générer une interruption qui se produit lorsqu’il déborde de FFh à 00h.

Le **Timer1** est constitué essentiellement d’un registre de 16 bits divisé en deux registres de 8 bits : **TMR1L** pour les bits de poids faible et **TMR1H** pour les bits de poids fort. Ils peuvent être tous deux lus et écrits à leur adresse.

Le TMR1 fonctionne au moyen du registre **T1CON**. Il peut utiliser trois sources d’horloges différentes en **mode temporisation**. Comme, il utilise l’horloge d’instruction en **mode compteur**. Il peut utiliser aussi un signal externe appliqué à la broche **T1OSO**, ou bien le signal d’un oscillateur relié entre les broches **T1OSO** et **T1OSOI**.

Le **Timer2** se compose d’un registre de 8 bits appelé **TMR2** associé à un prédiviseur et un post-diviseur ; ainsi qu’à un registre de période **PR2**, dont le contenu augmente à partir de 00 au rythme de l’horloge du PIC divisé par quatre.

Le **Timer chien de garde** ou **Watch dog timer** est une fonction utilisée pour se prémunir des erreurs de certains logiciels ou de blocages qui peuvent se produire dans certaines situations. Il est généralement constitué d’un compteur incrémenté au rythme d’un horloge, qui active le reset du microcontrôleur lors de son débordement.

1.7 CAPTEUR DE TEMPÉRATURE LM35

On veut mesurer la température de la batterie durant sa charge et sa décharge. À cet effet, on va utiliser le capteur de température LM35 ; un composant qui permet de mesurer la température au alentour. Il est très précis, peu coûteux, très simple d’utilisation et extrêmement fiable.

Le capteur LM35 se trouve dans un boîtier de type TO-220 avec trois broches comme le montre la figure suivante :

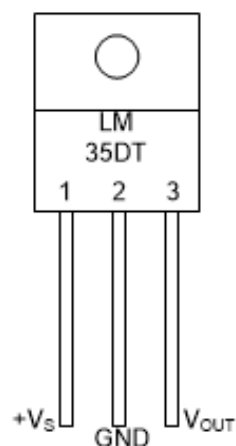


FIGURE 1.15 : Brochage du capteur de température LM35

La température mesurée par le capteur est proportionnelle à la tension sur la sortie analogique du capteur. Pour diminuer l'écart entre la température réelle et la température mesurée, notamment aux extrêmes (vers -55°C et vers 150°C), il est conseillé de prendre la moyenne entre plusieurs mesures réalisées successivement [5].

1.8 LE CIRCUIT MAX232 [7]

Les cartes électroniques à base de microcontrôleur fonctionnent très souvent avec des niveaux TTL ; 0V pour le niveau logique 0 et +5V pour le niveau logique 1. Brancher donc directement une ligne RS-232 sur un microcontrôleur n'aurait donc aucun sens et pourrait aussi endommager le système en imposant une différence de tension de l'ordre de +25V.

Pour rendre compatible une ligne RS-232 avec une carte de ce type, il existe un composant très simple d'utilisation que nous allons utiliser : le MAX232. En regardant son schéma interne (Figure 1.16), nous constatons directement qu'il est premièrement doté d'un convertisseur de tension. Avec les condensateurs C1 et C3, il génère une tension de +10V à partir de la tension +5V (montage doubleur de tension). En plus, il génère une tension de -10V à partir de la tension +10V en utilisant les condensateurs C2 et C4 (montage inverseur de tension).

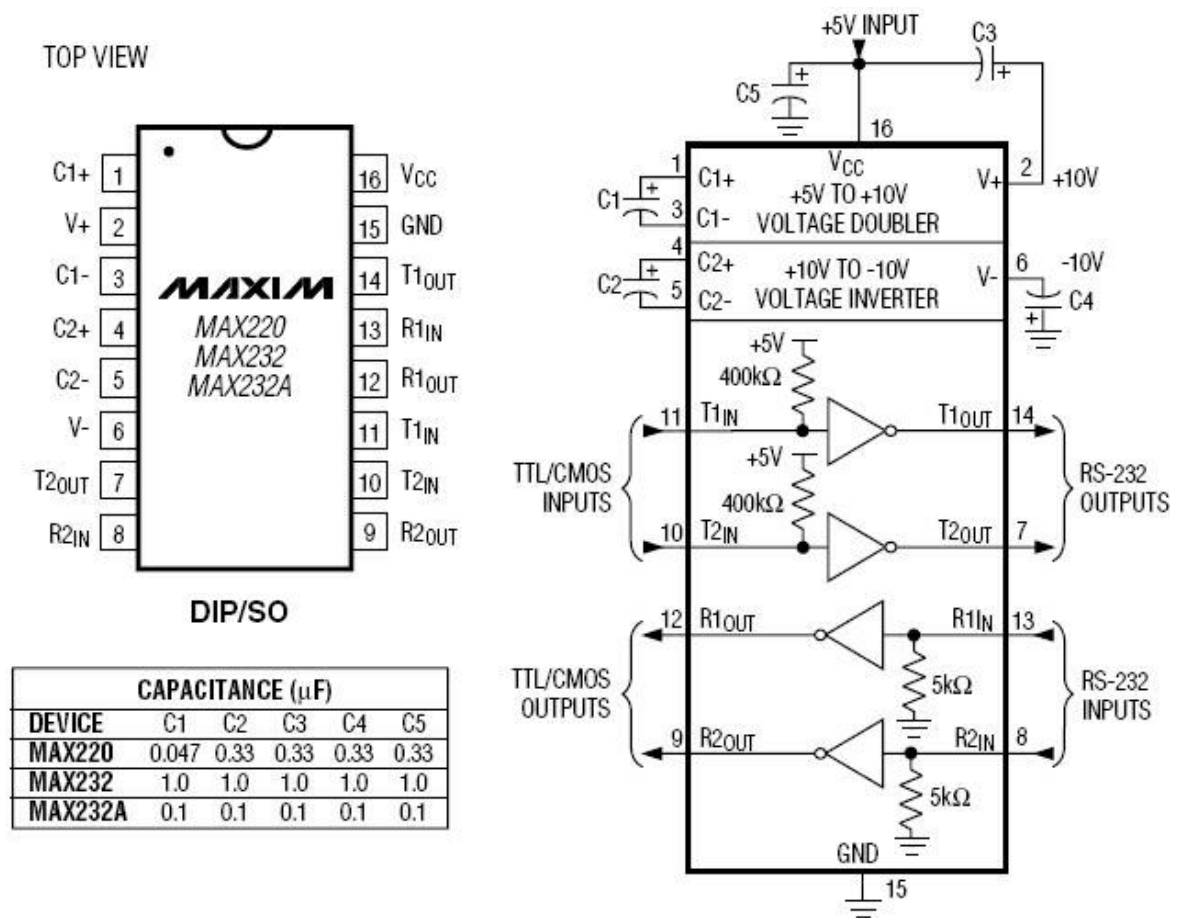


FIGURE 1.16 : Le composant MAX232

La connexion avec le port série se fait via les broches 2 (Rx : réception) et 3 (Tx : émission). Les broches 1, 4 et 6 du port série sont reliées ensemble. Tandis que la broche 5 est avec la masse du circuit. Les broches 7, 8 et 9 ne sont pas nécessaires dans notre cas.

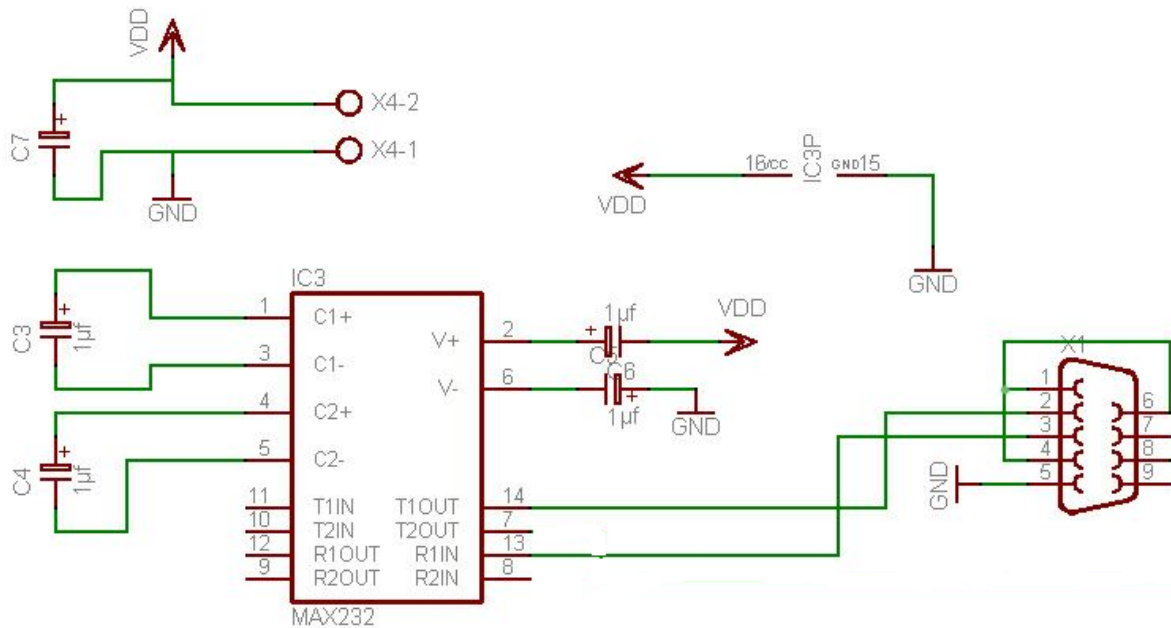


FIGURE 1.17 : Circuit de brochage du composant MAX232

1.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur le stockage d'énergie ; spécialement sous la forme électrochimique. Passant par l'historique, nous avons présenté différentes technologies de conceptions des batteries. Par la suite, nous allons s'intéresser plus à la batterie acide-au-plomb. Son contrôle va être réaliser à la base du microcontrôleur PIC16F877A. Nous avons illustré les principales fonctionnalités nécessaires dans le présent travail.

CHAPITRE 2

La batterie acide-au-plomb

LA BATTERIE ACIDE-AU-PLOMB

Aujourd'hui, il n'existe pas seulement le type de batteries acide-au-plomb, mais différentes technologies pour mieux répondre aux spécificités des différentes applications. Au fil des années, la batterie acide-au-plomb s'est nettement améliorée et spécialisée, et continuera de l'être. C'est pour cette raison qu'on a consacré ce chapitre à l'étude de ce type de batteries.

2.1 DIFFÉRENTS TECHNOLOGIES DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB [8]

On peut faire une classification des technologies des accumulateurs acide-au-plomb en fonction de l'électrolyte utilisé, du type de plaques et leur alliages, et du type de séparateur, conformément à l'organigramme de la [Figure 2.1](#).

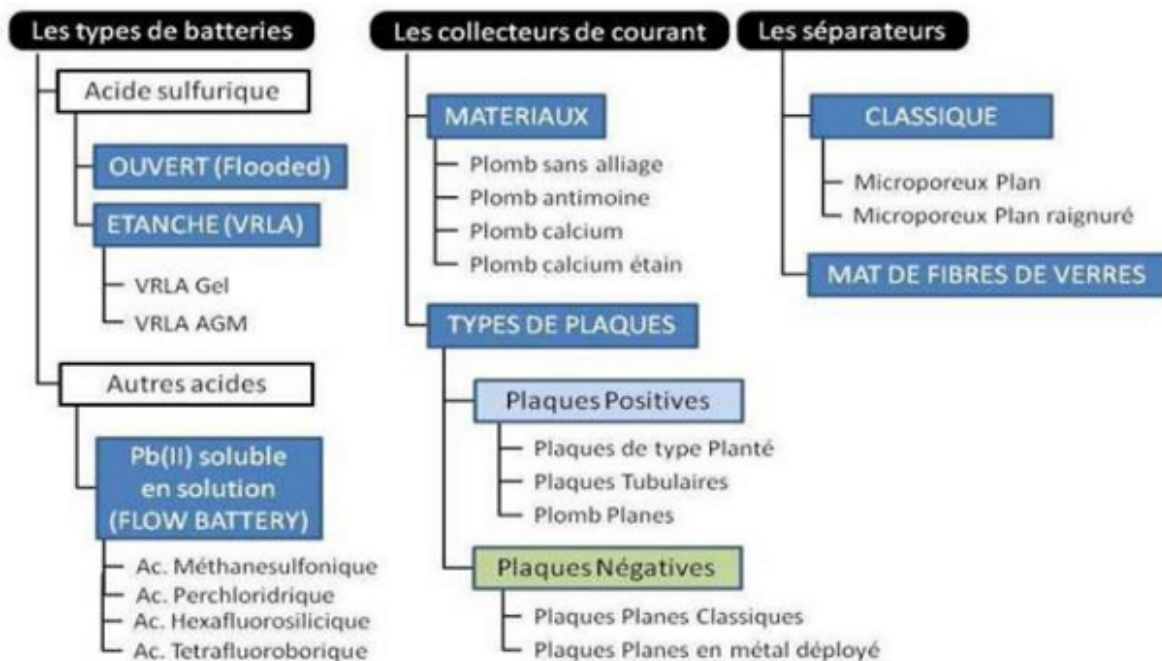


FIGURE 2.1 : Classification des différentes technologies des accumulateurs acide-au-plomb.

D'après l'organigramme précédent, les accumulateurs acide-au-plomb peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de l'électrolyte utilisé :

2.1.1 L'accumulateur ouvert :

Au cours du fonctionnement de ce type d'accumulateur, il peut y avoir un dégagement d'oxygène et d'hydrogène, ce qui provoque une perte d'eau dans l'électrolyte; ceci qui doit être compensée périodiquement. Ce type de batteries offre de nombreuses possibilités d'applications en raison de la flexibilité de sa taille et de ses options de conception.

Les accumulateurs ouverts (Figure 2.2) avec les plaques planes sont utilisés dans les applications de démarrage automobile. Leurs avantages sont la disponibilité des matériaux et leur faible prix. Ils sont aussi utilisés pour les applications stationnaires et de traction. Dans ces deux derniers cas, ces types de batteries sont limités en durée de vie et sont le siège de phénomènes de corrosion.

La technologie plaque tubulaire offre une bonne durée de vie en maintien de charge et permet d'accéder à une décharge profonde. Elle est donc utilisée pour les applications stationnaires, notamment pour le stockage de l'énergie solaire. Son principal inconvénient est les phénomènes d'autodécharge et de stratification.

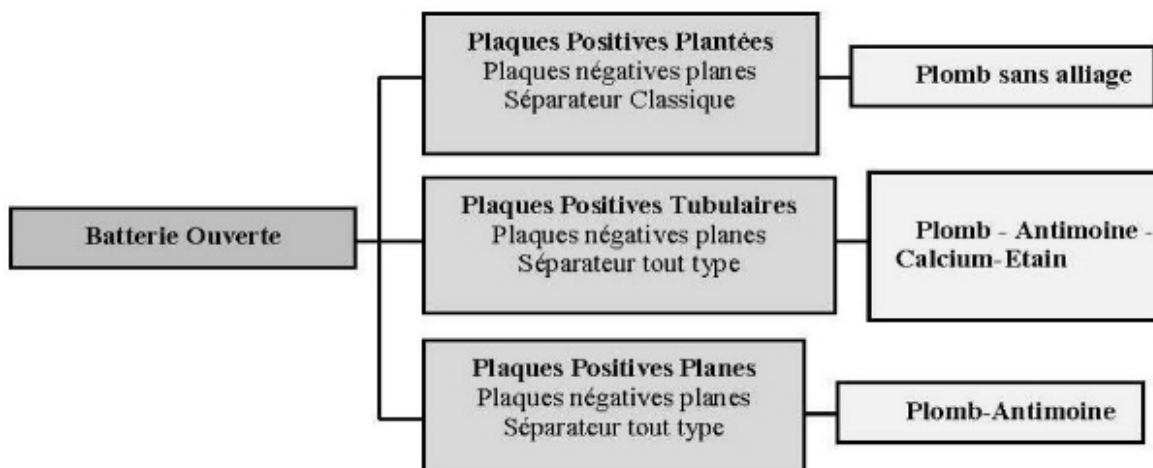


FIGURE 2.2 : Différentes technologies de l'accumulateur ouvert

2.1.2 L'accumulateur à électrolyte immobilisé :

Dans ce type d'accumulateur **VRLA (Valve Regulated Lead Acid)**, on utilise généralement conjointement une structure étanche avec soupape de sécurité. Les accumulateurs étanches sont pressurisés et sont équipés d'une valve permettant au gaz de s'échapper si la pression interne devient trop importante Figure 2.3. L'électrolyte peut être soit figé par addition de gel de silice, soit il est absorbé dans des fibres de verre placées entre les électrodes, on parle alors de batterie **AGM (Absorbed Glass Mat)**. Dans les deux cas, si le support de l'électrolyte est partiellement asséché, il y'a création d'une phase gazeuse permettant un processus accéléré de diffusion et de recombinaison du gaz. Les molécules d'oxygène libérées à l'électrode positive migrent à travers les tissus séparateurs (batterie **AGM**) ou les fissures créées dans l'électrolyte gélifié (batterie gélifiée) vers l'électrode négative pour y former de l'eau. Les accumulateurs **VRLA - AGM** ont l'avantage de résister au froid et nécessitent peu d'entretien, mais offrent surtout une énergie volumique élevée en décharge rapide, ce

qui permet de diminuer la taille de la batterie. Leurs principaux inconvénients restent leur prix élevé. En ce qui concerne la technologie **VRLA - GEL** du type plaque plane, ce type de batterie est généralement utilisé dans les équipements portatifs avec peu d'entretien car elle a une faible capacité. La technologie à plaque tubulaire qui présente une bonne durée de vie est très utilisée pour les applications de transport. On les retrouve notamment dans les véhicules hybrides, mais leur coût reste aussi élevé.

