



Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Électronique

---

# Optimisation de la gestion d'exploitation d'un groupe électrogène dans un site de télécommunications

---

*Réalisé par :*

M. CHERIF CHIA

M. DJAMAL BOUMEDIENE ZILAL

*Encadré par :*

Pr. MOURAD HADDADI  
(ENP)

M. SIDAHMED MEHIAOUI  
(Algérie Télécom)

Pr. Cherif LARBES : ENP - Président  
M. Mohamed TAGHI : ENP - Examineur  
Pr. Mourad HADDADI : ENP - Rapporteur





Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Électronique

---

# Optimisation de la gestion d'exploitation d'un groupe électrogène dans un site de télécommunications

---

*Réalisé par :*

M. CHERIF CHIA

M. DJAMAL BOUMEDIENE ZILAL

*Encadré par :*

Pr. MOURAD HADDADI  
(ENP)

M. SIDAHMED MEHIAOUI  
(Algérie Télécom)

Pr. Cherif LARBES : ENP - Président  
M. Mohamed TAGHI : ENP - Examineur  
Pr. Mourad HADDADI : ENP - Rapporteur

## ملخص

تتناول هذه الوثيقة مشكلة إدارة وتحسين نظام الإمداد بالطاقة لدى إتصالات الجزائر أثناء تعطل أو انقطاع مصدر الكهرباء الرئيسي الآتي من طرف سونالغاز.

حاليا، أثناء عطل أو انقطاع التيار الكهربائي الرئيسي يتم تغذية الشبكة بواسطة مولد طاقة مستهلك للوقود. الهدف من هذا البحث هو النظر في الاستخدام الأنسب للبطاريات من ناحية، وتحسين وقت استجابة النظام واستهلاك الوقود من جهة أخرى. قادنا التفكير الأول للأسف إلى عدم إيجاد حلول باستخدامنا للبطاريات كمولد رئيسي للطاقة لتغذية موقع بحجم (5 كيلواط) نظرا إلى العدد الكبير للبطاريات وتكلفته العالية جدا. فظلنا اقترح حل لإدارة وتحسين بدابة التشغيل للمولد من خلال تنفيذ خوارزميات بواسطة لوحة أردوينو.

---

كلمات مفتاحية : بطاريات، شواحن البطاريات، تحسين الأنظمة، أردوينو.

---

# Abstract

This document deals with the problem of managing and optimizing the power supply system at EMRCT Algeria Telecom during a power outage or outage.

Currently, during a power outage or outage, the network is supplied by a generator, which consumes fuel. The wish is to consider the use of batteries on the one hand, improve the response time of the system and on the other hand save fuel, a source of pollution and expensive. A first estimate unfortunately led us not to consider this solution because of the too much power consumed by the site (5kW) which would lead to a prohibitive number of batteries and to a much too high cost. We preferred to propose a solution for the management of the starting of the generator set by implementing a simple algorithm on an Arduino board.

---

**Keywords :** Power system optimization, Management and optimization problem, Arduino board, Operating cycle.

---

# Résumé

Ce document traite la problématique de gestion et d'optimisation du système d'alimentation à l'EMRCT Algérie Télécom lors d'une panne ou d'une coupure du secteur.

Actuellement, lors d'une panne ou d'une coupure d'électricité, le réseau est alimenté par un groupe électrogène, consommateur de carburant. Le souhait est d'envisager l'utilisation de batteries pour d'une part, améliorer le temps de réponse du système et d'autre part économiser le carburant, source de pollution et onéreux. Une première estimation nous a malheureusement amené à ne pas envisager cette solution en raison de la trop grande puissance consommée par le site (5kW) qui conduirait à un nombre de batteries rédhibitoire et à un coût beaucoup trop élevé. Nous avons préféré proposer une solution pour la gestion du démarrage du groupe électrogène en implantant un algorithme simple sur une carte Arduino.

---

**Mots clés :** Batteries, Chargeurs de batteries, Optimisation de systèmes, Arduino.

---

# Dédicace

“

*Je dédie ce travail à ...*

*En premier lieu à mes parents, sans lesquels je n'y serai  
jamais ici, qui me sont d'un grand soutien par leurs  
sacrifices et leurs encouragements.*

*Que Dieu me les garde*

*À mon cher frère, mes deux sœurs qui m'ont soutenu  
durant tout mon cursus scolaire. Les mots ne suffisent  
guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection  
que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous  
mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

*À mon Binôme et Ami Djamel*

*À tous mes chers amis*

*À tous ceux qui me sont chers, à vous tous*

*Merci.*

”

**- Cherif**

# Dédicace

“

*À ma Mère **Khadidja AMAR BELHADJ**, paix sur son âme, du peu que l'ai connu dans ma vie mais qu'elle a très bien inculqué en moi l'amour de la pure souche de l'apprentissage,*

*À mon père, mes deux sœurs et ma belle-mère, qui m'ont soutenu durant tout mon cursus scolaire et surtout dans les moments les plus difficiles rencontrés pendant toutes ces années d'études. Aussi de m'avoir poussé vers l'avant pour chercher et apprendre,*

*À toute ma famille, de m'avoir félicité durant mes succès et m'encourager dans les moments un peu difficiles et de me rappeler les mots de ma mère et de m'inciter à toujours apprendre,*

*À tous ceux qui me sont chers, à vous tous*

*Merci.*

”

*- Djamal Boumediene*

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaire pour que je puisse mener ce travail à son terme.

Nous tenons à remercier plus particulièrement notre encadrant **M. Mourad HADDADI**, pour l'aide compétente qu'il nous'a apporté, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique nous a été très précieux pour structurer et améliorer la qualité du travail effectué.

Nous tenons à adresser également nos sincères remerciements à **M. Chakib HAMMAS**, CHS Développement RH & Formation pour nous offrir l'opportunité d'intégrer son équipe au sein d'*Algérie Télécom* ainsi que pour sa confiance et son soutien.

Nous tenons aussi à remercier notre promoteur **M. Sidahmed MEHIAOUI**, le Chef de Subdivision Développement Réseaux Core dans l'Etablissement Maintenance Réseaux Core Tlemcen (EMRCT) pour son aide immense, la qualité de son suivie ainsi que pour tous les conseils et les informations qu'il nous a prodigués avec un degré de patience et de professionnalisme sans égal.

Un très grand remerciement et une très grande reconnaissance sont destinés à **Mme. Hessaine et Mme. Soraya BAKHTI** de nous avoir aidé durant le stage de fin d'études chez Algérie Télécom.

Nous remercions également **M. Nouredine AIT SALEM**, **Mme. Soraya BAKHTI**, **Mme. Hessaine**, **M. BAHLOUL**, **M. Bachir MESSAOUDENE**, **M. Ahmed BAGHLI** ainsi que tous les ingénieurs au sein de l'EMRC Tlemcen pour leurs aides précieuses, leurs encouragements et pour avoir rendu notre stage à Algérie Télécom une expérience très enrichissante.

---

Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de nos sincères remerciements pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Nous souhaitons aussi remercier l'équipe pédagogique et administrative de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs efforts dans le but de nous offrir une excellente formation.

Pour finir, nous souhaitons remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Table des matières

<b>2</b>	ملخص
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>Dédicace</b>	<b>5</b>
<b>Dédicace</b>	<b>6</b>
<b>Remerciements</b>	<b>7</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>16</b>
<b>1 Batteries</b>	<b>20</b>
1.1 Introduction	21
1.2 Historique	22
1.3 Caractéristiques principales des batteries	27
1.3.1 Tension (Volt)	27
1.3.2 Capacité (Ampère heure)	27
1.3.3 Quantité d'électricité emmagasinée (kilo Watt heure)	27
1.3.4 Durée de vie moyenne d'une batterie	27
1.3.5 Cycles de chargement/déchargement	28
1.4 Types de batteries	29
1.4.1 Au plomb	29
1.4.2 Nickel-Cadmium	36
1.4.3 Nickel-Métal Hydrures	36
1.4.4 Lithium-ion	37
1.4.5 Tout solide	38
1.5 Fonctionnement des batteries	39
1.6 Rendement	40
1.6.1 Batteries au Plomb	40

1.6.2	Batteries au Lithium ion . . . . .	40
1.7	Facteurs de dégradation des batteries . . . . .	41
1.7.1	Influence de la température . . . . .	41
1.7.2	Effets de décharge profonde . . . . .	42
1.8	Conclusion . . . . .	43
<b>2</b>	<b>Groupes Electrogènes . . . . .</b>	<b>44</b>
2.1	Introduction . . . . .	45
2.2	Groupe Electrogène . . . . .	46
2.3	Fonctionnement . . . . .	47
2.4	Rendement . . . . .	48
2.5	Armoire de commande . . . . .	49
2.6	Domaine d'application . . . . .	50
2.7	Aspect environnemental des groupes électrogènes . . . . .	51
2.8	Conclusion . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Composants utilisés . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	54
3.2	Arduino . . . . .	55
3.2.1	Définition . . . . .	55
3.2.2	Utilisation . . . . .	55
3.2.3	Fonctionnement . . . . .	55
3.2.4	Composition de la carte Arduino UNO . . . . .	57
3.2.5	Avantages . . . . .	59
3.2.6	Inconvénients . . . . .	59
3.3	Transformateur . . . . .	60
3.4	Redresseur . . . . .	61
3.4.1	Définition . . . . .	61
3.4.2	Fonctionnement d'un redresseur à point milieu . . . . .	61
3.5	Régulateur de tension LM338 . . . . .	62
3.6	Régulateurs fixes LM7812 . . . . .	64
3.7	Afficheur . . . . .	65
3.8	Conclusion . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Conception d'un système de gestion du démarrage du groupe électrogène . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1	Introduction . . . . .	68
4.2	Algorithme de détection du niveau de charge des batteries . . . . .	69

4.3	Circuit d'un chargeur de batterie contrôlé . . . . .	70
4.4	Principe de fonctionnement du chargeur de batteries . . . . .	71
4.4.1	Circuit de chargeur de batterie . . . . .	71
4.4.2	Abaisseur de tension et unité de redressement . . . . .	75
4.4.3	Unité d'affichage . . . . .	76
4.4.4	Etat des batteries . . . . .	77
4.5	Implémentation du système de charge des batteries contrôlé par Arduino dans le central d'alimentation . . . . .	78
4.6	Etude technico-financière . . . . .	81
4.6.1	Liebert GTX5 de VERTIV . . . . .	81
4.6.2	Fonctionnalités du système d'alimentation sans cou- pure et modèles disponibles . . . . .	82
4.6.3	Modes de fonctionnement du système d'alimentation sans coupure . . . . .	82
4.7	Proposition du système hybride . . . . .	84
4.8	Conclusion . . . . .	85
	<b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>90</b>

# Table des figures

1	Présentation de la problématique . . . . .	18
1.1	L'évolution des batteries . . . . .	22
1.2	Gaston Planté . . . . .	22
1.3	Schéma d'une batterie Nickel-Métal Hydrure ( <b>Ni-MH</b> ) . . .	23
1.4	Principe de base de fonctionnement d'une batterie chimique	25
1.5	Composants d'une batterie au plomb . . . . .	30
1.6	Schéma synoptique d'une batterie au plomb . . . . .	31
1.7	Constituants d'une batterie au plomb ouverte . . . . .	32
1.8	Constituants d'une batterie au plomb fermée . . . . .	33
1.9	Constituants d'une batterie au plomb AGM . . . . .	34
1.10	Schéma explicatif du principe de fonctionnement de la batterie	39
1.11	Profondeur de décharge en fonction de nombre de cycles . .	42
2.1	Composants d'un groupe électrogène . . . . .	46
2.2	Armoire électrique d'un groupe électrogène . . . . .	49
3.1	Composition de la carte UNO . . . . .	57
3.2	Entrées sorties numériques . . . . .	58
3.3	Les entrées analogiques . . . . .	58
3.4	Transformateur avec deux secondaire de 15V . . . . .	60
3.5	Redressement double alternance . . . . .	61
3.6	Régulateur LM338 . . . . .	62
3.7	Afficheur LCD 2x16 alphanumérique . . . . .	65
4.1	Circuit de chargeur de batterie contrôlé par Arduino . . . .	70
4.2	Régulateur de tension réglable avec redresseur . . . . .	71
4.3	Circuit régulateur de tension fixe . . . . .	74
4.4	Unité d'affichage . . . . .	76
4.5	Circuit d'état des batteries . . . . .	77
4.6	Schéma synoptique . . . . .	78
4.7	Liebert GTX5, VERTIV . . . . .	81

# Liste des tableaux

1.1	Les caractéristiques de différents types de batteries . . . . .	24
3.1	Caractéristiques du régulateur de tension LM 338 . . . . .	63
3.2	Caractéristiques du régulateur de tension LM 7218 . . . . .	64

# Liste des algorithmes

1	Langage C . . . . .	56
2	Algorithme implémenté sur la carte Arduino . . . . .	80

# Liste des abbréviations

<b>SONELGAZ</b>	<i>société nationale d'électricité et du gaz</i>
<b>ENP</b>	<i>école nationale polytechnique</i>
<b>GE</b>	<i>groupe électrogène</i>
<b>PFE</b>	<i>projet de fin d'étude</i>
<b>EMRC</b>	<i>établissement de maintenance réseaux cores</i>
<b>Li-ion</b>	<i>lithium-ion</i>
<b>FEM</b>	<i>force électromotrice</i>
<b>ASI</b>	<i>Alimentation Sans Interruption</i>
<b>GPL</b>	<i>Gaz de Pétrole liquéfié</i>
<b>CC</b>	<i>Courant Constant</i>
<b>DC</b>	<i>Tension Constante</i>
<b>RFID</b>	<i>Radio-frequency identification</i>

# Introduction générale

## Contexte

L'optimisation est un outil majeur dans un milieu professionnel qui propose des services publics et l'automatisation en fait partie. Les systèmes d'alimentation électrique de secours en cas d'une panne ou d'une coupure d'électricité sont indispensables pour la continuité des services fournis par les entreprises.

## Problématique

Au sein de l'établissement Algérie Télécom, l'alimentation électrique du réseau est assurée par SONELGAZ 24h/24 et 7j/7. En cas de coupure d'électricité pour des raisons techniques, le réseau d'Algérie Télécom devra continuer à fonctionner. Pour cela des batteries et des groupes électrogènes Diésel sont installés. Le cœur même de la problématique est d'optimiser et d'automatiser le processus de coexistence des batteries et des GEs. Le système que nous avons à concevoir devrait permettre d'une façon automatique d'alimenter le réseau en utilisant les batteries jusqu'à l'approche de l'épuisement de ces dernières, puis les GEs se déclenchent pour prendre le relais et alimenter le réseau et recharger en même temps les batteries. Lorsque les batteries sont rechargées, les GEs devront s'arrêter et le réseau continuera de fonctionner via les batteries et ainsi de suite jusqu'au retour de l'alimentation de SONELGAZ. Ceci permettrait une optimisation de l'utilisation des batteries et des GEs en cas de coupure d'électricité et permettrait d'économiser le gasoil utilisé pour le fonctionnement du GE. Malheureusement, la consommation du site de télécommunications qui s'élève à 5 kW nécessiterait un trop grand nombre de batteries pour n'assurer que quelques minutes de fonctionnement. Une opération qui n'est donc pas

rentable. Nous avons alors proposé d'optimiser le fonctionnement du GE par une bonne gestion de ses batteries de démarrage.

### **Le cahier des charges**

#### **Les batteries**

- Nombre de batteries : 4 de 12 V
- Capacité des batteries : 100 Ah
- Type de batteries : au Plomb (type VRLA flooded)

#### **Groupe électrogène**

- Puissance fournie : 15 kW
- Consommation en carburant : 4.2 l/h

#### **Les caractéristiques du site de télécommunication**

- Puissance consommée : 5 kW
- Temps estimé de coupure : 2 heures

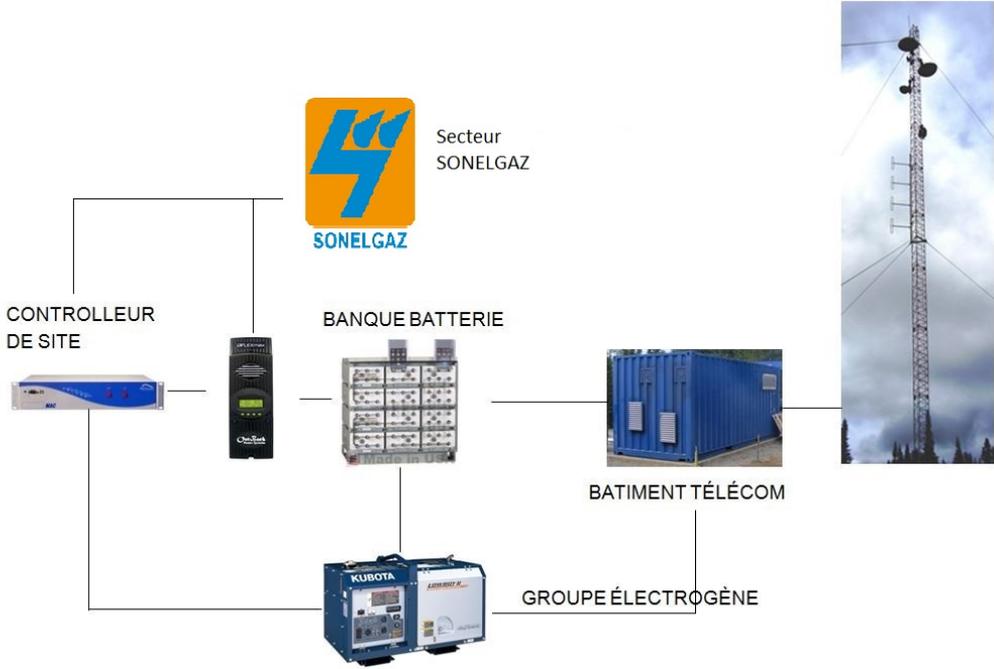


FIG. 1 : Présentation de la problématique

# Objectifs

Concevoir un système qui permet de structurer les différentes balises de ce processus à l'aide d'un microcontrôleur Arduino et permettre de suivre en temps réel le fonctionnement du système par une interface. Ainsi de proposer d'autres solutions énergétiques qui peuvent être installés pour remplacer l'énergie fossile pour des raisons économiques et écologiques et même de sûreté.

# Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en six chapitres :

Le premier chapitre "**Batteries**" Ce chapitre est une étude générale sur les différents accumulateurs (batteries) qui décrit leurs caractéristiques qui permettront leur dimensionnement dans un milieu industriel, leurs types selon les matériaux de fabrication afin de définir l'utilisation, leurs rendements afin de définir leurs performances.

Le deuxième chapitre "**Groupes électrogènes**" Ce chapitre est une étude du principe de fonctionnement des groupes électrogènes afin de regrouper tous les paramètres qui entrent en jeu lors d'une coupure d'électricité de SONELGAZ.

Le troisième chapitre "**Composants électronique**" Ce chapitre est consacré à la carte Arduino et ses composants ainsi que son fonctionnement afin de pouvoir l'implémenter dans notre système d'optimisation. Les cartes Arduino sont programmées à base du langage C++ et elles sont un coût abordable, c'est ce qui explique le choix de réaliser notre projet sur cette base.

Le quatrième chapitre "**Conception d'un système de gestion du démarrage du groupe électrogène**" Ce chapitre est consacré à la conception du système automatisé à base d'une carte Arduino afin de résoudre le problème de ce projet de fin d'études avec un principe de monitoring pour visualiser en temps réel son fonctionnement ainsi que la maintenance en cas d'une panne ou une défaillance.

# Chapitre 1

## Batteries

### 1.1 Introduction

Le stockage de l'énergie est devenu un enjeu mondial et un défi majeur. En effet, depuis les années 1980, la consommation mondiale annuelle de pétrole est devenue supérieure aux quantités des nouveaux gisements découverts. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres sources d'énergies, comme les énergies renouvelables, et de développer des technologies pour le stockage de ces énergies afin de mieux gérer ces ressources. Les efforts pour réduire la consommation de pétrole se sont portés sur les transports, notamment via le développement de véhicules électriques et de batteries. Si les batteries Lithium-ion (Li-ion) sont maintenant répandues pour les applications portables comme les ordinateurs et les téléphones mobiles, il y a néanmoins des limitations technologiques pour les applications de grande échelle aux véhicules électriques et au stockage de surplus de production d'énergie. De plus, les coûts de certains éléments comme le cobalt (un des constituants utilisé comme matrice support dans les batteries) et le lithium sont élevés et le recyclage des batteries Li-ion pose de nombreux problèmes techniques mais aussi écologiques à cause de la toxicité des métaux qu'elles contiennent. Les procédés actuels ne sont pas économiquement intéressants pour les industriels du secteur de l'énergie et seulement 50% des batteries Li-ion sont aujourd'hui recyclées comme stipulé par la directive européenne 2006/66/CE. Depuis l'invention de l'énergie électrique les ingénieurs ont toujours été subjugués par les moyens de stockage de cette énergie, où il y a eu plusieurs recherches qui vont dans ce sens. L'invention des batteries a révolutionné l'usage de l'électricité dans le monde et jusqu'aujourd'hui les chercheurs ainsi que les ingénieurs cherchent toujours à les améliorer avec les différents types qui existent de batteries.

## 1.2 Historique

Les premiers systèmes électrochimiques sont les piles ou systèmes primaires non rechargeables tel que la pile Volta, créée en 1801. Il existe aujourd'hui une grande diversité de piles. Dans la suite de cet article, nous allons nous focaliser sur les systèmes rechargeables uniquement.

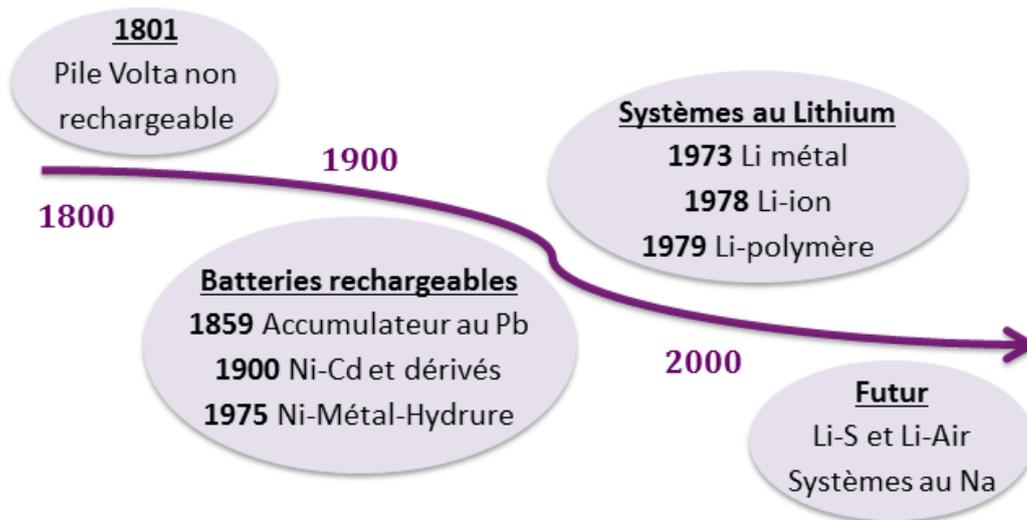


FIG. 1.1 : L'évolution des batteries

Le premier accumulateur, ou batterie par abus de langage, est l'accumulateur au plomb, mis au point par Gaston Planté, chimiste français, en 1859.



FIG. 1.2 : Gaston Planté

Cette batterie a pour principal avantage son coût peu élevé ; néanmoins sa faible énergie spécifique (20 à 35 Wh/kg) et sa faible cyclabilité (200 à 300 cycles) (Tableau 1) ne permettent pas beaucoup d'autres applications qu'un usage dans les véhicules thermiques traditionnels [2,4]. Dans les années 1900, les batteries de Nickel-Cadmium (Ni-Cd) sont développées, et plusieurs dérivés apparaissent comme les batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn), Nickel-Fer (Ni-Fe) et Nickel-Hydrogène (Ni-H<sub>2</sub>), entre autres. Cette génération de batteries commercialisées à partir des années 1940 présente une bien meilleure cyclabilité et une énergie spécifique supérieure en comparaison des batteries au Plomb [2]. (Tableau 1) Ces batteries présentent la même cathode d'insertion en nickel et le même électrolyte aqueux (KOH), seule l'anode varie avec les différents types de batteries. En 1988, la batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH), toujours dérivée de la batterie Ni-Cd, pose les bases des batteries Li-ion actuelles en étant constituée de deux électrodes d'insertions. En effet, jusqu'à l'invention de cette batterie il y avait toujours « consommation » d'une des électrodes au cours du fonctionnement de la batterie (par exemple consommation de l'anode en cadmium dans une batterie Ni-Cd, lors de la décharge). La cathode reste la même par rapport aux modèles Ni-Cd, en revanche l'anode est maintenant composée d'un alliage M ayant la capacité d'absorber et de désorber l'hydrogène. Cet alliage est généralement un intermétallique de type LaNi<sub>5</sub> ou de type TiNi.

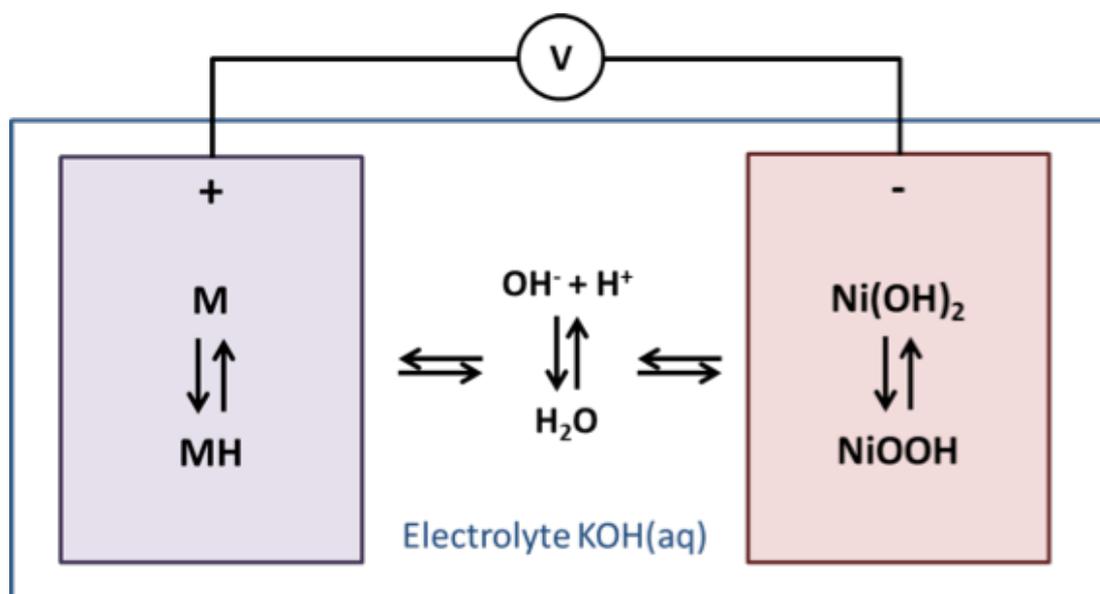


FIG. 1.3 : Schéma d'une batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Dans une batterie Ni-MH, les réactions aux électrodes sont, lors de la décharge :

- A l'anode :  $x\text{OH}^- + \text{MH}_x = x\text{H}_2\text{O} + \text{M} + x\text{e}^-$
- A la cathode :  $\text{NiO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- = \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$

L'équation de la réaction globale de fonctionnement de la batterie est donc, lors de la décharge :  $x\text{NiO}(\text{OH}) + \text{MH}_x = \text{M} + x\text{Ni}(\text{OH})_2$ , qui ne consomme pas de métal (ni M, ni Ni). Cette technologie est encore commercialisée notamment sous la forme d'accumulateur « bâtons ». Malgré le coût élevé des matériaux constitutifs de l'anode et une énergie spécifique relativement faible (80 Wh/kg), ce type de batteries sert pour la première voiture hybride (Toyota Prius), commercialisée en 1997.

Type	Energie spécifique en Wh/kg	Capacité spécifique en mAh/g	Force électromotrice en V	Cyclabilité
Batterie au Plomb	20 - 35	9.5	2	200 - 300
Ni-Cd et dérivés (Ni-Fe ; Ni-Zn)	50 - 80	41.7	1.3	> 1000
Nickel-Métal Hydrure	80	62.5	1.3	600
Li-Métal	200	100	3.5	400 - 500
Li-polymère	120	33.3	3.7	300 - 600
Li-ion	150 - 250	60 - 300	3.6	500 - 2000

TAB. 1.1 : Les caractéristiques de différents types de batteries

Avec le développement des batteries à électrode d'intercalation, l'idée d'utiliser du lithium, fait son apparition et permet d'augmenter la fem des batteries. Cela donne naissance dans les années 1970 aux premières batteries lithium métal. Ces batteries possèdent une anode de lithium métallique, une cathode avec un composé d'insertion tel que MoS<sub>2</sub> et un électrolyte organique contenant un sel de lithium. Le remplacement de l'électrolyte aqueux KOH par une solution organique a été nécessaire car le lithium est un élément qui s'hydrolyse facilement en présence d'eau. Lors de la décharge, les réactions se produisant aux électrodes sont :

- À l'anode :  $\text{Li}(s) = \text{Li}^+ + e^-$  (oxydation du lithium)
- À la cathode :  $x\text{Li}^+ + \text{MoS}_2(s) + xe^- = \text{MoS}_2\text{Li}_x(s)$  (réduction des ions  $\text{Li}^+$  en atomes Li avec insertion dans le composé d'insertion  $\text{MoS}_2$ )

L'énergie spécifique de ces batteries est plus que doublée par rapport aux modèles précédents (Tableau 1). Néanmoins la production et la vente sont arrêtées à la fin des années 1980 pour des problèmes de sécurité rencontrés lors de leur utilisation. En effet, lors de la charge de la batterie, la réduction d'ions  $\text{Li}^+$  en Li a lieu au niveau de l'électrode de lithium ; cette réduction pouvait occasionner la formation de dendrites à partir de l'anode en lithium au cours de la charge de la batterie (sorte de filaments de lithium, voir Figure 5). Ces dendrites finissaient par toucher la cathode, ce qui provoquait un court-circuit et parfois même l'explosion de la batterie comme cela s'est produit au Japon au sein de téléphones.

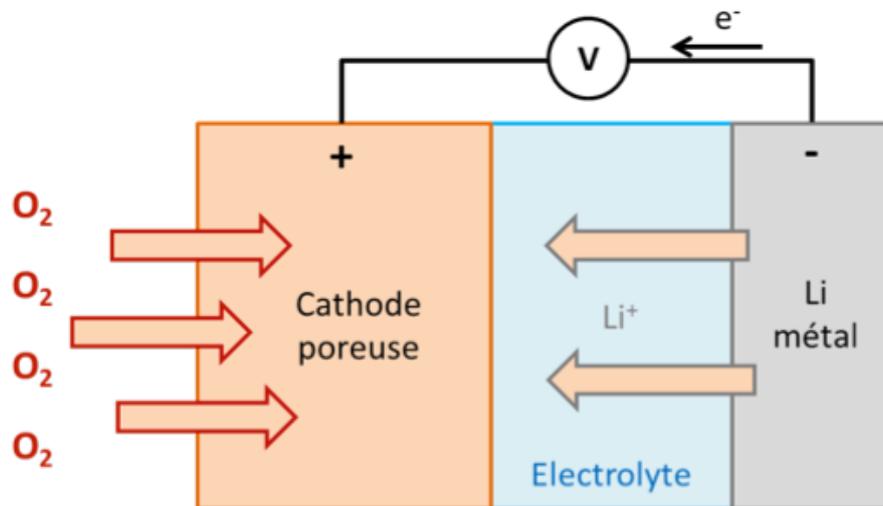


FIG. 1.4 : Principe de base de fonctionnement d'une batterie chimique

Suite à cela, la technologie au lithium ne fût pas abandonnée, bien au contraire ; deux solutions principales pour la sécurité furent développées : la technologie lithium-polymère (Li-Po) et la technologie Li-ion. Les batteries Li-Po sont pratiquement identiques aux batteries lithium métal : en effet, les électrodes ne changent pas et l'anode en métal est conservée. L'électrolyte liquide est quant à lui remplacé par un électrolyte polymère qui limite fortement la formation de dendrites mais qui a le désavantage de

limiter la mobilité des ions lithium d'une électrode à l'autre et donc l'énergie spécifique de la batterie. La technologie Li-ion, la plus prometteuse en termes d'énergie spécifique et de cyclabilité, sera quant à elle détaillée dans le deuxième volet de cet article. La plupart des modèles sur le marché actuellement et en cours de développement peuvent être rattachés à la technologie Li-ion, cependant de nombreux problèmes et limitations empêchent encore des applications à plus large échelle telles que les applications réseaux ou les véhicules.

## 1.3 Caractéristiques principales des batteries

### 1.3.1 Tension (Volt)

Valeur exprimée en volts et dont le vrai nom est « différence de potentiel » : c'est la force potentielle du courant électrique. Dans le cas des batteries, on la mesure entre les deux bornes + et -. La tension est l'équivalent de la pression de l'eau dans un tuyau, alors que le courant serait le débit. Ce que l'on appelle « tension nominale » est la tension moyenne en phase de décharge et pour les batteries de démarrage de véhicules particuliers, elle est de 12V.

### 1.3.2 Capacité (Ampère heure)

La capacité représente la quantité de courant présent dans la batterie, mais pas la quantité d'énergie. Pour connaître cette quantité d'énergie (qui s'exprime en Watt-heure (Wh)), il faut multiplier la capacité par la tension de la batterie :  $Ah * V = Wh$ . Il est important de ne pas confondre quantité de courant et quantité d'énergie. Par exemple, si on branche deux batteries 12V 100Ah en série on obtient l'équivalent d'une batterie de 100Ah. Alors que la quantité d'énergie est doublée.

### 1.3.3 Quantité d'électricité emmagasinée (kilo Watt heure)

La tension x la capacité = la quantité d'électricité emmagasinée en kWh. La décharge ne doit pas dépasser 10 à 15% de sa capacité sous peine de dégradation rapide. Le courant de décharge ne doit pas dépasser le dixième de sa capacité. Pour une batterie de 100Ah, c'est un courant de 10A, donc une consommation de  $12V * 10A = 120W$ . L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est déchargée.

