

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option* : **Énergies Renouvelables en Électrotechnique**

**Intitulé :**

**L'aide Multicritère A La Décision Pour Le Choix  
D'un Système De Stockage**

**Présenté par :**

- ➤ **BENHADJA Mohammed Abdelouahab**
- **BELKHIRANI Nor El Bachir**
- **DJEDIDI Boudjema**

*Soutenu le : ... 19/06/2022..... devant le Jury :*

*M. ZEYNEB Amara  
M. BENOYHEMAN  
Noreddin*

*MAA  
MAA*

*Centre niversitaire Naâma  
Centre Universitaire Naâma*

*Président  
Examineur*

**Naama – Algérie – 2021/2022**



## Remerciements



*Tout d'abord, nous remercions Allah, et tous ceux qui nous a données la force et la patience pour accomplir cette tâche modeste A la fin de ce travail, nous remercions sincèrement l'encadreuse Mme K.Rekkal pour ses remarques, ses conseils considérables et ces critiques constructives.*

*Nous remercions également tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail. Nous remercions tous les enseignants qui ont encadré durant notre cursus universitaire.*

*Enfin que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.*

*Je dédie ce modeste  
travail A mon père le  
symbole d'espoir  
A ma mère le symbole de tendresse  
À mes amis et mes binômes qui ont été avec  
Moi dans la prospérité et l'adversité  
A tous ceux qui m'ont encouragé pour arriver jusqu'ici.  
A tous mes proches.  
A tous ce que j'aime. Cette mémoire leur est dédiée.*



*BELKHIRANI Nor El Bachir*



*DJDIDI Boudjemaa*

*Benhadja Mohammed Abdelouahab*

## Résumé

L'aide multicritère à la décision a pour but de donner à un décideur les outils lui permettant de résoudre un problème de décision à plusieurs points de vue. Ces points de vue sont souvent contradictoires. La principale difficulté d'un problème multicritère est qu'il s'agit d'un problème mathématiquement mal posé, c'est-à-dire sans solution objective. Il n'existe pas, en général, d'action meilleure que toutes les autres, simultanément sur tous les critères : le concept de solution optimale, un postulat de base de l'approche monocritère n'a donc pas de sens dans un contexte multicritère. Il ne s'agit pas donc de chercher une vérité cachée, mais plutôt à aider le décideur à progresser vers une action de compromis. Dans ce travail, Nous proposons d'appliquer l'approche aide multicritère à la décision (AMD) pour le choix d'un système de stockage (batterie) qui satisfait un ensemble maximum de critère préalablement sélectionnée afin de satisfaire nos besoins en énergie électriques.

**Mots clés :** AMD ; Technique de classement par similarité avec la solution idéale (TOPSIS); Batteries, Critère, Scénario, Energie renouvelable.

## Summary

Multi-criteria decision support aims to give a decision maker the tools to solve a decision problem from several points of view. These points of view are often contradictory. The main difficulty of a multi-criteria problem is that it is a mathematically ill-posed problem, that is to say without an objective solution. In general, there is no action that is better than all the others, simultaneously on all the criteria: the concept of optimal solution, a basic postulate of the single- criteria approach, therefore has no meaning in a multi-criteria context. . It is therefore not a question of looking for a hidden truth, but rather of helping the decision-maker to progress towards a compromise action. In this work, we propose to apply the multi-criteria decision aid (AMD) approach for the choice of a storage system (battery) that satisfies a maximum set of criteria previously selected in order to satisfy our electrical energy needs.

**Keywords:** AMD; Technique for Order by Similarity to Ideal Solution; Batteries, Criterion, Scenario, Renewable energy

## ملخص

يهدف دعم القرار متعدد المعايير إلى إعطاء صانع القرار الأدوات اللازمة لحل مشكلة القرار من عدة وجهات نظر. غالبا ما تكون وجهات النظر هذه متناقضة. تتمثل الصعوبة الرئيسية لمشكلة متعددة المعايير في أنها مشكلة مطروحة رياضياً، أي بدون حل موضوعي. بشكل عام، لا يوجد إجراء أفضل من جميع الإجراءات الأخرى، في نفس الوقت على جميع المعايير: مفهوم الحل الأمثل، افتراض أساسي لنهج المعايير الفردية، وبالتالي ليس له معنى في سياق متعدد المعايير. لذلك، لا يتعلق الأمر بالبحث عن الحقيقة المخفية، بل يتعلق بمساعدة صانع القرار على التقدم نحو إجراء توافقي. في هذا العمل، نقترح تطبيق نهج المساعدة في اتخاذ القرار متعدد المعايير لاختيار نظام تخزين (بطارية) يفي بأقصى مجموعة من المعايير المحددة مسبقاً من أجل تلبية احتياجات الطاقة الكهربائية لدينا.

**الكلمات المفتاحية:** بطارية؛ القرار متعدد المعايير لاتخاذ القرار، تقنية الترتيب حسب التشابه مع الحل المثالي، القرار، معايير، سيناريو. الطاقات المتجددة

**L'aide multicritère a la décision pour le choix d'un système de stockage**

<b>Dédicace</b> .....	<b>I</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>IV</b>
<b>Liste des Acronymes</b> .....	<b>VII</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Introduction général</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I AIDE MULTICRITERE A LA DECISION</b> .....	<b>2</b>
<b>I. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>II. Le processus d'aide multicritère à la décision</b> .....	<b>4</b>
<b>III. Méthodes de l'approche du processus d'aide à la décision</b> .....	<b>5</b>
<b>III.1.Méthodes de l'utilité multi-attribut</b> .....	<b>5</b>
<b>III.1.1. La méthode SMART: Technique simple d'évaluation multi-attributs</b>	<b>5</b>
<b>A) Présentation de la méthode</b> .....	<b>5</b>
<b>B) Exemple d'application pour la recherche d'un partenaire</b> .....	<b>5</b>
<b>III.1.2. La méthode TOPSIS : Technique de classement par similarité avec la solution idéale</b> .....	<b>8</b>
<b>A) Les principales étapes de la méthode</b> .....	<b>8</b>
<b>B) Exemple d'application sur une compagnie de sous-traitance</b> .....	<b>9</b>

C) Application de la méthode TOPSIS .....	9
III.1.3. La méthode SAW (Pondération additive simple) .....	10
A) Les principales étapes de la méthode .....	10
B) Exemple d'application sur une entreprise de transport .....	11
III.1.4. La méthode AHP .....	12
A) Principales étapes de la méthode .....	12
III.2. Méthodes de sur-classement .....	14
III.2.1. La méthode Electre I:Élimination et Choix Traduisant la Réalité.....	14
A) Les principales étapes de la méthode .....	14
III.2.2. La méthode Electre II .....	15
A) Les principales étapes de la méthode .....	16
III.2.3. La méthode Electre III .....	18
A) Présentation de la méthode .....	18
B) Les principales étapes de la méthode .....	19
IV. Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de résolution ...	20
IV.1. Les avantages des différentes méthodes .....	20
A) Les avantages des méthodes multi attributs .....	20
B) Les avantages des méthodes de sur classement .....	20
IV.2. Les Inconvénients des différentes méthodes .....	21
A) Les Inconvénients des méthodes multi attributs .....	21
B) Les Inconvénients des méthodes de sur classement .....	21
V. Conclusion .....	22
 CHAPITRE II LES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIES .....	 23
I Introduction .....	24

<b>II Les différentes méthodes de stockage d'énergie .....</b>	<b>24</b>
<b>II.1 Les super-condensateurs .....</b>	<b>25</b>
<b>II.2 Les piles à combustible (PAC) .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3 Les batteries et les accumulateurs électrochimiques .....</b>	<b>27</b>
<b>II.4 Accumulateurs secondaires et primaires .....</b>	<b>27</b>
<b>III Caractéristiques des batteries .....</b>	<b>28</b>
<b>III.1 La tension nominale .....</b>	<b>28</b>
<b>III.2 Tension à vide .....</b>	<b>28</b>
<b>III.3 Tension de fin de décharge .....</b>	<b>28</b>
<b>III.4 La résistance interne .....</b>	<b>28</b>
<b>III.5 Capacité d'une batterie d'accumulateurs .....</b>	<b>29</b>
<b>III.6 Le taux-C .....</b>	<b>29</b>
<b>III.7 Effet mémoire .....</b>	<b>30</b>
<b>III.8 L'énergie .....</b>	<b>30</b>
<b>III.9 Etat de charge (SOC) .....</b>	<b>30</b>
<b>III.10 Etat de batterie (SOH) .....</b>	<b>30</b>
<b>IV Types d'accumulateurs .....</b>	<b>31</b>
<b>IV.1 Généralités sur l'accumulateur au plomb .....</b>	<b>31</b>
<b>IV.1.1 Historique .....</b>	<b>32</b>
<b>IV.1.2 Place de l'accumulateur au plomb aujourd'hui .....</b>	<b>32</b>
<b>IV.1.3 Constitution de la batterie au plomb .....</b>	<b>34</b>
<b>IV.1.4 Différent types d'accumulateurs au plomb.....</b>	<b>35</b>
<b>1) La batterie au plomb ouverte .....</b>	<b>35</b>
<b>2) La batterie à recombinaison de gaz .....</b>	<b>35</b>
<b>IV.1.5 Principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb ouvert .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.1.6 Les grandeurs caractéristiques .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.2 Généralités sur l'accumulateur au Nickel cadmium .....</b>	<b>42</b>

<b>IV.2.2 Historique</b> .....	<b>42</b>
<b>IV.2.3 Constitution d'une batterie</b> .....	<b>42</b>
<b>IV.2.4 Conditions d'utilisation</b> .....	<b>43</b>
<b>IV.2.5 Propriétés et applications des batteries Ni-Cd</b> .....	<b>43</b>
1) <b>Fonctionnement</b> .....	<b>43</b>
2) <b>Format</b> .....	<b>43</b>
3) <b>Problématiques</b> .....	<b>44</b>
4) <b>Marché</b> .....	<b>44</b>
<b>IV.2.6 Les grandeurs caractéristiques</b> .....	<b>44</b>
<b>IV.3 Généralités Sur L'accumulateur Au NI-MH</b> .....	<b>44</b>
<b>IV.3.1 Historique</b> .....	<b>44</b>
<b>IV.3.2 Réalisation des accumulateurs étanches Ni-MH</b> .....	<b>45</b>
<b>IV.3.3 Electrode à hydrogène</b> .....	<b>45</b>
<b>IV.3.4 Réaction principales</b> .....	<b>45</b>
<b>IV.3.5 Les grandeurs caractéristiques</b> .....	<b>46</b>
<b>IV.4 Généralités sur l'accumulateur au Lithium ion (Li-ion)</b> .....	<b>47</b>
<b>IV.4.1 Historique</b> .....	<b>47</b>
<b>IV.4.2 Technologie lithium-ion</b> .....	<b>49</b>
<b>IV.4.3 Description tituants internes des batteries Li-ion</b> .....	<b>51</b>
1) <b>Electrode négative</b> .....	<b>51</b>
2) <b>Electrode positive</b> .....	<b>52</b>
3) <b>L'électrolyte</b> .....	<b>52</b>
4) <b>Mécanisme Chimique</b> .....	<b>54</b>
<b>IV.4.4 Avantages et Inconvénients</b> .....	<b>54</b>
1) <b>Avantages</b> .....	<b>54</b>
2) <b>Inconvénients</b> .....	<b>54</b>
<b>IV.4.5 Conclusion</b> .....	<b>56</b>



<b>CHAPITRE III RESULTATS DE SIMULATIONS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>57</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>58</b>
<b>II. Langage de développement .....</b>	<b>58</b>
<b>II.1. Choix du langage .....</b>	<b>58</b>
<b>II.2. Les particularités du langage MATLAB .....</b>	<b>58</b>
<b>III. Application de l'aide multicritère à la décision pour le choix d'un système de stockage .....</b>	<b>59</b>
<b>III.1. Présentation et identification du problème .....</b>	<b>59</b>
<b>III.2. Définition de l'ensemble des critères .....</b>	<b>59</b>
<b>III.3. La matrice de décision .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4. Implémentation des méthodes TOPSIS .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1. Les étapes suivies pour l'implémentation .....</b>	<b>60</b>
· <b>Les fonctions prédéfinies .....</b>	<b>61</b>
· <b>Les fonctions implémentées .....</b>	<b>61</b>
<b>III.4.2. Résolution avec la méthode TOPSIS .....</b>	<b>62</b>
<b>A) Idéal et anti-idéal .....</b>	<b>63</b>
<b>IV. Description de l'interface utilisateur .....</b>	<b>64</b>
<b>I. Explication du système et interprétation des résultats.....</b>	<b>65</b>

<b>II. Explication du système et interprétation des résultats.....</b>	<b>65</b>
<b>V. Conclusion .....</b>	<b>67</b>
<b>VII. Conclusion général.....</b>	<b>69</b>

## Table des figures :

### ----- CHAPITRE I -----

<b>Figure(I.1) Représentation du processus d'aide multicritère à la décision .....</b>	<b>04</b>
--	-----------

### ----- CHAPITRE II -----

<b>Figure (II.1) : Structure interne des super-condensateurs à couche double électrique.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure (II. 2): Fonctionnement d'une pile à combustible.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure (II. 3): L'accumulateur au plomb-acide, malgré sa très grande toxicité .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure (II. 4) : Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure (II. 5):Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure (II. 6):Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure (II. 7): Vue éclatée d'une batterie de démarrage .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure (II. 8) : Réaction chimique la décharge.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure (II. 9) : Réaction chimique Chargement de la batterie.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure (II. 10):Produits et réactifs d'un élément au plomb-acide, se formant en décharge..</b>	<b>38</b>

<b>Figure (II. 11):Technologies au plomb Pb selon différents critères.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure (II. 12):technologies au plomb selon différents tension.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure (II. 13):Technologies au plomb OPZS selon différents critères .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure (II. 14):Technologies au plomb AGM selon différents.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure (II. 15):Technologies au plomb GEL selon différents critères .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure (II. 16):Technologies au plomb OPZV selon différents critères.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure (II. 17):Produit set réactifs d'un élément au plomb-acide, se formant en décharge..</b>	<b>42</b>
<b>Figure (II. 18):Technologies au nickel NiCd NiMH selon différents critères.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure (II. 19):Technologies au nickel Ni Fe selon différents critères .....</b>	<b>47</b>
<b>Figure (II. 20) : Représente le schéma de la structure d'un l'accumulateur.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure (II. 21):Structure d'accumulateur lithium ion .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure (II.22):Structure et principe de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion .....</b>	<b>50</b>
<b>Figure (II. 23) : Tension à vide des différentes électrodes négatives existantes xiv .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure (II. 24) : Présentation des électrodes positives et négatives des batteries Li-ion selon leur potentiel électrique vs Li/Li+ et leur capacité de stockage par unité de masse.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure (II. 25):Technologies au lithium Li Fe Po4 selon différents critères.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure (II. 26):Technologies au lithium Li-ion Li-po selon différents critères .....</b>	<b>55</b>