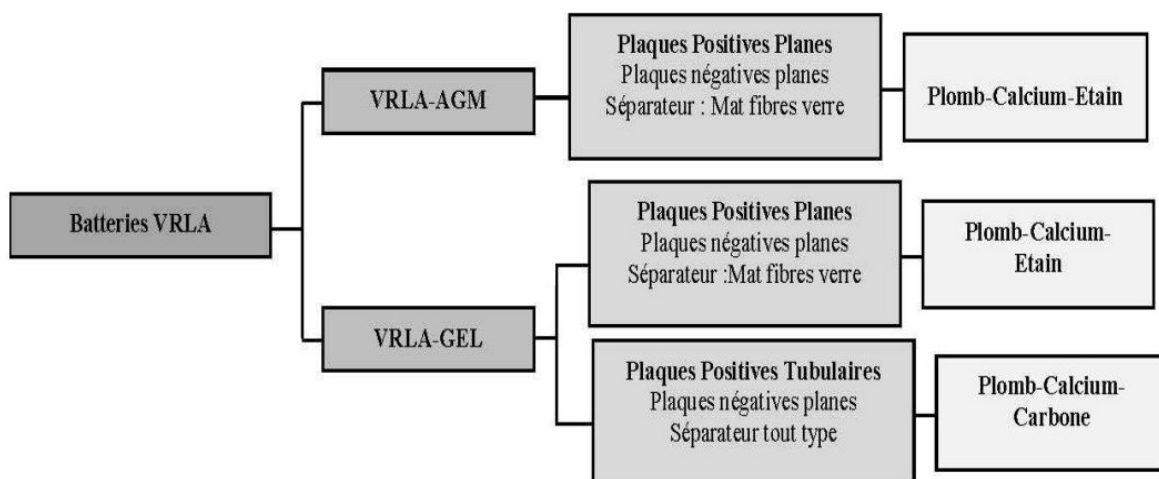


FIGURE 2.3 : Différentes technologies des accumulateurs étanches (**VRLA**).

2.2 DOMAINE D'APPLICATION DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB [3]

Il existe aujourd'hui trois grandes domaines d'application des batteries acide-au-plomb :

- Batteries de **démarrage** ou **SLI** (Starting, Lighting, Ignition),
- Batteries industrielles **stationnaires**,
- Batteries industrielles de **traction**.

2.2.1 Les batteries de démarrage ou **SLI** :

C'est l'application la plus répandue car elle est directement en rapport avec les consommateurs. Ces batteries servent aux démarrages des machines à combustion interne (ex : moteurs de voitures thermiques) et à l'alimentation des systèmes électriques entourant ces machines.

Le besoin en forte puissance et faible énergie favorise la technologie plaque plane pour cette application. Leur utilisation standard consiste à :

- Être en stockage en circuit ouvert pour la majeure partie du temps,
- Être maintenue en pleine charge par un alternateur relié au moteur à combustion,
- Répondre à des appels de forte puissance pendant des temps brefs.

2.2.2 Les batteries industrielles stationnaires :

Elles sont utilisées comme batteries tampons pour assurer la continuité de l'alimentation des réseaux électriques, de communication, informatiques, ou des éclairages d'urgence lors des coupures d'électricité.

Le besoin d'importantes énergies pour des puissances plutôt faibles autorise les trois technologies de plaque. En cours d'utilisation normale, les batteries stationnaires :

- Sont maintenues, la majeure partie du temps, en pleine charge par application, par la source de puissance primaire d'une tension dite de "floating" (+2.25 V/élément) destinée à compenser l'autodécharge,
- Compensent les microcoupures "secteur" en fournissant l'énergie au travers de faibles décharges.
- Subissent de temps à autre une décharge complète à faible courant lors des coupures prolongées.

2.2.3 Les batteries industrielles de traction :

Elles servent en majeure partie à la propulsion de véhicules électriques (chariots de manutention, petits véhicules de ville, bennes à ordures, tramways ...).

Elles sont également destinées, pour l'avenir, à servir comme tampon d'énergie dans le concept de "load-levelling". Le but est de diminuer les variations quotidiennes, trop brutales et trop importantes, de demande d'énergie au réseau ; les organes de production d'électricité ont parfois de grandes difficultés à répondre rapidement aux besoins. Pour répartir la production sur 24 heures, des batteries installées chez les particuliers leur délivreront le surplus d'énergie pendant la journée et se rechargeront à régime constant pendant la nuit. De plus, le système pourra écrêter les appels de puissance.

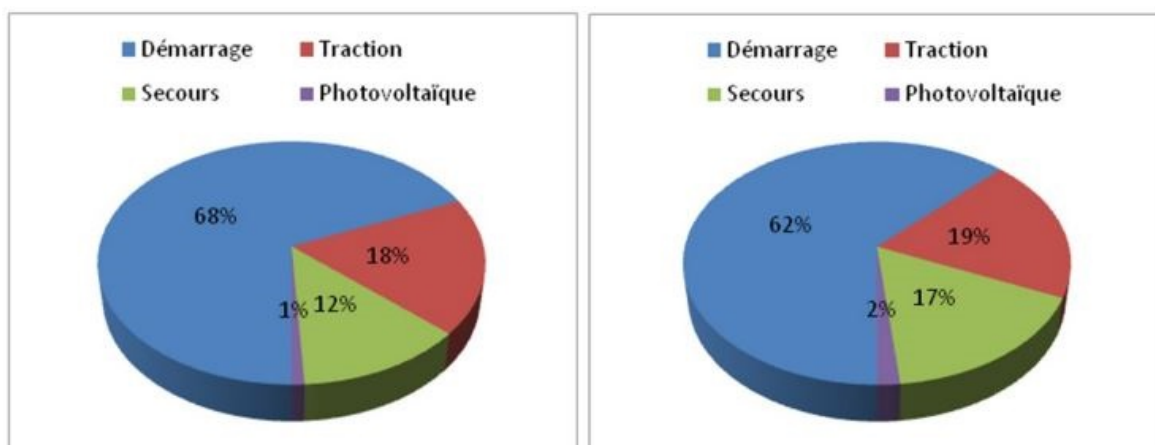


FIGURE 2.4 : Répartition du marché mondial des batteries d'accumulateurs acide-au-plomb. A gauche : en 1992 - 8,5 milliards d'euros, A droite : en 2002 - 12 milliards d'euros[10]

A chacune de ses applications est adaptée une technologie d'accumulateurs acide-au-plomb, qui se distinguent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou immobilisé, des concentrations d'électrolyte différentes, des plaques planes ou tubulaires, etc.

2.3 CONSTITUTION DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB [8]

La Figure 2.5 représente une vue éclatée d'un accumulateur acide-au-plomb. Ce dernier est un dispositif composé d'un ensemble de plaques montées en série, plongées dans une solution concentrée d'acide sulfurique. De tels systèmes sont capables de stocker et de restituer de l'énergie électrique issue des réactions d'oxydo-réduction des matériaux actifs que sont le plomb et le dioxyde de plomb respectivement à l'électrode négative et positive. Les électrodes positives sont reliées entre elles sous forme de fuseaux et constituent la borne positive de l'accumulateur. Il en est de même en ce qui concerne la borne négative. Les électrodes négatives et positives sont disposées les unes en face des autres en alternant la polarité des plaques.

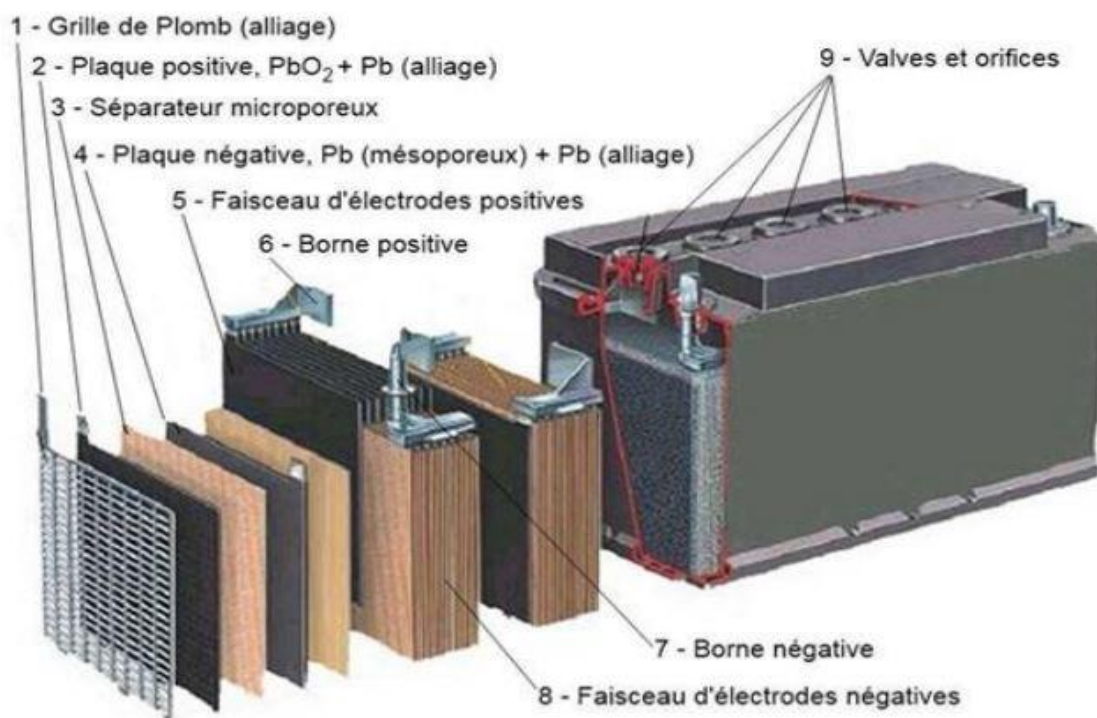


FIGURE 2.5 : Vue éclatée d'un accumulateur acide-au-plomb.

2.3.1 Les grilles :

Maillon fondamental de l'accumulateur, les grilles sont constituées d'alliages de plomb. Elles servent à la fois à la collecte du courant et à la tenue mécanique de la matière active. De nombreuses recherches leur sont consacrées et beaucoup de soins sont apportés à leurs

alliages, car c'est souvent la corrosion des grilles qui limite la durée de vie des batteries au plomb.

Le choix du métal des grilles reste limité. Le plomb est à peu près le seul métal qui, sans constituer un poison pour la batterie, supporte convenablement les conditions corrosives du milieu. Le plomb pur étant trop mou pour être utilisé directement, d'autres métaux (étain, antimoine, calcium, argent...) sont introduits dans la composition des grilles afin d'en améliorer la dureté mais également la résistance à la corrosion.

Que ce soit pour les accumulateurs de démarrage ou les accumulateurs industriels, les alliages traditionnels composés de plomb-antimoine tendent à être délaissés. Aujourd'hui, la plupart des alliages sont à base de plomb-calcium : on en trouve d'innombrables grilles dans l'industrie, dites au plomb-calcium-..., avec différentes teneurs en étain, argent, ... selon les utilisations.

2.3.2 L'électrode positive :

Ils existent deux types de plaques : les plaques planes et les plaques tubulaires. Les plaques planes sont fabriquées selon le procédé Faure. Elles sont constituées d'une grille en alliage de plomb qui assure la tenue mécanique de la plaque et la collecte du courant. Cette grille est couverte d'une pâte préparée à partir d'acide sulfurique et d'une poudre constituée d'un mélange d'oxyde de plomb et de plomb métallique. Lors de la formation de la plaque positive, la matière active est oxydée en dioxyde de plomb de couleur marron foncé. La granulométrie de la poudre est très importante car elle détermine la surface spécifique de la matière active, c'est-à-dire la surface réactionnelle : en moyenne la taille des pores est de l'ordre du micron. Pour les plaques positives, la surface réactionnelle est d'environ $2m^2/g$. La technologie "plaques planes" est la moins chère car elle contient un minimum de matière et son procédé de fabrication est simple. Elle est principalement utilisée dans le domaine des batteries de démarrage.

Les plaques tubulaires sont constituées d'épines en alliage de plomb (collecteur de courant) enfilées dans un tube poreux qui reçoit, dans l'espace libre entre l'épîne et la gaine, la matière active. Ainsi, l'électrode positive est composée d'une rangée de tubes cylindriques qui sont placés verticalement.

La forme cylindrique permet à la matière active de se dilater et de se contracter au cours des cycles charge-décharge, tout en conservant une excellente cohésion et un bon contact électrique avec le conducteur central : la longévité des électrodes s'en trouve améliorée. Cette technologie plus robuste, plus lourde et plus volumineuse sera utilisée dans les applications nécessitant des durées élevées en cyclage et durée de vie : la traction lourde, le stationnaire de secours et le photovoltaïque.

2.3.3 L'électrode négative :

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

d'oxyde de plomb et de plomb métallique. Pour avoir une bonne porosité de la matière active d'autres produits qualifiés d'expanders, lui sont ajoutés en faible quantité. La surface réactionnelle de la matière active négative est de l'ordre de $0.5m^2/g$.

2.3.4 Le séparateur microporeux :

Pour isoler les plaques correctement, le séparateur (non conducteur électronique) doit avoir une résistance mécanique appropriée, pour supporter les contraintes dues aux variations de volume des matières actives pendant les cycles charge-décharge, une résistance chimique suffisante pour sa tenue dans le temps, une structure micro poreuse pour permettre la diffusion des anions et cations de l'électrolyte. Parfois le séparateur peut avoir un rôle plus actif en appliquant une pression mécanique sur les électrodes : de nouveaux séparateurs ont été étudiés, comme l'**AJS** (Acid Jellying Separator) dans les batteries à recombinaison, afin d'augmenter la durée de vie des électrodes en limitant la dégradation des matériaux actifs et la corrosion des grilles positives. Les séparateurs sont généralement réalisés en polymères (de plus en plus en polyéthylène) ou en fibres de verre.

2.3.5 L'électrolyte :

Dans l'accumulateur acide-au-plomb, l'électrolyte joue un double rôle : il assure le transport d'électricité par conduction ionique et participe, en tant que réactif, aux réactions ayant lieu lors de la charge et de la décharge.

Selon le type de batterie, l'électrolyte est peut être soit liquide, ou bien gélifié ou absorbé :

2.3.5.1 *Électrolyte liquide (libre) :*

L'électrolyte est une solution dont le solvant est de l'eau distillée et le soluté est de l'acide sulfurique. La proportion du mélange définit la densité de l'électrolyte. Un électrolyte ayant 33% en masse de H_2SO_4 aura une densité de $1,28g.cm^{-3}$.

À l'état liquide, la molécule d'eau se dissocie en ions H^+ et OH^- . L'ion H^+ n'existe pas seul, il est toujours associé à une molécule H_2O , pour former un ion H_3O^+ . Dans l'eau, les molécules d'acide sulfurique se dissocient majoritairement en ions hydrogène H^+ (qui deviennent H_3O^+) et en ions hydrogénosulfate HSO_4 (anion solvaté, entouré de molécules H_2O). Dans une plus faible proportion, il existe aussi des ions sulfates SO_4^{-2} .

2.3.5.2 *Électrolyte gélifié ou absorbé (immobilisé) :*

L'électrolyte gélifié est produit à partir d'une poudre de silice colloïdale, coagulée par réaction avec l'acide contenu dans l'électrolyte. Le gel ainsi formé permet d'immobiliser l'électrolyte à l'intérieur des bacs. L'électrolyte absorbé est un électrolyte liquide imbibant un séparateur fibreux placé entre les plaques de polarités différentes. Mis à part le fait qu'il soit immobilisé, cet électrolyte reste une solution aqueuse d'acide sulfurique. Le volume

d'électrolyte et sa densité sont définis par les fabricants en fonction du type et de l'usage de la batterie. Il résulte d'un compromis conciliant la capacité désirée, la durée de vie, l'intensité de courant à fournir, la tenue aux basses températures (la température agissant sur la viscosité et donc la conductivité de l'électrolyte). Si l'on considère deux plaques dans une cellule, ce sont les deux surfaces en vis-à-vis et le volume d'électrolyte entre les plaques qui ont un rôle largement prépondérant car les lignes de courant sont les plus courtes et drainent la majeure partie du courant.

2.4 PROCESSUS DE FABRICATION DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB [9]

2.4.1 Atelier fonderie :

Cet atelier est destiné à la fabrication des grilles en fondant le plomb dur (1.7% d'antimoine Sb) dans un creuset, le plomb liquide obtenu est coulé dans des moules ou la grille prend sa forme rigide.

2.4.2 Atelier moulins et empâtement :

Dans cet atelier la grille est combinée avec la pâte préparée selon les étapes suivantes :

- Le plomb fin (99,99% de Pb) est fondu dans un creuset, le plomb liquide est coulé dans des moules en forme de petites pastilles de 2 cm de diamètre et de 30 à 40g. Ces pastilles subissent un frottement dans un tambour tournant (moulin) donnant une poudre ayant 25% de Pb et 75% de PbO. Puis, elle est aspirée à travers des filtres vers des silos de stockage.
- La poudre est mélangée avec des additifs afin d'obtenir la pâte de chaque plaque comme le montre tableau suivant :

Plaque	Plaque positive non formée	Plaque négative non-formée
Additifs	-l'eau distille -acide sulfurique H_2SO_4 d=1.4 -dynel flock (polypropylène coupé sous forme de fibre)	-l'eau distille -acide sulfurique H_2SO_4 d=1.4 -dynel flock -l'huile -mélange noir
Couleur de la plaque	Jaune claire	Vert olive
La pâte	Composition chimique de la pâte (3 PbO, PbSO ₄)	Composition chimique de la pâte (3 PbO, PbSO ₄)

TABLE 2.1 : Composition de la pâte.

2.4.3 Curing :

Les plaques non formées sont mises dans un tunnel pour le mûrissage de la pâte, il se fait en deux étapes successives à une température de 70°C :

- **Humidification** : Elle consiste à exposer les plaques pré-séchées pendant 24 heures dans une atmosphère riche en vapeur d'eau pour gonfler la pâte par l'insertion des molécules d'eau dans la plaque.
- **Séchage** : Cette opération sert à extraire les molécules d'eau en augmentant ainsi la surface de contact acide – grains d'oxyde.

Cette opération, qui peut durer quelques jours, a plusieurs buts :

- Assurer la cohésion de la pâte, en favorisant le développement de la cristallisation du sulfate de plomb.
- Assurer l'accrochage de la pâte sur la grille support (réaction grille-pâte).
- Faire passer le maximum de plomb métal résiduel à l'état oxyde.

2.4.4 Atelier Formation :

A ce stade, les plaques négatives et positives non formées sont déposées dans des bacs qui contiennent l'acide sulfurique de densité 1,05. Sous l'action d'un courant électrique continu pendant 20 h, les plaques se forment donnant PbO_2 à la positive et Pb à la négative.

Après formation, les plaques sont introduites dans des bassins remplis d'eau déminéralisée afin d'éliminer l'acide en excès.

2.4.5 Atelier Séchage :

Les plaques négatives et positives formées sont séchées différemment comme suit :

- Les plaques positives sont séchées dans un four de séchage à une température de 80°C.
- Les plaques négatives sont séchées dans des fours sous vide ou sous un gaz inerte pour ne pas s'oxyder.

2.4.6 Atelier Ebarbage :

Les plaques formées sont brossées au niveau des drapeaux et coupées en deux. Le but du brossage est de débarrasser les plaques des poussières afin de faciliter leur montage.