### 1.3.4 Durée de vie moyenne d'une batterie

La durée de vie d'une batterie varie selon sa capacité à tenir la charge et à être rechargée, par exemple la durée de vie d'une batterie de voiture est en moyenne de 4 à 5 ans. Cela ne signifie pas pour autant qu'on doit

changer systématiquement la batterie de voiture tous les 4 ou 5 ans. Il convient d'attendre de voir les premiers signes de fatigue de la batterie avant d'envisager son remplacement et elle n'est plus utilisable dès qu'elle ne se recharge plus. Si au bout de 4 ou 5 ans, vous ne constatez toujours pas de manque d'énergie au moment du démarrage, il n'est pas nécessaire de changer la batterie. Sachez également que la durée de vie de la batterie dépend essentiellement de son état à l'achat. Si elle est utilisée rapidement à sa sortie des usines, sa performance sera maximale. Au contraire, si elle a été longtemps stockée dans un magasin, ses performances déclineront. C'est aussi pour cette raison que la batterie d'origine du véhicule dure souvent plus longtemps que la batterie de rechange. La première est en effet placée directement après fabrication.

De nombreux facteurs peuvent abimer la batterie et accéléré sont processus de vieillissement comme l'humidité, la température, leur Conditions d'utilisation ou bien les conditions de l'environnement de ces batteries. Parmi ces problèmes nous trouvons un qui est très particulier et très fréquent et qui touche tous les types de batteries qui est l'effet de décharges trop profond.

### 1.3.5 Cycles de chargement/déchargement

Un cycle de recharge est tout simplement qu'une recharge complète de la batterie du véhicule, par contre si la batterie est à moitié chargée et que vous la rechargez complètement, cela ne correspond pas à un cycle de recharge mais juste à une demie charge.

## 1.4 Types de batteries

De nombreuses sociétés s'intéressent aux techniques de stockage de l'énergie et essaient de proposer des technologies destinées à abaisser le prix du stockage. Pour le photo-voltaïque, la batterie au plomb restera un composant incontournable pour encore des décennies.

### 1.4.1 Au plomb

#### Les composants d'une batterie au Plomb

Les batteries au Plomb possèdent Cinq éléments essentiels qui sont bien représentés dans la Figure.

- **Grille**

Comme les électrodes positives et négatives sont fabriquées dans des matériaux mous, elles ont besoin d'un soutien mécanique fourni par une grille en alliage de Plomb, qui conduit aussi l'électricité des électrodes vers la charge externe.

- **Electrode**

Elles sont initialement fabriquées à partir d'un mélange d'oxyde de Plomb et de sulfate de Plomb. Il est converti en dioxyde de Plomb dans la plaque positive et en Plomb poreux dans la plaque négative lors de la première charge de la batterie. L'électrode négative contient aussi des petites quantités d'additifs afin d'offrir à la batterie une bonne performance de décharge à basse températures et d'améliorer le démarrage.

- **Electrolyte**

C'est de l'acide sulfurique dilué. Il agit en tant que conducteur pour faire circuler les ions électriques entre les plaques positives et négatives lorsque la batterie est en cours de charge ou de décharge. L'acide participe également à la décharge étant donné que les ions sulfates réagissent chimiquement avec les électrodes pour produire du sulfate de Plomb.

- **Séparateur**

C'est un isolant placé entre les plaques positives et négatives qui les

empêche de se toucher. Il doit être micro-poreux et doté de très petits trous afin de permettre aux ions de circuler dans le séparateur d'une plaque à une autre. Et aussi pouvoir résister aux températures élevées et aux conditions d'oxydation fortement acides qui se produisent dans une batterie.

- **Conteneur et le couvercle**

Ils sont généralement fabriqués en Polypropylène, qui est un plastique léger mais solide. Contrairement à certains plastiques, il ne devient pas friable lorsqu'il est froid, et peut donc résister aux coups lors de sa manipulation. Il n'est pas attaqué par l'acide et peut aussi supporter les fluides (pétrole, diesel, liquide freinage, antigel) que l'on trouve généralement dans un véhicule.

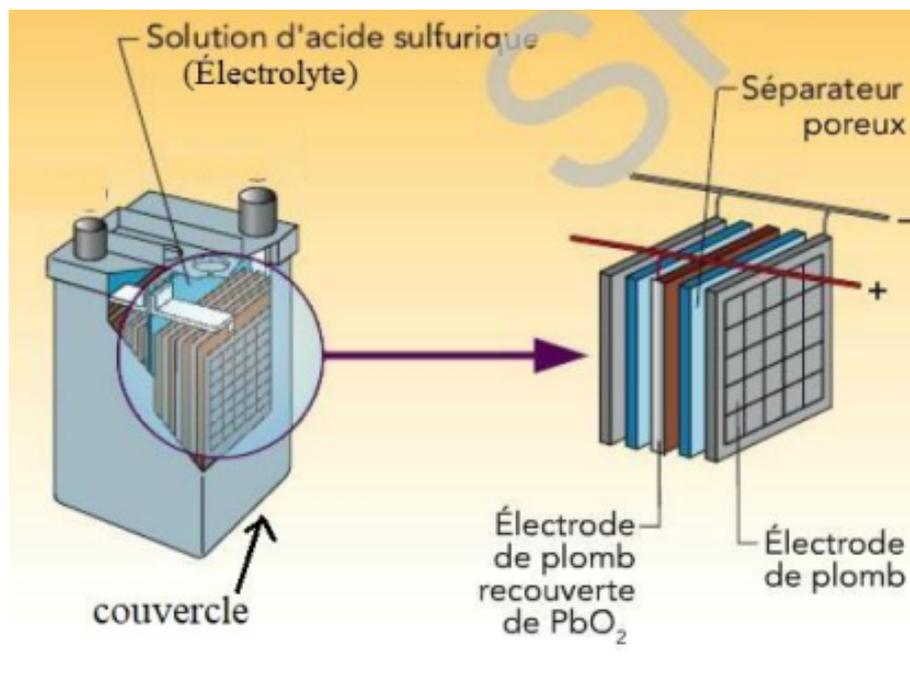


FIG. 1.5 : Composants d'une batterie au plomb

## Fonctionnement d'une batterie au plomb

Une batterie stocke de l'électricité pour que celle-ci puisse être utilisée à un moment ultérieur, et pour mieux comprendre il est nécessaire de bien assimiler le principe électrochimique qui est illustré dans la figure ci-dessous.

Lors d'une décharge de l'accumulateur, la réaction d'oxydation qui se produit à l'anode libère un ou des électrons dans le circuit extérieur. Ces électrons circulent alors jusqu'à la cathode où ils participent à la réaction de réduction (gain d'un ou plusieurs électrons). Simultanément, les anions et les cations migrent dans la solution électrolytique entre les deux électrodes afin de préserver l'équilibre des charges. Lorsque l'anode est complètement oxydée (ou la cathode totalement réduite), ces réactions s'achèvent et la batterie est déchargée. Quant à la charge, elle est réalisée en appliquant un courant électrique aux électrodes afin d'engendrer les réactions inverses.

En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode est la borne positive. Par contre, en phase de charge l'électrode négative est la cathode et la positive c'est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens.

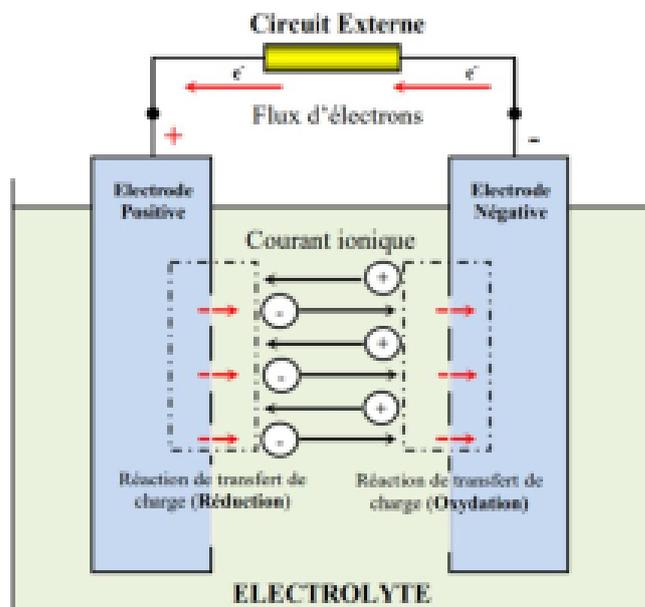


FIG. 1.6 : Schéma synoptique d'une batterie au plomb

## Technologies des batteries au Plomb

On y trouve deux sortes :

- **Batteries au plomb ouvertes** (FLA : Flooded Lead Acid) (électrolyte liquide) sont des batteries au Plomb équipées des bouchons permettant le rajout d'eau distillée. Elles nécessitent un entretien régulier, et craignent le froid (gèle de l'électrolyte). Elles sont néanmoins plus économiques. Dans ces batteries, les fortes températures engen-

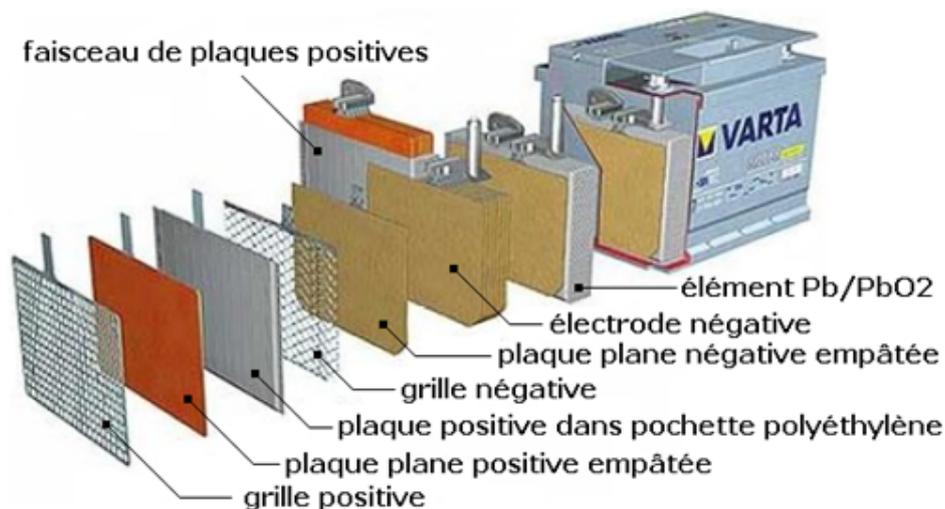


FIG. 1.7 : Constituants d'une batterie au plomb ouverte

drées lors de la charge évaporent en partie l'électrolyte mettant la batterie en danger (c'est la raison pour laquelle il est conseillé de toujours surveiller la température des batteries –les chargeurs disposent maintenant bien souvent d'une sonde de température permettant d'adapter l'intensité de la charge–). Il est donc indispensable de contrôler et remettre à niveau l'électrolyte périodiquement. De plus, la présence de liquide à l'intérieur interdit la position couchée à ces batteries (elles ne sont pas étanches). Ce type de batterie dispose du meilleur rendement capacité/poids/prix de toutes les batteries au plomb. En effet, les plaques de plomb sont fines et de grande surface.

### Utilisation des batteries plomb ouvertes

Le principal avantage de ces batteries est de pouvoir fournir une forte intensité sur une courte période, ce qui est par exemple idéal pour

actionner un démarreur de moteur thermique. En revanche, la faible épaisseur des plaques de plomb les rendent impropres aux longues décharges prolongées (utilisation batterie de service déconseillée).

- **Batteries au plomb fermées** : (SLA : Sealed Lead Acid) :

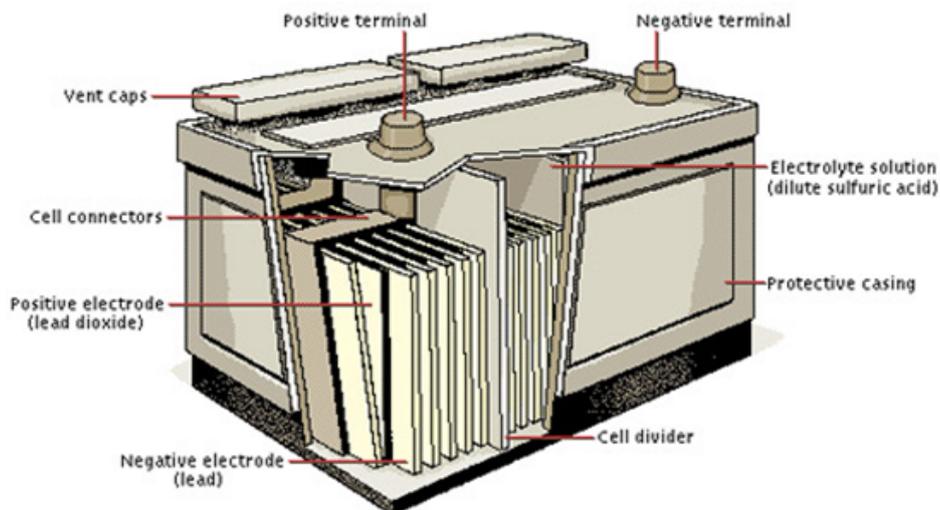


FIG. 1.8 : Constituants d'une batterie au plomb fermée

Totalement hermétiques, elles recombinent le gaz pour empêcher l'évaporation de celui-ci. Elles ne nécessitent aucun entretien et ont une bonne résistance au froid. Les batteries plomb fermées sont munies de plaques fines dans l'alliage desquelles l'antimoine a été remplacé par du calcium le tout baignant dans une solution électrolytique d'acide sulfurique et d'eau. La présence de calcium apporte l'avantage de (presque) supprimer la consommation d'eau rendant inutile la présence de bouchons de remplissage. Elles ne sont pas réellement étanches comme les batteries Gel, mais le demeurent sous  $55^\circ$  d'inclinaison. Elles sont dites "sans entretien" car il n'est pas nécessaire de faire l'appoint d'électrolyte au long de la durée de vie de ces batteries. C'est un euphémisme, car c'est justement le manque d'électrolyte qui va abréger leur durée de vie... Le faible poids de l'alliage plomb calcium autorise l'emploi de bandes perforées d'où l'appellation parfois rencontrée de "batteries à plaques perforées".

### Utilisation des batteries plomb fermées :

Elles sont assez légères et font de bonnes batteries de démarrage mais ne supportent pas les décharges profondes qui les détruisent assez rapidement. Usage déconseillé en servitude.

- **Batteries au AGM :**

Le sigle “AGM” est l’acronyme de Absorbed Glass Matt. L’électro-

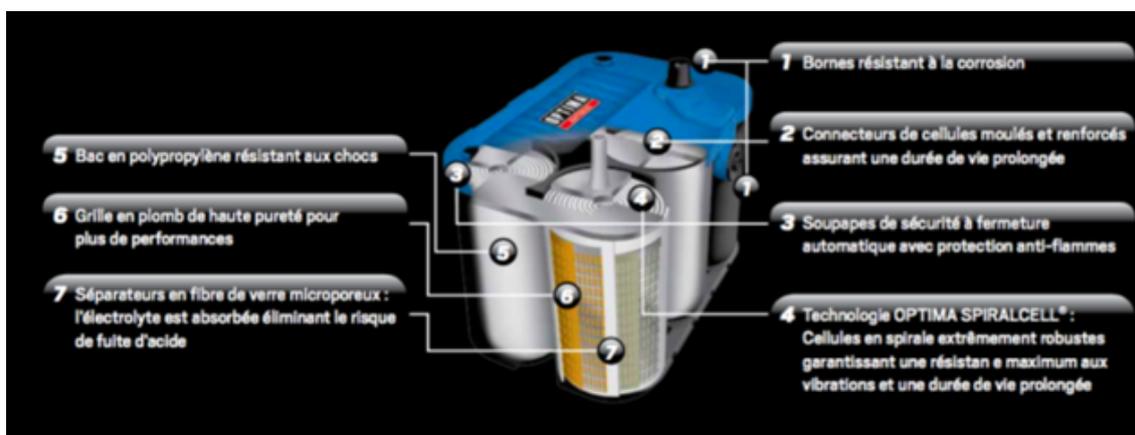


FIG. 1.9 : Constituants d’une batterie au plomb AGM

lyte dans lequel baigne les plaques en plomb (+) et oxyde de plomb (-) est “stabilisé” à l’intérieur de sortes d’éponges en fibre de verre (le glass matt bien connu des réparateurs de coques en fibre de verre). Les plaques sont fines ou épaisses suivant les cas. Les plaques forment avec les éponges une sorte de millefeuille compact favorisant la circulation des ions et la solidité de l’engin. L’électrolyte étant totalement absorbé par la fibre de verre, les réactions chimiques sont différentes de celles des batteries plomb liquide. Ici, les gaz issus du processus se recombinent dans les éponges évitant ainsi toute émission gazeuse. Pour la même raison, il n’est jamais nécessaire de revoir le niveau d’électrolyte, celui-ci, présent à l’état absorbé, ne variant pas. Du coup, ces batteries sont totalement étanches et peuvent être montées dans toutes les positions. Enfin, sur le plan de la construction, les plaques sont très serrées entre elles, comprimées par l’éponge en fibre de verre, générant une architecture plus “dense” autorisant un cycle de charge plus rapide que d’autres batteries plomb acide.

### Utilisation des batteries au plomb AGM :

Décharges lentes et profondes, idéales pour les batteries de service avec les Deep cycle. AGM Spiralées capables de forte décharges courtes idéales pour des batteries de démarrage ou les propulseurs d'étraves. Couchées, elles ne déversent pas d'acide et peuvent maintenir –suivant leur position– le système électrique d'un bateau en service, même après un chavirage.

Dans ces batteries, l'électrolyte est stocké sous forme de gel de silice. Les plaques sont épaisses, en plomb et en oxyde de plomb, éventuellement tubulaires pour les modèles OPZV. Leur conception les rend totalement étanches et sans entretien. Elles peuvent être stockées et utilisées couchées. Elles appartiennent à la famille des batteries VRLA (valve regulated lead acid) car sont équipées d'une valve pour compenser le très faible dégazage que produit leur fonctionnement.