### ----- CHAPITRE III -----

<b>Figure (III. 1): Fenêtre d'accueil de la fonction TOPSIS .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure (III. 2): Algorithme de la fonction TOPSIS.....</b>	<b>65</b>

# Liste des tableaux :

## ----- CHAPITRE I -----

Tableau (I.1): Règles d'optimisation SMART produite selon quatre critères .....	06
Tableau (I.2) : Les offres reçu selon quatre critères selon la méthode smart .....	06
Tableau (I.3): Les actions effectué par rapport au différent critère (SMART) .....	07
Tableau (I.4): Règles d'optimisation avec TOPSIS produits selon quatre critères.....	09
Tableau (I.5): les offres reçu selon quatre critères selon la méthode TOPSIS .....	09
Tableau (I.6): Règles de préférence SAW produits selon quatre critères .....	11
Tableau (I.7): Représentation des valeurs qualitatifs en quantitatif (SAW) .....	11
Tableau (I.8): Interprétation des valeurs pour déterminer des actions a effectuer( SAW).	12
Tableau (I.9): déterminé de la cohérence des jugements selon la méthode (AHP) .....	13

## ----- CHAPITRE II -----

Tableau (II.1): Principales comparaisons des deux types de batterie au plomb .....	36
Tableau (II.2): Caractéristiques d'un accumulateur au plomb .....	39
Tableau (II.3): Caractéristiques d'un accumulateur au Ni-cd.....	44
Tableau (II.4): Caractéristiques d'un accumulateur au Ni- MH.....	46
Tableau (II.5): Caractéristiques d'un accumulateur au Li-ion .....	54

## ----- CHAPITRE III -----

Tableau (III.1): les poids de l'évaluation des différentes batteries selon les différents critères.....	60
Tableau (III.2): Fonctions prédéfinies utilisées sous MATLEB.....	61



---

## **Introduction générale**

---

L'objectif principal de notre étude est de concevoir un outil d'aide multicritère à la décision pour être capable de choisir la meilleur source d'énergie dans notre cas la batterie.

Les besoins en énergie ainsi que la recherche de moyens efficaces pour son stockage. C'est la raison pour laquelle ce domaine d'activité n'a cessé de se développer [1].

Le stockage de l'énergie électrique représente un défi majeur ; actuellement, seuls les condensateurs et les batteries d'accumulateurs sont capables de disposer d'une réserve d'énergie autonome. Il existe plusieurs types d'accumulateurs et plusieurs facteurs électriques et chimiques peuvent affectés leur performance. D'autre part, ces accumulateurs jouent un rôle primordial dans l'industrie, que ce soit dans la nouvelle génération des voitures électriques et hybrides ou dans les appareils électroniques grand publique [2] [3].

. Dans la majorité des systèmes faisant intervenir un système de stockage d'énergie, on trouve un système de gestion de l'énergie associé à la batterie [2].

La problématique de notre mémoire c'est de chercher qu'elle système de stockage le plus opérationnelle pour notre installation PV.

A cet effet notre mémoire est organiser en trois chapitre dans le premier est consacré à l'aide à la décision qui consiste à assister les décideurs et les aider à mieux exprimer leurs choix et préférences vis-à-vis d'une situation donnée dans notre étude mieux choisir la batterie à utiliser, d'où nous allons voir les concepts théoriques de l'aide multicritère à la décision, Les différentes méthodes d'aide multicritère à la décision. la modélisation détaillée du problème et décrira l'approche détaillée de résolution. le deuxième chapitre est consacré au éléments de stockage et les différents types de batterie, le principe fondamental du fonctionnement d'un accumulateur et il décrit certaines caractéristiques de ce dernier sans tenir compte de l'interaction complexe entre les processus électrochimiques et physiques qui occurrent pendant le fonctionnement de la batterie, Le dernier chapitre présente les résultats de simulation de l'application dans l'environnement du Matlab.

Une conclusion générale et une perspective seront introduites à la fin de ce travail.

# **CHAPITRE I**

# **AIDE MULTICRITERE A LA DECISION**

## I. Introduction

Nous pouvons dater "les origines de l'aide multicritère à la décision à la période un peu antérieure à la deuxième guerre mondiale ; elles se trouvent dans les études menées par l'armée Britannique dans le cadre de l'installation des systèmes radars et les efforts de décodage du code secret des communications allemandes (1936 – 1937)" [1].

En réalité, les origines de l'aide multicritère à la décision (AMD) à la décision remontent au moins jusqu'au 18ème siècle, où les institutions avaient déjà occupé les scientifiques et les gestionnaires sur les problèmes combinatoires, sur les procédures de décisions collectives, le Marquis de Condorcet a été le premier à appliquer systématiquement des théories mathématiques aux sciences sociales. En 1785, il écrit son ouvrage *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*, qui traite de prise de décision en présence de plusieurs votants.

Cependant, les bases de l'AMD moderne ont été posées au milieu du 20ème siècle avec la théorie des préférences révélées de Samuelson (1938) [2], les débuts de la théorie des jeux par von Neumann et Morgenstern (1944)[3], les recherches sur les aspects psychologiques et mathématiques des décisions par Fishburn (1970), en 1957 paraît un ouvrage qui reste à ce jour une très bonne référence des théoriciens de la décision "Games and Decision " de Luce et Raiffa. Le point y est fait sur l'état de l'art à cette époque et de nombreuses suggestions sur des extensions et des applications possibles sont proposées" [4].

En matière d'aide à la décision, la littérature "multicritère" a connu un extraordinaire accroissement depuis le début des années 1970. Les spécialistes ont souvent cherché à expliquer ce développement (voir, par exemple, Zeleny (1982)[5] ou Scharlig (1985)[4]) en faisant remarquer que la "réalité" elle-même était multicritère et que toute décision impliquait de "peser le pour et le contre" [4].

Cette brève introduction au domaine de l'Aide Multicritère à la décision montre bien la diversité des sujets de recherche qui peuvent être traités on peut donc y trouver par exemple la proposition de nouvelles procédures d'agrégation multicritère, leur caractérisation mathématique, l'étude du comportement du décideur en vue de proposer la procédure d'agrégation appropriée, la recherche de recommandations robustes, la formalisation du processus d'AMD et le développement d'outils informatiques qui lui viennent en soutien, l'application des méthodes d'AMD à d'autres champs scientifiques ou à des problèmes décisionnels de la vie réelle . . . [6].



**II. Le processus d'aide multicritère à la décision :**

Guitouni [Guitouni 1998] stipule que le processus d'aide multicritère à la décision peut généralement être vu comme un processus récursif (itératif), non linéaire, composé de cinq étapes principales : [7]

- (1) La structuration de la situation (problème) de décision.
- (2) L'articulation et la modélisation des préférences au niveau de chaque point de vue (modélisation des préférences locales).
- (3) L'agrégation de ces préférences locales en vue d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globaux.
- (4) L'exploitation de cette agrégation.
- (5) La recommandation.

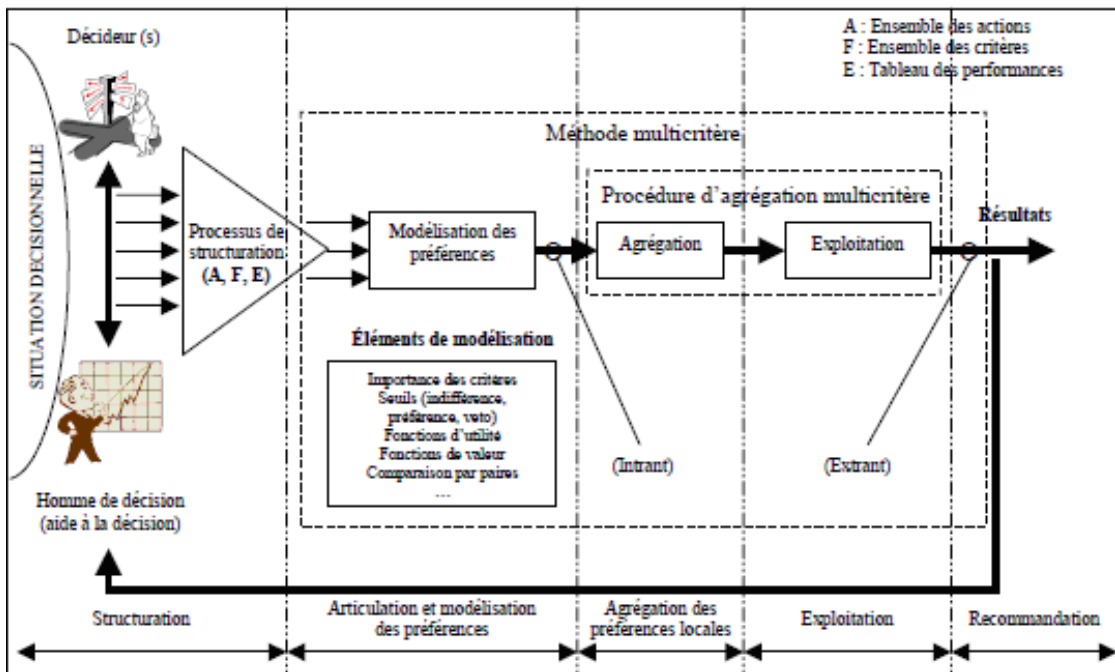


Figure (I.1) Représentation du processus d'aide multicritère à la décision [Guitouni et al, 1999]. [8].

Comme précisé dans la Figure (I.1), nous supposons que face à une situation décisionnelle, le décideur (la personne ayant connaissance des actions, des critères, ...) sera aidé par un homme d'étude (personne sensée maîtriser le processus d'aide à la décision). Il est possible que le décideur soit lui-même l'homme d'étude, nous détaillons ci-dessous, chacune des étapes du processus d'aide multicritère à la décision.

### III. Méthodes de l'approche du processus d'aide à la décision

Ces approches sont caractérisées par une interaction continue entre l'homme d'étude et le décideur tout au long du processus d'aide à la décision, nous allons les détailler ci-dessus.

#### III.1. Méthodes de l'utilité multi-attribut

##### III.1.1. La méthode SMART: Technique simple d'évaluation multi-attributs

###### A) Présentation de la méthode

Edwards [9] pense que si la modélisation des préférences est assez complexe, entre autres raisons à cause des erreurs de mesure, il serait intéressant de simplifier cette modélisation en mettant de l'avant une procédure simple pour obtenir les préférences réelles du décideur qui sont nécessairement subjectives. C'est ainsi qu'il a été conduit à développer la procédure SMART. Il constate que plusieurs expériences et simulations avec le décideur confirment qu'on obtient d'aussi une bonne approximation avec la fonction additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont beaucoup plus complexes. La procédure se présente comme suit:[10]

**Étape 1 :** Mettre les critères selon l'ordre décroissant d'importance. C'est une étape qui devrait déclencher une discussion entre le décideur et tous ses partenaires dans le processus de décision.

**Étape 2 :** Déterminer le poids de chaque critère.

**Étape 3 :** Faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme, cette étape permet de normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1.

**Étape 4 :** Mesurer la localisation de chaque action sur chaque critère ( $u_j(a_i)$ )

Les évaluations des actions se font sur une échelle variant de 0 (minimum possible) à 100 (maximum possible).

**Étape 5 :** Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j * u_j(a_i), i=1,2,\dots, \quad (I.1)$$

**Étape 6 :** Classer les actions selon l'ordre décroissant de  $U(a_i)$ .

###### B) Exemple d'application pour la recherche d'un partenaire

Une entreprise cherche un partenaire pour externaliser un processus de fabrication d'un produit qu'elle a des difficultés à maîtriser. Le comité de direction a décidé d'exploiter la méthode SMART pour faire son choix.

Critère de sélection	sens de l'optimisation
Coût du contrat d'externalisation (C1)	Minimiser
Licenciement (C2)	Minimiser
Amélioration de la qualité (C3)	Maximiser
Proximité (C4)	Maximiser

Tableau (I.1): Règles d'optimisation avec SMART produits selon quatre critères [6].

La direction a reçu les 5 offres suivantes :

Offre (a <sub>i</sub> )	Coût (C <sub>1</sub> )	licenciement (C <sub>2</sub> )	Qualité (C <sub>3</sub> )	Proximité (C <sub>4</sub> )
a <sub>1</sub>	40	100	insuffisante	très loin
a <sub>2</sub>	100	140	Très bonne	Très proche
a <sub>3</sub>	60	40	Bonne	Proche
a <sub>4</sub>	60	40	Moyenne	Loin
a <sub>5</sub>	70	80	Bonne	Très proche

Tableau (I.2):les offres reçu selon quatre critères selon la méthode smart [6].

**Étape 1 :** Mettre les attributs selon l'ordre décroissant d'importance après la discussion avec le syndicat ouvrier, le comité de direction a opté pour l'ordre suivant :

Licenciements (C<sub>2</sub>) > Qualité (C<sub>3</sub>) > Coût (C<sub>1</sub>) > Proximité (C<sub>4</sub>).

**Étape 2 :** Déterminer le poids de chaque attribut.

Le comité de direction a commencé par donner une valeur de 10 au critère le moins important à savoir la proximité (C<sub>4</sub>). Les coût ont été considérés 4 fois plus importants que la proximité : une valeur de 40 a été donc attribuée aux coûts (C<sub>1</sub>). Une valeur de 150 a été attribuée à la qualité (C<sub>3</sub>) et une valeur de 250 aux licenciements (C<sub>2</sub>).

**Étape 3 :** Normalisation des coefficients d'importance : on divise chaque valeur de l'étape précédente par la somme des valeurs :

- Licenciement (C<sub>2</sub>) =  $\frac{250}{10+40+150+250} = 55.6 \%$ .

- Qualité (C<sub>3</sub>) =  $\frac{150}{10+40+150+250} = 33.3 \%$ .

- Coût (C<sub>1</sub>) =  $\frac{40}{10+40+150+250} = 8.9 \%$

- proximité (C<sub>4</sub>) =  $\frac{10}{10+40+150+250} = 2.2 \%$

Ainsi a<sub>1</sub>= 0.089, a<sub>2</sub>=0.556, a<sub>3</sub>=0.333, a<sub>4</sub>=0.022.