2.4.7 Atelier Enveloppement :

Les plaques positives sont enveloppées dans un séparateur et disposées en alternance avec les plaques négatives de telle façon que les drapeaux des plaques positives soient dans un coté et les drapeaux des plaques négatives au côté opposé.

2.4.8 Atelier COS (Casting On the Strap) :

Les plaques sont soudées au niveau des drapeaux pour les assembler entre elles, l'ensemble ainsi formé s'appelle « élément ». Ce dernier sera mis dans les bacs.

2.4.9 Chaîne de production :

Les batteries non finies sortant de l'atelier COS passent dans la chaîne de production où le couvercle est soudé à chaud au bac. Par la suite, les batteries subissent les tests de court-circuit et l'étanchéité. A la fin, elles seront étiquetées et emballées avant d'être stockées.

2.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB :

Considérons un élément de technologie "plomb ouvert". À ses bornes, apparaît une **f.e.m** d'environ 2.1V : l'électrode en dioxyde de plomb (PbO_2) correspond au pôle positif et celle en plomb (Pb) au pôle négatif.

2.5.1 Principales réactions en charge/décharge :

Système électrochimique réversible transformant l'énergie chimique en énergie électrique, l'accumulateur est le siège de réactions d'oxydoréduction (transferts d'électrons) qui se produisent à l'interface des électrodes avec l'électrolyte. Le fonctionnement en décharge du générateur électrochimique $PbO_2/H_2SO_4/Pb$ peut se schématiser de la façon simplifiée dans la **Figure 2.6**.

Bien que les phénomènes électrochimiques mis en jeu pendant la charge et la décharge soient complexes et imparfaitement connus, certaines réactions prédominent et peuvent être décrites. En plus de l'évolution des matériaux actifs, une autre réaction (dite secondaire) se produit en permanence au sein de l'accumulateur : l'électrolyse de l'eau.

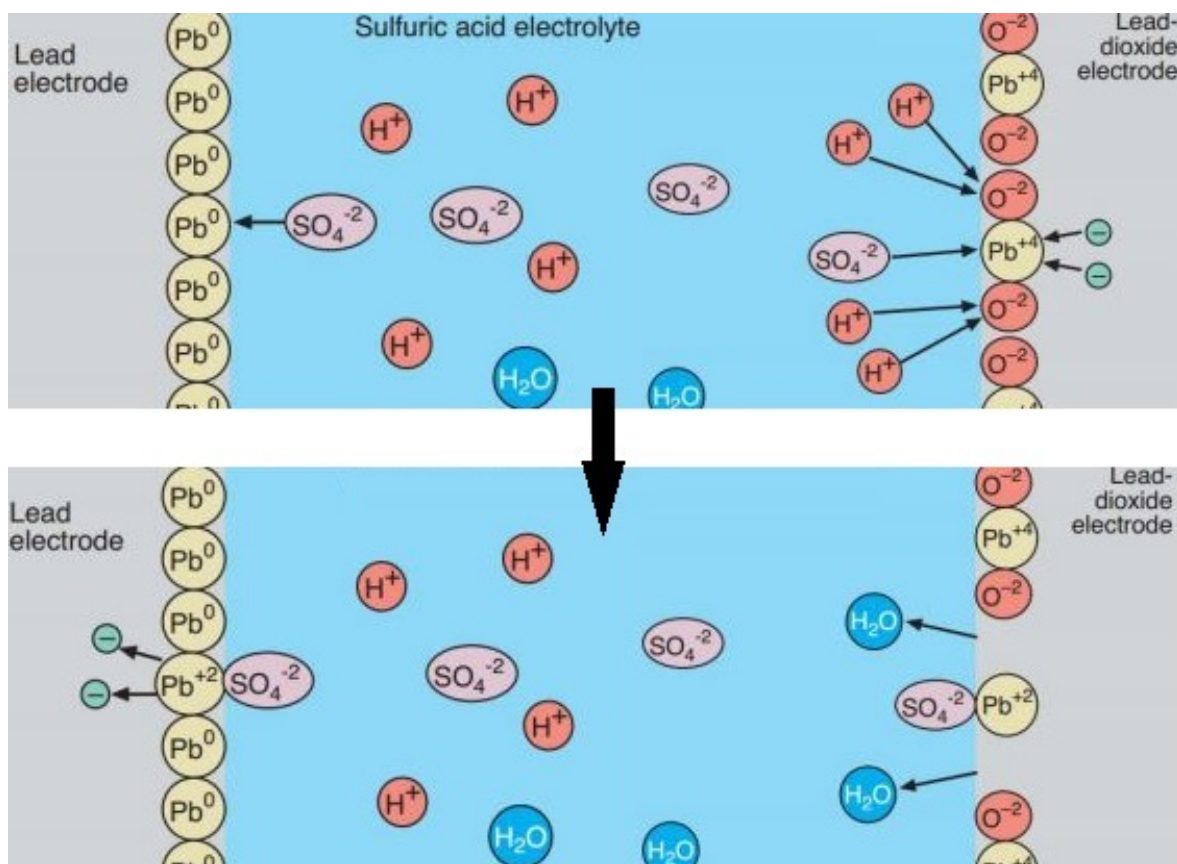
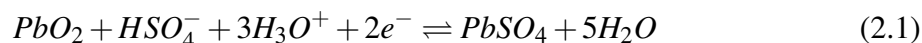


FIGURE 2.6 : Les réactions chimiques à la décharge

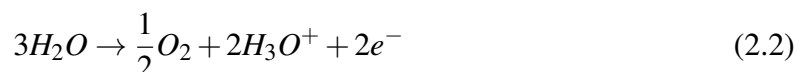
En décharge, les matériaux actifs positif et négatif produisent, respectivement par réduction et par oxydation, des ions Pb^{2+} (Figure 2.6) qui, en se combinant avec des ions sulfate contenus dans l'électrolyte, se fixent en cristaux sulfate de plomb. Cette transformation du dioxyde de plomb et du plomb spongieux porte le nom de "double sulfatation". L'électrode où a lieu l'oxydation est appelée anode et celle où a lieu la réduction, la cathode.

Les principaux phénomènes en charge et en décharge aux deux électrodes sont donc :

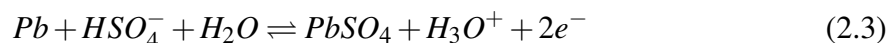
L'**électrode positive** a un comportement de cathode en décharge car le PbO_2 est réduit en $PbSO_4$, et devient anode en charge puisque le $PbSO_4$ s'oxyde en PbO_2 (Figure 2.7).



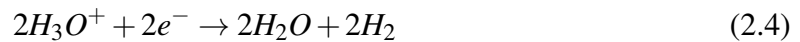
Production permanente de dioxygène (gaz) :



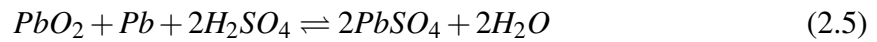
L'**électrode négative** est anode en décharge (oxydation du Pb en $PbSO_4$) et cathode en charge (Figure 2.7).



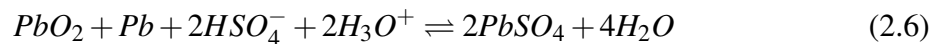
Production permanente de dihydrogène (gaz) :



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



Double sulfatation qui s'écrit aussi, de façon plus rigoureuse :



2.5.2 Degrés d'oxydation :

Pour mieux aborder les phénomènes, il est utile de souligner les degrés d'oxydation par lesquels passe le plomb lors de charges et décharges. Dans la (Figure 2.7), les flèches indiquent le sens (oxydation ou réduction) des changements d'état du plomb, en décharge. En charge, seules les flèches en trait plein existent, et sont inversées.

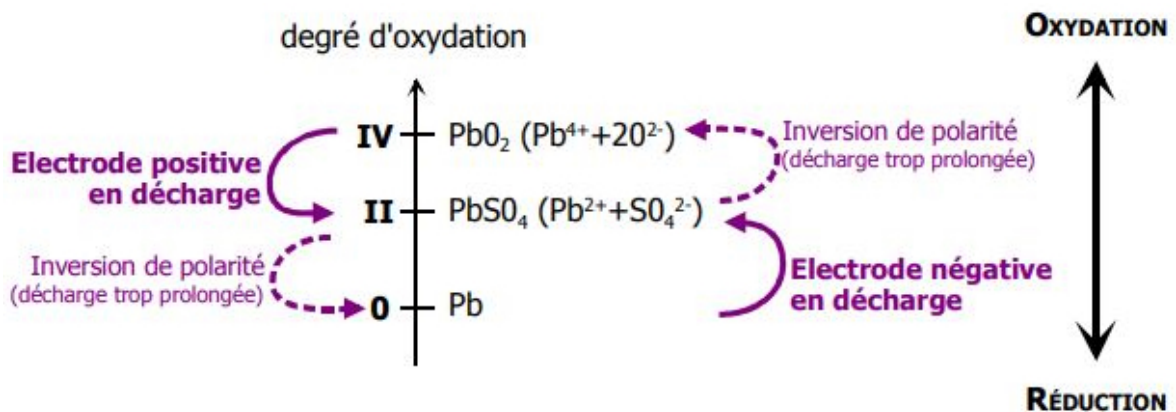


FIGURE 2.7 : Degrés d'oxydation du plomb.

Cette représentation illustre les 3 états chimiquement stables du plomb, susceptibles d'exister dans le système électrochimique $PbO_2/H_2SO_4/Pb$: le plomb métallique spongieux (nombre d'oxydation 0 : Pb^0), le sulfate de plomb (PbII : plomb à l'état Pb^{+2}) et le dioxyde de plomb (PbIV : Pb^{+4}).

On peut retrouver qu'en décharge, le plomb de l'électrode négative s'oxyde (à l'état Pb^{+2}) en sulfate de plomb et que le dioxyde de plomb se réduit en sulfate de plomb à l'électrode positive. Si la décharge est trop prolongée (au-delà de la capacité maximale de l'électrode), le matériau actif accessible a disparu et les cristaux de sulfate de plomb deviennent seuls disponibles. À leur tour, ils vont s'oxyder en dioxyde de plomb (électrode négative) et/ou se réduire en plomb (électrode positive) : c'est le phénomène d'inversion de polarité.

2.5.3 Description qualitative des réactions en charge et décharge

En charge : Pendant la charge, le phénomène prépondérant pour l'élément est la reconstitution d'acide sulfurique au sein des électrodes. La concentration d'acide croît rapidement à proximité de l'interface réactionnelle. Ce phénomène est amplifié, côté positif, par une consommation d'eau. Il en résulte un engorgement du matériau actif en une solution d'acide très concentrée, plus visqueuse et plus dense que l'électrolyte situé entre les électrodes. Cet acide concentré suinte des électrodes et glisse le long de leurs parois vers le fond du bac. Les densités de l'électrolyte devenu hétérogène sont d'environ $1,15 \text{ g.cm}^{-3}$ pour l'électrolyte situé entre les électrodes et de $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$ pour celui suintant des électrodes.

Après une décharge relativement profonde, une importante quantité d'acide sera reconstituée. Vers 90% de recharge, l'électrolyte est "stratifié", c'est-à-dire que la partie basse des éléments contient de l'électrolyte concentré et la partie haute de l'électrolyte dilué. Arrêter la charge à ce stade aurait des conséquences désastreuses, à savoir un fonctionnement hétérogène des électrodes, menant à une fatigue rapide de leur partie inférieure.

À mesure que l'état de charge de la batterie augmente, la réaction de recharge des matériaux actifs devient plus difficile (cristaux de sulfate plus rares, donc moins accessibles) et c'est la réaction secondaire d'électrolyse de l'eau qui se substitue progressivement à la réaction de charge proprement dite. La phase de fin de charge est alors qualifiée de surcharge, signifiant que l'essentiel du courant fourni à la batterie ne contribue qu'à la réaction d'électrolyse de l'eau. Cette phase est généralement prolongée pendant un temps suffisant pour assurer les deux fonctions suivantes :

- Le complément de charge proprement dite ; en effet, même si l'électrolyse de l'eau est majoritaire, il apparaît que les quelques pour cent de charge récupérés pendant cette surcharge sont nécessaires pour maintenir les performances de la batterie au cours des cycles charge/décharge.
- L'homogénéisation de l'électrolyte ; la réaction d'électrolyse de l'eau produit du dégagement gazeux d'oxygène et d'hydrogène qui provoque, en remontant à la surface, une convection forcée qui brasse l'électrolyte.

En décharge : Pendant la décharge, les ions sulfate actifs sont ceux situés à proximité de l'interface réactionnelle et donc contenus dans le volume poreux de l'électrode. Ces ions sulfate se lient aux ions Pb^{+2} , produits par la réaction de décharge, pour former du sulfate de plomb insoluble qui cristallise dans les pores.

Tout au long de la décharge, les conditions de la réaction se dégradent sous l'effet combiné des processus suivants :

- La cristallisation du sulfate de plomb consomme des ions sulfate, faisant chuter la concentration de ce réactif dans le volume poreux des électrodes.
- La cristallisation du sulfate de plomb consomme des ions sulfate, faisant chuter la concentration de ce réactif dans le volume poreux des électrodes.
- Le sulfate formé occupant un volume sensiblement plus grand que le matériau initial consommé, le volume poreux occupé par l'électrolyte tend à se restreindre, chassant ainsi l'électrolyte actif du sein des électrodes.

Face à ces trois processus qui se conjuguent pour dégrader les conditions de la décharge, un processus tente de rétablir la situation, ou plus exactement d'atténuer la dégradation : il s'agit de la diffusion, vers l'intérieur des électrodes, des ions sulfate contenus dans l'électrolyte entourant ces électrodes. Cette diffusion est lente, et plusieurs heures sont nécessaires pour en obtenir une efficacité maximum.

2.6 LES CARACTÉRISTIQUES DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB :

Tension ou **f.e.m** (Force Electromotrice) en Volts (V) :

Fixée par le potentiel d'oxydoréduction du couple électrochimique utilisé (exemple : acide-au-plomb), elle est de quelque volts pour une cellule. En pratique, comme des tensions plus élevées sont nécessaires (12V, 24V, 250V, 500V, ...), il est nécessaire de mettre en série un certain nombre de cellules.

On distingue trois tensions :

- **Tension nominale** : tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge.
- **Tension à vide** : tension mesurée aux bornes d'une batterie non connectée à une charge.
- **Tension en charge** : tension mesurée aux bornes d'une batterie connectée à sa charge (Récepteur, servos, déchargeur, résistance, ...); c'est-à-dire délivrant un courant.

L'intensité maximale de démarrage (**CCA**) :

CCA en anglais signifie Cold Cranks Amps. Il s'agit de l'intensité maximale extractible d'une batterie sur une courte période en situation de démarrage de moteur par exemple.

Capacité C (Unité : Ah ou mAh) :

Capacité énergétique d'une batterie à délivrer un certain courant pendant un certain temps ; des ampères fois des heures : Ah.

La vitesse de décharge :

Elle s'exprime en C10, C20 ou C100, elle indique la capacité d'une batterie en fonction de sa vitesse de décharge. Exemples :

- C100 = 104 Ah : signifie que la batterie peut fournir un courant de 1.04 A pendant 100h (104/100).
- C20 = 90 Ah : signifie que la batterie peut fournir un courant de 4.5 A pendant 20h (90/20).

L'impédance interne en Ohms (Ω) :

Elle est assimilée à une résistance pure et limite le courant de décharge en transformant en pertes joules une partie de l'énergie restituée.

Energie massique ou densité énergétique D (Unité : Wh/kg) :

C'est le rapport entre la capacité d'une batterie à délivrer une certaine puissance pendant un certain temps et son poids.

Les valeurs de vie de la batterie :

- **State Of Charge - SOC** : C'est la charge réelle de la batterie, totale, y compris le potentiel inactif (environ 20%) sous le seuil duquel la batterie est morte.
- **State Of Health - SOH** : C'est la capacité de charge totale de la batterie, prenant en compte l'usure des alliages des plaques, résistance interne ...
- **State Of Function - SOF** : Synthèse des deux précédentes valeurs. C'est l'énergie utilisable disponible dans la batterie en fonction de son altération (SOH) et de l'énergie totale de charge (SOC). C'est cette valeur qui définit si la batterie est apte à démarrer le moteur dans un système « Stop & Start », grâce à l'analyse du BMS (Batterie Management System).

Nombre de cycles :

Une batterie ne peut supporter qu'un nombre limité de cycle charge-décharge. On doit choisir notre batterie de façon à ce que cette valeur soit cohérente avec la projet. S'il s'agit d'un système de secours utilisé exceptionnellement un nombre de cycle réduit n'est pas gênant. S'il s'agit d'un système solaire rechargé chaque jour et déchargé chaque nuit, il nous faudra le plus grand nombre de cycles possible. Ce nombre de cycles dépend fortement de la profondeur de décharge :

- 500 cycles à décharges 80%.
- 750 cycles à décharge 50%.
- 1800 cycles à décharge 30%.

Durée de vie :

Indépendamment du nombre de cycles, la durée de vie d'une batterie est limitée par l'oxydation des électrodes et des bornes. Ce phénomène peut être relativement rapide si la batterie est utilisée à une température élevée, dans ce cas il sera inutile de choisir une batterie possédant un très grand nombre de cycle.

Profondeur de décharge :

Il n'est pas possible d'utiliser toute l'énergie stockée dans une batterie sans l'endommager gravement. Une batterie complètement vide a une espérance de vie très limitée. La profondeur maximale de décharge est le pourcentage maximal de l'énergie de la batterie qu'on va utiliser. En général, il est conseillé de ne pas dépasser une profondeur de 50% (sur une batterie de 100Ah, on ne peut donc utiliser que 50Ah); mais des valeurs plus faibles peuvent être fixées pour obtenir un plus grand nombre de cycles.

Autodécharge :

Une batterie non-utilisée se décharge d'elle-même. Pour une batterie acie-au-plomb, le taux d'autodécharge est en générale limité (de l'ordre de 5% par mois); mais, il peut augmenter rapidement avec la température.

Tenue au froid :

Les batteries à électrolyte liquide supportent mal le froid. Leur capacité baisse rapidement avec la température et si l'électrolyte gèle, elles sont détruites. Si la batterie sera exposée à des températures négative, il le faudra tenir en compte dans les calculs et choisir un point de congélation assez bas pour que la batteries ne gèlent pas.

2.7 LES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE DES ACCUMULATEURS ACIDE-AU-PLOMB [3] :

Les phénomènes physiques et électrochimiques provoquant le vieillissement des batteries acide-au-plomb sont nombreux et complexes. Ce paragraphe propose un aperçu de ces mécanismes de dégradation irréversible et décrit quelques cas de pertes de capacité réversibles.