- **Batteries Tubulaire Gel OPZ V** : Ces batteries sont constituées de cellules de 2,1 V de fortes capacité permettant d'atteindre des capacités très importantes pouvant aller, en 12 V, jusqu'à 3500 Ah en branchant ensemble seulement 6 éléments ! Il serait impossible de réaliser un pack de cette capacité avec des batteries 12 V compte tenu des contraintes de câblage interne au pack. Ces batteries offrent un nombre de cycles élevé (250 et une durée de vie pouvant atteindre 20 ans.

### Utilisation des batteries GEL :

Leur construction à base de plaques épaisses les rendent idéales en usage de servitude en leur autorisant un grand nombre de cycles de fonctionnement y compris en décharge profonde. Tout comme les AGM, elles sont étanches et peuvent fonctionner dans toutes les positions (chavirage) et maintenir les pompes de cales en services si les batteries ne sont pas immergées. Inconvénient : lourdes et assez onéreuses.

### 1.4.2 Nickel-Cadmium

Un type de batterie rechargeable utilisant de l'oxyde de nickel hydroxyde et du cadmium métallique comme électrodes. L'abréviation Ni-Cd est dérivée des symboles chimiques du nickel (Ni) et du cadmium (Cd). L'abréviation NiCad est une marque déposée de SAFT Corporation, bien que ce nom de marque soit couramment utilisé pour décrire toutes les piles Ni-Cd.

#### Utilisation des batteries au Nickel-Cadmium

Les cellules en Ni-Cd peuvent être utilisés individuellement ou assemblés en packs de batteries contenant deux éléments ou plus. Les petits éléments sont utilisés pour les appareils électroniques portables et les jouets (tels que les lampes de jardin solaires), souvent avec des éléments fabriqués dans les mêmes dimensions que les éléments primaires. Lorsque les piles Ni-Cd remplacent les piles primaires, la tension aux bornes plus faible et la capacité ampère-heure plus petite peuvent réduire les performances par rapport aux piles primaires. Les piles boutons miniatures sont parfois utilisées dans les équipements photographiques, les lampes à main (lampe de poche ou torche), les mémoires de secours des ordinateurs, les jouets et les nouveautés.

### 1.4.3 Nickel-Métal Hydrures

On y trouve les batteries NiMH (nickel métal hydrure) qui ont quasiment remplacé les NiCd (nickel cadmium) qui posaient des problèmes de recyclage du cadmium. Les NiMH ont une grande densité énergétique et peuvent être complètement déchargée sans porter préjudice à leur durée de vie. Elles ont l'inconvénient d'être de faible capacité, ce qui en fait des accumulateurs plutôt destinés à alimenter des appareils portables où l'autonomie dépasse rarement quelques heures. Elles fournissent en général entre 500 et 700 cycles à 80 % de décharge.

#### Utilisation des batteries au Nickel-Métal Hydrures

Les batteries NiMH étaient fréquemment utilisées dans les véhicules électriques et hybrides électriques de la génération précédente; à partir de 2020, elles ont été presque entièrement remplacées par des batteries

au lithium dans les véhicules tout électriques et hybrides rechargeables, mais elles restent utilisées dans certains véhicules hybrides (Toyota Highlander 2020, par exemple)[41] Les véhicules tout électriques rechargeables antérieurs comprenaient le General Motors EV1, la première génération du Toyota RAV4 EV, le Honda EV Plus, le Ford Ranger EV et le scooter Vectrix. Tous les véhicules hybrides de première génération utilisaient des batteries NIMH, notamment la Toyota Prius et la Honda Insight, ainsi que les modèles ultérieurs, notamment la Ford Escape Hybrid, la Chevrolet Malibu Hybrid et la Honda Civic Hybrid.

### 1.4.4 Lithium-ion

Lithium-métal, dangereuses et explosives, lithium-ions, stables avec la densité énergétique la plus élevée du marché, lithium-Polymère, technologie sèche prometteuse. Elles sont réservées aux systèmes photo voltaïques portables où leur grande capacité de décharge (six fois mieux que le plomb étanche) est leur grand intérêt. Leur prix est encore prohibitif mais elles fournissent en général, environ 1 300 cycles à 100% de décharge. Cette technologie très jeune, est tout de même prometteuse et en développement constant.

#### Utilisation des batteries au Lithium-ion

Les batteries Li-ion sont utilisées dans les applications de télécommunications. Les batteries secondaires au lithium non aqueux fournissent une alimentation de secours fiable aux équipements de charge situés dans l'environnement réseau d'un fournisseur de services de télécommunications typique. Les batteries Li-ion conformes à des critères techniques spécifiques sont recommandées pour un déploiement dans l'installation extérieure (OSP) à des endroits tels que les chambres à environnement contrôlé (CEV), les boîtiers d'équipement électronique (EEE) et les cabines, et dans des structures non contrôlées telles que les armoires. Dans ces applications, les utilisateurs de batteries li-ion ont besoin d'informations détaillées sur les matières dangereuses spécifiques aux batteries, ainsi que de procédures appropriées de lutte contre l'incendie, afin de satisfaire aux exigences réglementaires et de protéger les employés et les équipements environnants.

### 1.4.5 Tout solide

une technologie de batterie qui utilise des électrodes solides et un électrolyte solide, au lieu des électrolytes liquides ou en gel polymère que l'on trouve dans les batteries lithium-ion ou lithium-polymère.

Si les électrolytes solides ont été découverts au XIXe siècle, plusieurs inconvénients, tels que les faibles densités d'énergie, ont empêché une application généralisée. Les développements de la fin du 20e et du début du 21e siècle ont provoqué un regain d'intérêt pour les technologies de batteries à électrolyte solide, notamment dans le contexte des véhicules électriques, à partir des années 2010.

Les matériaux proposés pour être utilisés comme électrolytes solides dans les batteries à l'état solide comprennent les céramiques (par exemple, les oxydes, les sulfures, les phosphates) et les polymères solides. Les piles à l'état solide ont été utilisées dans les stimulateurs cardiaques, les dispositifs RFID et les dispositifs portables. Elles sont potentiellement plus sûres, avec des densités d'énergie plus élevées, mais à un coût beaucoup plus élevé. Les défis à relever pour une adoption généralisée sont la densité d'énergie et de puissance, la durabilité, le coût des matériaux, la sensibilité et la stabilité.

#### Utilisation des batteries tout solide

Les piles à l'état solide pourraient être utilisées dans les stimulateurs cardiaques, les dispositifs d'identification par radiofréquence (RFID) et les dispositifs portables.

## 1.5 Fonctionnement des batteries

Les piles convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique. Dans de nombreux cas, l'énergie électrique libérée est la différence entre les énergies de cohésion ou de liaison des métaux, oxydes ou molécules qui subissent la réaction électrochimique. Par exemple, l'énergie peut être stockée dans le Zn ou le Li, qui sont des métaux à haute énergie car ils ne sont pas stabilisés par la liaison des électrons d, contrairement aux métaux de transition. Les batteries sont conçues de manière à ce que la réaction d'oxydoréduction énergétiquement favorable ne puisse se produire que lorsque les électrons se déplacent dans la partie externe du circuit.

Une batterie est constituée d'un certain nombre de cellules voltaïques. Chaque cellule est constituée de deux demi-cellules reliées en série par un électrolyte conducteur contenant des cations métalliques. Une demi-cellule comprend l'électrolyte et l'électrode négative, l'électrode vers laquelle migrent les anions (ions chargés négativement) ; l'autre demi-cellule comprend l'électrolyte et l'électrode positive, vers laquelle migrent les cations (ions chargés positivement). Les cations sont réduits (des électrons sont ajoutés) à la cathode, tandis que les atomes métalliques sont oxydés (des électrons sont retirés) à l'anode. Certaines cellules utilisent des électrolytes différents pour chaque demi-cellule ; on utilise alors un séparateur pour empêcher le mélange des électrolytes tout en permettant aux ions de circuler entre les demi-cellules pour compléter le circuit électrique.

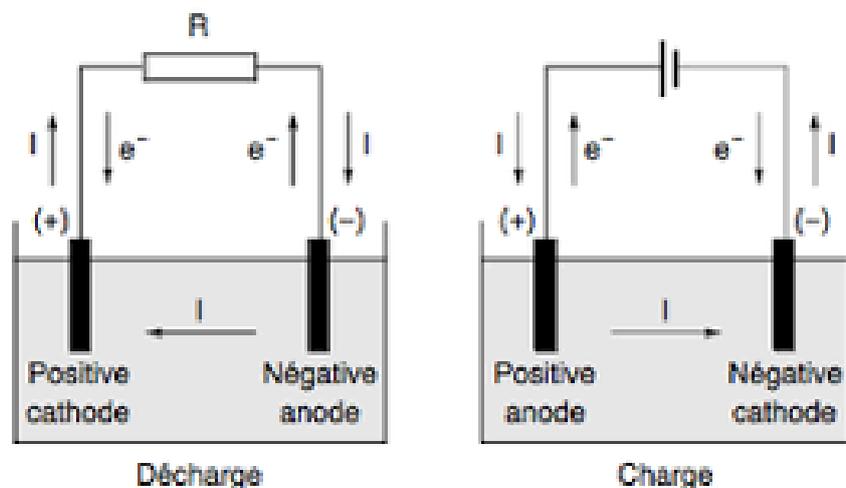


FIG. 1.10 : Schéma explicatif du principe de fonctionnement de la batterie

## 1.6 Rendement

Les caractéristiques d'une batterie peuvent varier en fonction du cycle de charge, du cycle de chargement et de la durée de vie en raison de nombreux facteurs, notamment la composition chimique interne, la consommation de courant et la température. À basse température, une batterie ne peut pas fournir autant d'énergie. C'est pourquoi, dans les climats froids, certains propriétaires de voitures installent des chauffe-batteries, qui sont de petits plaques chauffantes électriques qui gardent la batterie de la voiture au chaud.

### 1.6.1 Batteries au Plomb

Le rendement énergétique des batteries au plomb est de 70 - 75% : 25% de l'énergie électrique est dissipée en essentiellement sous forme de chaleur (effet joule), lors des réactions électrochimiques de charge, décharge et auto-décharge.

### 1.6.2 Batteries au Lithium ion

Le rendement énergétique des batteries lithium-ion est légèrement inférieur à 100% en raison des pertes d'énergie par effet Joule (échauffement de la batterie lors de la charge). En matière de performances, les batteries lithium-ion sont celles qui peuvent à l'heure actuelle stocker le plus d'énergie par unité de masse (Wh/kg) ou par unité de volume (Wh/l)

## 1.7 Facteurs de dégradation des batteries

### 1.7.1 Influence de la température

La capacité tient compte de la température de l'accumulateur, elle est annoncée en général pour 20 à 25°C. La capacité augmente quand la température augmente et baisse quand la température baisse. La durée de vie de la batterie va également être liée à cette température d'exploitation. En effet, une augmentation de 10°C au-dessus de 20°C la réduira de moitié. Les batteries sont généralement installées dans le compartiment moteur ou dans l'habitacle. Cependant sous le capot la température ambiante monte facilement vers 60°C à 80°C alors que la température admise pour certaines batteries ne dépasse généralement pas 40°C. Bien vérifier la température maximum de la batterie avant de déterminer l'emplacement de celle-ci. Dans l'habitacle, le danger vient du dégagement de fumées toxiques et de la mise à feu qui s'ensuit généralement. C'est pourquoi il est conseillé de placer la batterie dans un compartiment isolé et bien ventilé pour les refroidir et évacuer les éventuelles fumées.

### 1.7.2 Effets de décharge profonde

Comme vous avez pu le constater dans la fiche technique d'une batterie, plus vous déchargerez une batterie profondément, plus courte sera sa durée de vie. C'est également un des facteurs de vieillissement prématuré d'une batterie. La raison de ce vieillissement est que pendant une décharge, la batterie perd un peu de la matière active des plaques, il y a alors création de sulfate, qui est un dépôt blanc qui se forme sur les plaques et diminue ainsi la surface de contact entre le Plomb et l'électrolyte. Si on ne décharge que très peu la batterie, cette perte de matière active sera limitée. Dans le cas contraire, cette perte sera limitée. Donc si on décharge la batterie profondément, beaucoup plus de matière active sera perdue. Cette perte n'est pas linéaire. Elle s'accroît considérablement au-delà de 50% de profondeur de décharge. C'est pourquoi le nombre de cycles qu'une batterie peut offrir durant sa durée de vie sera bien moindre dans le cas de profondeur de décharge élevée par rapport à des décharges faibles.

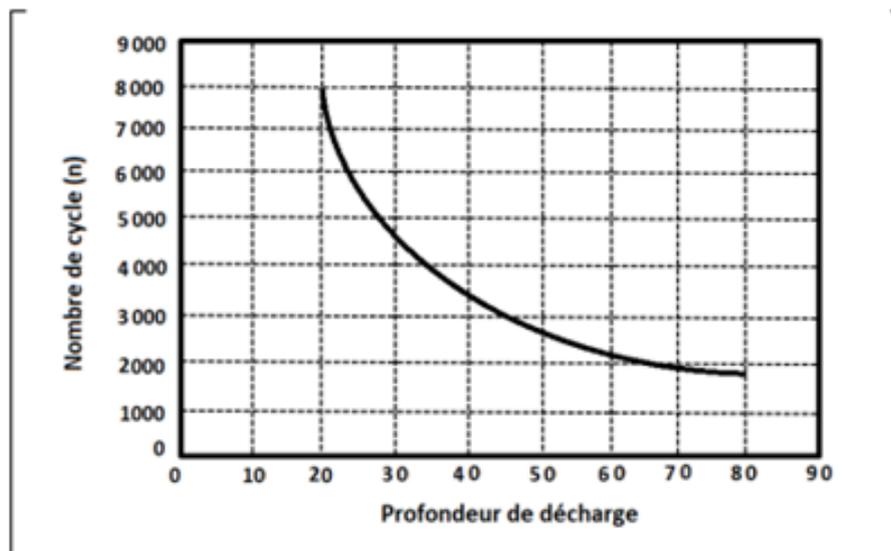


FIG. 1.11 : Profondeur de décharge en fonction de nombre de cycles

Si cette perte était proportionnelle aux profondeurs de décharge, nous aurions une ligne droite. Ici nous avons une courbe. Cela signifie donc que le vieillissement d'une batterie s'accroît en fonction de la profondeur de décharge.

## 1.8 Conclusion

L'invention des batteries a complètement changé la vision du monde envers l'énergie électrique avec un stockage qui dure dans le temps et qui peuvent être rechargées dans un volume très réduit et avec un rendement rapprochant les 100%.

Ce chapitre est une étude globale des accumulateurs qui permettent le stockage de l'énergie électrique pour pouvoir l'utiliser lors d'une panne ou d'une coupure de la source d'énergie pour les alimentations sans interruption (ASI). Cette étude permet d'avoir une vision sur tous les aspects afin de l'implémenter dans notre projet pour effectuer un système qui peut être réaliser dans un milieu professionnel pour garantir la continuité du fonctionnement de la charge à alimenter.

# Chapitre 2

## Groupes Electrogènes

## 2.1 Introduction

Dans un milieu industriel qui possède des machines électriques, il est primordial d'avoir un groupe électrogène afin que l'entreprise continue à fonctionner en cas d'une coupure d'électricité afin d'éviter des conséquences graves, comme dans les hôpitaux, les industries agro-alimentaires, les services publics, etc.

Les groupes électrogènes fonctionnent avec du carburant pour produire de l'énergie mécanique qui est transformée en énergie électrique pour finalement faire fonctionner les machines et recharger des batteries. Ils sont utilisés essentiellement dans les zones éloignées du réseau de distribution électrique ou pour dépanner une éventuelle coupure d'alimentation électrique, les GEs sont compléments à des alimentations sans interruption (ASI) qui sont constituées de batterie d'accumulateurs qui alimenter un onduleur.

## 2.2 Groupe Electrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité à base d'un moteur thermique qui fonctionne par la combustion des carburants pour actionner un alternateur afin de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Leur poids et leur taille peuvent varier de quelques kilogrammes jusqu'au plusieurs dizaines de tonnes. La puissance d'un GE s'exprime en (Volt Ampère) qui traduit la puissance fournie. Les unités de GE les plus puissantes sont mues par des turbines à gaz ou de gros moteurs Diesel.

On réserve l'appellation groupe électrogène à l'association moteur à combustion ou à explosion et alternateur (génératrice synchrone et plus rarement génératrice asynchrone ou continue), répondant à la Norme ISO 8528-1.

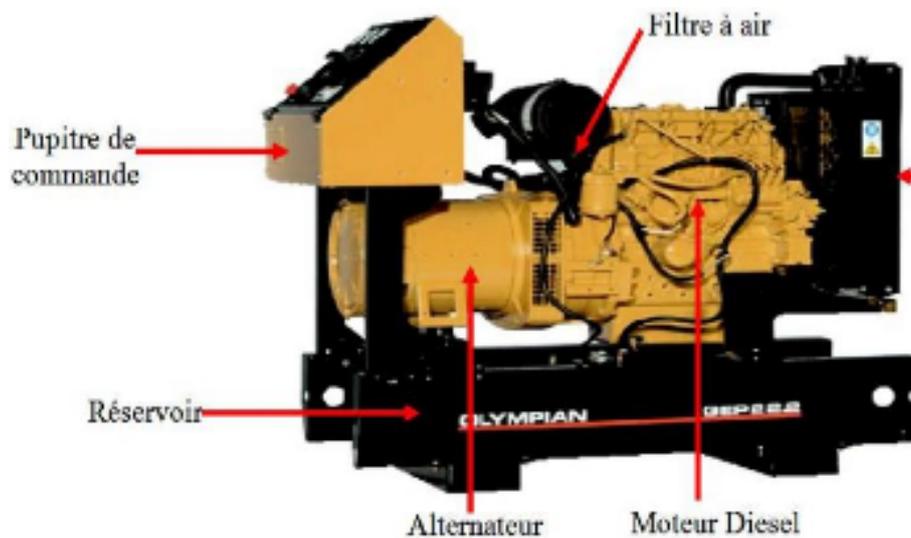


FIG. 2.1 : Composants d'un groupe électrogène

### 2.3 Fonctionnement

Un groupe électrogène est l'association d'une machine (moteur) produisant de l'énergie mécanique et d'un alternateur qui transforme cette dernière en énergie électrique. Une centrale de production électrique est en fait un groupe électrogène couplé à une chaudière.