**Étape 4 :** Evaluation des actions sur chaque attribut ( $u_j(a_i)$ ).

- pour les coûts : (Max=100 et Min=40)

$$U_2=100*\frac{(140-\text{Licenciement } i)}{(140-40)} \text{ en \%}$$

Ainsi

$$U_{1(a_1)}=100*\frac{(100-40)}{(140-40)} = 100 \%$$

$$U_{1(a_2)}=100*\frac{(100-100)}{(140-40)} = 0 \%$$

$$U_{1(a_3)}=100*\frac{(100-60)}{(140-40)} = 66.7 \%$$

$$U_{1(a_4)}=100*\frac{(100-60)}{(140-40)} = 66.7 \%$$

$$U_{1(a_5)}=100*\frac{(100-70)}{(140-40)} = 50 \%$$

- Pour les licenciements :(Max=140 et Min=40)

$$U_2=100*\frac{(140-\text{Licenciement } i)}{(140-40)} \text{ en \%}$$

Ainsi,  $u_2(a_1) = 40\%$ ,  $u_2(a_2) = 0\%$ ,  $u_2(a_3) = 100\%$ ,  $u_2(a_4) = 100\%$ ,  
 $u_2(a_5) = 60\%$ .

- Pour la qualité, la valeur de 100 a été accordée à très bonne, la valeur 0 a été accordée à insuffisante, 66 à bonne et 33 à moyenne.

La qualité :(Max=100 et Min=40)

- $u_3(a_1) = 0\%$ ,  $u_3(a_2) = 100\%$ ,  $u_3(a_3) = 66\%$ ,  $u_3(a_4) = 33\%$ ,  $u_3(a_5) = 66\%$ .

- Pour la proximité, la valeur de 100 a été accordée à très proche, la valeur 0 a été accordée à très loin, 66 à proche et 33 à loin

Ainsi,  $u_4(a_1) = 0\%$ ,  $u_4(a_2) = 100\%$ ,  $u_4(a_3) = 66\%$ ,  $u_4(a_4) = 33\%$ ,  $u_3(a_5) = 100\%$ .

**Étape 5 :** Détermination des valeurs des actions.

Offre (ai)	Coût(C1)	Licenciement (C2)	Qualité (C3)	Proximité (C4)	u(ai)
Poids ( $\pi_i$ )	0.089	0.556	0.333	0.022	...
a1	100	40	0	0	31.1
a2	0	0	100	100	35.5
a3	66.7	100	66	66	85.0
a4	66.7	100	33	33	73.3
a5	50	60	66	100	62.0

Tableau (1.3) : Les actions effectuer par rapport au différent critère (SMART) [6].

**Étape 6** : classification des actions.

L'offre proposée par  $\alpha_3$  est la meilleure, suivie de celle de  $\alpha_4$  et  $\alpha_5$ .

Les offres proposées par  $\alpha_2$  et  $\alpha_1$  viennent en dernières positions avec des utilités de moins de 36.

Ainsi, le comité de direction de l'entreprise optera pour le partenaire  $\alpha_3$ .

### III.1.2. La méthode TOPSIS : Technique de classement par similarité avec la solution idéale

Proposée pour la première fois par [Hwang et Yoon, 1981], elle se base sur la relation de dominance qui est représentée par les distances entre les poids et la solution idéale. Son principe consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale et de s'éloigner le plus possible de la pire solution pour tous les critères [11].

#### A) Les principales étapes de la méthode

La méthode se présente comme suit :

**Étape 1** : normaliser les performances comme suit :

$$E_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m g_j(a_i)^2}}; i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n. \quad (I.2)$$

**Étape 2** : calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative aux attributs :

$$e''_{ij} = \pi_j * e_{ij}; i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n. \quad (I.3)$$

**Étape 3** : déterminer les profils idéal ( $a^*$ ) et anti-idéal ( $a^*$ ).

$$a^* = \{ \max_{ij} \{ e''_{ij} \}, i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n \}; e^* = \max_{ij} \{ e''_{ij} \} \quad (I.4)$$

$$a^* = \{ e_{j^*}, 1, 2, \dots, n \}.$$

**Étape 4** : calculer la distance euclidienne par rapport aux profils ( $a^*$ ) et

$$D^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e''_{ij} - e^*_j)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (I.5)$$

$$D^*_{*j} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (e''_{ij} - e_{j^*})^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (I.6)$$

**Étape 5** : calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal.

$$C^*_i = \frac{D^*_{*j}}{D^*_i + D^*_{*j}}; \forall i = 1, 2, \dots, m \text{ avec } 0 \leq C^*_i \leq 1 \quad (I.7)$$

**Étape 6** : ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de  $C^*_i$ .

### B) Exemple d'application sur une compagnie de sous-traitance

Une entreprise cherche un partenaire pour sous-traiter la fabrication d'un produit. La direction de cette entreprise privilégie les critères lors de choix de :

Critère de sélection	Sens d'optimisation	Coefficient d'importance.
Fiabilité (C1)	Maximiser	45%
Capacité d'autofinancement (C2)	Maximiser	35%
Coût du contrat sous-traitance (C3)	Maximiser	20%

Tableau (1.4) règles d'optimisation avec TOPSIS produits selon quatre critères[6].

La direction a reçu les 4 offres suivantes

Partenaire	Fiabilité (C1)	Auto financement (C2)	Coût du contrat (C3)
a1	78%	94%	10000\$
a2	82%	86%	15000\$
a3	80%	75%	22000\$
a4	88%	90%	25000\$

Tableau (1.5) les offres reçu selon quatre critères selon la méthode TOPSIS[6].

$$g_1(X^*) = 55\% , g_2(X^*) = 94\% , g_3(X^*) = 25000\$$$

$$g_1(X^*) = 78\% , g_2(X^*) = 75\% , g_3(X^*) = 10000\$$$

$$\pi_1 = 78\% , \pi_2 = 75\% , \pi_3 = 20\%$$

Les données de l'exemple sont alors :

$$E = \begin{pmatrix} 78 & 94 & 10000 \\ 82 & 86 & 15000 \\ 80 & 75 & 22000 \\ 88 & 90 & 25000 \end{pmatrix}$$

Vecteur de coefficients d'importance des critères :  $W = [0.45 \ 0.35 \ 0.20]$

### C) Application de la méthode TOPSIS :

**Étape 1 :** Matrice des performances normalisées :

$$E' = \begin{pmatrix} 0.4751 & 0.5431 & 0.2641 \\ 0.4995 & 0.4969 & 0.3961 \\ 0.4873 & 0.4333 & 0.5810 \\ 0.5360 & 0.5200 & 0.6602 \end{pmatrix}$$

**Étape 2 :** pondération des performances :

$$E'' = \begin{pmatrix} 0.2138 & 0.1901 & 0.0528 \\ 0.2248 & 0.1739 & 0.0792 \\ 0.2193 & 0.1517 & 0.1162 \\ 0.2412 & 0.1820 & 0.1320 \end{pmatrix}$$

**Étape 3 :** détermination des profils idéals ( $a^*$ ) et anti-idéal ( $a^*$ ). Profil idéal ( $a^*$ ) =  $[0.2412 ;$

$0.1901 ; 0.0528]$  Profil anti idéal ( $a^*$ ) =  $[0.2138 ; 0.1517 ; 0.1320]$ .

**Étape 4** : calcul des distances idéal par rapport aux profils ( $a^*$ ) et ( $a^*$ ).

$$D_1^* = 0.0274, D_2^* = 0.0350, D_3^* = 0.0773, D_4^* = 0.0796$$

$$D_1^* = 0.1001, D_2^* = 0.1156, D_3^* = 0.1359, D_4^* = 0.1671$$

**Étape 5** : calcul un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal.

$$C_1^* = 0.7851, C_2^* = 0.7676, C_3^* = 0.6374, C_4^* = 0.6773$$

**Étape 6** : ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de  $C_i^*$ .  $C_1^* = 0.7851 >$

$$C_2^* = 0.7676 > C_3^* = 0.6374 > C_4^* = 0.6773$$

Selon la méthode TOPSIS, le partenaire  $a_1$  sera alors sélectionné par le comité de direction de l'entreprise.

### III.1.3. La méthode SAW (Pondération additive simple)

La méthode SAW (pondération additive simple) est une des plus méthodes multi-critères d'évaluation largement utilisée en pratique [12] en raison de sa simplicité. Elle démontre clairement l'idée intégrant les valeurs et les poids des critères en une seule estimation de la valeur du critère, cependant un score est calculé pour chaque alternative en multipliant la valeur pesée donnée à l'alternative de cet attribut avec les poids d'importance relative assignés directement par les décideurs suivis en additionnant des produits pour tous les critères [13].

#### A) Les principales étapes de la méthode

La méthode de SAW se présente comme suit : Tel que  $\overline{x}_{ij}$   $i = \overline{1, n}$  ;  $j = 1, m$  représente la matrice de décision et  $W_j$  les poids des critères.

**Étape 1** : calculer la matrice normalisée  $r_{ij}$  :

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} & \text{si on veut maximiser l'attribut } j \\ \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} & \text{si on veut minimiser l'attribut } j. \end{cases} \quad (I.8)$$

**Étape 2** calculé :

$$A_i = \sum_{j=1}^m W_j r_{ij} \text{ avec } j \in \overline{1, n} \quad (I.9)$$

**Étape 3** : classement des alternatives selon l'ordre décroissant des  $A_i$ .

**B) Exemple d’application sur une entreprise de transport**

Une entreprise de transport veut renouveler sa flotte de camions, pour cela la direction de l’entreprise a mis à la disposition des concessionnaires un cahier de charge afin de recevoir leurs différentes offres. Cinq grandes marques ont été retenues. L’entreprise s’intéresse dans sa sélection au prix (milliers) (Cr1), au confort (Cr2), à la consommation de carburant (Cr3), à la robustesse (Cr4), à la puissance (Cr5), à la garantie (Cr6) et à la disponibilité des pièces de rechange (Cr7). Après l’analyse, le service de logistique a établi une table de performance liée aux préférences des décideurs :

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7
A1	250	haut	8	robuste	moyen	2	oui
A2	220	moyen	8	robuste	très élevée	3	oui
A3	300	très haut	9	très robuste	élevé	3	non
A4	170	mauvais	11	peu robuste	moyen	1	non
A5	200	acceptable	10	robuste	élevée	3	oui

Tableau (1.6): Règles de préférence SAW produits selon quatre critères [6].

Afin de transformer les valeurs des critères qualitatifs en des critères quantitatifs, on construit une échelle d’état qui est représenté dans le tableau suivant :

	Cr1 (Min)	Cr2 (Max)	Cr3 (Min)	Cr4 (Max)	Cr5 (Max)	Cr6 (Max)	Cr7 (Max)
A1	250	2	8	1	0	2	1
A2	220	1	8	1	2	3	1
A3	300	3	9	2	1	3	0
A4	170	-1	11	0	1	1	0
A5	200	0	10	1	3	3	1

Tableau (1.7): Représentation des valeurs qualitatifs en quantitatif ( SAW) [6].

Les données de l’exemple sont alors : Matrice des performances :

$$E = \begin{matrix} & \begin{matrix} 250 & 2 & 8 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 220 & 1 & 8 & 1 & 2 & 3 & 1 \\ 300 & 3 & 9 & 2 & 1 & 3 & 0 \\ 170 & -1 & 11 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 200 & 0 & 10 & 1 & 1 & 3 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{h} \end{matrix} & \mathbf{u} \\ & \mathbf{I} \end{matrix}$$

Vecteur de coefficients d’importance des critères :

$$W = [0.20 ; 0.10 ; 0.20 ; 0.20 ; 0.20 ; 0.10 ; 0.10].$$



### III.1.4. La méthode AHP (Hiérarchie analytique Processus[ Saaty 1980])

#### A) Principales étapes de la méthode

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème [15], et procéder ensuite à des comparaisons par paire des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions.

**Étape 1** : décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuent à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

**Étape 2** : procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur.

Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (échelle de comparaison binaire), tout en respectant le principe de la

$$\text{réciprocité : } P_c(a, b) = \frac{1}{P_c(b, a)} \quad (\text{I.10})$$

Dégré d'importance	Définition	Explication
1	Également important	Deux éléments contribuent également à l'objectif.
3	Légèrement plus important	L'expérience et le jugement favorise faiblement un objet sur un autre.
5	Fortement plus important	L'expérience et le jugement favorise fortement un objet sur un autre.
7	Très fortement plus important élément par rapport a un autre	Un objet est fortement favorisée et sa dominance démontrée en pratique est attestée dans la pratique
9	Absolument plus important	L'expérience favorise un objet sur un autre et de plus grand pratique possible d'affirmation.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaire pour affiner	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations.

Tableau (1.8): Interprétation des valeurs pour déterminer des actions à effectuer( SAW) [6]

**Étape 3** : Normalisation de la matrice de jugement Mc des comparaisons binaire :

1. Sommer les entrées (les classes) de chaque colonne j :

$$SC_j = \sum_{i=1}^m (i, j) \quad (I.11)$$

Diviser l'entrée de chaque colonne par le total de cette colonne :

$$M_{(i,j)} = \frac{(i,j)}{SC(j)} \quad (I.12)$$

**Étape 4** : Déterminer les priorités globales.

1. Totaliser les entrées de chaque ligne de la matrice normalisée :

$$SL_i = \sum_{j=1}^m M_{(i,j)} \quad (I.13)$$

2. Prendre la moyenne de ces entrées :

$$(i) = \frac{SL_i}{m} \text{ pour } i = 1 \dots m \text{ (es priorités } W_i) \quad (I.14)$$

**Étape 5** : déterminer de la cohérence des jugements.

1. Multiplier la matrice initiale par la priorité globale relative :

$$TL(i) = \sum_{j=1}^m (i, j)(i) \text{ pour } i = 1 \dots m \quad (I.15)$$

2. Calculer les proportions :

$$PR(i) = \frac{TL(i)}{PG(i)} \text{ pour } i = 1 \dots m \quad (I.16)$$

3. Calculer ( $\lambda$ ) :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m PR(i)}{m} \quad (I.17)$$

4. Déterminer l'indice de consistance :

$$IC = \frac{\lambda - m}{m-1} \quad (I.18)$$

5. Déterminer le ratio de consistance :

$$RC = \frac{IC}{IC(m)} \quad (I.19)$$

Avec IC(m) indice de consistance aléatoire.

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cohérence aléatoire (IC(m))	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tableau (1.9): déterminé de la cohérence des jugements selon la méthode( AHP) [6]

**Étape 6** : Tester la consistance des jugements.

si  $RC < 0.1$  **alors**.

Bonne consistance, le vecteur de priorité  $PG(i)$  est accepté.

**sinon**

Revoir, et modifier les jugements des décideurs (la matrice  $M_c$ ).

**Finsi**

**Étape 7** : Détermination de l'utilité de chaque critère. Pour chaque critère refaire les mêmes procédures de l'étape précédente. Le poids global de chaque action est obtenu en multipliant les poids locaux par rapport à chaque critère par le poids du critère et on additionne tous ces produits.