2.7.1 Les dégradations catastrophiques :

Elles se traduisent, pour la batterie, par une soudaine impossibilité de se charger ou de délivrer de l'énergie électrique. Les causes de ces phénomènes irréversibles sont multiples :

- Des défauts de conception ou de fabrication peuvent entraîner en cours d'utilisation des courts circuits entre les plaques ou des circuits ouverts par rupture des soudures inter-plaques ou inter-éléments.
- Des chocs externes peuvent parfois provoquer des fissures du bac, des fuites d'électrolyte ou des ruptures de liaisons internes.
- Une mauvaise utilisation (manques de charge, surcharges, décharges profondes, stockages prolongés à l'état déchargé) est souvent à l'origine de pertes de capacité irréversibles, importantes et brutales.

2.7.2 Les dégradations progressives irréversibles :

Elles se caractérisent par des changements des paramètres physiques et chimiques de la batterie à l'échelle microscopique et se traduisent par un déclin graduel irréversible de capacité. Les paramètres de fabrication (composition chimique et structure des plaques, de l'électrolyte et du séparateur) et les conditions d'utilisation (fréquences, courants et profondeurs des décharges, profils des recharges, durées des stockages, quantités de surcharge, conditions de température ou encore état de l'électrolyte) influencent fortement les types de dégradation.

De nombreuses expériences et études microscopiques ont mis en évidence différentes formes de dégradation, les plus fréquentes et les plus limitatives pour la batterie concernent la plaque positive, les dégradations de la plaque négative et du séparateur sont moins influentes et beaucoup mieux contrôlées.

2.7.2.1 La dégradation de la plaque positive :

Plusieurs mécanismes de dégradation semblent affecter les performances de la plaque positive :

Dégradation de la matière active positive :

Les processus physico-chimiques de charge et décharge ayant lieu au sein de la matière active en cyclage ont tendance à modifier sa morphologie en créant et en isolant mécaniquement et électriquement des agglomérats de grains de PbO_2 . On observe, avec le nombre des cycles, un "amollissement" de la pâte et des augmentations importantes des surtensions par pertes de contact électrique dans la matière active.

Ce phénomène est en partie limité dans le cas des batteries étanches par la compression du séparateur sur les plaques qui maintient mécaniquement la matière active.

D'autres études avancent que la perte de capacité de la plaque positive est également due à une perte d'activité électrochimique des grains de PbO_2 encore appelée amorphisation ... Cette hypothèse est toutefois contestée.

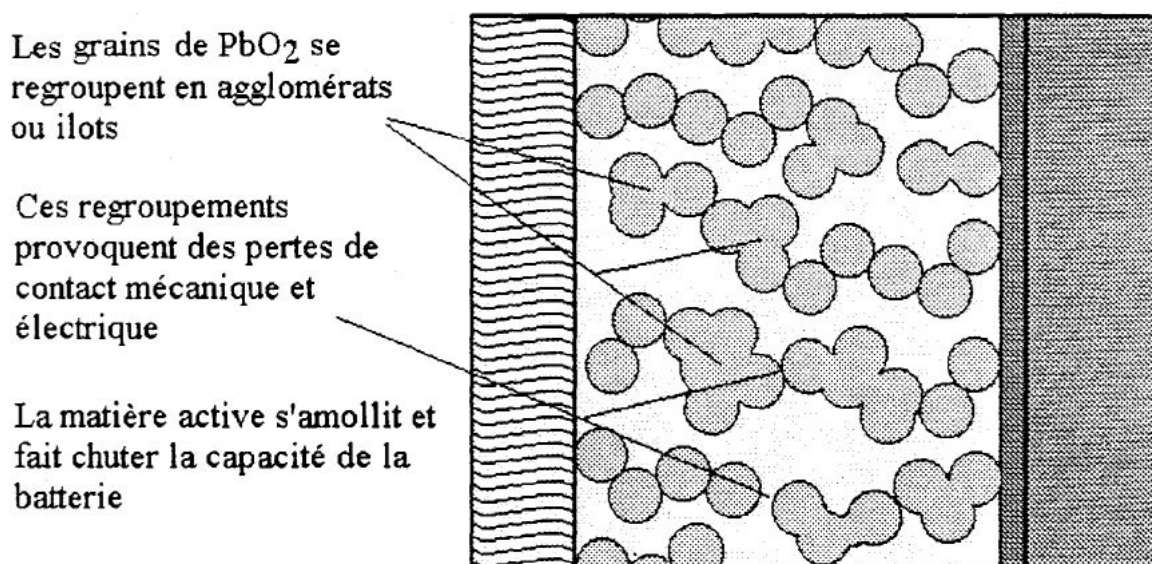


FIGURE 2.8 : Vieillessement de la matière active positive par changement de morphologie.

Corrosion et expansion du collecteur (grille ou épines) :

Le plomb ou l'alliage de plomb du collecteur de la plaque positive est porté à des potentiels auxquels il est instable : il a tendance à se corroder à l'interface collecteur/matière active en formant du PbO ou du PbO_2 suivant le type d'alliage.

L'importance et la vitesse d'évolution de la couche de corrosion dépendent de l'alliage utilisé, du potentiel de l'électrode, de l'électrolyte et de la température, pour certains types d'alliages cette couche est isolante et provoque des pertes de capacité prématurées.

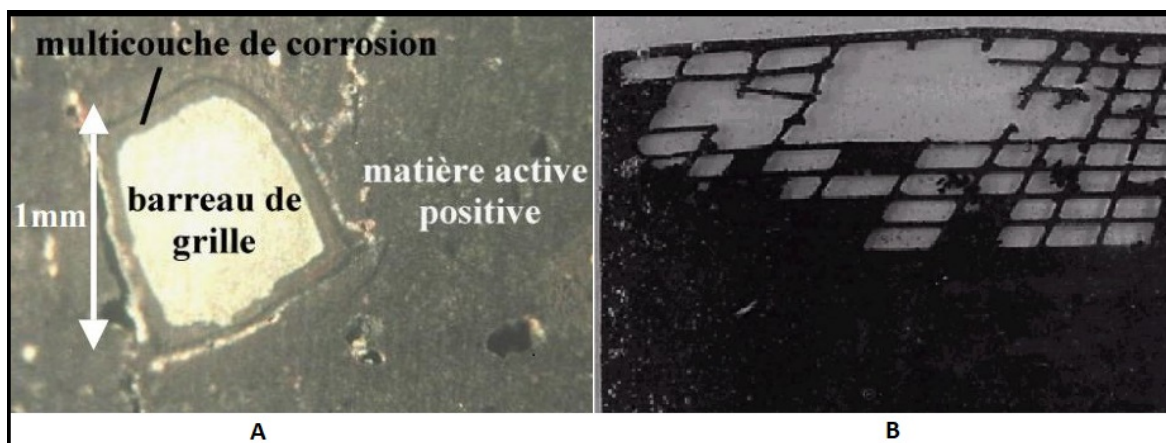


FIGURE 2.9 : Corrosion de la plaque positive : (A) : Vue au microscope optique d'une grille positive sectionnée et polie, entourée de sa matière active, d'un élément de batterie rechargé 2 mois à 13,5V après 5 mois d'autodécharge. (B) : Plaque positive corrodée d'une batterie de démarrage, après 5 années de service dans une automobile

Les produits de corrosion provoquent également l'expansion du collecteur à cause de leur différence de volume avec le plomb, cette expansion entraînerait des microfissures et des pertes de contact entre le collecteur et la matière active.

Les batteries de type acide-au-plomb étanche sont plus touchées par ces deux phénomènes que les batteries de type acide-au-plomb ouvert. En effet, leurs plaques négatives sont dépolarisées par la recombinaison des gaz qui limite l'augmentation de leurs potentiels. A tension de charge de la batterie égale, les plaques positives d'une batterie étanche sont donc portées à un potentiel plus élevé que celles d'une batterie ouverte. Il s'en suit une amplification de la corrosion et donc de l'expansion du collecteur positif.

Tout comme l'amollissement de la matière active, l'expansion est compensée par la compression des plaques entre elles sur les séparateurs.

2.7.2.2 La dégradation de la plaque négative :

La matière active négative contient des "expandeurs" (sulfate de baryum, noir de carbone, dérivés sulfonés de lignite, etc.); destinés à empêcher les grains de plomb de grossir, de se recombiner pour former des agglomérats, ils évitent les pertes de capacité par diminution de la surface de contact entre le plomb et l'électrolyte en maintenant la présence de pores dans la matière active négative. Il arrive que ces expandeurs se dégradent par dissolution, décomposition thermique ou réaction chimique avec l'acide.

Dans le cas des batteries étanches, la dépolarisation de la plaque négative l'empêche théoriquement d'atteindre la pleine charge. La répétition du phénomène peut entraîner des pertes de capacité.

En pratique, ces cas de dégradation de la plaque négative sont rares, leurs effets sont limités aujourd'hui en surdimensionnant la plaque négative par rapport à la plaque positive.

2.7.2.3 *La dégradation du séparateur :*

Le séparateur a un rôle double : il évite les courts circuits et aide à la tenue mécanique de la matière active sur le collecteur. Certains phénomènes peuvent l'altérer et faciliter ainsi la dégradation des plaques :

- Il peut subir une dégradation thermique lors des montées de la batterie en température.
- Des impuretés introduites lors des rajouts d'eau peuvent l'attaquer.
- Des dendrites de plomb (accumulation des grains en forme d'aiguille), apparaissant sur l'électrode négative dans les moments de faible densité d'acide, peuvent venir le transpercer.

Les améliorations récentes sur les séparateurs limitent fortement aujourd'hui ces modes de dégradation. Traversé par l'oxygène lors de la recombinaison, le séparateur d'une batterie étanche peut être sujet à oxydation, l'emploi de séparateur en micro fibres de verre, résistant à 100% à l'oxydation a résolu le problème.

Par ailleurs, la formation des dendrites est limitée par l'immobilisation de l'électrolyte, les séparateurs résistent mieux aux contraintes mécaniques des éventuelles formations de ces "grains aiguilles".

En fait, il est devenu rare aujourd'hui de rencontrer des défaillances de batterie dues au séparateur.

2.7.2.4 *La stratification :*

L'usure des plaques n'est pas uniforme. Plus lourd que l'eau, l'acide a tendance par gravité à s'accumuler vers le bas de l'élément. Au fil du temps, une "stratification" de l'électrolyte apparaît. Ainsi, l'hétérogénéité résultante entraîne une non uniformité, synonyme d'amplification, des dégradations le long de la plaque. Le brassage de l'électrolyte par les dégagements gazeux en surcharge ou par un système de pompe extérieur permet de réduire ce phénomène.

Plus lente que dans le cas du plomb ouvert du fait de l'immobilisation de l'électrolyte, la stratification des batteries étanches est en contrepartie difficilement réversible, elle peut entraîner des difficultés de réduction du sulfate de plomb en bas des plaques et déséquilibrer ces dernières. Pour limiter ce phénomène on utilise des séparateurs à porosité de plus en plus fine, mais un minimum de stratification a quand même lieu dans la matière active au travers de ses nombreux pores, une installation couchée des batteries permet de limiter fortement le phénomène.

2.7.2.5 *La perte d'eau :*

La perte d'eau des batteries ouvertes en surcharge peut être compensée par des rajouts réguliers. Liée essentiellement à la recombinaison non complète des gaz, elle est beaucoup plus lente mais irréversible dans le cas des batteries étanches, prépondérante dans les applications

cyclage, elle augmente la résistivité de l'acide (en augmentant sa densité) et du séparateur (en réduisant sa saturation).

2.7.2.6 *La réorganisation du sulfate de plomb en stockage (sulfatation) :*

Les molécules de sulfate de plomb en contact dans les électrodes ont tendance avec le temps à se réorganiser en agglomérats très résistifs. Il devient ensuite très difficile de les retransformer en plomb ou en dioxyde de plomb lors de la charge. Ce phénomène, observé pour les matières actives des deux électrodes, provoque des pertes d'énergie souvent irréversibles lors des stockages prolongés.

Plus les électrodes contiennent de sulfate de plomb, plus les formations d'agglomérats sont nombreuses, autrement dit, plus la batterie est déchargée, plus le temps de stockage doit être court pour éviter de trop importantes pertes d'énergie.

2.7.2.7 *Désulfatation :*

Il existe un moyen d'inverser le processus de sulfatation d'une batterie. Cela consiste en l'envoi d'impulsions électriques à la fréquence de résonance de la batterie (entre 2 et 6 MHz). Durant ce processus, les ions de soufre entrent en collision avec les plaques, ce qui a pour effet de dissoudre le sulfate de plomb qui les recouvre.

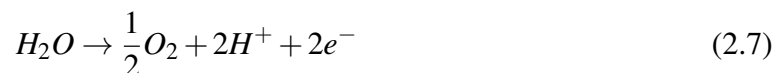
2.7.3 Les pertes de capacité réversibles :

Il arrive sous certaines conditions d'utilisation, qu'une batterie acide-au-plomb perde une partie de sa capacité et la récupère peu de temps après. Ces baisses de performances temporaires peuvent notamment être provoquées par les trois principaux phénomènes suivants :

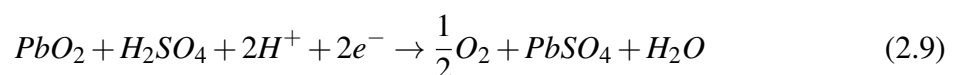
2.7.3.1 *L'autodécharge en stockage :*

Lorsqu'un élément est en circuit ouvert, aucun courant ne circule, pourtant si sa tension est supérieure à 1.23 Volts la décomposition de l'eau a quand même lieu. Cette dernière provoque la transformation de Pb et de PbO_2 en $PbSO_4$ pour récupérer les électrons dont elle a besoin : c'est l'autodécharge de la batterie. Elle s'effectue suivant les réactions suivantes :

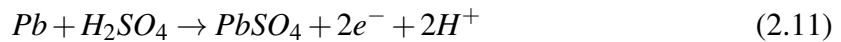
Électrode positive :



Soit la réaction globale d'autodécharge de l'électrode positive :



Électrode négative :



Soit la réaction globale d'autodécharge de l'électrode négative :



Les potentiels d'équilibre des électrodes d'une batterie plomb-acide se situent dans un domaine où l'autodécharge reste relativement faible.

La vitesse d'évolution de ce phénomène dépend toutefois d'autres paramètres extérieurs, elle augmente, par exemple, avec une élévation de température ou diminue avec l'augmentation de la quantité de $PbSO_4$ sur les électrodes.

Le sulfate de plomb formé par l'autodécharge provoque une perte de capacité pour la batterie. Cette perte est réversible tant que le phénomène précédemment cité de réorganisation des grains de sulfate de plomb en agglomérats résistifs n'a pas lieu.

Elle est récupérable par des compléments de charge ou par quelques cycles de charge/décharge à faible courant.

2.7.3.2 L'effet mémoire :

La batterie acide-au-plomb a tendance, en cyclage, à s'habituer à une utilisation répétitive. Ce phénomène appelé parfois "effet mémoire" n'est pas propre à la technologie acide-au-plomb, il apparaît pour bon nombre d'accumulateurs électrochimiques.

Vérifier en laboratoire, les comportements suivants sont constatés :

- Lors de cyclages à courants forts, l'accumulateur perd un peu de capacité à courant faible.
- Lors de cyclages à faible profondeur de décharge, il s'habitue à délivrer la quantité d'énergie qu'on lui demande à chaque cycle et n'arrive plus à fournir la capacité maximale initiale.
- Lorsque ces deux types d'utilisation ne sont pas trop prolongés, il est possible de récupérer facilement la capacité perdue (hors vieillissement irréversible normal) en faisant subir à la batterie un cyclage comportant des décharges à 100% à courant faible.
- Ces phénomènes d'adaptation sont modérés pour la technologie plomb acide et difficilement expliqués.

2.7.3.3 Les poches de gaz :

Afin de limiter le phénomène difficilement réversible de la stratification dans les accumulateurs étanches, les constructeurs diminuent de plus en plus la porosité de leurs séparateurs.

Ce gain en homogénéité s’effectue parfois au détriment de la qualité de recombinaison, les très faibles porosités rendent difficile la traversée de l’oxygène entre les deux plaques, des poches de gaz se forment parfois à la surface de la plaque positive et entraînent des pertes de capacité en diminuant les surfaces d’échange entre la plaque et l’acide.

Une phase de repos après la charge de l’accumulateur laisse le temps à l’oxygène de diffuser, de se recombinaison ou de s’échapper, et permet de récupérer l’énergie temporairement perdue.

2.8 LA MODÉLISATION DE BATTERIE ACIDE-AU-PLOMB [13]

Le circuit électrique équivalent d’une batterie acide-au-plomb est illustré dans la Figure 2.10. La batterie est représentée par une tension à circuit ouvert V_{OC} , qui modélise la force électromotrice résultant des activités électrochimiques de la solution et d’une résistance R_b qui représente toutes les pertes pendant le processus de charge/décharge.

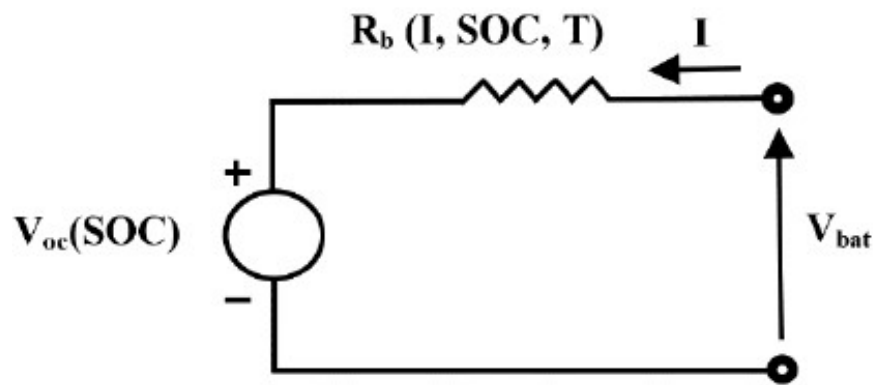


FIGURE 2.10 : Circuit équivalent de batterie [13]

La tension aux bornes de sortie peut être exprimée par l’expression suivante :

$$V_{bat} = V_{OC} \pm I.R_b \quad (2.13)$$

I est le courant de charge/décharge. Ce courant est positif pendant le processus de charge et négatif pendant le processus de décharge.

2.8.1 La résistance interne de la batterie [13]

En raison du comportement interne à l’intérieur de la batterie, le terme de résistance interne exprime les pertes d’énergie dans différents modes (charge, décharge). I dépend de l’électrolyte, du matériau constituant la batterie et de la température.