Le groupe électrogène est doté d'un moteur thermique qui fonctionne à l'essence, au fioul (diesel), le GPL, le gaz naturel ou les biocarburants. Il tourne à une vitesse fixe par l'intermédiaire d'une dynamo (courant continu) ou d'un alternateur (courant alternatif). Cette installation convertit l'énergie en électricité. Pour le fonctionnement d'un groupe électrogène ou d'un alternateur, il est nécessaire de réguler la vitesse du moteur ainsi que la tension de l'alternateur. De plus, ils doivent être munis d'un ensemble de capteurs et de sécurités. Ils sont aussi équipés d'un système de gestion de démarrage et d'arrêt qui peut être manuel ou automatique ou grâce à de l'air comprimé (selon la puissance).

#### Autonomie

Un groupe électrogène doit normalement être autonome. Il faut donc une source d'énergie de démarrage qui peut être mécanique, pneumatique ou électrique. Il doit pouvoir faire face aux pointes de consommation (démarrage de gros équipements en particulier) alors que sa capacité de surcharge est très limitée. La capacité de surcharge est nulle pour un groupe dit « de secours » (en mode ESP : Production énergie secours) selon la norme ISO 8528 et généralement de 10% pour les autres (mode PRP : Production régime Permanent). Ainsi lors de son usage il faut s'assurer que la charge maxi déterminée par le constructeur du groupe ne sera jamais dépassée. Cette charge est différente selon qu'il s'agit d'un groupe de production continue ou alternatif, à charge constante ou variable.

## 2.4 Rendement

L'efficacité d'un générateur est caractérisée par son rendement, qui est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance mécanique absorbée. Le rendement thermique d'une centrale électrique, qui est d'un intérêt primordial en thermodynamique, est généralement défini comme le rapport entre le travail net de l'arbre produit par la turbine et l'apport de chaleur au fluide de travail. Les effets d'autres facteurs sont incorporés en définissant le rendement global de la centrale électrique comme le rapport entre la puissance électrique nette produite et le taux d'apport énergétique du combustible. Les groupes électrogènes actuels ont un rendement souvent bien inférieur à 50% par rapport à la valeur calorifique du carburant. C'est-à-dire que lors de sa combustion, la moitié du carburant se convertit en énergie électrique tandis que l'autre se convertit en chaleur.

Le rendement des groupes électrogènes croît avec leur puissance, mais reste limité au maximum que permet le cycle de Carnot, duquel doivent être soustraites les pertes mécaniques et électriques dans l'alternateur et la transmission. En particulier, les groupes de puissance modérée se caractérisent par un médiocre rendement et une consommation élevée.

## 2.5 Armoire de commande

Les armoires électriques des groupes électrogènes jouent un rôle essentiel dans la connexion du GE dans l'entreprise afin de fournir une alimentation électrique temporaire (et même à long terme). Il est relié électriquement à un commutateur de transfert manuel ou à un commutateur de transfert automatique, elles sont conçues pour assurer la sécurité du personnel ainsi que des équipements matériels durant le fonctionnement du GE par la protection contre les courts-circuits, Protection contre la rotation de phase à l'aides des boutons poussoirs de démarrages/arrêt et le boutons d'arrêt d'urgence mais aussi les contacteurs et les différents relais et capteurs qui le sont reliés.

Les armoires électriques pour les GEs permet l'organisation des différents connexions et câblage afin de faciliter la maintenance ou les modifications et ajouts appliqués aux GE puisqu'elles sont conçues d'une manière normalisée.

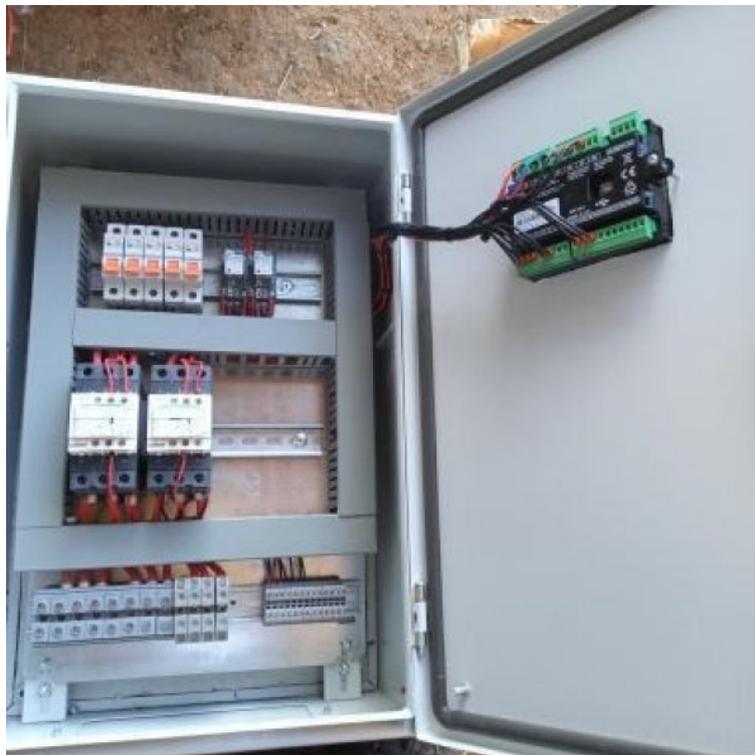


FIG. 2.2 : Armoire électrique d'un groupe électrogène

## 2.6 Domaine d'application

Une centrale électrique est une installation industrielle destinée à la production d'énergie électrique. La plupart des centrales électriques contiennent un ou plusieurs générateurs, une machine rotative qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique triphasée. Le mouvement relatif entre un champ magnétique et un conducteur crée un courant électrique. La source d'énergie exploitée pour faire tourner le générateur est très variable. La plupart des centrales électriques dans le monde brûlent des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour produire de l'électricité. Les sources plus propres comprennent l'énergie nucléaire et une utilisation croissante des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, houlomotrice et hydroélectrique.

Un moteur-générateur est la combinaison d'un générateur électrique et d'un moteur montés ensemble pour former une seule pièce d'équipement autonome. Les moteurs utilisés sont généralement des moteurs à piston, mais des turbines à gaz peuvent également être utilisées, et il existe même des unités hybrides diesel-gaz, appelées unités bicarburant. Il existe de nombreuses versions différentes de générateurs à moteur, allant des très petits appareils portables à essence aux grandes installations à turbine. Le principal avantage des générateurs à moteur est leur capacité à fournir de l'électricité de manière indépendante, ce qui permet aux unités de servir de solutions d'alimentation de secours.

Un groupe électrogène est un dispositif électromécanique qui produit une tension de sortie proportionnelle à la vitesse de son arbre. Il peut être utilisé comme indicateur de vitesse ou dans un système de contrôle de vitesse par rétroaction. Les générateurs tachymétriques sont souvent utilisés pour alimenter des tachymètres afin de mesurer la vitesse des moteurs électriques, des moteurs et des équipements qu'ils alimentent. Les générateurs génèrent une tension à peu près proportionnelle à la vitesse de l'arbre. Avec une construction et une conception précises, les générateurs peuvent être construits pour produire des tensions très précises pour certaines plages de vitesses de l'arbre.

## 2.7 Aspect environnemental des groupes électrogènes

Le principal impact environnemental des générateurs diesel est l'émission constante de CO<sub>2</sub> pendant leur durée de vie. Un générateur diesel utilisé pour alimenter un BTS consomme environ 18 000 litres de carburant par an. L'émission de CO<sub>2</sub> d'un litre de carburant diesel est de 2,68g. Cela représente une émission annuelle de 46,5 tonnes de CO<sub>2</sub>.

Il existe actuellement 10 233 stations émettrices-réceptrices de base alimentées par des sources d'énergie renouvelables, ce qui permet de réduire les émissions de carbone de 480 000 tonnes par an dans le monde. Par exemple, en Asie, les trois grands fournisseurs de télécommunications, à savoir : China Mobile, China Unicon et China Telecom, ont plus de 10 000 sites qui fonctionnent sans électricité. Si ces entreprises de télécommunications utilisaient l'énergie renouvelable comme ressource énergétique primaire, une économie de 107 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an pourrait être réalisée.

En septembre 2008, le programme Green Power for Mobile de la GSMA a été lancé pour accélérer l'utilisation de l'énergie verte dans le secteur de la téléphonie mobile. Il prévoit l'installation de 118 000 stations émettrices-réceptrices de base hors réseau dans les pays en développement d'ici 2012.

## 2.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une présentation générale du fonctionnement et des caractéristiques des groupes électrogènes.

Les groupes électrogènes sont des dispositifs qui offrent des performances impeccables en terme de puissance spécifique, d'efficacité et de cyclabilité. Malgré leur impact environnemental ils restent toujours le principal choix des entreprises de part le coût mais aussi pour leur rendement par rapport aux énergies renouvelables.

Outre l'utilisation des GEs en sources de secours, leurs simplicités d'installation, leurs modularités et leurs coûts abordables dont des GEs des dispositifs de production d'électricité idéaux pour des zones équipées où l'énergie électrique est un facteur de développement incontournable et la continuité du fonctionnement des machines est impérative. Enfin il faut rappeler que le développement de la cogénération, qui permet d'atteindre des rendements énergétiques compris entre 80 et 85%, représente une autre application dont l'importance s'affirme de jour en jour.

# Chapitre 3

## Composants utilisés

## 3.1 Introduction

Pour réaliser une carte électronique il faut impérativement avoir des bases en électronique pour réussir à comprendre et bien assimiler le fonctionnement d'un circuit, pour cela une explication globale des différents composants majeurs de notre chargeur de batterie 12 V contrôlé par Arduino est nécessaire. Dans ce présent chapitre nous allons commencer par présenter la pièce maitresse de notre circuit qui est l'Arduino tout en expliquant son fonctionnement et ces différentes entrées et sorties (numérique et analogique) ensuite nous allons décrire brièvement le transformateur et le redresseur que nous avons utilisé, en outre nous allons aussi présenter les caractéristiques des régulateurs LM338, LM7812 et de l'afficheur LCD 2x16 alphanumérique.

## 3.2 Arduino

### 3.2.1 Définition

Arduino est la marque d'une plateforme de prototypage open-source qui permet aux utilisateurs de créer des objets électroniques interactifs à partir des cartes électroniques matériellement libres sur lesquelles se trouve un micro-contrôleur (d'architecture Atmel AVR comme l'Atmega328p, et d'architecture ARM comme le Cortex-M3 pour l'Arduino Due). Les schémas de ces cartes électroniques sont publiés en licence libre. Cependant, certaines composantes, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas sous licence libre. Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques, éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, de l'informatique embarquée, etc. La carte Arduino la plus utilisée est la carte ArduinoUno. La conception matérielle (schémas électroniques et typons) est distribuée sous licence Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 Le code source de l'environnement de programmation et les bibliothèques embarquées sont disponibles sous licence LGPL.

### 3.2.2 Utilisation

Les possibilités d'utilisation sont infinies. Si on peut détecter un ou plusieurs événements (variation de température, mouvement, présence, distance ...) et en fonction de ces événements, agir sur le monde réel à l'aide d'actionneurs (résistances chauffantes, moteurs ...), alors on peut tout faire : bras de robot, régulation de température, effets lumineux, instruments de musique, systèmes d'alarmes, ...etc.

### 3.2.3 Fonctionnement

Supposons qu'on veut faire clignoter une lampe (DEL) à l'aide d'un bouton poussoir (BP) comme le montre la Figure ci-dessous

Nous connectons le bouton poussoir (BP) à une entrée (E) de la carte Arduino et notre lampe (diode lumineuse DEL) à une sortie (S) de la carte. Mais nous devons également programmer la carte, de manière à ce

que la diode lumineuse clignote. Nous rédigeons le programme à l'aide d'un logiciel, installé sur un ordinateur. Le programme doit sans cesse surveiller l'entrée connectée au bouton poussoir. Si le bouton poussoir est appuyé il doit allumer la diode, attendre 1 seconde, éteindre la diode, attendre 1 seconde, puis recommencer (allumer la diode, attendre 1 seconde ...). Si le bouton poussoir n'est pas (ou plus) appuyé, il doit éteindre la diode. Le programme ci-dessous illustre les différentes étapes à suivre pour le réaliser en langage C.

---

**Algorithm 1** : Langage C

---

```
1 void setup()
2 {
3   pinMode(1,INPUT);
4   pinMode(12,OUTPUT);
5 }
6 void loop()
7 {
8   if(digitalRead(1)){
9     digitalWrite(12,HIGH);
10  delay(1000);
11  digitalWrite(12,LOW);
12  delay(1000);
13 }
14 else{
15  digitalWrite(12,LOW);
16 }
17 }
```

---

### 3.2.4 Composition de la carte Arduino UNO

Les différents composants de la carte Arduino sont représentés sur la Figure.

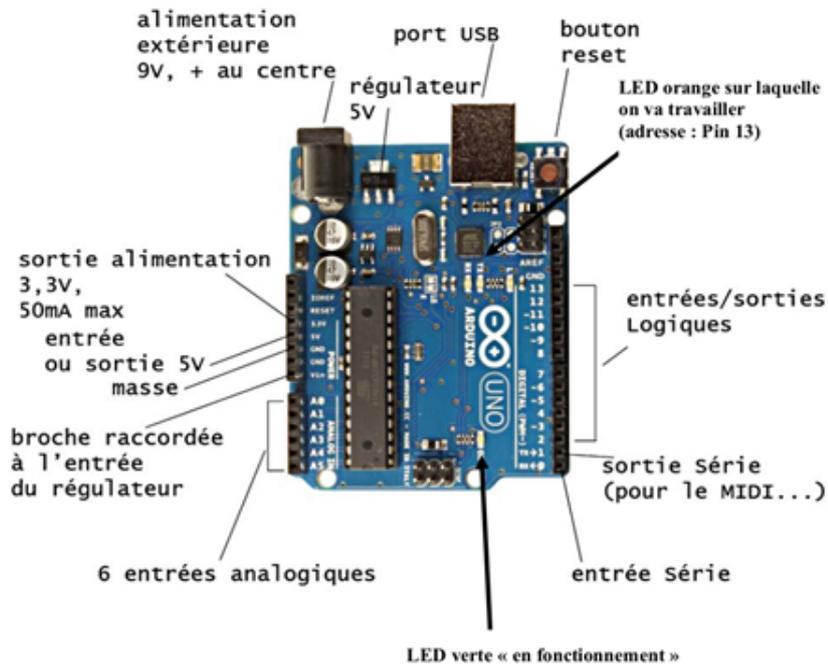


FIG. 3.1 : Composition de la carte UNO

### Les entrées sorties numérique

La figure ci-contre montre les entrées sorties numériques de la carte Arduino Chacun des connecteurs D0 à D13 peut être configuré par pro-



FIG. 3.2 : Entrées sorties numériques

grammation en entrée ou en sortie, nous pouvons donc avoir par exemple les connecteurs 2 et 3 configurés comme des entrées et les connecteurs 7, 8 et 9 configurés comme des sorties. Les signaux véhiculés par ces connecteurs sont des signaux logiques, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre que deux états : HAUT (5 Volts) ou BAS (0 Volt), par rapport au connecteur de masse GND, qui lui est toujours, par définition, à 0 Volt. Les connecteurs ne peuvent pas fournir en sortie un courant supérieur à 40 mA, ce qui interdit de brancher directement un moteur sur une sortie logique. Le signe ~ sur les connecteurs 3, 5, 6, 9 10 et 11, sa signification (PWM)

### Entrées analogique A0 à A5

Les entrées analogiques A0 à A5 , ces six entrées pouvant mesurer des tensions comprises entre 0 et 5 Volts qui prend environ 10  $\mu$ s, avec une précision de 10 bits (soit 1024 points) si on fait le calcul 1024 points sur une plage de 5Volts donne une précision de 0.0048828125 Volts, soit environ 4.9mV comme le montre la Figur.



FIG. 3.3 : Les entrées analogiques

### 3.2.5 Avantages

L'un des avantages indéniables de ce microcontrôleur est sa facilité d'utilisation qui fait qu'il est accessible à tous. Pas besoin d'être calé en IT, même les amateurs pourront s'en sortir aisément grâce aux explications claires distribuées un peu partout sur internet, La carte se connecte très facilement à un ordinateur via un câble USB fourni.

### 3.2.6 Inconvénients

L'Arduino Uno, est utilisé pour les simulations électroniques mais n'est pas pour l'exploitation l'industriel du a sa grande taille et sa fragilité et son cout aussi qui reste élevé.