## III.2. Méthodes de sur-classement

### III.2.1. La méthode Electre I : Élimination et Choix Traduisant la Réalité [Roy 1968]

#### A) Les principales étapes de la méthode

La méthode Electre I relève de la problématique de choix ( $P_\alpha$ ) Elle vise à obtenir un sous-ensemble  $N$  d'actions tel que toute action qui n'est pas dans  $N$  elle est surclassé par au moins une action de  $N$ .  $N$  est appelée le noyau du graphe de sur-classement : c'est le siège des actions non surclassées. Ce sous-ensemble (qu'on rendra aussi petit que possible) n'est pas donc l'ensemble des bonnes actions, mais c'est l'ensemble dans lequel se trouve certainement le meilleur compromis cherché [15].

La manière d'établir le sur-classement d'une action par rapport à une autre repose sur :

**Une condition de concordance** : condition imposant qu'une majorité des Critères se dégagent en faveur de l'action surclassant.

**Une condition de non-discordance** : condition imposant qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans un des critères de la minorité, en faveur du sur-classement inverse.

La méthode Electre I se présente comme suit :

On attribue à chaque critère  $j$ , un poids  $W_j$  d'autant plus grand que le critère est important.

**Étape 1** : calculer les indices de concordance à chaque couple d'action (a,b), on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a, b) = \frac{\sum_{\substack{j: \\ g_j(a) \geq g_j(b)}} w_j}{2a} \quad \text{avec } W = \sum_{j=1}^n w_j \quad (I.20)$$

**Étape 2** : calculer les indices de discordance à chaque couple d'action (a, b). On associe l'indice de discordance suivant :

$$D(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } \forall j : g_j(a) \geq g_j(b); \text{ sinon} \\ \frac{1}{\sigma} \max_{c, d, j} [g_j(c) - g_j(d)] & \end{cases} \quad \text{avec } \sigma = \max_{c, d, j} [g_j(c) - g_j(d)]. \quad (I.21)$$

**Étape 3** : construire les relations de sur-classement :

La relation de sur-classement pour Electre I est construite par la comparaison des indices de concordances et de discordance à des seuils limites de concordance

Ainsi, a surclasse b, si seulement si :

$$aSb - c(a, b) \leq d \quad (I.22)$$

- **Exploiter les relations de sur-classement** : cette étape consiste à déterminer le sous-ensemble d'action N appelé noyau tel que toute action qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une action de N et les actions de N sont incomparables entre elles.

### III.2.2. La méthode Electre II

Electre II a été mise au point par ROY et BERTIER (1971, 1973)[12]. C'est une méthode d'analyse de type multicritère qui permet de résoudre avec une plus grande précision les problèmes décisionnels.

Le méthode Electre II relève de la problématique de rangement  $\gamma$  (la procédure d'investigation est une procédure de classement), elle vise à ranger les actions de la meilleure à la moins bonne.

La méthode Electre II utilise le même indice de concordance qu'Electre I. Toutefois, on associe trois seuils à cet indice ( $0.5 \leq c^- < c^0 < c^+ \leq 1$ ).

L'indice de discordance ne change pas non plus dans sa définition (Electre I), mais on le calcule pour chaque critère discordant, et on lui donne 2 seuils par critère :

$$D_1 < D_2.$$

La méthode Electre II introduit une nouveauté fondamentale : elle permet de distinguer des sur-classements forts et des sur-classements faibles.

**A) Les principales étapes de la méthode**

La méthode Electre II se présente comme suit :

On attribue à chaque critère  $j$ , tel que  $j \in F$  (ensemble des critères)  $j = \overline{1, n}$  un poids  $w_j$  d'autant plus grand que le critère est important.

$$w^+(a_i, a_k) = \sum_{g_j(a_i) > g_j(a_k)} W_j \tag{I.23}$$

La somme des poids des critères pour les quels  $(a_i)$ , est préféré à  $(a_k)$  où  $a_i, a_k \in A$

(Ensemble des actions) et  $i, k = \overline{1, m}$

$$w^-(a_i, a_k) = \sum_{g_j(a_i) > g_j(a_k)} W_j \tag{I.24}$$

La somme des poids des critères pour lesquels  $(a_k)$  est préféré à  $(a_i)$ , où  $a_i, a_k \in A$  et

$i, k = \overline{1, m}$

**Étape 1 :** calculer les indices de concordance (idem que Electre I) à chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$  ; on associe l'indice de concordance suivant :

$$D_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a_i) \geq g_j(a_k); \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) & \text{si } j \neq k \\ \text{sinon} & \end{cases} \tag{I.25}$$

- Construction de la matrice de concordance.

La deuxième condition de concordance a comme but principal d'éliminer les circuits, qui sont toujours gênants. Elle est calculée comme suit :

$$\frac{w^+(a_i, a_k)}{w^-(a_i, a_k)} \geq 1. \tag{I.26}$$

**Étape 2 :** calculer les indices de discordance (par critère) à chaque couple d'actions  $(a_i, a_k)$  ; et pour tout critère  $j$ , on associe l'indice de discordance suivant :

$$D_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a_i) \geq g_j(a_k); \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) & \text{si } j \neq k \\ \text{sinon} & \end{cases} \tag{I.27}$$

Construction de la matrice de discordance.

**Étape 3** : construire les relations de sur-classements.

On conclut au sur-classement fort de  $a_k$  par  $a_i$  ( $a_i S^F a_k$ ) si un test de concordance et un test de non-discordance suivants sont satisfaits.

$$\left( \begin{array}{l} C_{ik} \geq c^+ \text{ et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_{(j)} \forall_j \text{ et} \\ \frac{w^+(a_i, a_k)}{w^-(a_i, a_k)} \geq 1 \end{array} \right) \quad (I.28)$$

Et/ou

$$\left( \begin{array}{l} C_{ik} \geq c^0 \text{ et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_{(j)} \forall_j \text{ et} \end{array} \right) \quad (I.29)$$

$$\left( \frac{w^+(a_i, a_k)}{w^-(a_i, a_k)} \geq 1 \right)$$

On conclut au sur-classement faible de  $a_k$  par  $a_i$  ( $a_i S^f a_k$ ) si les tests de concordance et

de non-discordance suivants sont satisfaits :

$$\left( \begin{array}{l} C_{ik} \geq c^- \text{ et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D \end{array} \right) \quad (I.30)$$

Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions  $a_i$  et  $a_k$  ( $a_i R a_k$ ).

**Étape 4** : exploiter les relations de sur-classement : On établit deux pré ordres totaux C1 et C2, ainsi qu'un pré ordre partiel C.

1. Le premier pré ordre total C1 est obtenu par "classement direct" en utilisant uniquement les sur-classements forts : la première classe est celle des actions non surclassées ; c'est-à-dire celles auxquelles aboutit un chemin de longueur nulle. La deuxième classe est celle des actions auxquelles aboutit un chemin de longueur 1, et ainsi de suite. Par longueur d'un chemin, on entend le nombre d'arcs constituant ce chemin. On utilise ensuite les sur-classements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.

2. Le second pré ordre C2 est obtenu par "classement inverse" : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins toujours en sur-classement fort qui en sont issus. On utilise ensuite les sur-classements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.
3. Le pré ordre C'est l'intersection de C1 et C2.

### III.2.3. La méthode Electre III [Roy 1978]

#### A) Présentation de la méthode [12].

1. La méthode ELECTRE III relève de la problématique  $\gamma$  (procédure de classement), son but est de classer les actions potentielles, depuis les "meilleures" jusqu'aux "moins bonnes", la méthode s'appuie sur la définition d'une relation de sur-classement S permettant de comparer deux actions a et b distincts.
2. En considérant un ensemble d'actions  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ . Il s'agit de classer les actions en les comparants par pairs. Chaque action est donc comparée aux autres sur la base des critères considérés. L'évaluation des actions est effectuée par une fonction réelle, pour chaque critère, on définit l'ensemble  $G = (g_1, g_2, \dots, g_m)$  contenant l'évaluation de l'action sur l'ensemble des critères.
3. L'importance des critères dans la prise de décision est évaluée par un ensemble de poids  $K = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m)$ . Dans ce cas, on considère le sens de préférence des critères considérés. Pour une action a, évaluée par  $g_j(a)$  pour le critère j, dans ce cas le seuil d'indifférence est noté  $q_j(g_j(a))$ , le seuil de préférence par  $p_j(g_j(a))$  et le seuil de veto par  $v_j(g_j(a))$ .

**B) Les principales étapes de la méthode**

La méthode Electre III s'appuie sur les étapes suivantes : [24].

**Donnée :** La matrice de décision ( $g_j(a_i)$ ,  $j = 1 \dots m$  critères,  $i = 1 \dots n$  alternatives), F la famille cohérente de critères, les poids des critères ( $\pi_j$ ) et les seuils ( $q_j(g_j(a))$ ,  $p_j(g_j(a))$ ,  $v_j(g_j(a))$ ).

**Étape 1 :** calcul des indices de concordance ( $c_j(a, b)$ ) pour chaque critère, la

formule générale pour le calcul des indices de concordance est :

$$C_j(a_i, b_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq q_j(g_j(a)) \\ \frac{p_j(g_j(a)) - (g_j(b) - g_j(a))}{p_j(g_j(a)) - (q_j - g_j(a))} & \text{sinon} \end{cases} \quad (I.31)$$

Où bien :

$$C_j(a_i, b_k) = \frac{p_j(g_j(a)) - \min[(g_j(b) - g_j(a)), p_j(g_j(a))]}{p_j(g_j(a)) - \min[(g_j(b) - g_j(a)), q_j(g_j(a))]} \quad (I.32)$$

**Étape 2 :** calcul de l'indice de concordance globale :

$$C_j(a_i, b_k) = \frac{\sum_{j \in F} \pi_j c_j(a, b)}{\sum_{j \in F} \pi_j} \quad (I.33)$$

**Étape 3 :** calcul des indices de discordance par critère, l'indice de discordance  $D_j(a, b)$  s'exprime de façon générale sous la forme suivante :

$$D_j(a_i, b_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq g_j(b_h) + p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j[g_j(a)]}{v_j[g_j(a)] - (p_j[g_j(a)])} & \text{sinon} \end{cases} \quad (I.34)$$

**Étape 4 :** calcul de l'indice de crédibilité et définition de la relation de surclasse- ment flou

$$S(a, b) = \begin{cases} (a, b) & \text{si } D_j(a, b) \geq C(a, b) \forall_j \\ C(a, b) & \text{sinon } D_j(a, b) > \frac{1 - D_j(a, b)}{1 - C(a, b)} \end{cases} \quad (I.36)$$

Où :  $J(a, b)$  est l'ensemble tel que  $D_j(a, b) \geq C(a, b)$



**Étape 5** : le calcul de  $\lambda$  par la relation :

$$\zeta = \max_{a,b \in A} S(a, b) \quad (\text{I.37})$$

- **Étape 6** : le calcul de  $S(\lambda)$  par la relation :

$$S(\zeta) = 0.3 - 0.15 \zeta \quad (\text{I.38})$$

**Étape 7** : le calcul de la matrice finale par la relation :

$$(a, b)_{\lambda} = \begin{cases} 1 & \text{si } (a, b) > \lambda - (\lambda) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.39})$$

Enfin, une alternative avec une grande différence de sommation de lignes et de Colonnes a été choisie comme la première priorité. Ensuite, l'alternative la première place sera supprimée et le classement se poursuit pour les alternatives restantes. Pour le classement ascendant, un ensemble d'alternatives avec la qualification la plus basse est en premier lieu. Le classement final est basé sur l'échange faisant le classement.

#### **IV. Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de résolution**

Arrivé au terme de ce chapitre, nous pensons qu'un récapitulatif est nécessaire pour une meilleure lisibilité des méthodes présentées, nous illustrons quelques avantages et inconvénients des méthodes multi-attributs, et ceux des méthodes de sur-classement.

##### **IV.1. Les avantages des différentes méthodes**

###### **A) Les avantages des méthodes multi attributs**

- **La méthode TOPSIS**
  - L'apporte de la méthode TOPSIS est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal.
  - Elle est facile à appliquer.
- **La méthode SMART**
  - La méthode SMART est facile à exploiter.
- **La méthode AHP**
  - La méthode AHP permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique.
  - Elle utilise une échelle sémantique pour examiner les préférences du décideur.

###### **B) Les avantages des méthodes de sur classement.**

- **La méthode ELECTRE I**
  - La méthode est utilisée pour des problématiques de sélection.
  - Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions.

**- La méthode ELECTRE II**

- Cette méthode est utilisée pour des problématiques de classement.
- Elle vise à classer les actions depuis les meilleurs jusqu'aux moins bonnes.

**- La méthode ELECTRE III**

- Cette méthode relève des problématiques de classement.
- Le but est de classer les actions des meilleurs aux moins bonnes.
  - L'originalité de cette méthode est d'admettre une part de flou dans les choix du décideur, et l'introduction d'un seuil véto.

**IV.2. Les Inconvénients des différentes méthodes****A) Les Inconvénients des méthodes multi attributs****- La méthode TOPSIS**

- Les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées à priori.
- Si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.

**- La méthode SMART**

- Elle exige une articulation à priori des préférences et une évolution des actions sur une échelle unique.

**- La méthode AHP**

- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaison par paires.
- Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou plusieurs actions) de l'ensemble des actions.
- L'association d'une échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.

**B) Les Inconvénients des méthodes de sur classement.****- La méthode ELECTRE I**

- Elle exige de traduire les performances des actions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui voient une perte de maîtrise de leurs données.

**- La méthode ELECTRE II**

- Il est difficile de déterminer le procédé partiel P car les rangs des actions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse.
- Elle exige des évaluations cardinales et une articulation à priori des préférences

**- La méthode ELECTRE III**

- Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.
- Elle est jugée trop complexe et parfois difficile à interpréter.

**V. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté les différents principes des méthodes d'aide à la décision, nous avons illustré quelques exemples pour mieux cerner les avantages et inconvénients des méthodes multi-attributs et de sur-classement.

Le deuxième chapitre sera consacré aux différents types d'accumulateurs cités au préalable, on a présenté les caractéristiques de base pour chacun d'eux avec les avantages et les inconvénients. Le choix de ces quatre types d'accumulateurs est justifié par le fait qu'ils sont largement utilisés dans plusieurs applications grand public et industrielles.

**CHAPITRE II**

**LES SYSTEMES DE**

**STOCKAGE D'ENERGIES**

## CHAPITRE II

### LES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIES

#### I Introduction

Aujourd'hui, les systèmes de stockage de l'énergie sont fortement présents aussi bien dans l'industrie que chez le particulier notamment dans les systèmes embarqués où une source autonome d'énergie est nécessaire pour l'alimentation [20].