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer cette résistance interne comme : la méthode impulsionnelle, la période de repos et la méthode milliohm-mètre. Une relation

empirique représente la résistance interne en mode charge et décharge comme l'indique l'équation suivante :

$$R_b = \left(\frac{P_1}{1 + I(t)^{P_2}} + \frac{P_3}{(1 - SOC(t))^{P_4}} + P_5 \right) (1 - \alpha_T (T - T_{ref})) \quad (2.14)$$

où : de P_1 à P_5 et α_T sont des paramètres empiriques qui devront être identifiés, I le courant qui passent de et à la batterie, SOC est l'état de charge de la batterie, T est la température de l'électrolyte et T_{ref} est la température de référence égale à 25 °C.

2.8.2 État de charge SOC de la batterie et niveau d'énergie LOE [13]

L'état de charge de la batterie **SOC** est un indicateur qui décrit le stockage de charge dans la batterie en pourcentage variait dans la gamme $0 < SOC < 1$. Il est obtenu en calculant la somme d'ampères qui traversent la batterie en fonction de sa capacité instantanée et l'état de charge initial SOC_0 . Dans le même concept, le niveau d'énergie **LOE** exprime l'énergie stockage dans la batterie en fonction de la capacité maximale pour i égale à 0 et la température dans la plage $[-40, +40]$. Les équations suivante décrivent l'évolution du **SOC** et de **LOE** :

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C(t)} \int_0^t \eta_c(t) I(t) \partial t \quad (2.15)$$

$$C(t) = \frac{C_{nominal} \cdot C_{tcoef}}{1 + A_{cap} \left(\frac{|I(t)|}{I_{nominal}} \right)^{B_{cap}}} (1 + \alpha_c \Delta T + \beta_c \Delta T^2) \quad (2.16)$$

$$I_{nominal} = \frac{C_{nominal}}{n} \quad (2.17)$$

$$LOE(t) = LOE_0 + \frac{1}{C_n} \int_0^t \eta_c(t) I(t) \partial t \quad (2.18)$$

$$C_n = \max(C) \Big|_{T=[-40,+40]}^{I=0} \quad (2.19)$$

où, C_{tcoef} , A_{cap} , B_{cap} , α_c , β_c sont des paramètres qui seront identifiés pour le développement de ce modèle, $C_{nominal}$ est la capacité nominale, \int_0 est l'efficacité coulomb et C_n est le capacité maximale pour le courant égale à 0 et la température dans la gamme $[-40, +40]$. Pour réduire nombre de paramètres, nous supposons que la capacité varie linéairement avec la température par conséquent β_c est égal à 0.

2.9 TECHNIQUE DE CHARGE D'UNE BATTERIE ACIDE-AU-PLOMB [13]

Afin d'obtenir une meilleure gestion, de bonnes performances et une durée de vie optimale, des conditions spécifiques doivent être respectées pour charger les batteries acide-au-plomb. Principalement, les conditions de travail sont :

- Le courant de charge ne doit pas dépasser la valeur qui surchauffe la batterie (C/4).
- La bonne estimation des zones de travail sûres (safe working zones) pour éviter la surcharge et la décharge excessive.
- La bonne estimation de l'état de charge de la batterie (SOC).

Selon les applications, il existe plusieurs modes de charge des batteries acide-au-plomb :

2.9.1 Charge classique ON-OFF :

Ce type de charge est paramétrés par quatre seuils de tension contrôlés [13] :

- Dans l'étape de charge, la source est déconnectée au niveau de tension de gazage appelé également « fin de charge ».
- La source est reconnectée au niveau de la tension de recharge lorsque la batterie peut être rechargé à nouveau.
- Dans l'étape de décharge, la charge doit être déconnectée au niveau de l'extrémité de tension de décharge,
- et reconnecté lorsque la batterie peut fournir de l'énergie à la charge.

2.9.2 Charge avec un courant constant :

Cette méthode de charge est appliquée aux systèmes de contrôle qui assurent un courant de charge constant. Il peuvent être appliqués à différents niveaux contrôlés de courant de charge [13].

- Dans la première étape de charge, la tension commence à augmenter rapidement.
- Lorsque la batterie est près de son seuil de tension de charge, si le courant de charge est faible, nous pouvons considérer que l'état de charge est proche de 100 %.
- Ensuite, il est recommandé d'arrêter la charge par un courant faible près de la capacité de batterie divisé sur cent C/100.

2.9.3 Charge avec tension constante :

Dans ce mode de charge, la tension est fixé à la même valeur presque tout au long du processus de charge. Ce mode de charge fournit un courant initial important en raison de la différence de tension entre la batterie déchargée et la source. Ainsi, la charge de batterie augmente jusqu'à 70 % à 30 minutes. Pour les systèmes admettant un courant de charge élevé, il est recommandé d'utiliser la charge avec tension constante [13].

2.10 CONCLUSION :

Ce chapitre fait clairement ressortir les principales difficultés posées par ce système. L'énergie que peut fournir une batterie dépend de bon nombre de paramètres. Ainsi, par exemple, varie-t-elle avec le courant auquel la batterie est déchargée, avec la température, ou encore avec l'état de vieillissement.

Les performances sur une décharge dépendent des décharges précédentes. Si l'influence de tous ces paramètres est relativement bien connue du point de vue qualitatif, l'approche quantitative est toute autre. Ces phénomènes sont difficiles à évaluer numériquement d'autant plus qu'ils se combinent de façon non linéaire et souvent aléatoire. La détermination de l'état de charge est directement liée à cette approche quantitative de l'accumulateur. On comprend donc aisément pourquoi il est difficile de traiter ce problème.

CHAPITRE 3

Réalisation pratique

RÉALISATION PRATIQUE

Après définition des différents outils logiciels et matériels utilisés, l'étape suivante consiste à les exploiter pratiquement : programmation du PIC, interfaçage avec **LabVIEW**, communication avec le port série **RS-232** du PC, acquisition des données et sauvegarde sur une base de données.

3.1 PRINCIPE DE LIAISON DES DIFFÉRENTS OUTILS :

Notre travail se divise en plusieurs étapes : partie commande, partie puissance, partie d'acquisition des données et la partie de stockage des données) représenté en détail sur la **Figure 3.1**.

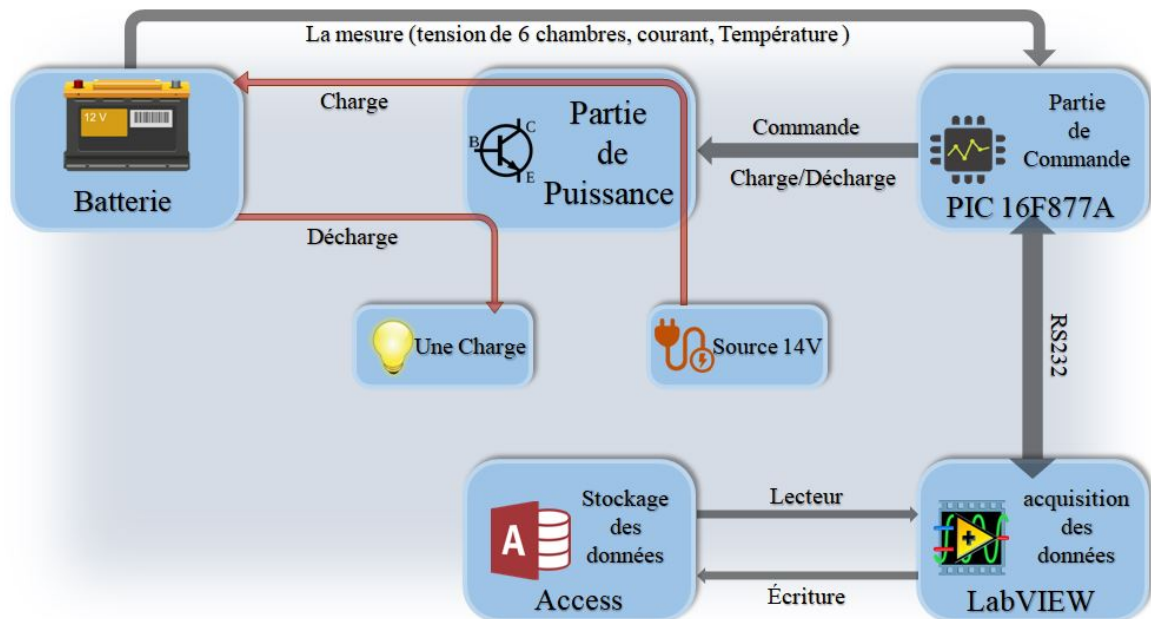


FIGURE 3.1 : Schéma de principe de la liaison entre les différents outils de développement

3.2 LE LOGICIEL LABVIEW :

LabVIEW offre une approche de programmation graphique qui aide à visualiser tous les aspects de l'application, et compris la configuration matérielle, les données de mesure et le débogage. Cette visualisation facilite l'intégration du matériel de mesure à partir de n'importe quel fournisseur, représente une logique complexe sur le diagramme, développe des algorithmes d'analyse de données et conçoit des interfaces utilisateurs d'ingénierie personnalisée basée sur un langage de programmation graphique appelé langage G.

La programmation en langage G se présente comme un schéma, un diagramme, réunissant différents icônes reliés par des fils de couleur. Chaque fil symbolise le passage d'une donnée depuis une source dont elle provient comme résultat, vers une cible où elle entre comme paramètre [RS232_pic].

Notre objectif en utilisant **LabVIEW** est de créer une interface graphique qui facilite la supervision de l'état de charge de la batterie avec la possibilité d'enregistrer les mesures acquises dans une base de données Access.

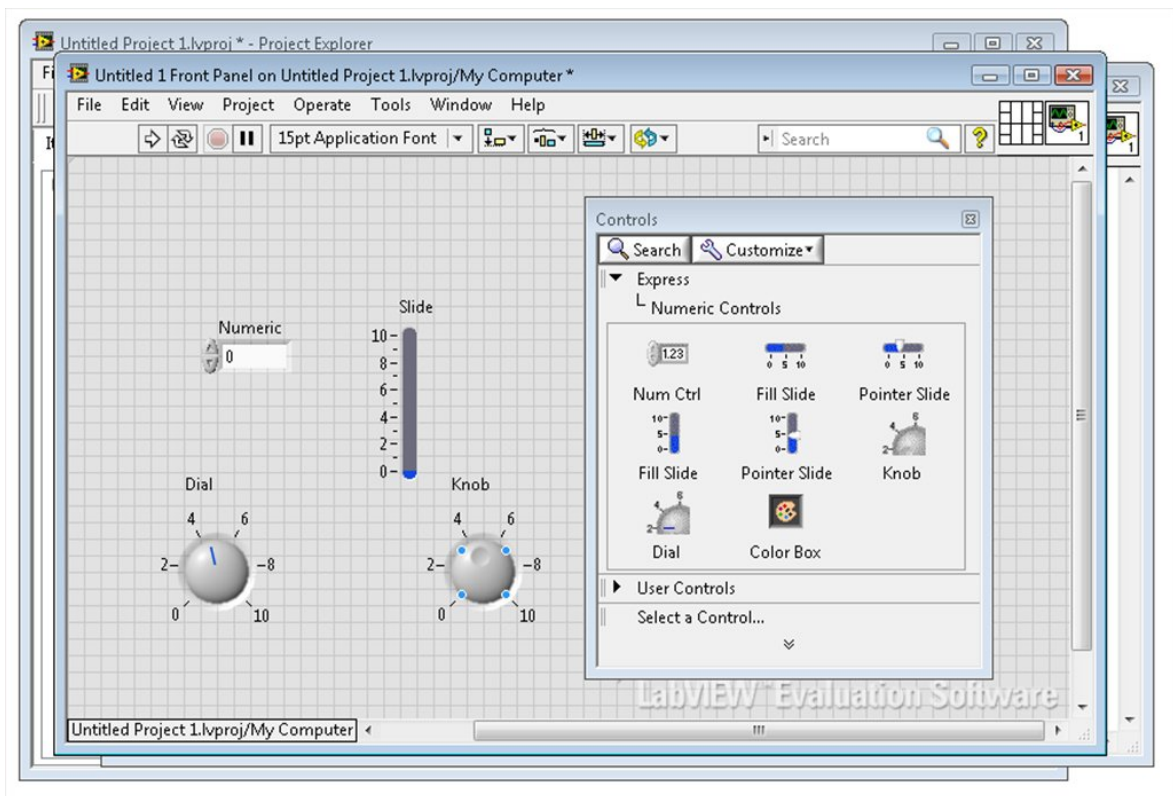


FIGURE 3.2 : Exemple d'une interface **LabVIEW**

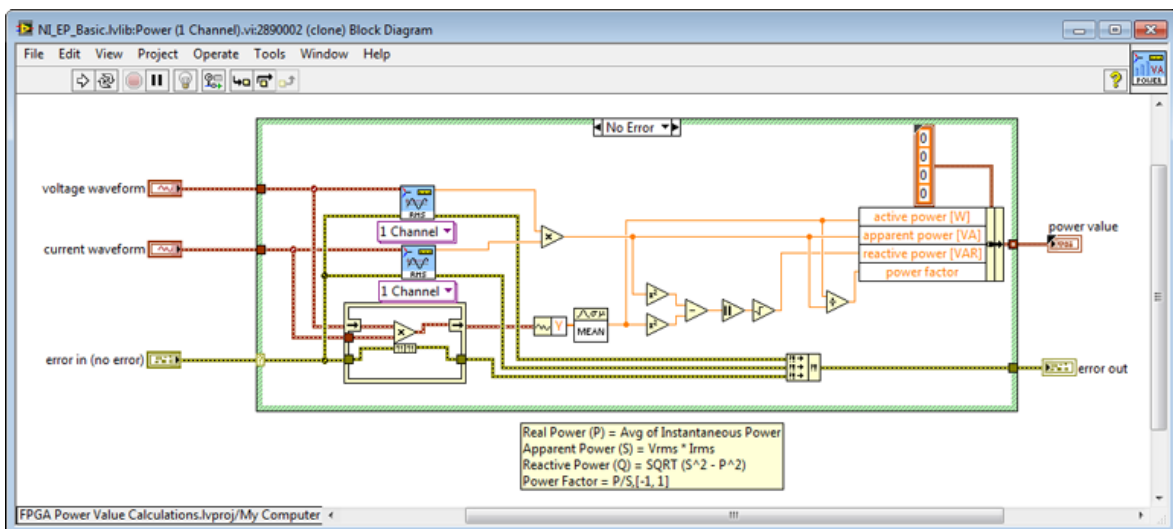


FIGURE 3.3 : Exemple de programmation en langage G sur **LabVIEW**

3.3 RÉALISATION D'UN PROGRAMMATEUR PICKIT2 :

A partir un logicielle de contrôle, le programmeur, une carte électronique, permet de transférer le fichier HEX obtenu par le compilateur dans la mémoire programme du microcontrôleur.

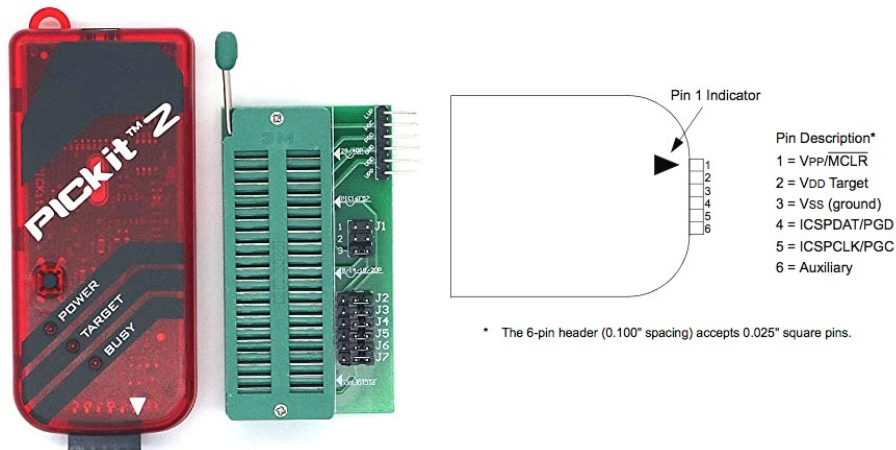


FIGURE 3.4 : Le programmeur PICKit2

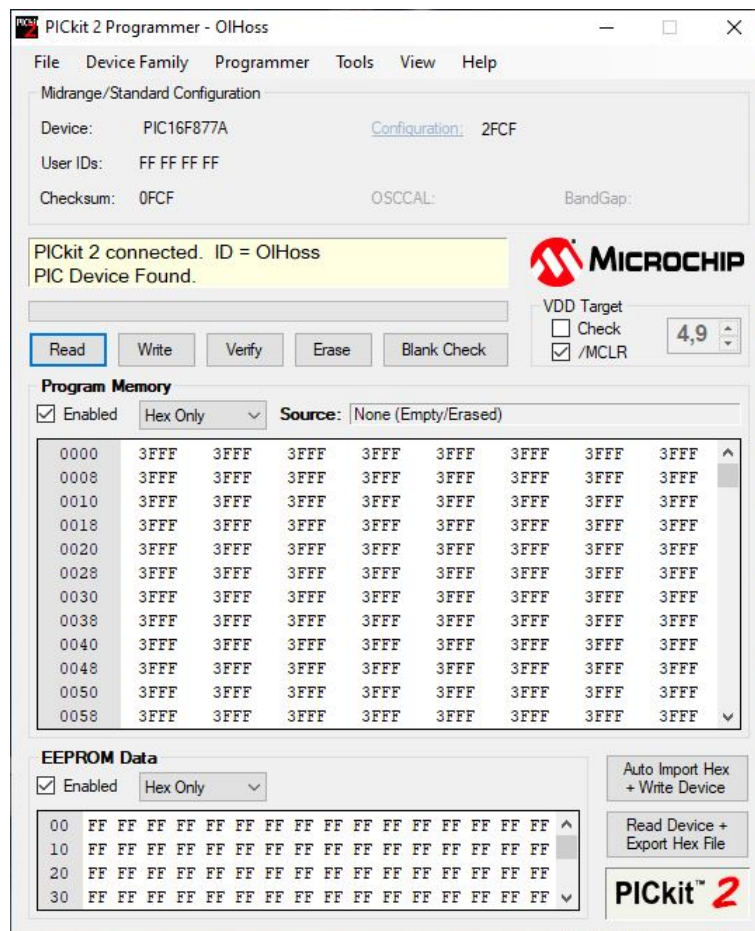


FIGURE 3.5 : Interface de contrôle du programmeur PICKIT2

Le PICKit2 (Figure 3.4) est une famille de programmeurs pour microcontrôleur PIC de Microchip Technology, le schéma interne est divulgué sur le site de Microchip ainsi que le code source du firmware. Le logiciel PICKit2 facilite la programmation des PIC avec une interface logicielle très simple comme le montre la figure Figure 3.5.