### 3.3 Transformateur

#### Description d'un transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur, servant à modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un dispositif de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est composé d'un noyau de fer et de deux bobines de cuivre. (Bobine primaire et bobine secondaire), il faut savoir aussi qu'il existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire, tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique. Le transformateur monophasé est composé d'un noyau et deux bobines, tandis que le transformateur triphasé comporte 3 noyaux et 6 bobines. Dans ce présent projet nous avons opté pour un transformateur avec deux secondaires par ce qu'on a besoin de deux tensions de 15V dans notre circuit comme le montre la Figure.

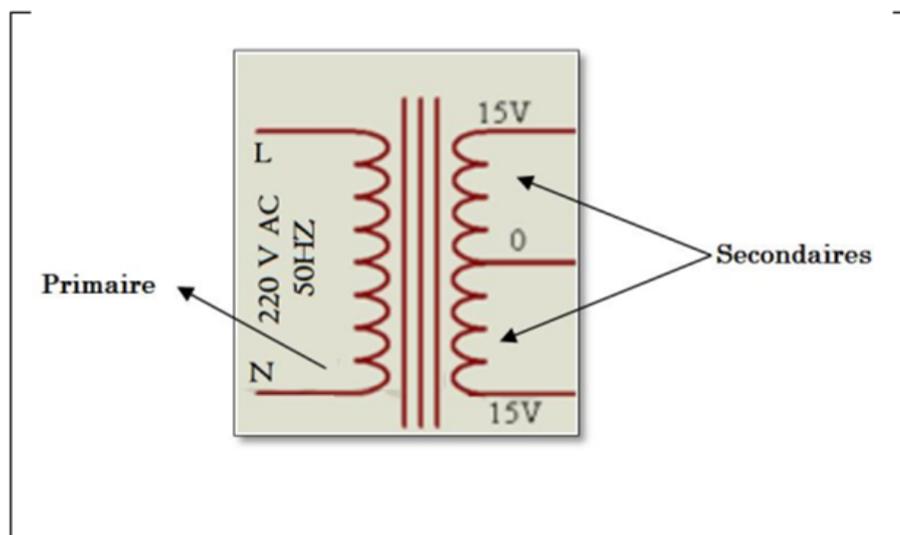


FIG. 3.4 : Transformateur avec deux secondaire de 15V

## 3.4 Redresseur

### 3.4.1 Définition

La conversion du courant alternatif en courant continu est réalisée par un convertisseur appelé redresseur. La charge elle peut être résistive, inductive ou capacitif, elle est alimentée en courant continu à partir d'une source alternative. Dans le redressement double alternance, les interrupteurs commutent de manière à transformer les tensions négatives en positives tout en gardant les alternances positives.

### 3.4.2 Fonctionnement d'un redresseur à point milieu

A partir d'un transformateur d'alimentation avec un point milieu, deux diodes travaillent en alternance pour créer, à la charge, un signal redressé double alternance (pleine-onde) possédant la même polarité pour chacun des demi-cycles du signal d'entrée comme le montre la Figure.

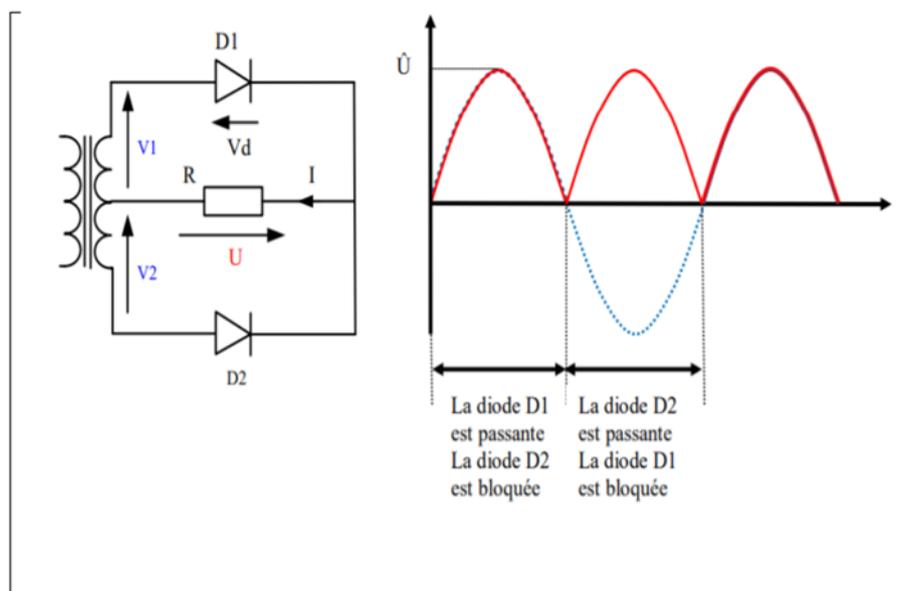


FIG. 3.5 : Redressement double alternance

### 3.5 Régulateur de tension LM338

C'est un régulateur de tension linéaires ajustables, capables de fournir plus de 5 A à une tension de sortie comprise entre 1,25 et 32 V. Les circuits LM338 incluent une limitation de courant, une protection contre les courts-circuits et les surcharges thermiques, et offrent une excellente régulation de charge et de ligne. Les régulateurs sont robustes et faciles à utiliser avec seulement deux résistances requises pour le réglage de la tension de sortie. Le LM338 est disponible en deux modèles de boîtier : le LM338K dans un boîtier en acier TO-3 et le LM338T dans un boîtier en plastique TO-220.

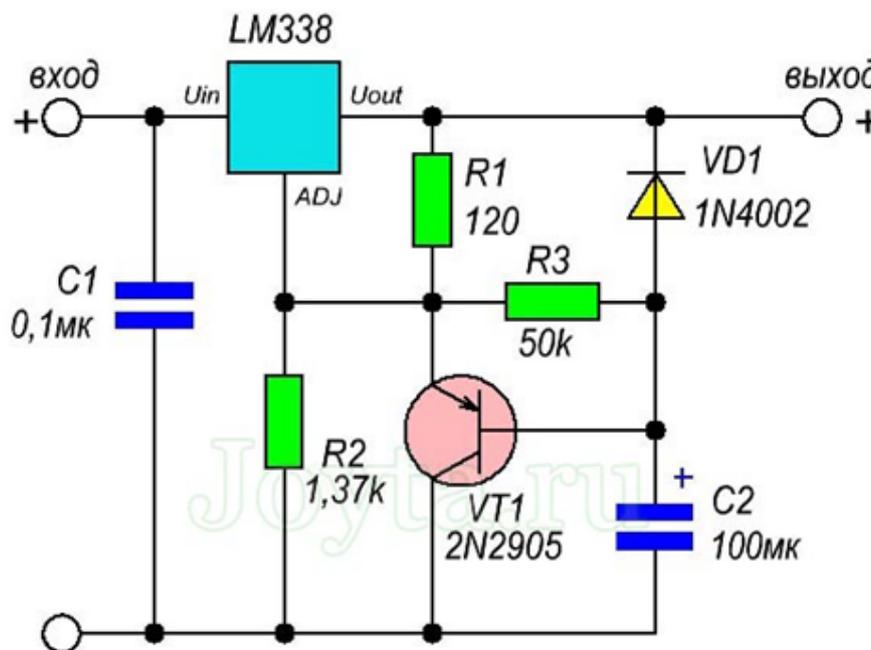


FIG. 3.6 : Régulateur LM338

#### Caractéristiques

Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques du régulateur de tension LM 338

Attribut	Valeur
Tension de sortie	1,2 → 32 V
Courant de sortie maximum	5A
Tension d'entrée minimale	4,2 V
Tension d'entrée maximale	40 V
Nombre de broches	3
Puissance	25W
Nombre de sorties	1
Polarité	Positive
Régulation de charge	0,5%
Régulation en ligne	0,03%
Tension de référence	1,25V
Courant de référence	40mA

TAB. 3.1 : Caractéristiques du régulateur de tension LM 338

## 3.6 Régulateurs fixes LM7812

Les régulateurs fixes sont appelés ainsi parce qu'ils ont été conçus pour délivrer une tension continue d'une valeur donnée, qui ne peut pas être modifiée sans artifice. Il en existe de multiples sortes, mais les plus courants sont sans aucun doute ceux de la série LM78xx (ou uA78xx) et LM79xx (ou uA79xx). Ils sont très faciles à mettre en œuvre, et il suffit de peu de connaissances pour savoir lequel utiliser, leur nom indiquant de lui-même de quoi il en retourne. Pour tout savoir, décomposons le nom de ces régulateurs : LM = préfixe utilisé par le fabricant. Il peut aussi s'agir de uA, ou MC. 78 = signifie qu'il s'agit d'un régulateur positif 79 = signifie qu'il s'agit d'un régulateur négatif xx = tension de sortie fixe (valeur entière)

### Caractéristiques

Tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques du régulateur de tension LM 7812

Attribut	Valeur
Tension de sortie	12 V
Courant de sortie maximum	1 A
Tension d'entrée minimale	14,6 V
Tension d'entrée maximale	19 V
Nombre de broches	3
Nombre de sorties	1
Polarité	Positive
Courant de référence	8 mA

TAB. 3.2 : Caractéristiques du régulateur de tension LM 7812

### 3.7 Afficheur

Les afficheurs LCD (Liquid Crystal Display) sont devenus incontournables dans toutes applications qui demandent la visualisation de paramètres, il s'agit donc d'une interface Homme/Machine. Ils sont très utilisés dans les montages à microcontrôleur, et permettent une grande convivialité. Ils peuvent aussi être utilisés lors de la phase de développement d'un programme, car on peut facilement y afficher les valeurs de différentes variables. Au paravent ils étaient très chers et difficile à mettre en œuvre, ils sont maintenant bon marchés et l'interface parallèle au standard Hitachi permet un pilotage facile.

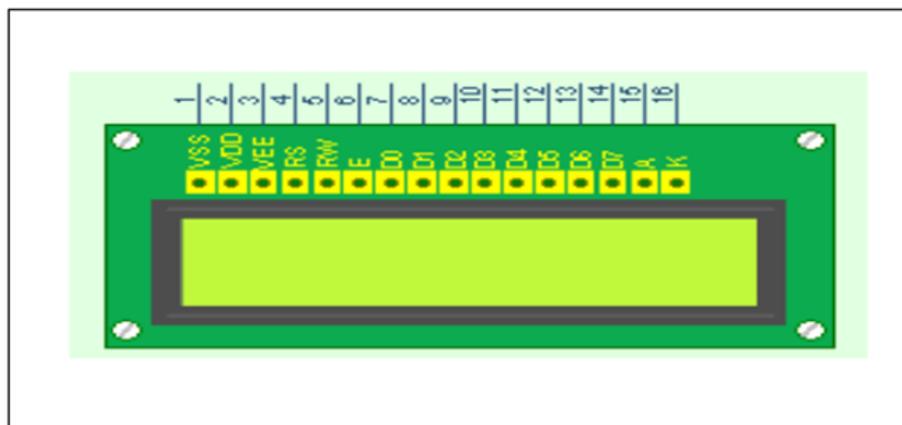


FIG. 3.7 : Afficheur LCD 2x16 alphanumérique

La figure ci-dessus permet de visualiser l'afficheur LCD dont les broches 15 et 16 ne sont présentes que sur les afficheurs LCD avec rétro éclairage.

#### Caractéristiques

- Nombre caractères par ligne : 2
- Nombre de caractère par ligne 16
- Contrôleur : SPLC780D
- Rétro éclairage : LED Bleu
- 80 x 11 x 36mm

## 3.8 Conclusion

Après avoir revu toutes ces bases d'électronique dans ce chapitre, nous avons pu en premier lieu comprendre le fonctionnement des différents composants essentiels qui structurent notre circuit, et ce qui nous a aussi permis de bien diviser notre circuit en blocs pour mieux comprendre l'enchaînement des étapes et ne pas se noyer dans la masse des composants. Le chapitre suivant présentera le circuit global du chargeur de batterie, et ensuite les différents blocs qui le composent pour pouvoir mieux le décrire.

## Chapitre 4

# Conception d'un système de gestion du démarrage du groupe électrogène

## 4.1 Introduction

L'optimisation est enjeu essentiel dans un milieu industriel qui permet d'augmenter l'efficacité du système en place. Elle consiste à chercher de nouvelles méthodes et de nouveaux dispositifs afin de continuer à offrir le même service avec un moindre coût.

Ce chapitre contient tout les détails nécessaire pour concevoir un système qui optimise la gestion de démarrage du groupe électrogène lors d'une panne ou d'une coupure d'électricité principale de l'ASI à l'aide d'un micro-contrôleur. Ce principe permet d'avoir un avantage économique et écologique. Ce chapitre comporte aussi une étude qui prend en compte la puissance consommée du réseau alimenté pour faire le dimensionnement des batteries et faire une proposition technico-financière.

Le système à concevoir permet une autonomie suffisante pour l'alimentation du réseau jusqu'au retour de l'électricité de SONEGAS qui peut être monitorer en temps réel, simple à maintenir et qui respecte les principes de sécurités.

## 4.2 Algorithme de détection du niveau de charge des batteries

La détection du niveau de charge est effectuée par l'algorithme implémenté sur une carte Arduino suivant :

---

```
1 const int batterypin = A0;
2 const float TensionMin = 42;
3 const float TensionMax = 50;
4 void setup() {
5   Serial.begin(9600);
6 }
7 void loop() {
8   float b = analogRead(batterypin);
9   int minValue = (1023 * TensionMin) / 5;
10  int maxValue = (1023 * TensionMax) / 5;
11    //mettre en pourcentage
12  b = ((b- minValue) / (maxValue - minValue)) * 100;
13  if (b > 100)
14    b = 100;
15  else if (b < 0)
16    b = 0;
17    //pour avoir un pourcentage entier
18  int value = b;
19  Serial.println(value);
20  delay(1000);
21 }
```

---

### 4.3 Circuit d'un chargeur de batterie contrôlé

Le schéma du circuit d'un chargeur de batteries contrôlé par Arduino Uno est réalisé à l'aide de Proteus dans la figure :

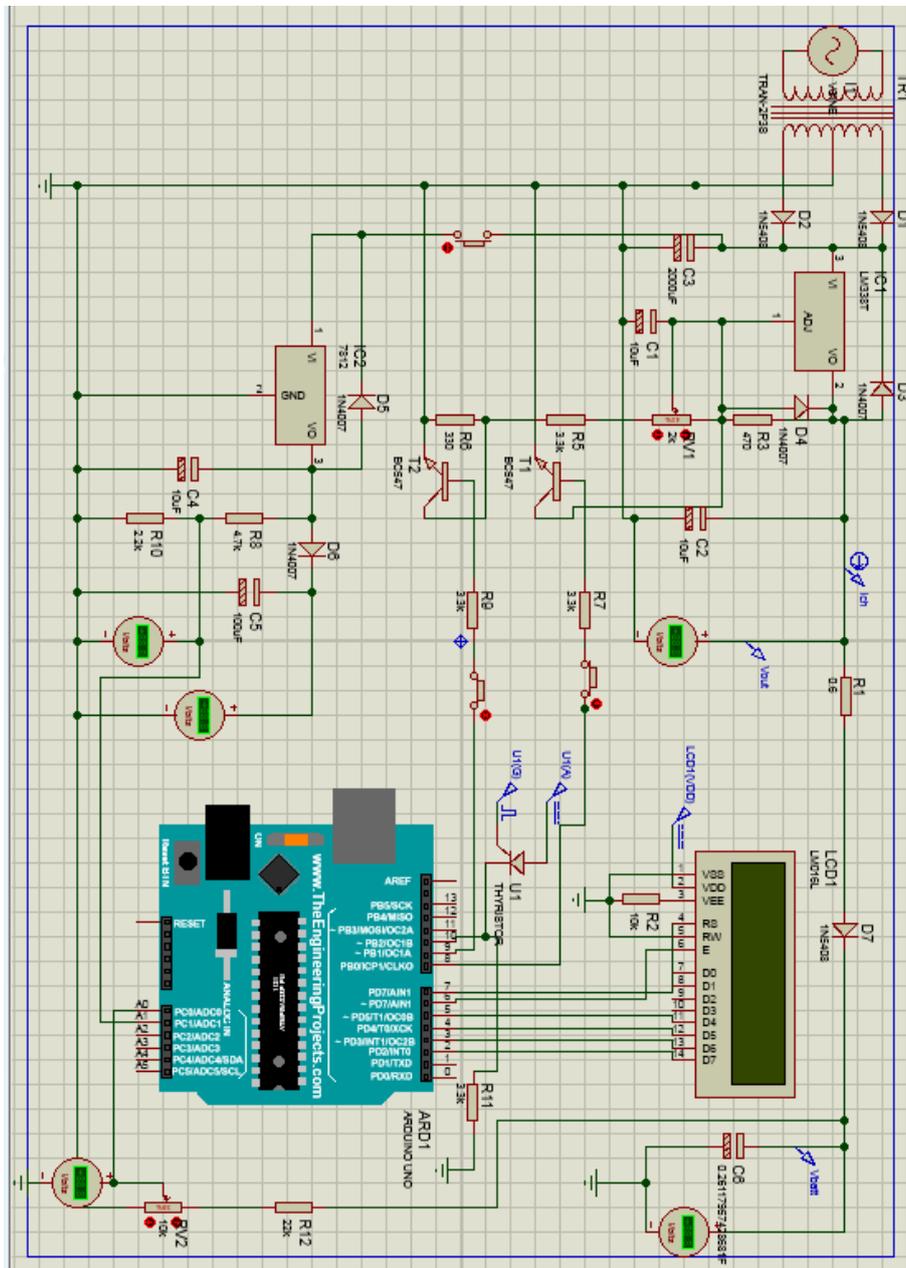


FIG. 4.1 : Circuit de chargeur de batterie contrôlé par Arduino

Les composants utilisés pour la conception de ce circuit : alimentation, ARDUINO UNO, Afficheur LCD 16x12, Transistors, Switch, dissipateurs thermique, résistances, potentiomètres, capacités, diodes, transformateurs, LED, LM338, LM7812.