Dans ce chapitre nous présentons d'abord un état de l'art très général des éléments de stockage et production d'énergie électrique. Puis nous donnons une description des différentes sources : la pile à combustible, les accumulateurs et les super-condensateurs.

Pour utiliser un accumulateur ou une batterie d'accumulateurs avec efficacité, il est bien nécessaire de comprendre le fonctionnement de l'accumulateur, sa dynamique et de connaître les paramètres qui peuvent affecter sa performance. Le problème de ces types d'accumulateurs est de réussir à maintenir leur durée d'utilisation le plus longtemps possible et d'optimiser l'utilisation de leur énergie. La deuxième partie présente le principe de fonctionnement d'une batterie et ses caractéristiques.

Enfin nous présentons les différents types d'accumulateurs : Plomb-Acide, Lithium-Ion, Cadmium-Nickel et Cadmium-Nickel-Métal hydrure.

#### II Les différentes méthodes de stockage d'énergie

Les composants électrochimiques de stockage et/ou production d'électricité offrent une très grande variété. Ainsi que leur dénomination l'indique, ces composants réalisent un couplage énergétique entre les domaines électrique et chimique. Ils sont constitués de deux électrodes, sièges de réactions d'oxydoréduction, reliées au circuit électrique extérieur et séparées par un électrolyte qui assure les échanges ioniques. Ce système est donc le siège de potentielles thermodynamiques chimiques et électriques à l'origine de flux de charges électriques et de matière couplés suivant les principes de la thermodynamique [21].

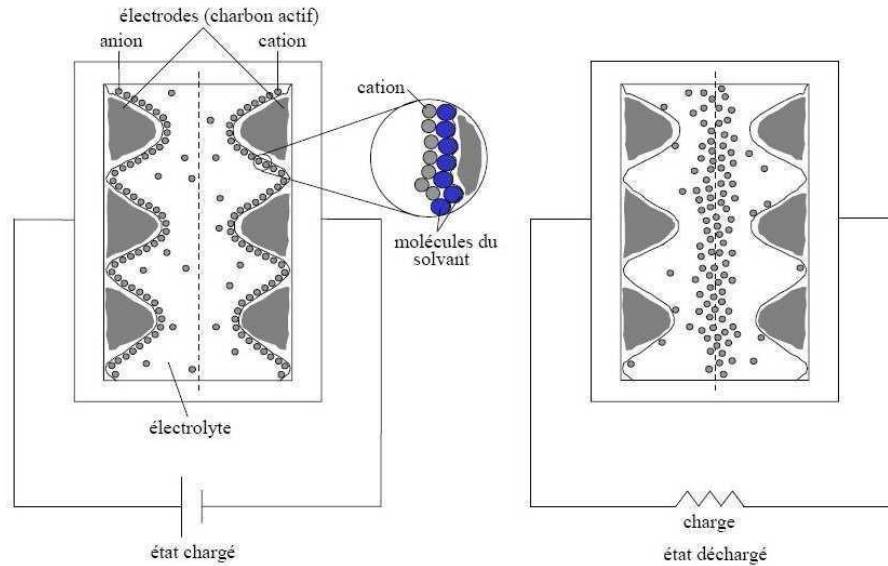
Il existe plusieurs méthodes de stockage de l'énergie. Les plus importantes sont les batteries, les super-capacités et les piles à combustibles.

Bien que les mécanismes de conversion et de stockage de l'énergie utilisés par ces trois méthodes différentes, elles partagent plusieurs caractéristiques électrochimiques. En effet, dans les trois cas :

- ✓ la production d'énergie se fait au niveau de l'interface électrode/électrolyte.
- ✓ le transport des électrons et des ions sont deux processus distincts (l'électrolyte est un conducteur ionique et joue le rôle d'un isolant électronique) [22].

## II.1 Les super-condensateurs

Dans les condensateurs électrochimiques appelés aussi super-condensateurs, la conversion de l'énergie ne se fait pas par oxydo-réduction. Par conséquent, l'utilisation des termes anode et cathode, bien que d'usage, n'est pas appropriée. En effet, le stockage de l'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée double couche électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. Quant à la fonction diélectrique, elle est assurée par les molécules du solvant de l'électrolyte. Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble figure(II.1) [22].



**Figure (II.1) :** Structure interne des super-condensateurs à couche double électrique.

## II.2 Les piles à combustible (PAC)

La pile est bien le siège d'une réaction d'oxydoréduction qui convertit une énergie chimique en énergie électrique, mais les réactifs sont stockés dans des réservoirs extérieurs à la pile. Seules les puissances massique et volumique la caractérisent donc intrinsèquement. L'énergie dépend de la nature du combustible, du volume du réservoir et dans une moindre mesure du volume interne de la PAC. Energie stockée et puissance sont donc découplées. De plus, la pile ne subit théoriquement aucune modification structurelle par principe de fonctionnement, mais naturellement elle vieillit.

Les piles à combustible sont, comme montré sur la **figure(II.2) [22]** des systèmes ouverts où l'anode et la cathode représentent seulement le « moyen » de transfert de l'énergie. En revanche, les masses réactives participant à la réaction d'oxydo-réduction proviennent de l'extérieur de la pile (par exemple l'oxygène de l'air, des combustibles comme l'hydrogène ou les hydrocarbures) [21].

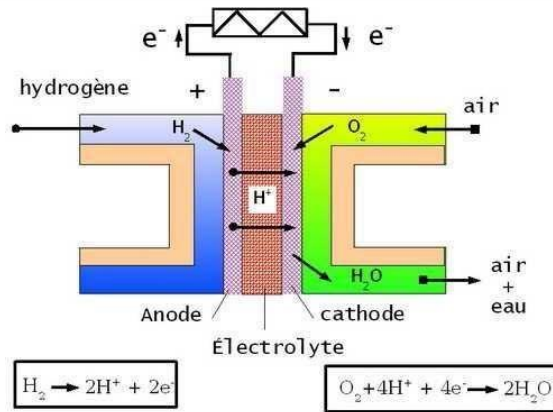


Figure (II. 2) : Fonctionnement d'une pile à combustible.

En comparaison avec les super-condensateurs et les piles à combustibles, les batteries ont envahi, et de loin, la plupart des applications du marché. Les super-condensateurs sont communément utilisés pour la protection des mémoires et plus rarement comme remplacement direct de la batterie électrochimique. En attendant donc une rupture technologique des piles à combustibles à la fois fiable, pratique et de coût raisonnable, nous considérons que le choix se restreint entre super-condensateurs et batteries [21].

### II.3 Les batteries et les accumulateurs électrochimiques

L'accumulateur est un dispositif physique qui transforme l'énergie chimique stockée en une énergie électrique par le biais d'une réaction chimique appelée oxydoréduction. Dans ce type de réactions les électrons se déplacent d'un matériau à un autre à travers un circuit électrique simple. Une batterie accumulateurs peut être composée d'une ou plusieurs éléments appelés cellule électrochimique. Par opposition aux batteries, on distingue les piles, pour lesquelles la réaction chimique n'est pas réversible [23].

### II.4 Accumulateurs secondaires et primaires

On distingue principalement deux types d'accumulateurs : primaire et secondaire. Les accumulateurs primaires ne sont pas rechargeables, car les réactions chimiques au sein de ce type de batterie sont irréversibles. Par contre, les accumulateurs secondaires, appelés aussi batteries de stockage, sont rechargeables. Dans ce type d'accumulateurs les réactions chimiques sont réversibles quand le courant est fourni à la batterie.



Les accumulateurs primaires ont dominé les produits de consommation et les appareils électroniques. Les accumulateurs rechargeables sont beaucoup plus utilisés dans l'industrie et les applications d'automobile.

Du point de vue conception, il faut faire la distinction entre batterie et cellule. La batterie est un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle, ou une combinaison série-parallèle selon la tension, la capacité et l'application désirées [23].

### **III Caractéristiques des batteries**

#### **III.1 La tension nominale**

La tension nominale, exprimée en volt, est fixée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple d'oxydoréduction utilisé. Par exemple, dans le cas d'un accumulateur au plomb la tension nominale (tension opérationnelle) par cellule est de 2,1 volts [23].

#### **III.2 Tension à vide**

C'est la tension mesurée sans charge et elle est presque égale à la tension théorique quand l'accumulateur est complètement chargé [23].

#### **III.3 Tension de fin de décharge**

A cette tension, l'accumulateur est considéré comme étant déchargé. Généralement, on ne doit pas descendre en dessous de cette tension pour éviter la détérioration de l'accumulateur. Si on prend le cas d'une cellule au plomb (2,1 volt) la tension de fin de décharge est environ 1,75 volt [23].

#### **III.4 La résistance interne**

L'impédance interne de l'accumulateur est reliée à l'ensemble des éléments qui constituent l'accumulateur, elle comprend alors :

- ✓ la résistance de l'électrolyte.
- ✓ la résistance des matériaux actifs de chaque électrode.
- ✓ la résistance de contact entre les électrodes et les cellules [23].

### III.5 Capacité d'une batterie d'accumulateurs

La tension de la batterie est déterminée par sa chimie, mais sa capacité représente la quantité maximale d'électricité qu'elle peut fournir. Comme le courant est le nombre d'électrons par unité de temps, la capacité d'une cellule est l'intégral du courant  $I(t)$  fournie par la batterie. La capacité est mesurée en ampères-heures (Ah) et elle exprimée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{t_0}^t I_b(t) dt \quad (\text{II.1})$$

La capacité est généralement en fonction des matériaux actifs qui constituent la batterie. La grandeur de la capacité d'une batterie varie entre des milliampères heures à des milliers d'ampères-heures. D'autre part, la capacité est proportionnelle au volume de la batterie [24].

A titre d'indication

$$\begin{cases} 1\text{Ah} = 1000 \text{mAh} = 3600 \text{Coulomb} \\ 1\text{Coulomb} = \frac{1}{3600} \text{Ah} = 0.278\text{mAh} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

### III.6 Le taux-C

Le courant de charge ou de décharge de la batterie d'accumulateurs est mesuré à un taux noté « C ». C'est-à-dire, une batterie d'accumulateurs de capacité 1 Ah peut fournir un courant de 1 A pendant une heure de décharge à un taux 1 C. La même batterie d'accumulateurs déchargée à un taux de 0,5 C fournira un courant de 0.5 A pendant deux heures [24].

A un taux de 2 C, la batterie va délivrer 2 A pendant 30 minutes. Donc, un taux de 1C implique une décharge (ou charge) pendant une heure, 0,5 C correspond à 2 heures et 0,1 C à 10 heures de décharge (ou charge) [23].

### III.7 Effet mémoire

L'effet mémoire se définit comme étant la perte de capacité après un certain nombre de cycles de charge et décharge. En réalité, pour remédier à ce problème, il faut décharger la batterie d'accumulateurs complètement avant de la recharger. On note que l'effet mémoire concerne principalement les accumulateurs de type nickel cadmium. Cependant, les accumulateurs aux hydrures métalliques de nickel sont moins sensibles. Les accumulateurs au plomb ainsi que ceux aux ions de lithium ne sont pas sensibles à cet effet. On peut retrouver dans la littérature plus d'information sur la nature de cet effet [23].

### III.8 L'énergie

L'énergie chimique dégagée pendant le processus de décharge est transformée en énergie électrique. Elle dépend de la tension et de la charge stockée. L'unité de mesure est généralement exprimée en joule ou en Wattheure (Wh) et elle est définie par l'équation suivante :

$V_t(t)$  représente la tension terminale aux bornes de l'accumulateur  $I_b(t)$  le courant de l'accumulateur [23].

$$E = \int_{t_0}^t V_t(t) I_b(t) dt \quad (\text{II.3})$$

### III.9 L'état de la santé (SOH)

L'état de la santé est défini comme la capacité d'une cellule de conserver l'énergie. La connaissance de le SOH peut être utilisé pour connaître la dégradation en cours ou brusque de la batterie et prévenir un échec possible [26].

### III.10 L'état de charge (SOC)

L'état de charge est le pourcentage de la charge maximum possible qui est présente à l'intérieur de la batterie. Le SOC fournit l'état actuel de la batterie et permet une charge et une décharge convenable pour augmenter la durée de vie de la batterie [25].

## IV Types d'accumulateurs

On distingue principalement 4 grandes familles que l'on retrouve dans 99,9% des applications de la vie de tous les jours [27] [28] :

✚Ni-cd : Nickel-Cadmium,

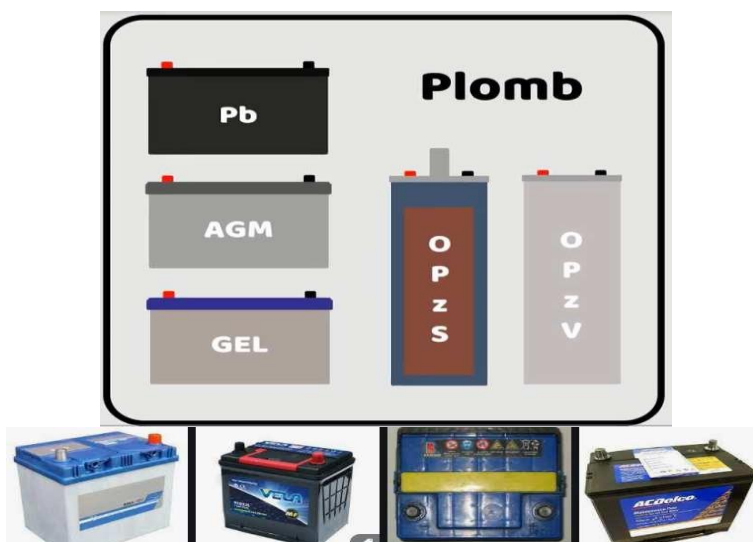
✚Ni-MH : Nickel-métal hydrure,

✚Pb : plomb acide,

Li-ion : ions de lithium.

### IV.1 Généralités sur l'accumulateur au plomb

C'est le type d'accumulateur le plus largement répandu sur le marché et c'est aussi la plus ancienne technologie de stockage d'énergie. Ils sont surtout utilisés dans nos voitures pour alimenter le démarreur. Il est à remarquer que plus du tiers de la production mondiale de plomb est destinée à la fabrication de batteries au plomb comme illustré à la **figure II.3**. Pour bien situer les objectifs associés à l'amélioration des propriétés d'un accumulateur plomb-acide, il est important de comprendre son fonctionnement ainsi que les différents éléments qui les constituent [29].