3.3.1 Test du programmeur sur plaque d'essais :

Dans notre cas, on va réaliser une version clone du programmeur PICKit2 afin de programmer notre microcontrôleur par la suite. Le circuit utilisé est représenté dans Figure 3.6.

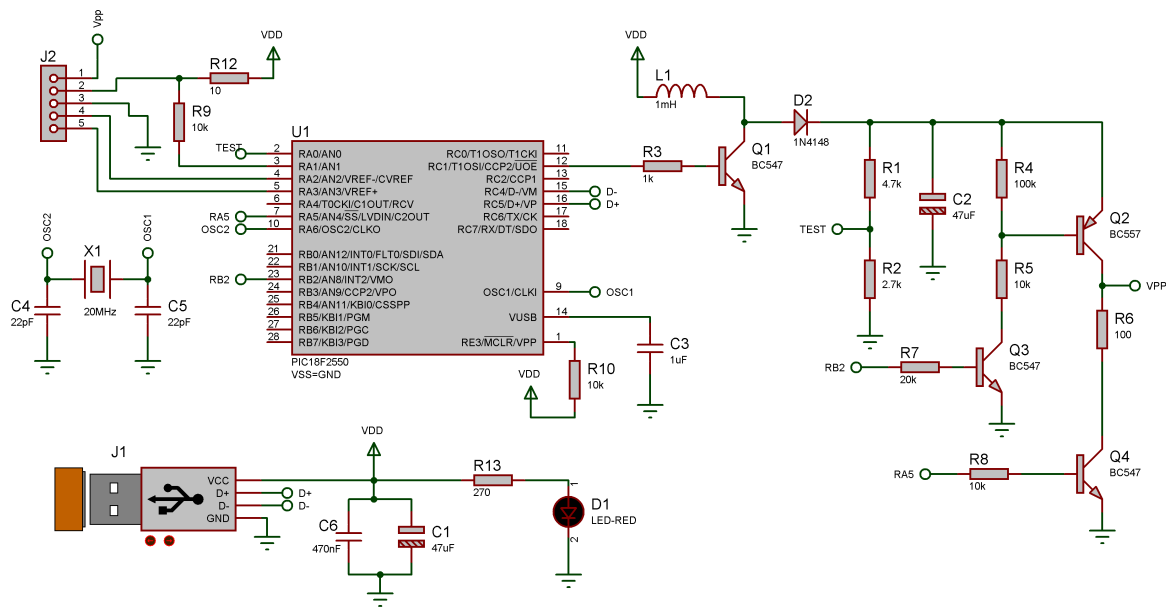


FIGURE 3.6 : Schéma de la version clone du programmeur PICKit2

Avant de réaliser notre programmeur en version finale, nous avons testé le circuit de la Figure 3.6 sur plaque d'essai afin de s'assurer du bon fonctionnement des différents composants. La programmation du firmware du programmeur lui même a été fait avec un autre programmeur disponible dans le laboratoire (une version PICKit3).

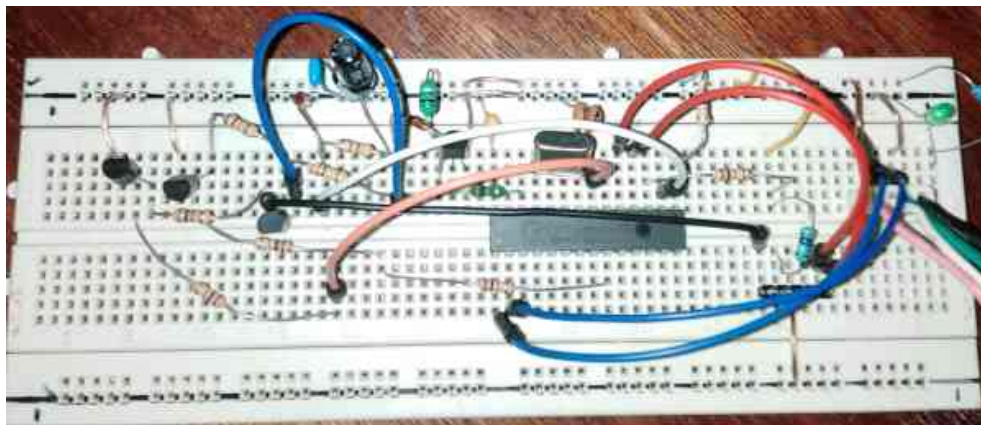
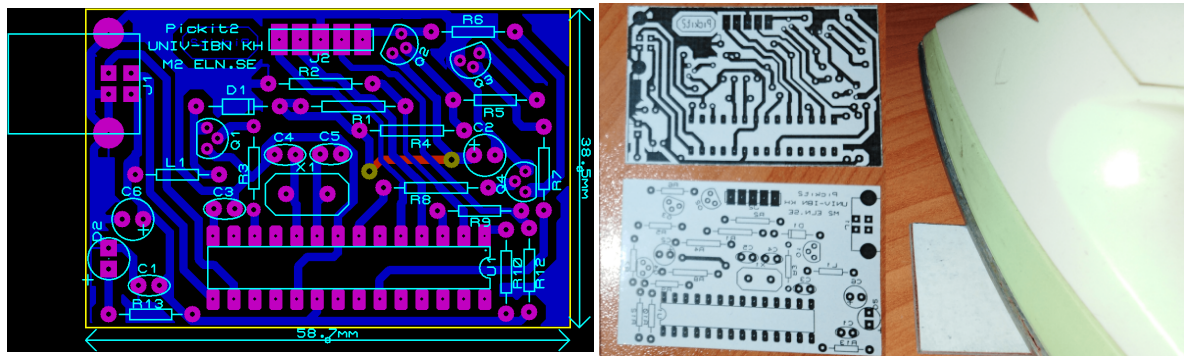


FIGURE 3.7 : Test du programmeur sur plaque d'essais

3.3.2 Développement du PCB du programmeur :

Le logiciel ARES est un outil d'édition et de routage qui complètement parfaitement le logiciel ISIS. Un schéma électrique réalisé sur ISIS peut alors être importé facilement sur ARES pour réaliser le PCB de la carte électronique [12]. Après conception sur mesure de notre programmeur, le résultat final de développement sur ARES est représenté dans la Figure 3.8a.

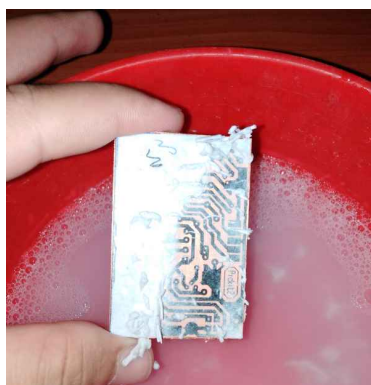


(a) Le typon développé avec ARES

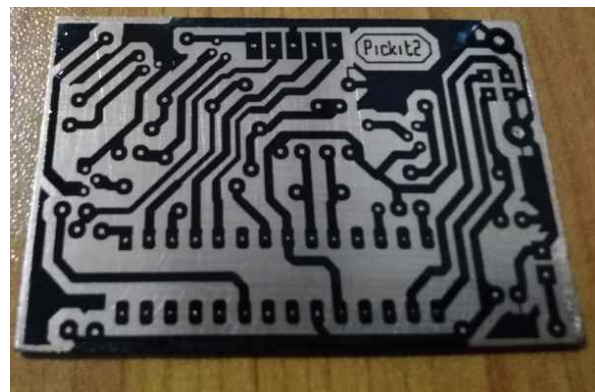
(b) Graveur de typon sur PCB

FIGURE 3.8 : Le typon du programmeur

ARES permet d'exporter le typon sous format PDF, si notre PCB ne dispose pas d'une couche photosensible, alors on imprime le typon dans un papier photo avec une imprimante laser (en utilisant la poudre du TONNER). Puis, on utilise un fer à repasser pour imprimer le circuit sur la couche de cuivre. Après lavage du PCB pour enlever le papier Figure 3.9a, on obtiens notre circuit de la Figure 3.9b prêt à être placé dans le bain d'acide Figure 3.10a.



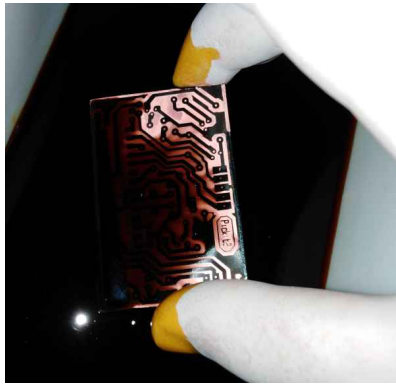
(a) Lavage du PCB



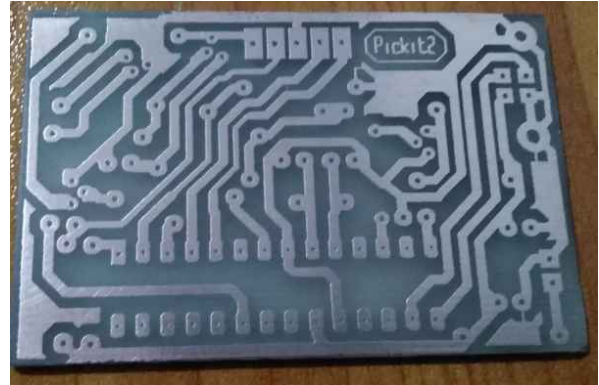
(b) Résultat après lavage

FIGURE 3.9 : Gravure du typon sur face cuivre en utilisant du papier photo

Après gravure de la poudre tonner sur la face en cuivre, l'étape finale consiste à graver les pistes sur le PCB en utilisant perchlorure de fer pendant 7 minutes avec l'agitation Figure 3.10a. La Figure 3.10b montre le résultat finale de notre propre programmeur réaliser à bas prix.



(a) Graveur avec le perchlorure de fer



(b) Le résultat finale du PCB

FIGURE 3.10 : Développement finale du PCB

Enfin, il ne nous reste que les dernières étapes qui sont : perçage, soudage des composants et test du résultat final.



FIGURE 3.11 : Version finale du programmeur PICKit2 (version maison)

3.4 LA SURVEILLANCE DE LA BATTERIE :

Pour atteindre l'objectif de ce travail, il est nécessaire de surveiller plusieurs paramètres de la batterie à la fois : courant de charge, courant de décharge, tension de chaque cellule et la température des différents éléments.

3.4.1 Mesure de la tension de la batterie :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les cellules de la batterie sont montées en série, chaque cellule a une tension environ 2.4V (selon le type de batterie), donc nous sommes confrontés à deux problèmes :

- Le microcontrôleur prendra les mesures par rapport à GND, or, la tension de chaque cellule sera additionnée avec les cellules qui la précède.
- La tension des quatre dernières cellules (7.2V, 9.6V, 12V, 14.4V) dépasse largement la tension maximale +5V que pourra admettre le microcontrôleur.

A cet effet, pour adapter les tensions élevées au microcontrôleur, nous avons utilisé un diviseur de tension 1/3 (Figure 3.12). Et pour connaître la valeur de la tension de chaque cellule, nous allons soustraire les valeurs précédentes comme le montre la ligne 25 dans le code C Listing 3.1.

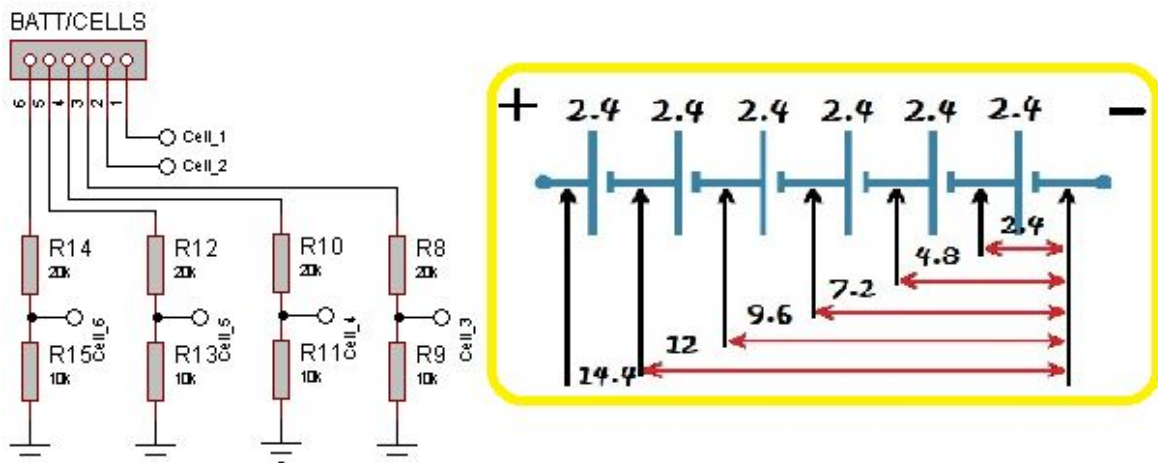


FIGURE 3.12 : Mesure de tension des éléments de la batterie

```

1  int16 Cells[6];
2  int16 S=0;
3
4  while(TRUE)
5  {
6
7      for(int i=0;i<6;i++)
8      {
9          set_adc_channel(i);
10         delay_ms(1);
11         S=0;
12         for (int j=0;j<10;j++)
13         {
14             S=S+read_adc();
15             delay_ms(1);
16         }
17     }

```

```

18     Cells[i]=S/10;
19
20     if(i != 0)
21     {
22         if (i>1)
23             Cells[i]=Cells[i]*3; // pour eliminer le diviseur de
                // tension Vt=Vdiviseur(R1+R2)/R2
24         for(int k=0 ; k<i ; k++)
25             Cells[i] = Cells[i]-Cells[k]; // eliminer les tensions de
                // cellule precedent
26     }
27 }
    
```

Listing 3.1: Code pour la mesure des tensions élémentaires de la batterie.

3.4.2 Mesure des courants de charge / décharge de la batterie :

Pour mesurer le courant de charge et de décharge de la batterie, nous avons utilisé le capteur ACS712. En utilisant la valeur résultante de la tension de sortie de ce capteur, nous pouvons calculer la valeur du courant en utilisant la formule suivante :

$$I = \frac{V_{OUT} - 2500}{Sensitivity} \quad (3.1)$$

où, V_{OUT} est la tension de sortie du capteur exprimée en mV, et *Sensitivity* est la sensibilité du capteur (valeur disponible sur le datasheet)

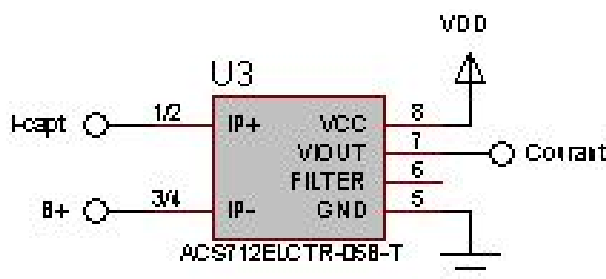


FIGURE 3.13 : Schéma de branchement du capteur de courant ACS712.

3.4.3 Mesure de température des éléments de la batterie :

La mesure de température se fait par le capteur LM35. Le code de source utilisé pour effectuer cette mesure est présenté dans le [Listing 3.5](#) ; la conversion des mesures en température se fait au niveau de [LabVIEW](#) ([Figure 3.23](#)).

3.5 CONTRÔLE DES CYCLES CHARGE/DÉCHARGE DE LA BATTERIE :

La partie puissance permet de commuter entre deux cycles : charge ou décharge de la batterie. Le microcontrôleur gère ces cycles de fonctionnement par l'ouverture ou la fermeture d'un relais (Figure 3.14). Pendant la charge de la batterie, un circuit de régulation automatique du courant de charger est utilisé (Figure 3.15). Lors de la décharge, la batterie est déchargée directement sur une résistance. L'ajustement manuel de la valeur de la résistance de décharge permet de régler le courant de décharge à la valeur souhaitée.

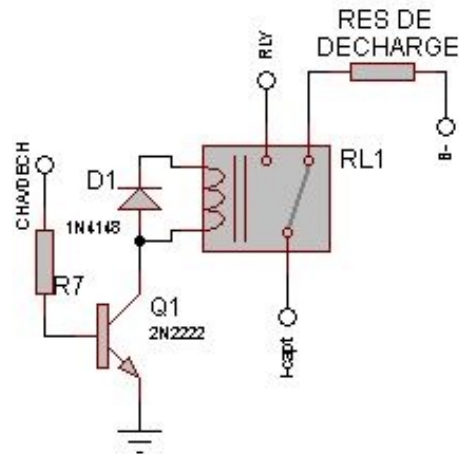


FIGURE 3.14 : Circuit de cyclage entre charge / décharge de la batterie.

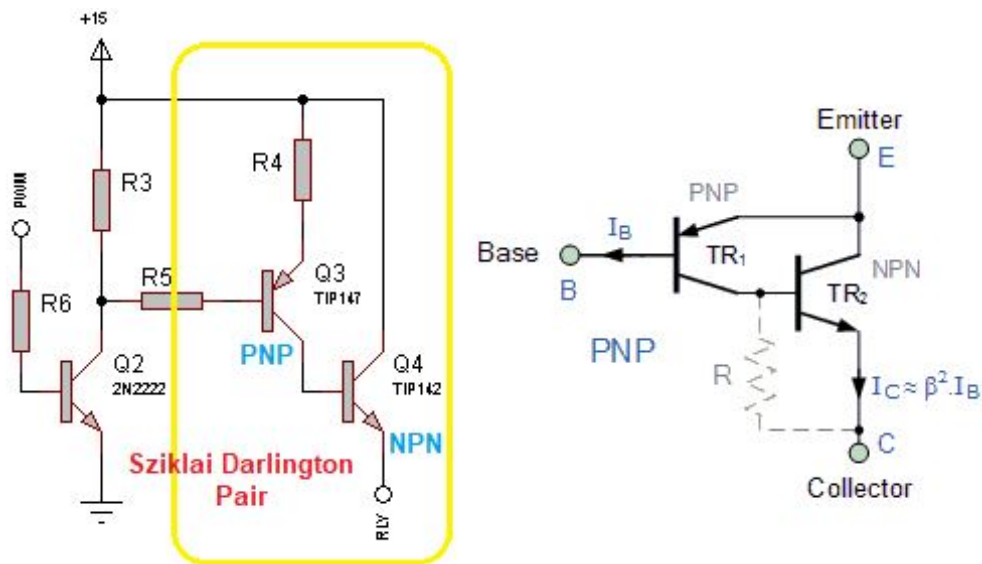


FIGURE 3.15 : Circuit de régulation du courant de charge.

Les deux modes de charge sont adopté dans le présent travail; le mode de charge à tension constante et le mode de charge à courant constant. La tension de référence ou le courant de référence seront utilisés par le microcontrôleur pour asservir la sortie à la consigne souhaitée en utilisant le signal PWM.