## 4.4 Principe de fonctionnement du chargeur de batteries

Pour expliquer le fonctionnement de ce circuit, on peut sectionner le schéma en quatre parties :

### 4.4.1 Circuit de chargeur de batterie

La Figure montre bien que Le circuit du chargeur est conçu autour d'un circuit intégré de régulateur de tension réglable (LM338). Une tension continue filtrée est fournie à la broche d'entrée d'IC 1 (LM338). Ce circuit intégré peut fournir une tension régulée d'environ 1,2 V à 32 V à un courant maximum de 5 A. Les diodes D 3 et D 4 sont des diodes de protection qui protègent la source de tension de la polarité inversée. Les transistors T 1 et T 2 contrôlent la tension en sortie Lorsque la batterie est complètement chargée, la sortie est mise en mode de charge de maintien Lorsque la batterie est en état de charge, la sortie est mise en mode de charge rapide.

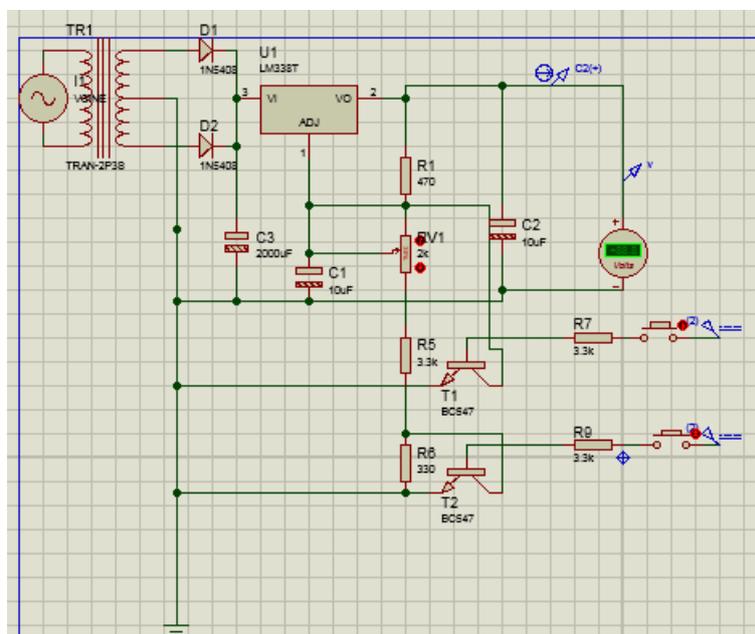


FIG. 4.2 : Régulateur de tension réglable avec redresseur

$x_1 = 220V$  AC primaire à  $15V-0-15V$ , transformateur secondaire 3A.

Ic<sub>1</sub> : LM338

Dissipateur thermique pour Ic<sub>1</sub>

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> : 1N5408 (pour les applications 3A).

$D_3, D_4$  : 1N4007 (Sa tension de blocage à 1kV).

$C_1, C_2$  : 10 $\mu$ F, 35V ou 63V (condensateur électrolytique).

$C_3$  : 2mF, 35V ou 63V (condensateur électrolytique).

$VR_1$  : 2k $\Omega$  potentiomètre.

$R_6$  : 330 $\Omega$ ,  $R_2$  : 1,5k $\Omega$ ,  $R_3$  : 470 $\Omega$ ,  $R_{5,7,9}$  : 3,3k $\Omega$ .

$T_1, T_2$  : BC547.

LED<sub>1</sub> : 5mm toute couleur LED.

### Fonctionnement du régulateur de tension réglable

La tension de sortie ( $V_{out}$ ) du régulateur de tension réglable est décrite par l'équation suivante :

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_x}{R_3}\right) + I_{ADJ} R_x \quad (4.1)$$

Où  $R_x = VR_1 + R_5 + R_6$  soit une combinaison de ces trois résistances.

$R_3 = 470$  ohms.

$V_{REF} = 1,25V$

$I_{ADJ} = 45\mu A$

Par conséquent on trouve :

$$V_{OUT} = 1,25 \left(1 + \frac{R_x}{470}\right) + 45R_x \quad (4.2)$$

Calcul mathématique de la valeur théorique de  $R_2$

La tension maximale à laquelle nous pouvons charger la batterie 12V est d'environ 14,2V. Supposons donc  $V_{OUT} = 14,2V$  et calculons la valeur de la résistance variable  $VR_1$ .

Après le calcul :

$$R_x = 4788,18 \quad (4.3)$$

Maintenant, nous allons calculer la valeur de la résistance variable  $VR_1$

$$R_x = VR_1 + R_5 + R_6 \Rightarrow VR_1 = 1158 \quad (4.4)$$

### Fonctionnement de la phase de chargeur automatique dans trois cas différents

- Cas 1 : Lorsque les transistors à la fois bloquer OFF, c'est-à-dire lorsque les tensions dans les broches numériques D8 et D9 de la carte

Arduino sont égale à zéro.

$$R_3 = 470\Omega$$

La valeur de la résistance  $R_x$  est la combinaison des trois résistances  $R_1$ ,  $R_5$  et  $R_6$  car ces deux transistors sont bloqués et ne conduisent aucun courant, c'est-à-dire  $R_x = 4788$  ohms

Ainsi, la sortie de tension peut être trouvée après le calcul :

$$V_{OUT} = 13,98 + 0,215 \quad (4.5)$$

$$V_{OUT} = 14,195V \approx 14,2V \quad (4.6)$$

Ainsi, la charge de la batterie sera en vrac

- Cas 2 : Lorsque le transistor  $T_1$  est bloqué et que le transistor  $T_2$  est passant. Dans ce cas, la résistance  $R_6$  n'apporte aucune résistance à la résistance réglable car le transistor conducteur  $T_2$  conduit fortement et transmet toute la tension à la masse à partir du point final de  $R_5$ .

$$R_3 = 470\Omega$$

$$R_x = 4448\Omega$$

Par conséquent, la tension de sortie  $V_{OUT} = 13,32V$

Ainsi, dans ce cas, le circuit de chargeur ne maintient que l'état de charge flottante, c'est-à-dire que le chargeur de batterie fournit une tension de 13.2V à la batterie à un taux constant. Comme nous le savons tous, la batterie a une certaine résistance interne et commence à se décharger à une vitesse constante et afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé ici le concept de charge flottante.

- Cas 3 : Lorsque les deux transistors sont passant, dans ce cas, aucune résistance (c'est-à-dire  $R_1$ ,  $R_5$  et  $R_6$ ) ne contribue à  $R_x$  c'est-à-dire que  $R_x$  devient nul parce que le transistor  $T_2$  commence à conduire et toute la tension passe du collecteur à émetteur à la terre. Ainsi, la tension de sortie peut être trouvée après le calcul :

$$V_{OUT} = 1,25V$$

### Régulateur de tension fixe

Le régulateur de tension fixe LM7812 ( $I_{c2}$ ) est utilisé pour alimenter la carte Arduino uno et également utilisé pour calculer la consommation d'énergie afin de déterminer si la batterie est bonne ou non. Deux diodes

D<sub>5</sub> et D<sub>6</sub> sont utilisées pour la protection. Un réseau diviseur de tension est réalisé à l'aide de deux résistances R<sub>8</sub> et R<sub>10</sub> qui permettent de mesurer la différence de tension. Une sortie entre ces deux résistances est donnée à la broche analogique A1 de la carte Arduino uno comme indiqué dans la Figure l'objectif de ce diviseur est d'adapter la plage de tension pour la mesure comprise entre 0V et 5V.

Ic<sub>2</sub> : LM7812

D<sub>5</sub>, D<sub>6</sub> : 1N4007

Dissipateur thermique pour Ic<sub>2</sub>

C<sub>4</sub> = 10 F, 35V ou 63V (condensateur électrolytique)

C<sub>5</sub> = 100 F, 24V (condensateur électrolytique)

R<sub>8</sub> = 4,7kΩ

R<sub>10</sub> = 2,2kΩ

La tension de diviseur est donnée par l'équation suivante :

$$V = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_8} V_o \quad (4.7)$$

$$V = \frac{2,2}{2,2 + 4,7} 12 \quad (4.8)$$

$$V = 3,826V \quad (4.9)$$

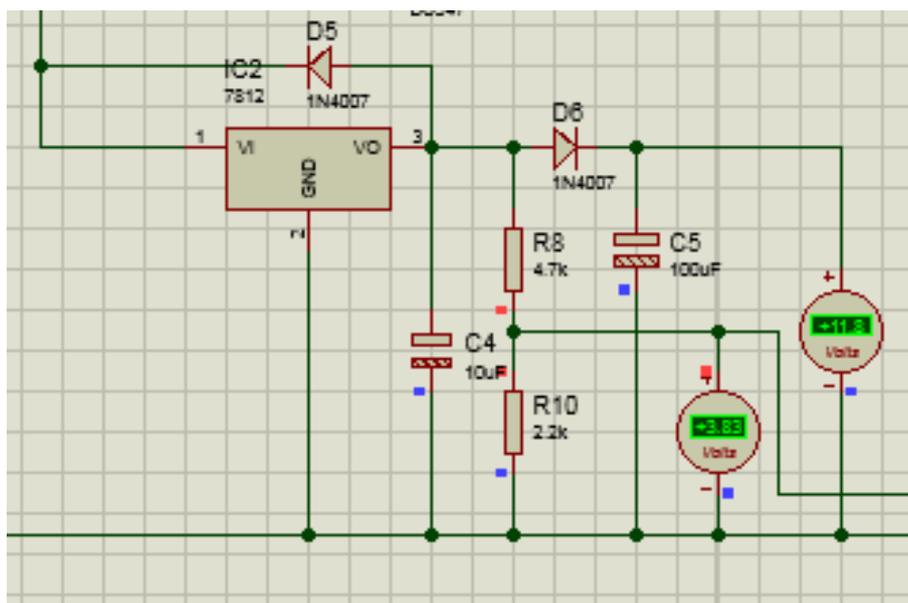


FIG. 4.3 : Circuit régulateur de tension fixe

#### 4.4.2 Abaisseur de tension et unité de redressement

L'abaisseur et le redresseur sont construits autour d'un transformateur primaire 220V AC vers un transformateur secondaire 15V-0-15V, deux diodes de redressement haute puissance et un condensateur de filtrage ( $C_3 = 2000 \mu\text{F}$ ). Cet agencement est fondamentalement un redresseur pleine onde avec circuit de filtrage. Le transformateur X 1 abaisse la tension d'entrée CA à 30 V CA qui est redressé à l'aide de deux diodes D 1 et D 2 et filtré à l'aide du condensateur C 3. Cette sortie CC contient une ondulation et l'amplitude du CC est d'environ 28,5 V ( $30 \cdot 0,7 \cdot 0,7 = 28,5\text{V}$ ). Environ 1,5 V est la chute de tension entre les diodes D 1 et D 2 combinées.

### 4.4.3 Unité d'affichage

L'unité d'affichage est construite autour d'un écran LCD alphanumérique  $16 \times 2$  et d'une carte Arduino. Comme cet écran LCD est basé sur Hitachi, nous n'avons pas besoin de résistance variable pour le contraste. Une résistance de valeur fixe est connectée à la broche  $V_{DD}$  (broche 3) de l'écran LCD à la masse comme on le constate sur la Figure ci-dessous. La broche de données supérieure de l'écran LCD ( $D_4, D_5, D_6$  et  $D_7$ ) est connectée à la broche numérique Arduino uno ( $D_5, D_4, D_3$  et  $D_2$ ) respectivement. Où la broche d'activation ( $E$ ) est de ré-initialisation / réglage ( $R_s$ ) de l'écran LCD est connectée respectivement à  $D_6$  et  $D_7$  comme indiqué dans le la Figure. La LED + et la LED - (broches 15 et 16) de l'écran LCD sont connectées à  $+V_{cc}$  (5V d'Arduino) via la résistance de limitation de courant  $R_{13}$  et GND respectivement.

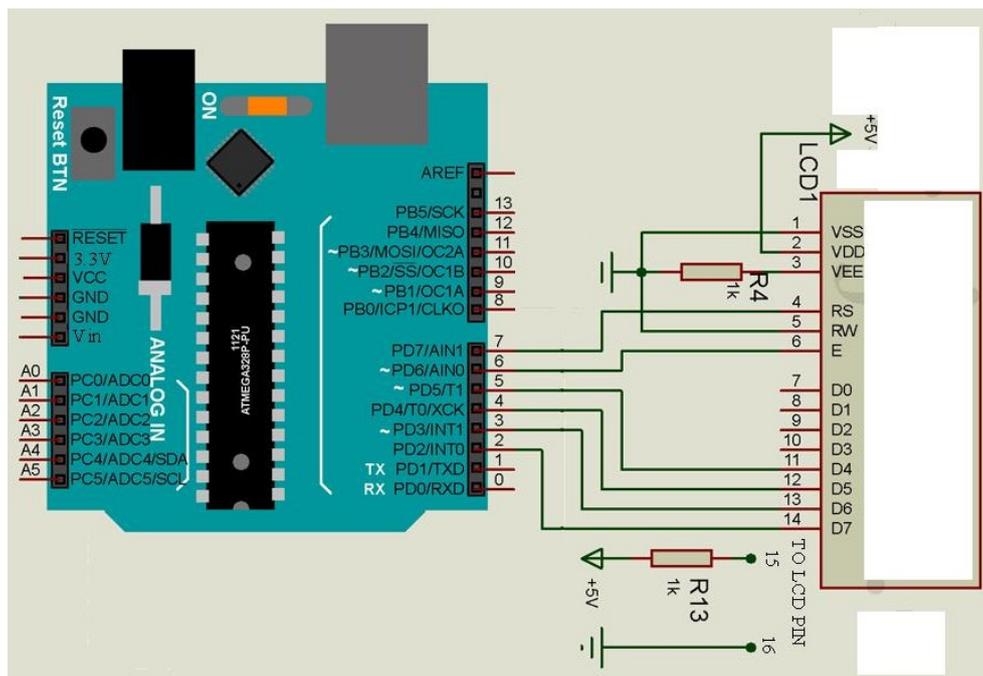


FIG. 4.4 : Unité d'affichage

#### 4.4.4 Etat des batteries

La Figure ci-dessous est réalisée pour vérifier l'état de la batterie, et pour cela il faut appuyer sur le commutateur  $SW_1$  pendant quelques instants. La carte Arduino est alimentée par la batterie et mesure la tension du réseau diviseur de tension formé à l'aide de la résistance  $R_{12}$  et de la résistance variable  $VR_2$ . Le cavalier est utilisé pour l'étalonnage du circuit pour le test de la batterie.

$R_{12} = 22k\Omega$

$VR_2 = 10k\Omega$  potentiomètre

$SW_1$  : Interrupteur Push-to-on.

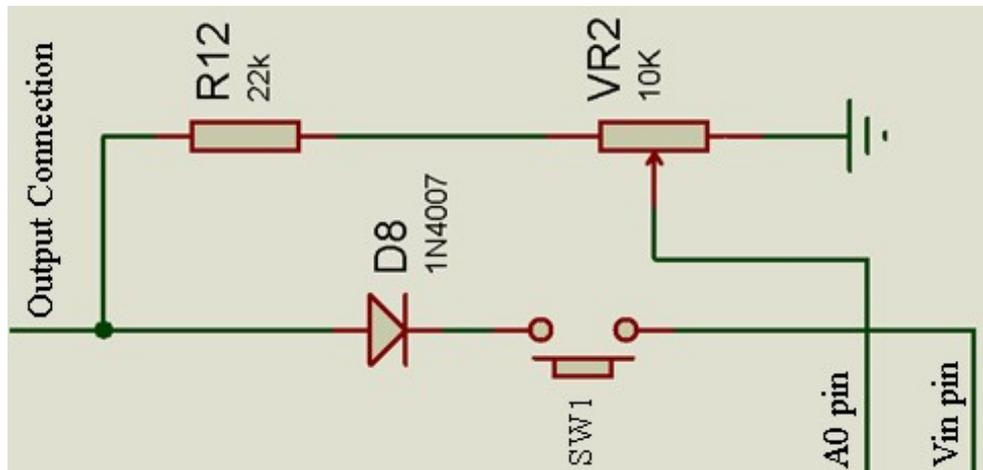


FIG. 4.5 : Circuit d'état des batteries

## 4.5 Implémentation du système de charge des batteries contrôlé par Arduino dans le central d'alimentation

Le schéma suivant permet de synthétiser l'implémentation du système conçu dans le centre d'alimentation d'Algérie Télécom.