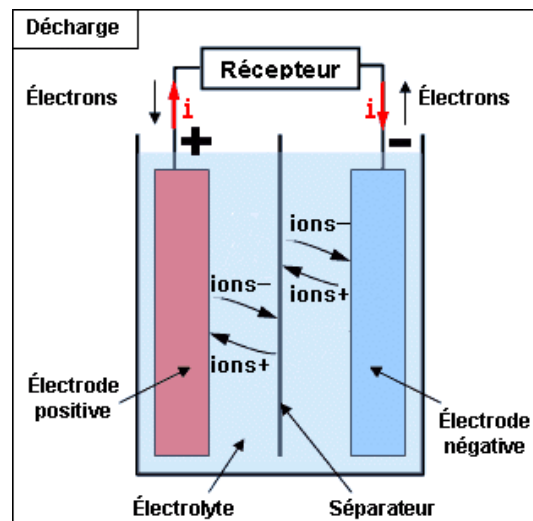
**Figure (II.3):** L'accumulateur au plomb-acide, malgré sa très grande toxicité, est le seul, actuellement, capable de fournir un courant de grande intensité permettant le démarrage des moteurs thermiques qui équipent nos véhicules automobiles.

## IV.2 Historique

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au plomb par formation de feuilles de plomb pur, dans de l'acide sulfurique et sous l'influence d'un courant électrique. Il fallut cependant attendre l'apparition en 1880 de la dynamo Gramme et la réalisation de l'accumulateur Faure à grilles et à oxyde rapporté pour que l'industrie de l'accumulateur commence à se développer.

### IV.2.1 Place de l'accumulateur au plomb aujourd'hui

Bientôt 150 ans d'études sur l'accumulateur au plomb, il continue de faire l'objet de diverses recherches et reste l'accumulateur le plus vendu dans le monde. Les principales raisons de cet engouement sont le faible coût et la maturité de cette technologie et aussi son aptitude à être recyclée à plus de 97%. Aujourd'hui il existe non pas un type de batterie d'accumulateurs au plomb, mais différentes technologies pour mieux répondre aux spécificités des applications qui l'emploient: la batterie au plomb son fonctionnement illustrée a la **figure II.4** s'est améliorée et spécialisée au fil des ans, et continuera de l'être. La batterie d'accumulateurs au plomb est notamment utilisée pour le démarrage des véhicules (secteur le plus porteur actuellement), la traction (chariots de manutention), les alimentations de secours, le photovoltaïque...



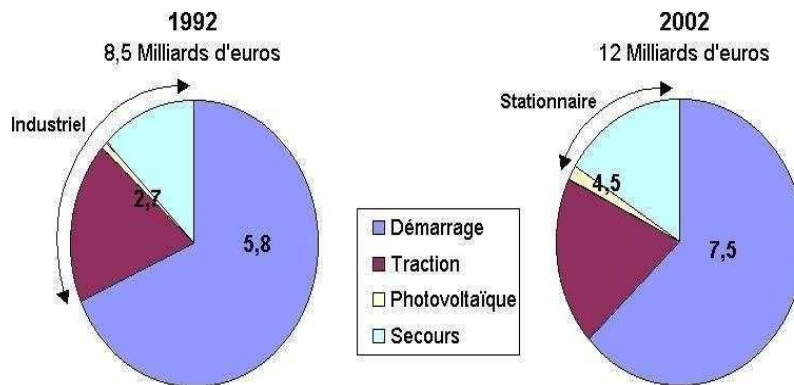
**Figure (II. 4):** Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[29]

À ces domaines sont adaptées des technologies d'accumulateurs au plomb, qui se

caractérisent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou mobilisé, une concentration d'électrolyte, des plaques planes ou tubulaires..., le marché mondial des batteries (toutes technologies confondues) regroupe 3 catégories :

Les batteries portables, de démarrage et industrielles (de traction et stationnaire).

La croissance du marché mondial des batteries au plomb amène le chiffre d'affaires à 12 milliards d'euros en 2002 (**figure II.5**) ce qui représente 65% de la production totale .La représentation du marché mondial est représenté sur la **figure II.5**..



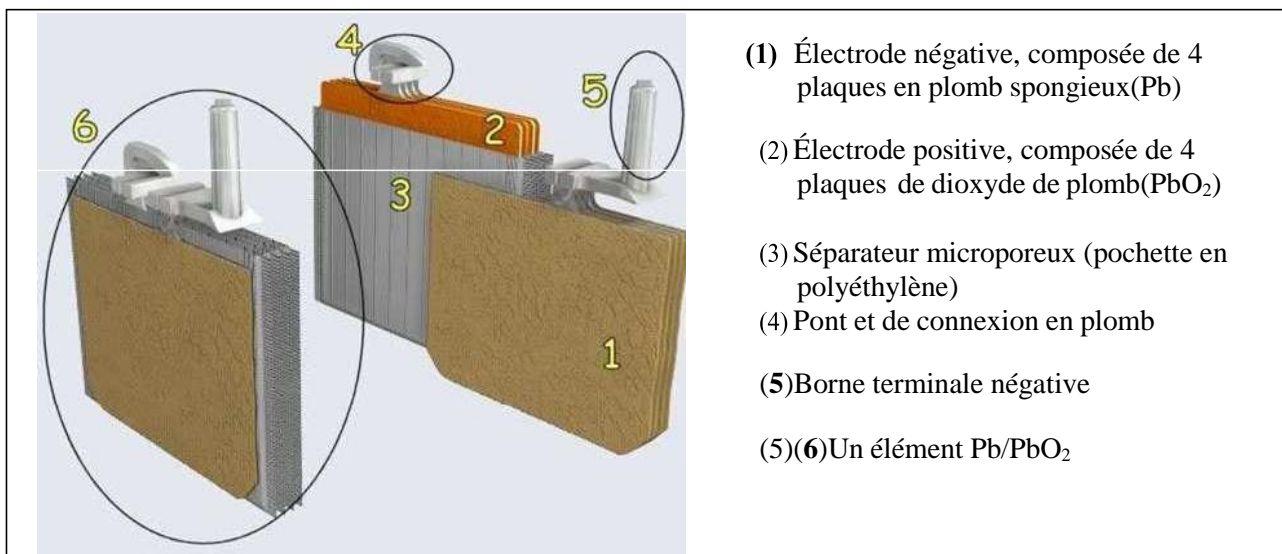
**Figure (II. 5):**Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb. [30]

### IV.2.2 Constitution de la batterie au plomb

Un accumulateur de 2V est l'unité de base d'une batterie au plomb. Il se compose Notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur micro poreux et d'un électrolyte. Un élément de batterie de démarrage (technologie "plomb ouvert") comprend des plaques Planes positives (2) et négatives (1) assemblées en alternance (**figure II.6**). Le nombre de plaques

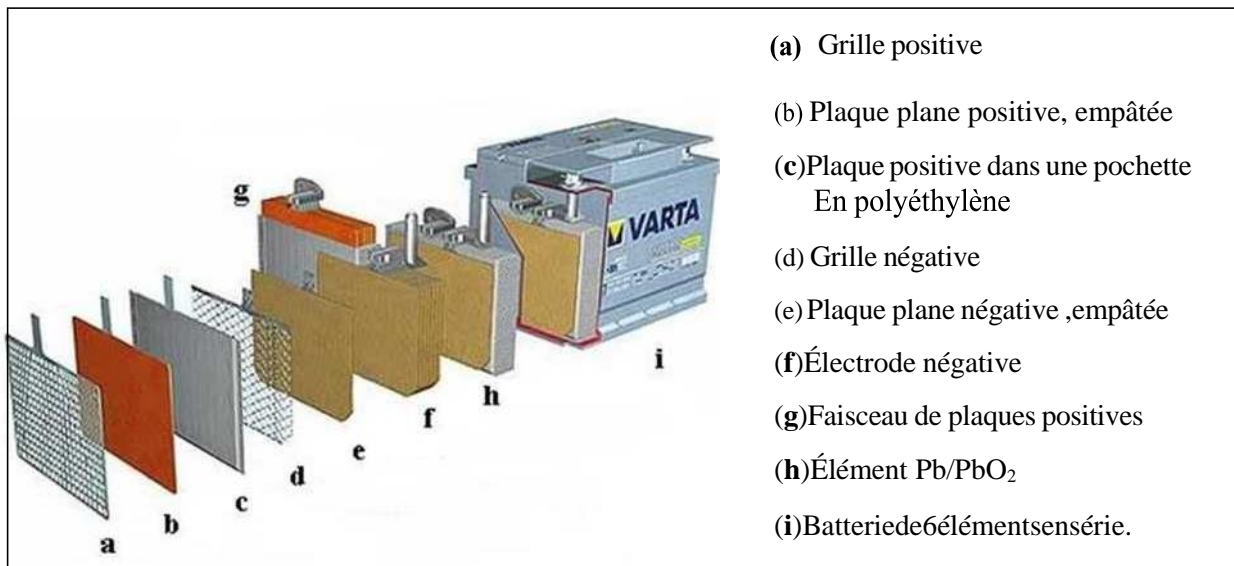
Pour chaque polarité et leur surface sont des paramètres qui définissent la **capacité** de l'élément. Par exemple, l'électrode positive comporte ici 4 plaques en parallèle, reliées par un connecteur(4). Pour éviter les courts -circuits entre les plaques de polarité différente, un séparateur micro poreux isolant est placé entre ces plaques lors du montage (3).

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



**Figure (II. 6):**Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) [31]

L'ensemble est contenu dans un bac (en polypropylène, PVC ou ABS) muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits (**Figure II.7**). Les deux bornes en plomb raccordées aux faisceaux de plaques de chaque polarité, permettent le raccordement de la batterie au circuit extérieur.



**Figure (II. 7) :** Vue éclatée d'une batterie de démarrage.[31]

### IV.2.3 Différents types d'accumulateurs au plomb

Il existe deux types d'accumulateurs au plomb, la batterie dite ouverte et la batterie scellée ou à recombinaison de gaz.

#### 1) La batterie au plomb ouverte

Dans le tableau II.1 la comparaison entre les Lors du fonctionnement de la batterie au plomb dite ouverte, les productions de gaz suite aux réactions secondaires de décomposition de l'eau s'échappent naturellement par les orifices prévus au niveau des bouchons. Le dégagement de dihydrogène dans le lieu de stockage des batteries est source de danger, car son mélange avec l'air ambiant est potentiellement explosif à partir de 4% en volume .Nous avons représenté deux types de batterie.



TYPEDE BATTERIE AU PLOMB	OUVERTE(I.1.5)	À RECOMBINAISON DE GAZ	
		Gélifié	Absorbé (parle séparateur)
ÉLECTROLYTE	Liquide	Gélifié	Absorbé (parle séparateur)
APPELLATION ANGLO- SAXONNE	Flooded (ou vented) battery	Gel VRLA (ou sealed) Batterie	VRLA(ou sealed) AGM separator battery
AVANTAGES	durée de vie pouvant être importante (5à 15ans) technologie la moins chère	recombinaison=>pas de perte en eau (pas d'entretien) très faible taux de dégagement de gaz (sécurité)	
INCONVÉNIENTS	consommation d'eau (maintenance) installation en locaux spécifiques (dégagements gazeux)	plus faible durée de vie (modes de défaillance spécifiques) plus sensible à la température	

**Tableau (II.1) :** Principales comparaisons des deux types de batterie au plomb. [31]

Dans le cadre du stationnaire de secours, une installation en locaux spécifiques ventilés est obligatoire. Les batteries ouvertes produites aujourd'hui (à base de grilles à fortes sur tensions d'oxygène et d'hydrogène, sont souvent qualifiées de batteries "sans maintenance" ou "sans entretien". Ces appellations ont été choisies car la consommation d'électrolyte est si faible que la réserve d'électrolyte d'origine est suffisante pour assurer le bon fonctionnement de la batterie pendant toute sa durée de vie.

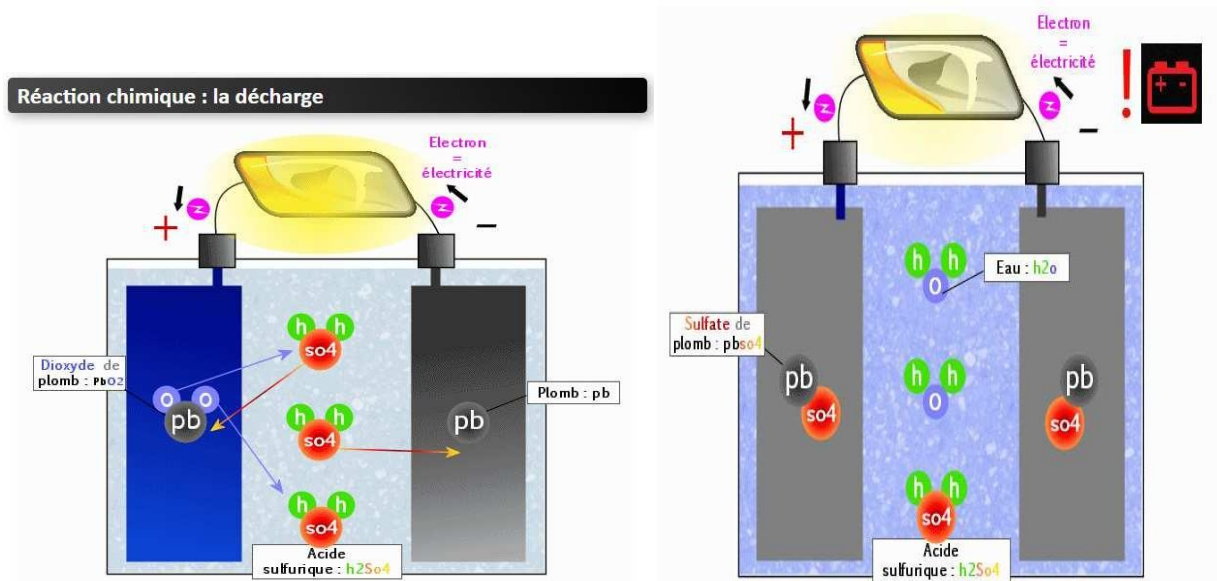


Figure (II. 8) : Réaction chimique la décharge [35].