La Figure 3.16 représente le schéma générale de la carte électronique développée pour contrôler et surveiller la batterie acide-au-plomb. Les mesures effectuées seront envoyer à l'interface LabVIEW pour les stocker dans une base de données ACCESS.

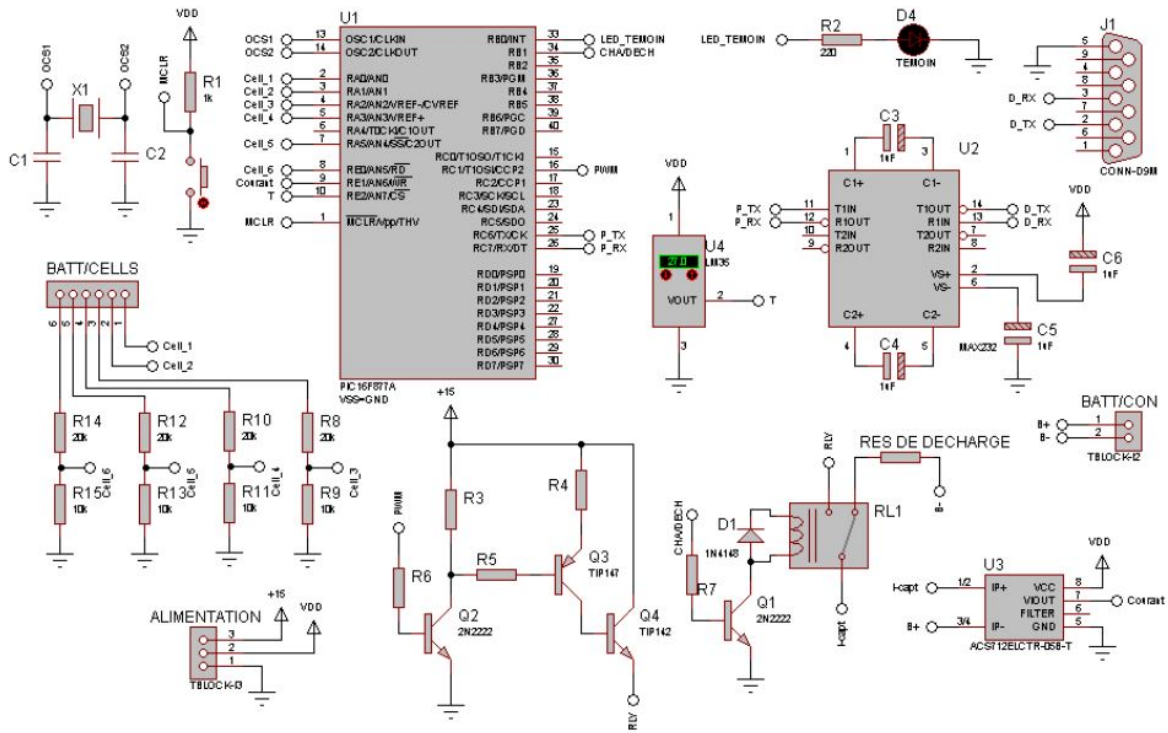


FIGURE 3.16 : Schéma générale de la carte de contrôle et d'acquisition.

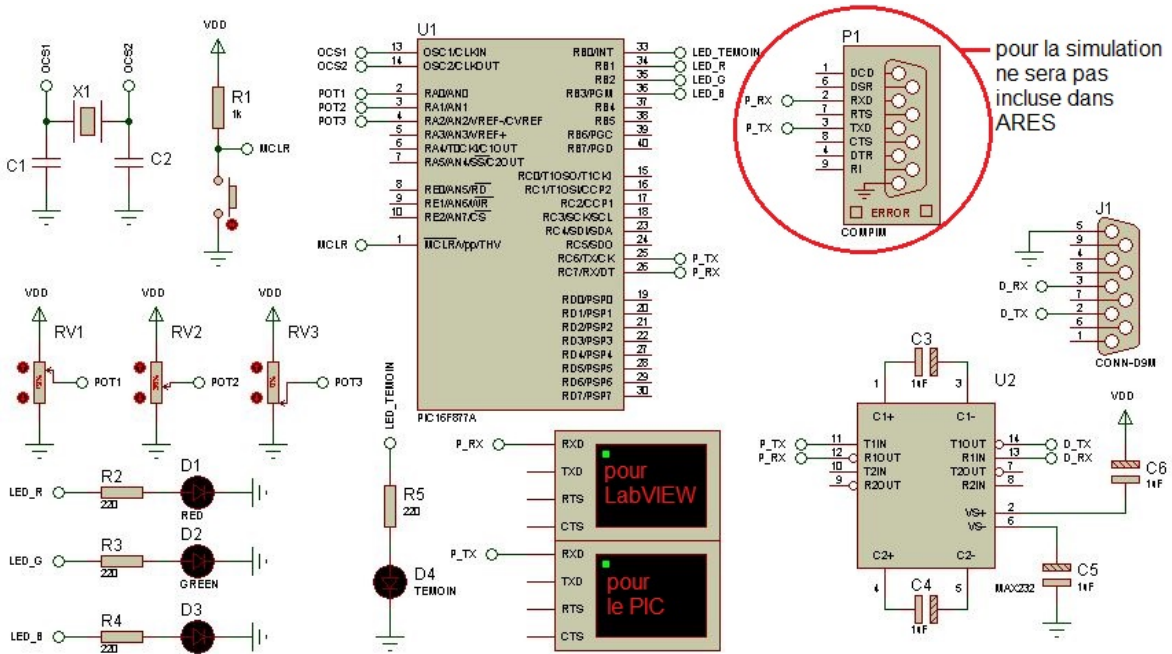


FIGURE 3.17 : Test de la communication entre le microcontrôleur et l'interface.

3.6 LIAISON ENTRE LE PIC16F877A ET L'INTERFACE LABVIEW :

Comme nous l'avons évoqué, nous avons besoin dans notre travail de faire communiquer les données mesurées vers l'interface **LabVIEW**. De même, cette interface devra donner les ordres au microcontrôleur afin d'exécuter une tâche spécifique : charger la batterie, décharger la batterie sur la résistance, varier l'intensité du courant de charge, ... ou encore, recevoir les valeurs des mesures des tensions, des courants et des températures.

Nous allons décrire la mise en oeuvre minimale pour pouvoir communiquer entre le PIC et l'interface PC. Nous nous intéresserons ici aux codes du microcontrôleur (code en langage C) et le bloc diagramme de **LabVIEW**, qui permettent d'échanger les données.

L'établissement de la connexion côté microcontrôleur est très simple. Il suffit d'inclure la bibliothèque **RS-232** comme le montre le listing du code suivant :

```

1  #include <16F877A.h>
2  #device ADC=10
3  #use delay(crystal=8MHz)
4  #Fuses HS,NOWDT,NOPUT
5  #use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=PORT1)
6
7  int16 POT[3],S=0;
8  #int_RDA
9  RDA_isr()
10 {
11 }
12
13 void main()
14 {
15     enable_interrupts(int_RDA);
16     enable_interrupts(GLOBAL);
17     setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
18     setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
19     set_tris_b(0x00);
20     output_b(0x00);
21     while(TRUE)
22     {
23         output_high(PIN_B0);    // pour indiquer
24         delay_ms(50);          // que le microcontrôleur
25         output_low(PIN_B0);    // est en marche
26         delay_ms(100);         //

```

Listing 3.2: Configuration de l'ADC et le RS-232 dans le microcontrôleur

3.6.1 Emission des données du microcontrôleur vers l'interface :

L'échange des données se fait caractère par caractère selon le code **ASCII** (ligne 13 du **Listing 3.3**). Dès leurs réception, les valeurs numériques seront convertir.

Parmi les fonctions qui existent, nous avons utilisé pour le microcontrôleur la fonction `printf()` en émission, et la fonction `getc()` en réception. Du côté **LabVIEW**, on a utilisé les fonctionnalités de l'instrument I/O **VISA** (Figure 3.18).

L'exemple du code qui suit (Listing 3.3), on mesure les tensions issues de trois potentiomètres. Les valeurs acquises seront envoyées par la suite à l'interface **LabVIEW**.

```

1
2   for(int i=0;i<3;i++)
3   {
4       set_adc_channel(i);
5       delay_ms(1);
6       S=0;
7       for (int j=0;j<10;j++) // 10 lectures pour lisser la tension
8           mesure
9           {
10              S=S+read_adc();
11              delay_ms(1);
12          }
13      POT[i]=S/10;
  
```

Listing 3.3: L'envoi des données de PIC vers PC

Au niveau de l'interface **LabVIEW**, on lit les données reçues en utilisant le bloc "VISA Read". Le bloc "search and replace String" permet de séparer les données reçues. Le bloc "decimal String to number" permet de les convertir en décimal.

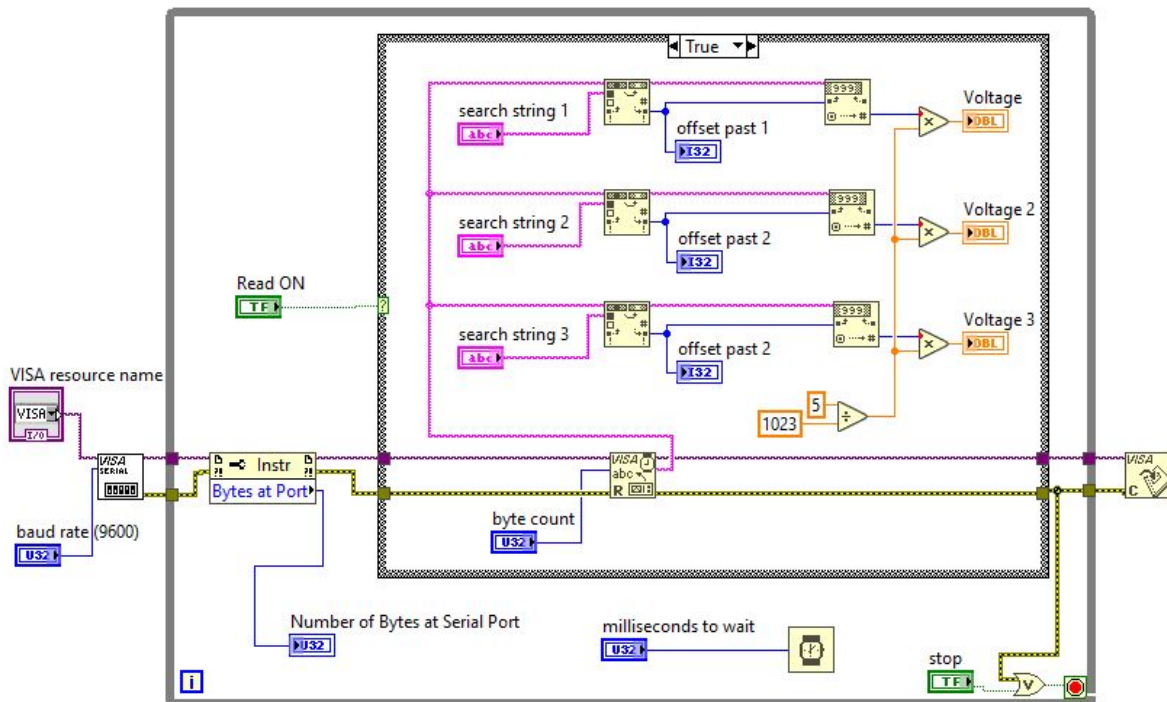


FIGURE 3.18 : Acquisition des données sur **LabVIEW**


```

20     for(int i=0 ; i<3 ; i++)
21     {
22         if (LED_RGB[i] == '1')
23             output_high(49+i); // PIN_B1 = 49
24         else
25             output_low(49+i);
26     }
27 }
28 }
    
```

Listing 3.4: Réception et exécution des ordres de l'interface LabVIEW

3.6.3 Echange des données entre le microcontrôleur et l'interface LabVIEW :

La communication bidirectionnelle, entre le microcontrôleur et l'interface LabVIEW, se fait par la combinaison des deux bloc diagramme de la Figure 3.18 et la Figure 3.19 et la combinaison des deux codes Listing 3.3 et Listing 3.4.

L'interface LabVIEW ainsi développée pour tester de cette communication est représenté par la Figure 3.20.

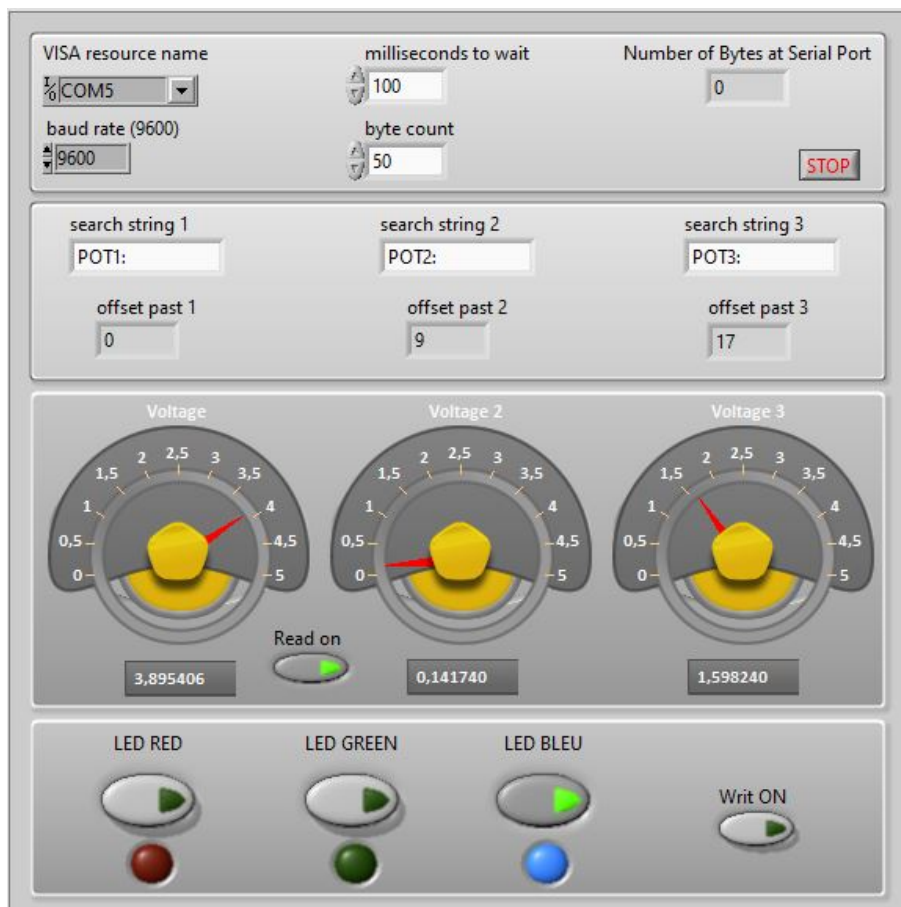


FIGURE 3.20 : Interface LabVIEW de test de la communication bidirectionnelle

3.6.4 Intégration de la mesure de température :

Pour tester le fonctionnement réel du capteur de température LM35, nous avons injecté le code du Listing 3.5 dans notre microcontrôleur.

```

1 while(TRUE)
2 {
3     set_adc_channel(3);
4     delay_ms(1);
5     S=0;
6     for (int j=0;j<20;j++)
7     {
8         S=S+read_adc();
9         delay_ms(5);
10    }
11    LM=S/20;
12    printf("LM: %lu\n\r",LM);
13 }
    
```

Listing 3.5: Mesure et transfert de la température à l'interface LabVIEW

Le bloc diagramme de décodage des valeurs reçues de la température est le suivant :

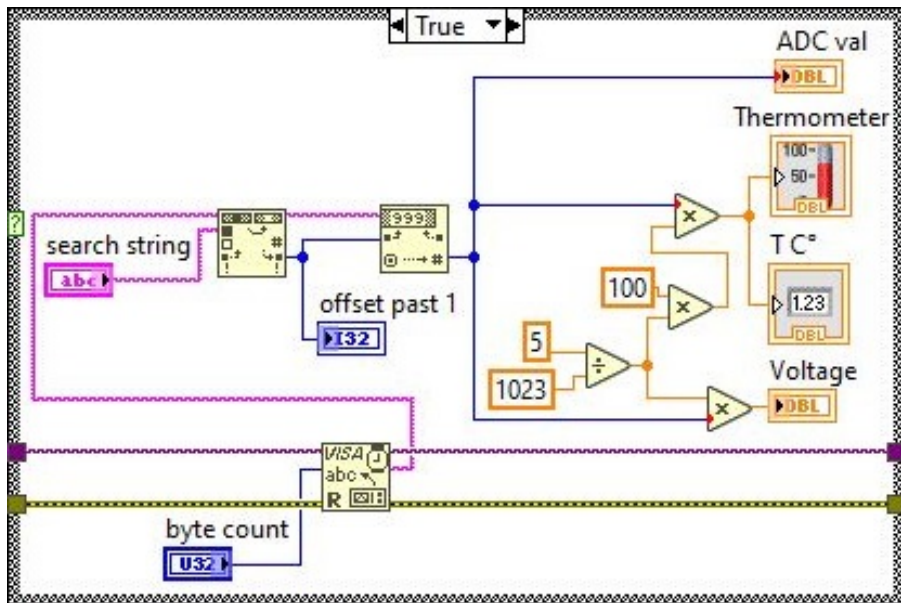


FIGURE 3.21 : Bloque diagramme sur LabVIEW

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de la communication, nous avons réalisé notre montage sur plaque d'essais comme le montre la Figure 3.22. Le résultat d'acquisition de température est affiché sur l'interface LabVIEW comme le montre la Figure 3.23.

3.7 CONNECTIONS AVEC LA BASE DE DONNÉES :

Nous avons déjà mentionné que nos mesures sur la batterie doivent être stocker pour les analyser par la suite. Le stockage se fait au niveau d'une base de données Access. A cet effet, il faut créer une connexion entre l'interface **LabVIEW** et cette base de donnée. Cela se fait avec la configuration d'un fichier d'extension ".udl" comme l'indique la **Figure 3.24**.