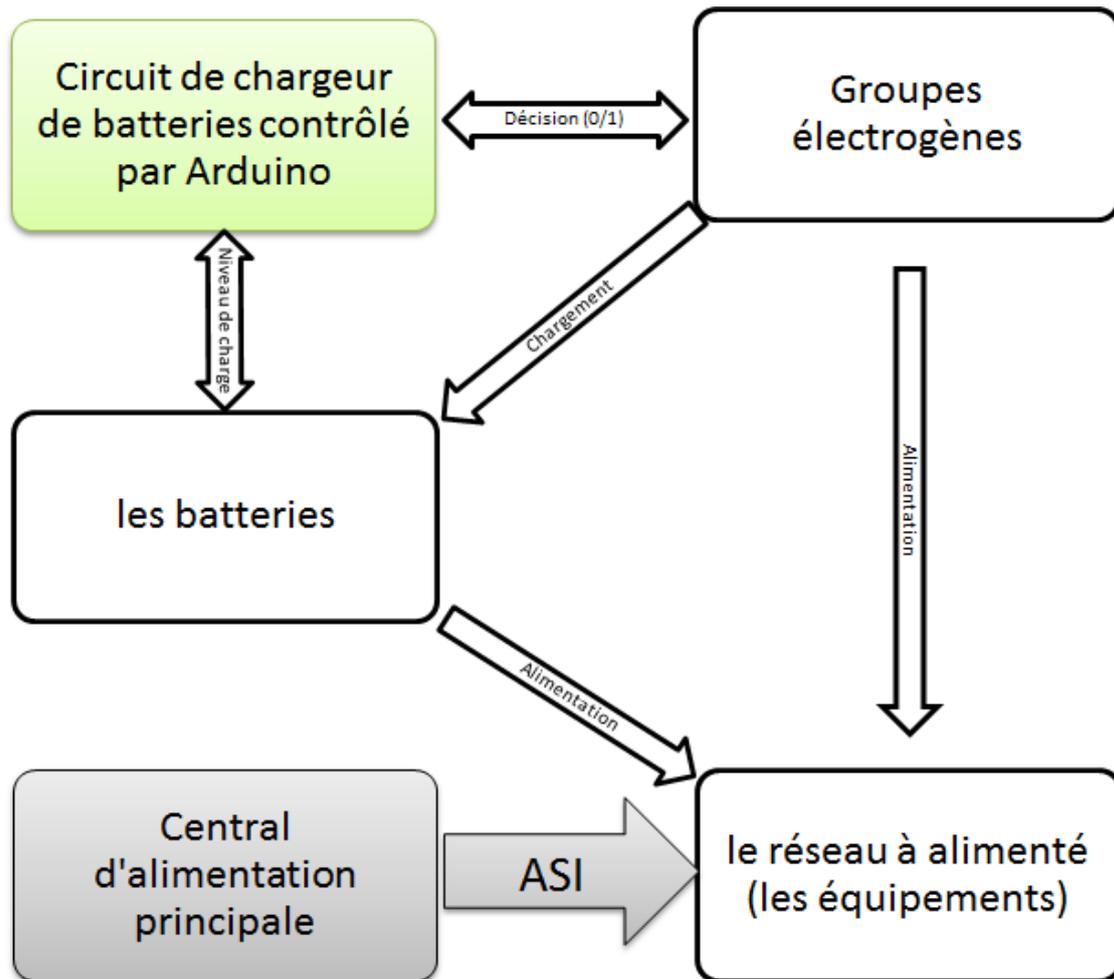


FIG. 4.6 : Schéma synoptique

Ce diagramme montre le rôle de notre système dans la gestion de l'alimentation du réseau lors d'une coupure d'électricité SONELGAZ.

Le circuit de chargeur de batteries contrôlé par Arduino permet de d'évaluer le niveau de charge des batteries afin de commander les groupes électrogènes (marche/arrêt).

- Cas 1 : les batteries sont chargées et n'ont pas atteint l'épuisement encore, donc la décision du circuit est '0' et donc les groupes sont en

modes arrêt et le réseau est alimenté par les batteries.

- Cas 2 : les batteries sont épuisées, donc la décision du circuit est '1' et donc les groupes électrogènes sont mis en marche pour recharger les batteries et alimenter le réseau et cela continue jusqu'au retour de l'ASI.

#### Algorithme de décision

L'algorithme suivant permet de donner la décision pour les GEs en considérant l'état de charge des batteries.

---

**Algorithm 2** : Algorithme implémenté sur la carte Arduino

---

```
1 const int batterypin = A0;
2 const int GEpin = A2;
3 const float TensionMin = 42;
4 const float TensionMax = 50;
5 int tmp = 0;
6 int oldvalue = 100;
7 void setup() {
8   Serial.begin(9600);
9 }
10 void loop() {
11   float b = analogRead(batterypin);
12   int minValue = (1023 * TensionMin) / 5;
13   int maxValue = (1023 * TensionMax) / 5;
14   //mettre en pourcentage
15   b = ((b - minValue) / (maxValue - minValue)) * 100;
16   if (b > 100)
17     b = 100;
18   else if (b < 0)
19     b = 0;
20   //pour avoir un pourcentage entier
21   int newvalue = b;
22   Serial.println(newvalue);
23   tmp = oldvalue - newvalue;
24   if (tmp > 0) // le cas de la décharge
25     if (b > 10)
26       analogWrite(GEpin, '0');
27     else
28       analogWrite(GEpin, '1');
29   else // le cas de la charge
30     if (b < 95)
31       analogWrite(GEpin, '1');
32     else
33       analogWrite(GEpin, '0');
34   oldvalue = newvalue;
35   delay(1000);
36 }
```

---

## 4.6 Etude technico-financière

Après avoir défini les besoins du réseau à alimenter (la puissance consommée, les capacités des batteries, le temps d'alimentation...) et aussi voir les différents types d'onduleur qui existent dans le marché, nous proposons l'onduleur Liebert GTX5 de VERTIV.

### 4.6.1 Liebert GTX5 de VERTIV

Vertiv Holdings Co est un fournisseur américain, basé dans l'Ohio, d'équipements et de services pour les centres de données, avec un portefeuille de solutions et de services d'alimentation, de refroidissement et d'infrastructure informatique qui s'étend du nuage à la périphérie du réseau.

Libert GTX5 est un système d'alimentation sans coupure en ligne com-



FIG. 4.7 : Liebert GTX5, VERTIV

pact, capable de conditionner et de réguler en continu sa tension de sortie. Le Liebert GTX5 fournit aux micro-ordinateurs et autres équipements sensibles une alimentation d'entrée sinusoïdale, sans variation de tension.

Ce dispositif permet de générer de fournir une puissance allant jusqu'à 20kW pour alimenter notre réseau et une tension de 230V qui sera ensuite abaissée pour alimenter les équipements qui fonctionnent avec du 48V. Lorsqu'elle est générée, l'alimentation est stable, sans variation de tension. Elle est néanmoins soumise, lors de sa transmission et de sa distribution, à des creux et à des pics de tension, ainsi qu'à des pannes totales susceptibles d'interrompre le fonctionnement des équipements, de provoquer des pertes de données et d'entraîner des dommages matériels.

Le Liebert GTX5 protège les équipements de ces perturbations. Le Liebert GTX5 recharge en continu ses batteries à partir de l'alimentation secteur. Ce dispositif a un temps de recharge de 3 heures jusqu'à 90% de la capacité après une décharge complète et il a une autonomie de 158 min d'alimentation de 5kW lorsqu'il est chargé à 100% avec un nombre d'armoires de batteries externes égal à 10.

#### 4.6.2 Fonctionnalités du système d'alimentation sans coupure et modèles disponibles

Le GXT5 inclut les fonctionnalités suivantes :

- Capacité de charge améliorée avec facteur de puissance de sortie de 1.
- Capacité de connexion en parallèle pour les modèles 10kVA, 16kVA et 20kVA, permettant d'obtenir une alimentation redondante parallèle jusqu'à 2+1.
- Adapté aux espaces dans lesquels l'alimentation secteur est instable grâce à une topologie double conversion et haute fréquence, avec un facteur de puissance d'entrée élevé, une vaste plage de tensions d'entrée et une sortie immunisée contre les interférences du réseau électrique.
- Bornes programmables avec protection des dispositifs critiques en cas de charge élevée sur les modèles 10kVA et inférieurs.
- Panneau de fonctionnement et d'affichage avec écran LCD couleur spécifique à chaque modèle, pour une configuration et un contrôle en toute simplicité du système d'alimentation sans coupure.
- Mode d'alimentation ECO et mode de veille intelligent permettant d'économiser un maximum d'énergie.

#### 4.6.3 Modes de fonctionnement du système d'alimentation sans coupure

- Mode normal :

Lorsque l'alimentation secteur est normale, le mode normal utilise le

redresseur et l'onduleur pour transmettre à la charge une alimentation stabilisée en tension et en fréquence. Le chargeur charge la batterie en mode normal.

- Mode de dérivation :

Le mode de dérivation alimente la charge depuis la source de dérivation (alimentation secteur) en cas de surcharge ou de défaillance au cours du fonctionnement normal.

- Mode batterie :

Le mode ECO permet de réduire la consommation électrique. Si la tension de dérivation est normale, la charge est alimentée par la dérivation. Si elle n'est pas normale, la charge est alimentée par le biais de l'onduleur. L'utilisation du mode ECO permet d'alimenter les équipements qui ne sont pas sensibles à la qualité de l'alimentation du réseau électrique via la dérivation afin de réduire la consommation électrique.

- Mode de dérivation de maintenance :

Les modèles de système d'alimentation sans coupure 5kVA ou plus intègre une dérivation de maintenance. Des boîtiers de distribution de l'alimentation MicroPOD sont disponibles en option pour ajouter cette fonctionnalité aux modèles plus petits.

## 4.7 Proposition du système hybride

Le monde s'oriente vers les énergies renouvelables vu leurs bienfaits écologiques et après plusieurs recherches faits dans ce domaine visant d'augmenter le rendement et de réduire le coût pour les rendre rentable dans un milieu industriel.

l'hybridation du système d'alimentation en utilisant les groupes électrogènes (les énergies fossiles) d'un côté et des énergie renouvelables est la solution idéale, vu que jusqu'à l'heure actuelle l'utilisation des énergies renouvelables uniquement n'est pas rentable (problème de stockage et de coût). Les entreprises modernes s'orientent vers l'hybridation des énergies fossiles et des des énergies renouvelables (solaire, éolienne) qui peuvent être installées sur le site ou être dé-localisées.

En effet, en Algérie qui a une très bonne exposition au soleil durant toute l'année a un très grand potentiel pour l'énergie solaire. Cette dernière peut être installée sur les toits des centrales d'alimentations des réseaux et stockée dans des batteries afin de l'utilisée lors d'une panne ou d'une coupure d'électricité principale de SONELGAZ.

## 4.8 Conclusion

La fonction principale d'un ingénieur en électronique est de trouver des solutions face à des problématiques en Système Embarqué, Télécommunications et même en instrumentation, pour aboutir à résoudre le problème il est nécessaire de faire une étude complète de tout les dispositifs à gérer pour avoir une idée détaillée sur le système à concevoir. Lors de la conception du système, un ingénieur doit être flexible pour pouvoir réagir face à n'importe quel problème même de spécialités sous-jacentes (en informatique, électrotechnique ou en automatique, etc.) vu la formation large de l'ingénieur durant son cursus dans les écoles supérieures.

## Conclusion et perspectives

## Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'études nous avons pu concevoir un système qui optimise la gestion de l'alimentation d'un réseau en cas de coupure dans un site de télécommunication. Ce travail a été effectué grâce à des profondes recherches et analyses, aussi par l'aide des différentes des personnes compétentes à l'Ecole Nationale Polytechnique et à Algérie Télécom qui nous ont permis de comprendre et percevoir les notions et principes nécessaires pour réaliser ce projet. Ce thème de ce PFE malgré sa simplicité, reste tout de même intéressant car il illustre une problématique dans un cas réel qu'un ingénieur peut rencontrer dans sa vie professionnelle. De plus, il permet de relier plusieurs disciplines dans lesquelles l'ingénieur s'est formé durant tout son cursus (Électronique, Électrotechnique, Informatique, Automatique. etc.).

Dans ce projet nous avons réussi à concevoir un système qui gère le démarrage du groupe électrogène jusqu'à la stabilisation de ce dernier pour pouvoir alimenter le réseau en cas d'une coupure d'électricité principale en implémentant un algorithme sur une carte Arduino pour évaluer le niveau de charge et prendre la décision d'une manière automatique avec un système de monitoring en temps réel tout en respectant principe de sécurité en cas d'un dis-fonctionnement.

Nous avons aussi effectué une étude technico-financière afin de dimensionner les batteries selon les besoins du réseau à alimenter et proposé un onduleur qui permet une autonomie suffisante pour notre application et qui est rentable pour le central d'alimentation électrique.

Le système conçu dans ce projet est un extrait parfait pour une mission d'ingénieur électronicien dans sa vie professionnelle. Cependant nous avons appliqué tous les principes de travail d'un ingénieur (le professionnalisme, la déontologie, le respect de la propriété intellectuelle, le respect des normes internationales, la gestion d'un projet, le travail d'équipe, la recherche. etc.) que nous avons appris durant notre cursus scolaire à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Les contributions que notre projet a pu apporter peuvent se résumer dans les points suivants :

- L'automatisation du système.
- Le monitoring en temps réel de niveau des batteries et ainsi prendre les décisions.
- Un bouton d'arrêt pour la sécurité en cas de maintenance.

## Perspectives

Ce travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études peut être amélioré d'un point de vue écologique et économique en utilisant les énergies renouvelables, en faisant des études de rendement et de rentabilité, il est possible de concevoir un système plus efficace et avec un coût raisonnable.

Ce projet peut avoir d'autres perspectives de développement comme :

- L'hybridation du système d'alimentation :  
L'utilisation des énergies renouvelables (solaire) par l'installation des plaques photo-voltaïques sur les toits du central d'alimentation électrique. Afin d'alterner entre énergies fossiles et énergies solaires pour équilibrer entre la rentabilité et l'aspect écologique.
- La dé-localisation des sites d'installation des énergies renouvelables :  
L'installation des centrales d'énergie renouvelables dans des zones dé-localisées afin d'avoir suffisamment de puissance et d'assurer une autonomie à base d'énergies renouvelables. Il faut prévoir une étude de distribution et de stockage d'énergie électrique pour alimenter le réseau.

# Bibliographie

- [1] M.S. Ait Cheikh, M.Chirk Belhadj, M. Bessaid, M. Becherif, C. Larbes. *Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables*, Unité de Recherche Appliquée en Energies Rnouvelables, Ghardaïa Algérie ,15 , 16 et 17 Octobre 2012.
- [2] M. Syphax OUKAOUR, M. Yanis ZERROUGUI, M. Abderahmane BOULAOUED. *Thèse de Master : Etude et simulation d'un chargeur de batterie intelligent*, Université de Béjaïa.
- [3] M. Ibrahim DINCER. *Comprehensive Energy Systems*, Volume 1, 2018, Pages 265-339
- [4] Liebert, *Système d'alimentation sans coupure GTX5*, VERTIV
- [5] M. Walid Hankache. *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupeélectrogène hybride à pile à combustible*, Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2008. Français. tel-00567577
- [6] M. Jérémy Lagorse. *Modélisation et optimisation d'alimentations électriques autonomes stationnaires multi-sources*, Laboratoire SeT (Systèmes et Transports) — Université de Technologie de Belfort Montbéliard Rue Thierry Mieg, 90000 BELFORT
- [7] M. Syphax Oukaour, M. Yanis Zerrougui, M. Abderahmane Boulaoued. *Etude et simulation d'un chargeur de batterie intelligent*, Université A. Mira-BEJAIA, 2019/2020
- [8] B. Ould Bilal. *Mise en œuvre de nouvelles approches d'optimisation multi-objectif de systèmes hybrides éolien-solaire-batterie-groupe électrogène*, Sciences de l'ingénieur [physics]. ESP, UCAD, 2012. Français.
- [9] M. Ali SARI, M. François LANZETTA, M. Didier CHAMAGNE, M. Christophe ESPANET, M. Didier MARQUET, M. Philippe NIKA

*Conception et analyse des performances d'un groupe électrogène à moteur Stirling.*, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Département ENISYS, Université de Franche-Comté Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort, France Telecom RD, 38-40 rue du Général Leclerc – 92794 Issy les Moulineaux

- [10] M. Yusuf Abdullahi Badamasi *The Working Principle Of An Arduino*, Nigerian Turkish Nile University, Abuja, Nigeria

### Webographie

- [1] Principe de fonctionnemnet des Accumulateur au Plomb (Juillet 2021) : <https://www.batterie-solaire.com/Accumulateur-plomb-principe-fonctionnement>.
- [2] Les différentes technologie de batteries (Juillet 2021) : <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-batteries.php>
- [3] L'évolution des batteries (Juillet 2021) : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/electrochimie/stockage-de-l-energie-evolution-des-batteries-12>
- [4] Liebert GXT5, VERTIV (Octobre 2021) : <https://www.vertiv.com/49bc43/globalassets/products/critical-power/uninterruptible-power-supplies-ups/vertiv-gxt5-brochure-en.pdf>
- [5] Les différentes technologies de batteries (Juillet 2021) : [http://www.contimac.org/DOCUMENTATIE/Training\\_BATTERY\\_CHARGERS-FR.pdf](http://www.contimac.org/DOCUMENTATIE/Training_BATTERY_CHARGERS-FR.pdf)
- [6] Effets de décharges trop profonde (Aout 2021) : <https://www.victronenergy.fr/upload/documents/Optimiserla-vie-des-batteries-plomb-Leçon-V02-Bis.pdf>
- [7] Principe de fonctionnement d'un chargeur de batterie (Septembre 2021) : <https://www.solaris-store.com/content/46-principe-de-fonctionnement-d-un-chargeur-de-batterie-solaire>
- [8] Chargeur de batterie automatique entre 14-15 volts avec un courant maximal de 3 ampères (Septembre 2021) : <https://electro-niques.blogspot.com/2011/12/chargeur-de-batterie-automatique-entree.html>
- [9] Chargeur automatique de batterie de voiture (Aout 2021) : [http://www.electronique-3d.fr/Chargeur\\_automatique\\_de\\_batterie.html](http://www.electronique-3d.fr/Chargeur_automatique_de_batterie.html)