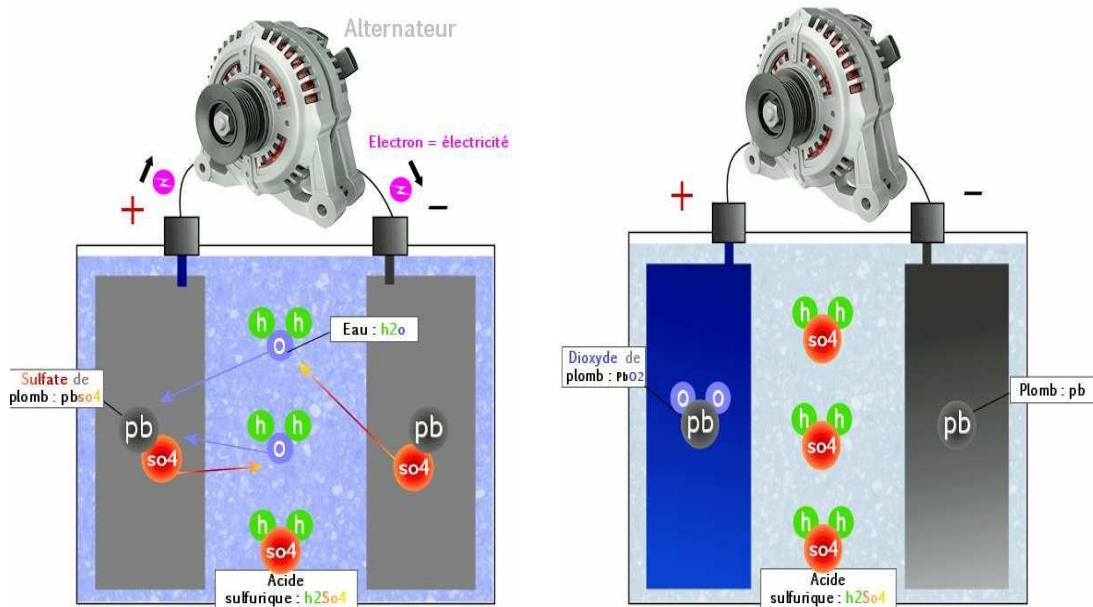


Figure (II. 9) : Réaction chimique Chargement de la batterie [35].

## 2) La batterie à recombinaison de gaz

Les premières batteries à recombinaison de gaz sont apparues fin des années 1950, grâce à la fabrication d'un électrolyte gélifié. Ce type d'électrolyte permet la formation de chemins gazeux facilitant le transfert rapide du dioxygène, qui suit alors un cycle interne : produit à l'électrode positive, sa diffusion vers l'électrode négative est optimisée et il atteint l'électrode négative où il y est réduit (formation de molécules d'eau). Les batteries à recombinaison de gaz sont appelées aussi batteries VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) ou batteries étanches.

IV.2.4 Principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb ouvert

Considérons un élément de technologie "plomb ouvert», A ses bornes apparaît une f.e.m. d'environ 2,1 V l'électrode en dioxyde de plomb (PbO2) correspond au pôle positif et celle en plomb (Pb) au pôle négatif. Le fonctionnement en décharge du générateur électrochimique PbO2 /H2SO4/Pb peut est schématisé sur la (figure II.10).

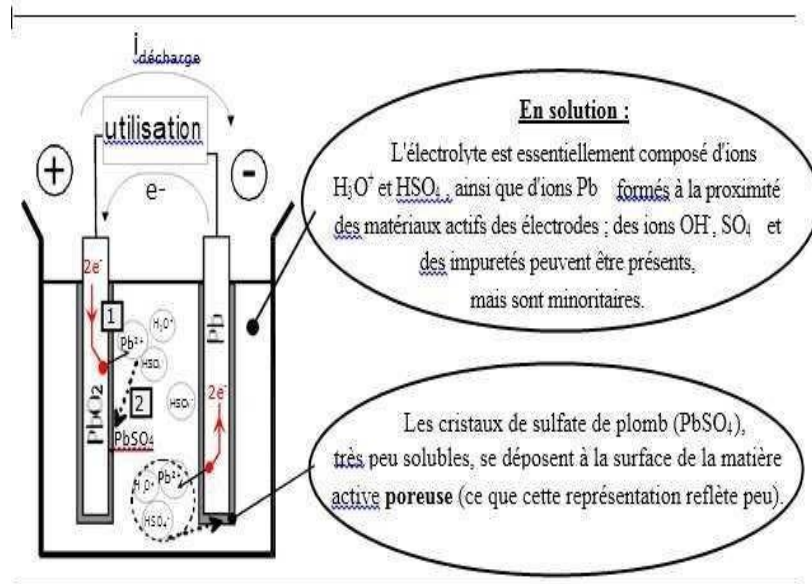
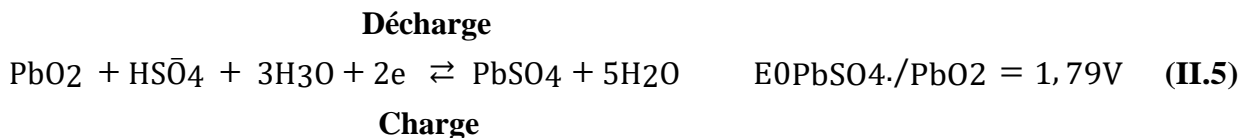


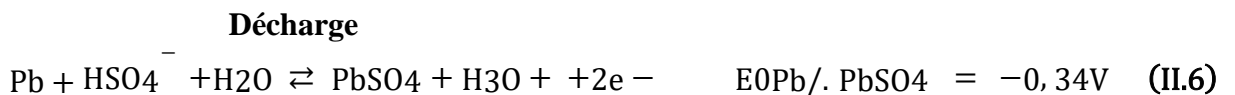
Figure (II. 10):Produits et réactifs d'un élément au plomb-acide ,se formant en décharge [35]

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

L'électrode positive a un comportement de **cathode en décharge** car le PbO<sub>2</sub> est **réduit** en PbSO<sub>4</sub>, et devient **anode en charge** puisque le PbSO<sub>4</sub> s'**oxyde** en PbO<sub>2</sub> selon la réaction :

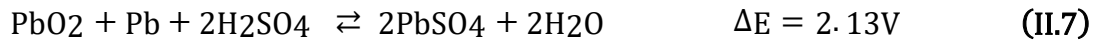


L'électrode négative est anode en décharge (oxydation du Pb en PbSO<sub>4</sub>) et cathode en Charge selon la réaction :

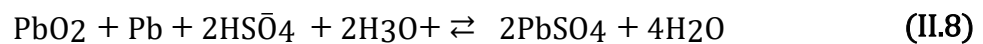


**Charge**

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

**Décharge****Charge**

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

**Décharge****Charge**

L'équation bilan (4) de l'élément traduit une consommation d'acide sulfurique et une production d'eau lors de la décharge d'un élément.

**IV.2.5 Les grandeurs caractéristiques**

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au plomb qui sont résumés dans le **tableau II.2**, on a aussi la (**figure II.11**) qui illustre les batteries au plomb selon la technologie basé sur des critères prix, vitesse décharge, effet mémoire,...etc, en plus de la figure précédente la (**figure II.12**) illustre les batteries sous le critère de différents tension

<b>Caractéristiques de l'accumulateur Plomb-acide (Pb)</b>	
<b>Electrode positive</b>	PbO <sub>2</sub>
<b>Electrode négative</b>	Pb
<b>Tension (V)</b>	2
<b>Densité d'énergie massique (Wh/kg )</b>	30-50
<b>Densité d'énergie volumique (Wh/L)</b>	75-120
<b>Nombre de cycles</b>	400-1200
<b>Température de fonctionnement</b>	-20 à 60°C
<b>Coûts (€.KWh)</b>	200-250
<b>Autodécharge (%)</b>	5

**Tableau (II.2) : caractéristiques d'un accumulateur au plomb. [36]**

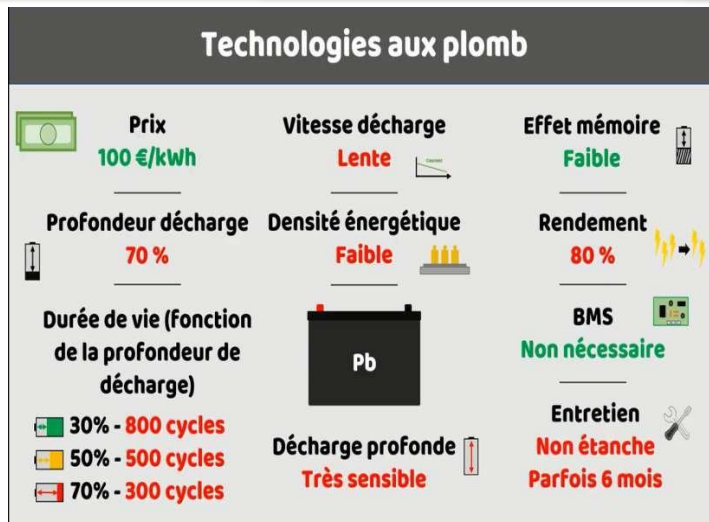


Figure (II. 11): technologies au plomb Pb selon différents critères (prix, vitesse Décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

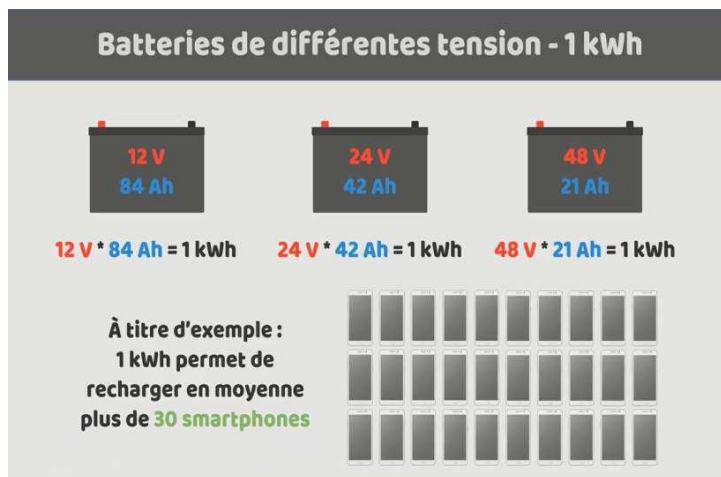


Figure (II. 12): technologies au plomb selon différents tension

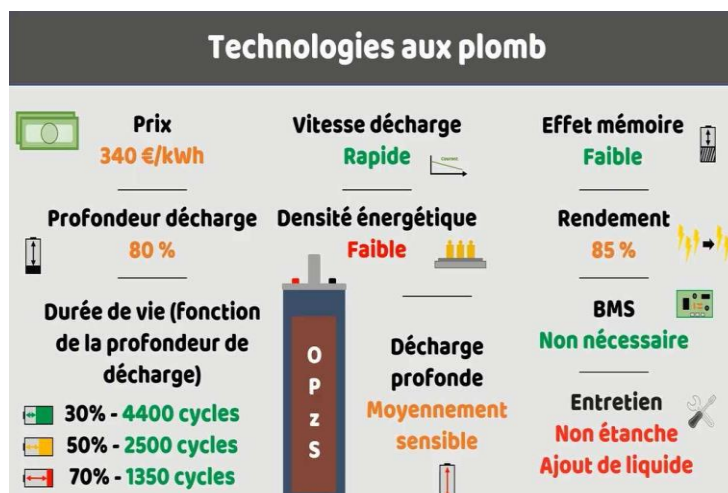
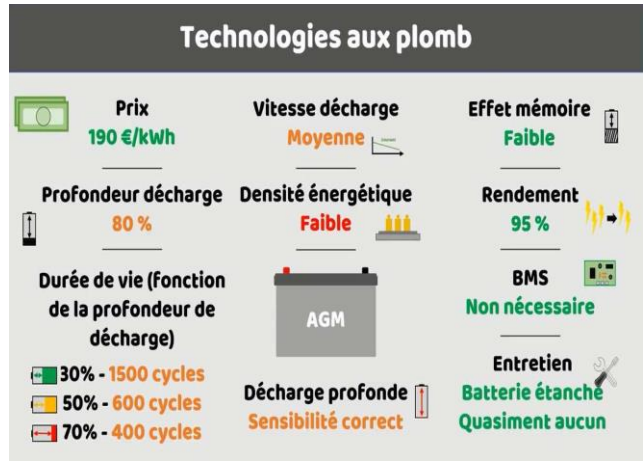


Figure (II. 13): technologies au plomb OPZS selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)



Figure(II. 14)::technologies au plomb AGM selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

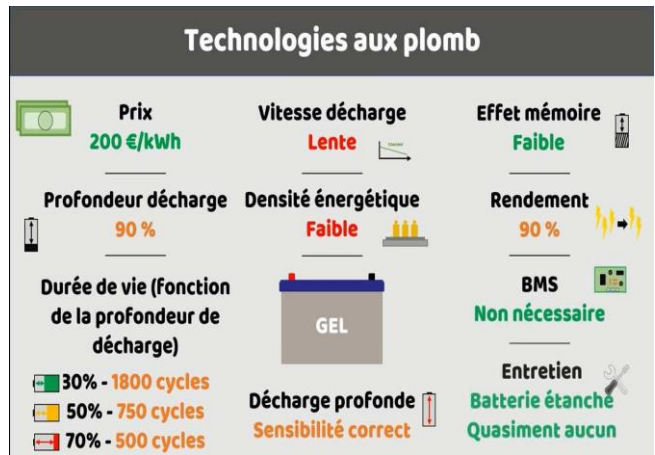


Figure (II. 15):technologies au plomb GEL selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

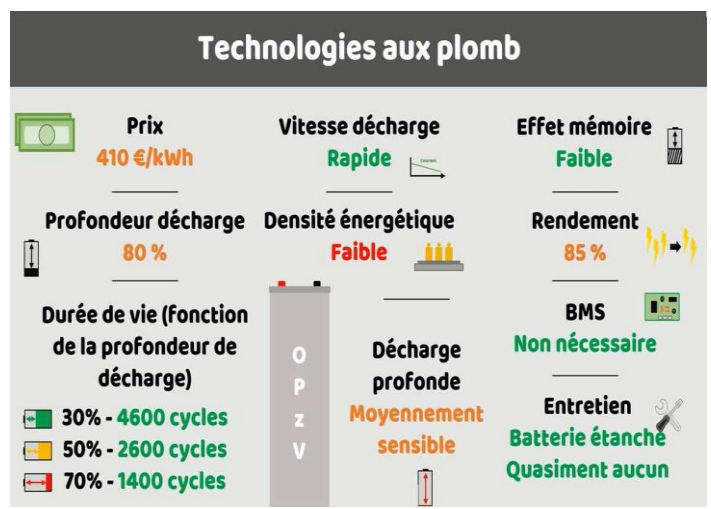


Figure (II. 16):Technologies au plomb OPZV selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc.)



IV.3 Généralités sur l'accumulateur au Nickel cadmium

IV.3.1 Historique

Il est mis au point en 1899 par Waldemar Jungner en Suède. C'est un système secondaire (accumulateur) basé sur la réaction entre l'oxyhydroxyde de nickel NiO(OH) et le cadmium. La production industrielle d'accumulateurs nickel-cadmium à électrodes positives planes a débute en 1909. La durée de vie est comparable à celle des accumulateurs au plomb (au moins 1 000 cycles) . En 1928, Schlecht et Ackermann réalisent des plaques frittées des deux polarités

.La mise en œuvre vers 1950 a conduit à réaliser des accumulateurs étanches.