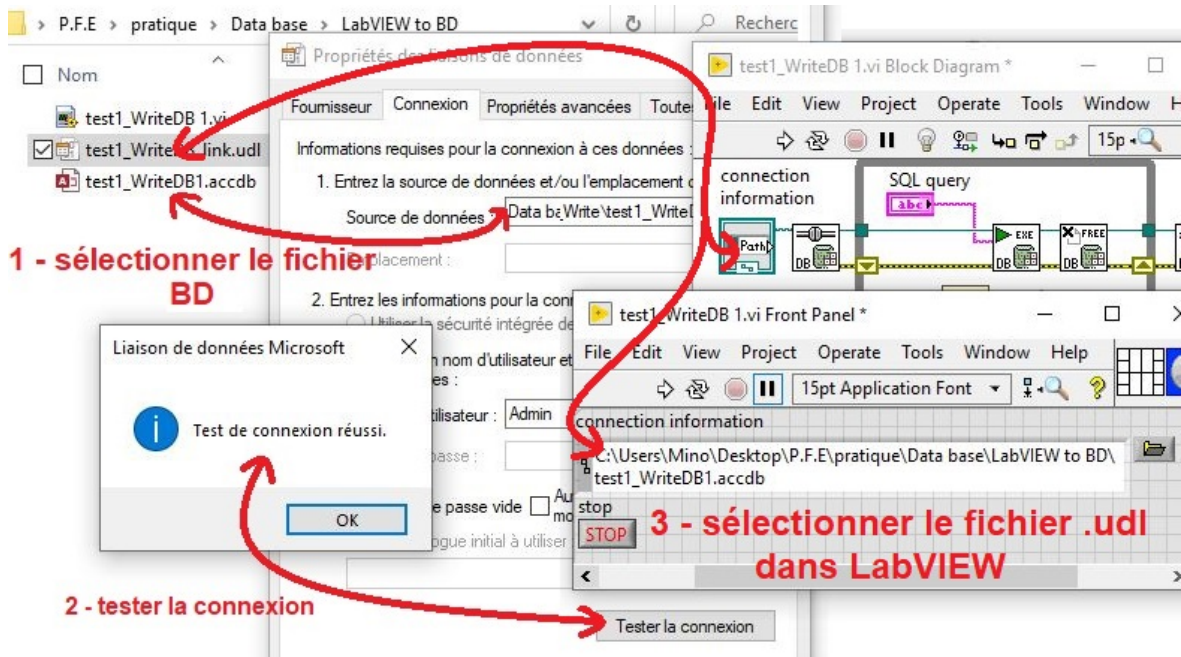


FIGURE 3.24 : Configuration de la connexion à la Base de Donnée.

Avec cette configuration, la connexion est parfaitement réussie, et les données sont bien stockées comme le montre la figure suivante :

ID	date	Heure	POT1	POT2	POT3
348	15/08/2020	13:15:07	1023	10	0
349	15/08/2020	13:15:07	726	10	0
350	15/08/2020	13:15:07	726	10	0
351	15/08/2020	13:15:07	542	10	0
352	15/08/2020	13:15:08	471	10	0
353	15/08/2020	13:15:08	471	10	0
354	15/08/2020	13:15:08	317	10	0

FIGURE 3.25 : Exemple de stockage de données dans une base de données Access.

La requête SQL "**insert into**", utiliser dans la **Figure 3.26**, permet d'insérer des données dans un tableau spécifié. Les données lues par **LabVIEW** sont concaténées par le bloc "**Concatenate Strings**" en utilisant la requête suivante :

insert into tab1 (POT1,POT2,POT3) values (X,Y,Z)

où X, Y, Z sont les valeurs mesurées à partir des trois potentiomètres.

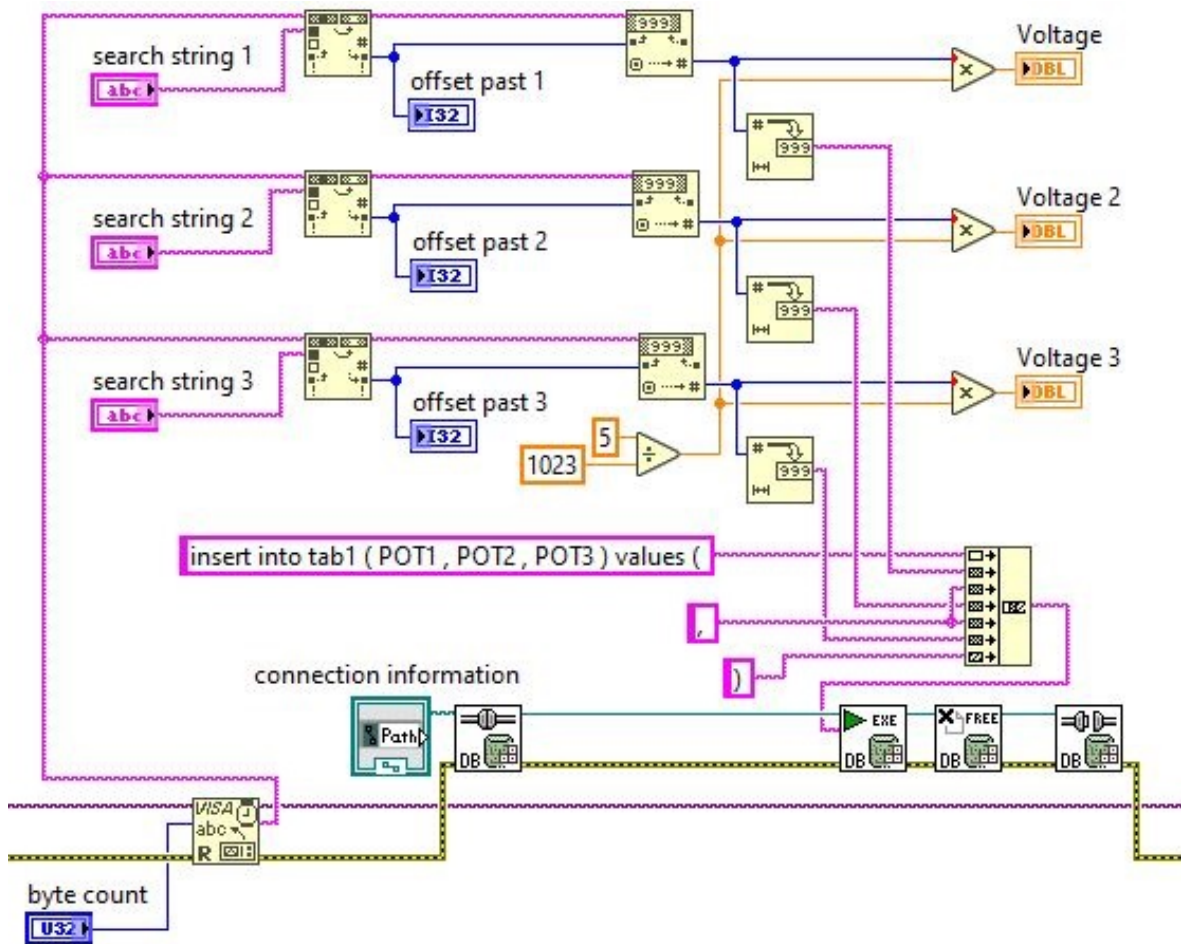


FIGURE 3.26 : Bloc diagramme d'insertion des mesures dans une base de données Access

La récupération des données à partir de la base de données s'effectue via le bloc **"select"** qui permet de sélectionner l'ensemble des éléments du tableau. Pour sélectionner seulement une ligne du tableau, on utilise le bloc **"Index Array"** pour sélectionner l'élément désiré comme le montre la figure suivante :

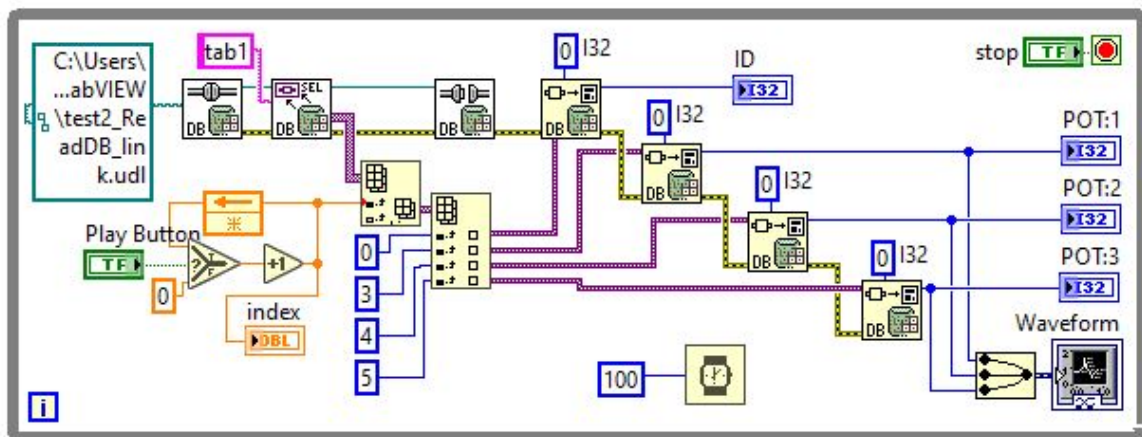


FIGURE 3.27 : Bloc diagramme de récupération des données à partir d'une base de données.

3.8 ANALYSE DE DONNÉES :

Après avoir réussi le processus de communication entre le microcontrôleur et la base de données à travers l'interface **LabVIEW**, l'utilisation des graphes facilite la lecture, l'analyse et le traitement de ces données (**Figure 3.28**).



FIGURE 3.28 : Analyse des données stockées dans la base de données.

3.9 CONCEPTION D'UNE NOUVELLE BATTERIE :

L'objectif de ce travail est d'étudier le problème de déséquilibre des tensions des éléments de la batterie acide-au-plomb. Ce problème influence fortement la charge de la batterie, vu le montage série des éléments de la batterie. Dans cette conception série, la tension de la batterie vue par le chargeur est la somme des tensions élémentaires. Avec le temps, les tensions des éléments ne seront plus équitables ; certains éléments se chargent plus vite que les autres. Mais, comme la tension globale de la batterie reste inférieure à la tension de fin de charge, le chargeur continue à charger la batterie ; d'où, il surcharge les éléments déjà chargés ce qui leur détruit.

Pour cela, nous proposons une nouvelle conception de la batterie. Une conception capable de résoudre le problème de déséquilibre de la tension des éléments de la batteries. Grâce au logiciel **Fusion 360**, une vision préliminaire de la nouvelle conception de la batterie est représentée par la (**Figure 3.29**). Au lieu de brancher les éléments de la batterie directement en série, une autre carte électronique (**Figure 3.30**) sera introduite dans la batterie pour assurer la connexion entre ces éléments.



FIGURE 3.29 : Nouvelle conception de la batterie acide-au-plomb.

Le carte de contrôle de la batterie [Figure 3.30](#) permet de choisir la bonne configuration de connexion des éléments ; si un élément est complètement chargé pendant le processus de charge, il sera mis hors circuit afin d'éviter sa surcharge. Cette carte permet aussi de contrôler le courant de charge et la tension de chaque élément.



FIGURE 3.30 : Carte de contrôle de la batterie.

En plus, sur cette carte électronique et à partir de l'extérieur de la batterie, on trouve un bouton de sélection et des LED témoins pour afficher l'état de charge de la batterie et des différents éléments.

Selon la communication utilisée (bleutooth, wifi, RS-232), cette carte électronique pourra être connecter à l'interface PC pour envoyer tout les alertes et les informations nécessaires afin de diagnostiquer les différents éléments de la batterie.

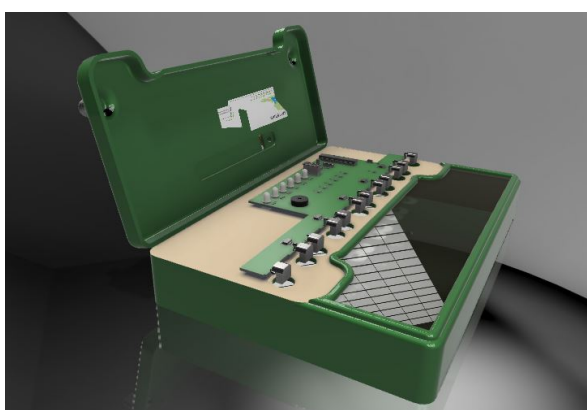
L'autre avantage, dans cette nouvelle conception, est la possibilité de remplacer les éléments constituant la batterie (Figure 3.31).



FIGURE 3.31 : Un élément constituant la batterie.

Dans le cas d'une défaillance, les LED extérieurs commencent à clignoter pour dire qu'un élément est endommagé et il faut le remplacer pour préserver les autres éléments (Figure 3.32). Ceci permet de prolonger la durée de vie de la batterie et minimiser le coût de sa maintenance.

A cet effet, le couvercle de la batterie devra être conçu d'une manière d'être simple en ouverture afin de donner la possibilité pour remplacer les éléments défaillants.



(a) Ouverture du couvercle de la batterie.



(b) Remplacement des éléments défaillants.

FIGURE 3.32 : Ouverture de la batterie pour remplacement des éléments défaillants.

3.10 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de résumer toute la partie pratique qu'on a effectué durant la réalisation de ce mémoire. En commençant avec la réalisation du programmeur des microcontrôleurs PICKIT2. Ensuite, nous avons détaillé la méthode suivie pour réaliser une interface [LabVIEW](#) qui permet le pilotage de la carte électronique de supervision de la batterie. En utilisant le protocole [RS-232](#), notre carte électronique pourra communiquer facilement avec l'interface logicielle. Nous avons donné les différents codes qui permettent d'envoyer ou de recevoir les données sur les deux côtés. Finalement, nous avons présenté la nouvelle conception de la batterie afin de remédier aux problèmes de déséquilibre des tensions des éléments [Figure 3.33](#).



FIGURE 3.33 : Imagination de la nouvelle conception des batteries acide-au-plomb.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principale de ce mémoire est de proposer une nouvelle conception de la batterie acide-au-plomb. Une conception qui améliore le rendement de la batterie et prolonge sa durée de vie.

Ce travail se fait avec l'extraction des paramètres qui caractérisent chaque élément de la batterie.

En premier chapitre, nous avons donné une vision générale sur les systèmes de stockage électrochimique, et les différentes technologies qui existent. Ensuite, nous avons présenté les caractéristiques principales du microcontrôleur PIC16F877A nécessaires pour superviser une batterie acide-au-plomb.

Le second chapitre a été consacré spécialement à cette batterie acide-au-plomb afin de créer une base de connaissance sur ce type de batteries. Nous avons présenté des généralités, les différentes technologies existantes, la modélisation mathématiquement, les équations régissant le mode charge et décharge de la batterie.

Enfin, le dernier chapitre a été consacré à la réalisation pratique. Commencant par la réalisation d'une version clone du programmeur des microcontrôleur PICKIT2, à partir des schémas ISIS jusqu'au développement du circuit PCB. Ensuite, nous avons abordé en détail la liaison [RS-232](#) entre la carte électronique d'acquisition des données et l'interface logiciel développé avec [LabVIEW](#). Enfin, l'enregistrement des données acquises sur base de données ACCESS a été discuté. Pour clôturer le mémoire avec l'imagination d'une nouvelle conception permettant d'éviter les problèmes de la batterie acide-au-plomb.

A cause du COVID-19, malheureusement, ce travail n'a pas abouti à l'objectif initialement fixé. Néanmoins, les futures étudiants qui vont continuer sur ce sujet trouvent ici l'essentiel du travail.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Accumulateurs Electrochimiques*. URL : http://www.fltsi.fr/tsi/tsi1/Domaines_de_competences/DC04_Choisir_un_actionneur_et_sa_commande/Cours/crs_dc04_acu.pdf.
- [2] Archouche Adel et BOUSSID SIHEM. “Mémoire Fin Etude : Etude Et Réalisation D’une Commande Automatique De L’éclairage Publique A Base De Microcontrôleur Pic16f877”. Université Larbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi., 2011.
- [3] Olivier CAUMONT. “Thèse De Doctorat : Détermination De L’état De Charge D’une Batterie Plomb Acide En Utilisation Véhicule Electrique”. L’Université Des Sciences Et Technologies De Lille., 1997.
- [4] Frédéric COUPAN. “Thèse De Doctorat : Stockage Pour Les Energies Renouvelables : Evaluation Et Modélisation De La Batterie Plomb-Acide”. Université de Guyane., 2017.
- [5] *Data sheet LM35*. REV H. Texas Instrument. URL : <https://www.ti.com/document-viewer/LM35/datasheet/abstract#SNIS1592470>.
- [6] *Data sheet PIC16F87X*. version 30292D. MICROSHIP.
- [7] *Description de l’RS232 et Mise en Place d’un MAX232*. URL : <http://www.roboticus.org/articles/4-description-de-lrs232-et-mise-en-place-dun-max232->.
- [8] Derafa IMAD. “Thèse De Doctorat : Comportement Electrochimique De Pbo2 En Milieu Sulfurique, Etude Comparative Entre Les Deux Variétés Chimique Et Electrochimique.” Université Ferhat Abbas Setif-1., 2018.
- [9] Derafa IMAD. “Thèse De Magister : Etude Comparative Des Propriétés Electriques De Pbo2 Préparé Par Voie Chimique Et Electrochimique.” Université Ferhat Abbas Setif-1., 2014.
- [10] *Les Différentes Technologies De Batterie Acide-Plomb*. URL : <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/technologies-batteries-acide-plomb.php>.
- [11] Hélène Horsin Molinaro Et Bernard MULTON. “Article Scientifique : Technologies Des Systèmes De Stockage De L’énergie Electrique”. Ressource publiée sur Culture Sciences de l’Ingénieur. URL : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>.
- [12] *Proteus (ISIS et ARES) - Logiciel Électronique*. URL : <http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php>.
- [13] Belaifi SIDALI. “Thèse De Doctorat : Contribution To The Développment Of A Robust Charge Controller Of A Stationary Battery For Photovoltaic Applications.” Université De Yahia Fares De Medea, 2017.
- [14] Degrandcourt THOMAS. *Accumulateurs : Le Futur Du Stockage D’énergie*. URL : <https://www.encyclopedie-energie.org/accumulateurs-le-futur-du-stockage-denergie>.

Résumé

Notre travail dans ce mémoire est le but de réaliser un modèle de batterie de batterie acide-ou-plomb dans le cadre d'améliorer la durée de vie batterie ce fait par l'augmentation des cycles de charge.

nous avons effectué une partie de ce mémoire par la collection les tension et le courant durant la charge et décharge de batterie avec l'influence de températures sur l'état des chambres dans ce process on a exploiter le PIC16F877A dans le contrôle et le protocole RS-232 pour la communication et LABVIEW pour la collection des mesures avec l'enregistrement sur un base de données pour faire l'étude sur la batterie.

Mots clés :PIC16F877A , LABVIEW , RS-232 ,BASE DES Donnée.

Abstract

Our work in this thesis achieving an acid-or-lead battery model as part of improving battery life by increasing charging cycles.

we carried out part of this memory by collecting the voltage and current during the battery charge and discharge with the influence of temperatures on the chambers in this process we exploited the PIC16F877A in the control and protocol RS-232 for communication and LABVIEW for the collection of measurements with recording on a database to do the study on the battery.

Keywords:pic16F877A , LABVIEW , RS-232 , Database.