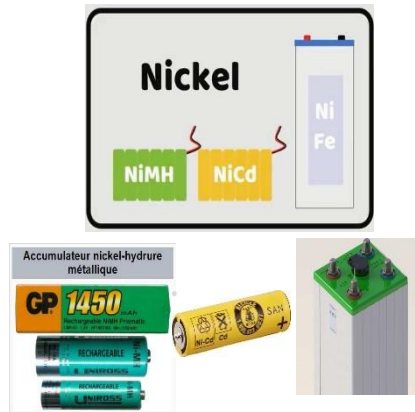
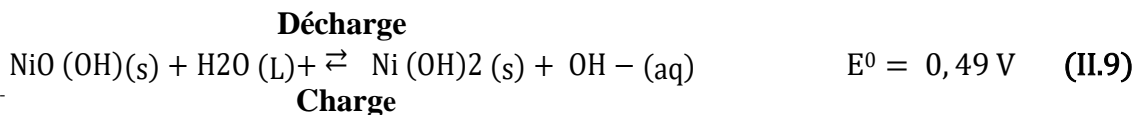


Figure (II. 17) Produits et réactifs d'un élément au plomb- acide, se formant en décharge

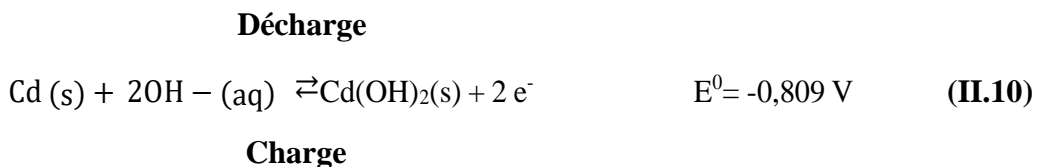
IV.3.2 Constitution d'une batterie

C'est un système secondaire (accumulateur) basé sur la réaction entre l'oxyhydroxyde de Nickel NiO(OH) et le cadmium. Les réactions électrochimiques ayant lieu aux électrodes sont :

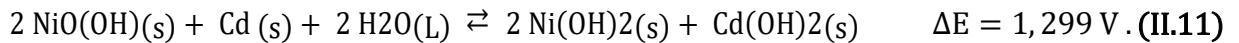
- Electrode positive(+)



- Electrode négative(-)



- Réaction globale

**Décharge****Charge**

### IV.3.3 Conditions d'utilisation

Une batterie Ni-Cd doit permettre au moins 500 cycles de charge/décharge, pour cela, il faut prendre des précautions d'utilisation :

- éviter les surcharges
- proscrire les décharges profondes (<1V par élément)
- ne jamais les court-circuiter
- attendre 1 heure avant d'utiliser une batterie qui vient d'être chargée
- attendre 15 minutes avant de recharger une batterie qui vient d'être déchargée
- une batterie Ni-Cd doit être stockée déchargée, une batterie Ni-MH doit être stockée chargée [37].

### IV.3.4 Propriétés et applications des batteries Ni-Cd

#### 1) Fonctionnement

- Supportent des conditions d'exploitation difficiles
  - Surcharges fréquente
  - Régime de décharge élevé
  - Basses températures.

Les performances techniques de l'accumulateur nickel cadmium sont comparables à celles des accumulateurs au plomb.

#### 2) Format

Un large éventail de produits existe, depuis les batteries spiralées, de capacité comprise entre 10 mAh et 15 Ah, jusqu'aux batteries stationnaires ouvertes de 1 000 Ah et au-delà. Toutes ces batteries présentent des durées de vie de l'ordre de 1000 cycles charge-décharge pour les batteries industrielles et 500 cycles pour les éléments spiralés.



### 3) Problématiques

Les prix du nickel et du cadmium, ainsi que ceux des procédés de fabrication, conduisent à un coût de l'énergie stockée largement supérieur à celui associé aux accumulateurs au plomb, la manipulation du cadmium n'est pas sans danger pour la santé

La mise au rebut des batteries usagées présente un risque pour l'environnement.

### 4) Marché

Pour l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord, le marché des accumulateurs nickel-cadmium représente aujourd'hui environ 10 % de celui des accumulateurs au plomb. Aujourd'hui largement concurrencé par Ni-MH et Li ion . [38]

## IV.3.5 Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Ni-cd sont résumés dans le tableau

Caractéristiques de l'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	
Electrode positive	NiOOH
Electrode négative	Cd
Tension (V)	1.2
Densité d'énergie massique (Wh/kg)	45-80
Densité d'énergie volumique (Wh/L)	80-150
Nombre de cycles	2000
Température de fonctionnement	-40à 60°C
Coûts €/KWh	600
Autodécharge / %	20

Tableau (II.3) : caractéristiques d'un accumulateur au Ni-cd. [39]

## IV.4 GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR AU NI-MH

### IV.4.1 Historique

L'accumulateur étanche nickel-hydrure métallique (désigné par le symbole Ni-MH) est apparu dans les années 1980. Il est l'aboutissement des recherches menées depuis 1970 sur des alliages susceptibles de stocker de l'hydrogène (hydrures métalliques). L'accumulateur Ni-MH diffère de l'accumulateur Ni-Cd au niveau de l'électrode négative dont le matériau actif est de l'hydrogène, stocké sous la forme d'un alliage métallique.

#### IV.4.2 Réalisation des accumulateurs étanches Ni-MH

Les accumulateurs étanches Ni-MH sont fabriqués industriellement sous forme cylindrique, prismatique ou de « pile bouton ». Les électrodes positives comportent une mousse de nickel imprégnée de composés de nickel qui sont transformés en matériau actif par électrodéposition ou précipitation par voie chimique. Les électrodes négatives sont constituées d'une grille ou d'une feuille perforée de nickel recouverte par l'alliage métallique destiné à stocker l'hydrogène. Dans les deux cas, la porosité est élevée afin de favoriser les régimes rapides. Les séparateurs, réalisés à partir de polypropylène, sont des structures fibreuses non tissées planes afin de réduire l'espace inter-électrodes et la résistance interne. Le conteneur constitue le pôle négatif de l'accumulateur. Le couvercle, qui comporte une soupape de sécurité, en est le pôle positif.

#### IV.4.3 Electrode à hydrogène

La perspective de stocker de l'hydrogène au sein d'un alliage métallique est apparue dans les années 1960. Les alliages, usuellement du type binaire  $A_xB_y$ , se répartissent en deux classes AB<sub>2</sub> et AB<sub>5</sub> :

- La classe AB<sub>2</sub> fait essentiellement intervenir le zirconium et le nickel ( $ZrNi_2$ )
- La classe AB<sub>5</sub> fait intervenir le lanthane et le nickel ( $LaNi_5$ ).

A et B peuvent être partiellement substitués. On améliore les propriétés interfaciales à partir de traces d'aluminium ou de silicium. On réduit l'expansion en volume en substituant partiellement du cobalt au nickel.

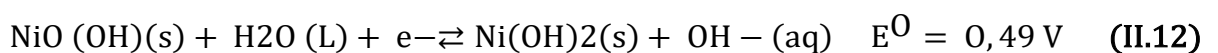
On élabore ainsi des alliages comptant jusqu'à huit composants.

#### IV.4.4 Réaction principales

- **Electrode positive(+)**

Les réactions sont identiques à celles observées du système Ni-Cd :

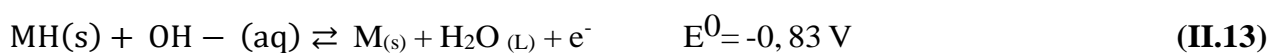
##### Décharge



##### Charge

- **Electrode négative (-)**

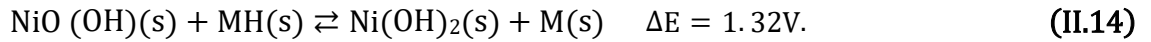
##### Décharge



##### Charge

- Réaction globale :

Décharge



Charge

#### IV.4.5 Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Ni-MH sont résumés dans le tableau.

Caractéristiques de l'accumulateur Nickel- Hydrure métallique (Ni-MH)	
Electrode positive	NiOOH
Electrode négative	MH
Tension / V	1.2
Densité d'énergie massique / Wh/kg	60-110
Densité d'énergie volumique / Wh/L	220-330
Nombre de cycles	1500
Température de fonctionnement	-20à 60°C
Coûts / €.KWh	1500-2000
Autodécharge / %	30

Tableau (II.4) : caractéristiques d'un accumulateur au Ni- MH.[39]

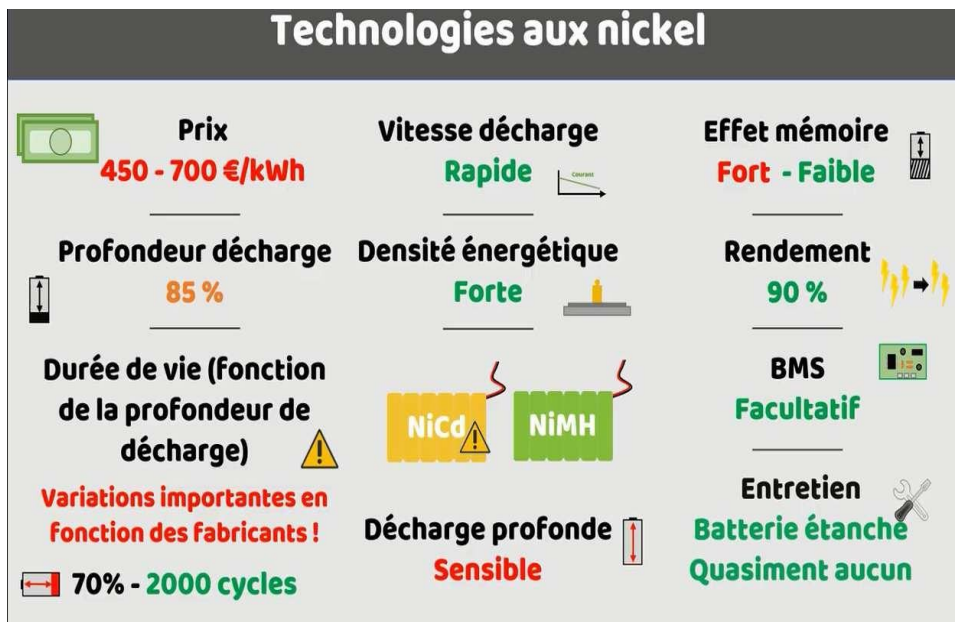


Figure (II. 18):technologies au nickel NiCd NiMH selon différents critères (Prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

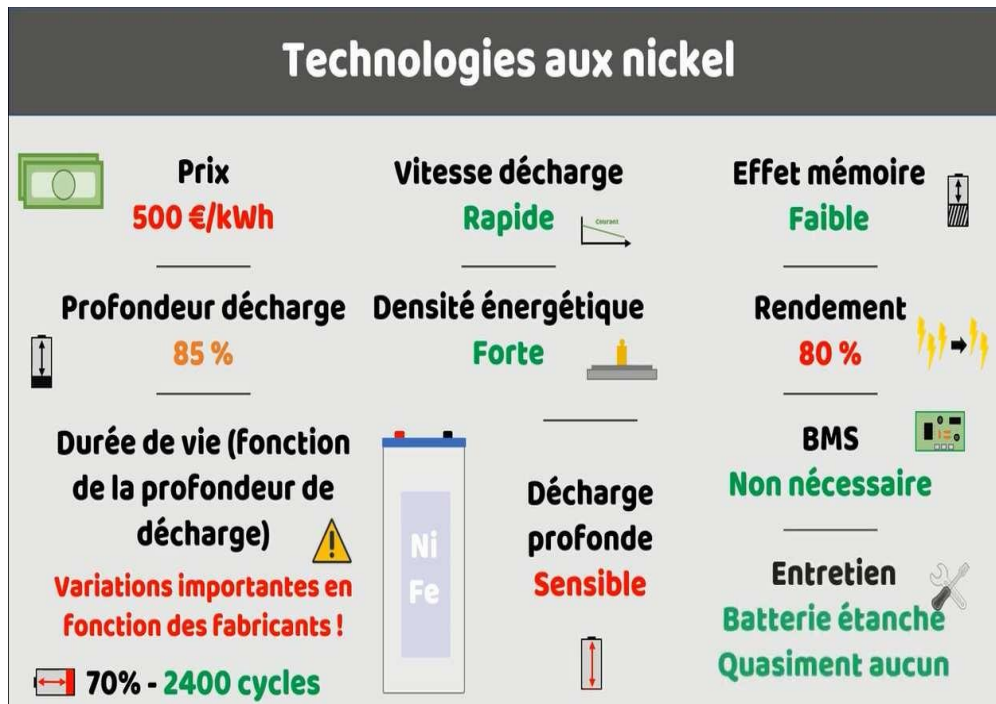


Figure (II. 19): technologies au nickel Ni Fe selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

## IV.5 GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR au Lithium ion (Li-ion)

### IV.5.1 Historique

C'est la dernière génération d'accumulateurs. Le principe est connu depuis la fin des années 70 mais le lithium étant instable à la charge, la commercialisation n'a été possible qu'en 1991. Les accumulateurs Li-ion sont très utilisés car :

Ils offrent une densité d'énergie très supérieure aux autres technologies pour un poids inférieur (80 à 160 Wh/kg). La durée de vie est de 2 à 3 ans après leur fabrication, il y a un risque d'explosion si elles ne sont pas chargées correctement (les constructeurs intègrent dans les batteries des circuits qui coupent la charge si les caractéristiques de la batterie sont anormales). La capacité varie de 150 à 4500mAh. Depuis 1999 est apparue une nouvelle génération d'accus Li-ion : le Lithium ion Polymère (Lipo). L'électrolyte est un polymère gélifié qui permet d'obtenir des éléments très fins, souples et se présentant sous la forme de "paquets". Encore chère aujourd'hui, cette nouvelle technologie est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins cher à la réalisation que le Li-ion classique.

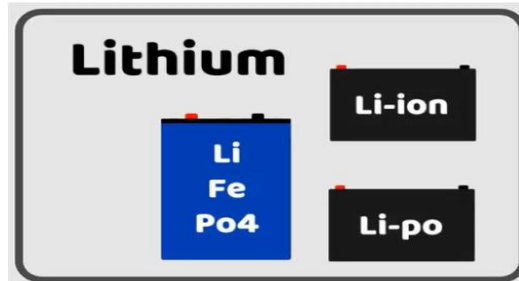


Figure (II. 20) représente le schéma de la structure d'un l'accumulateur [37].

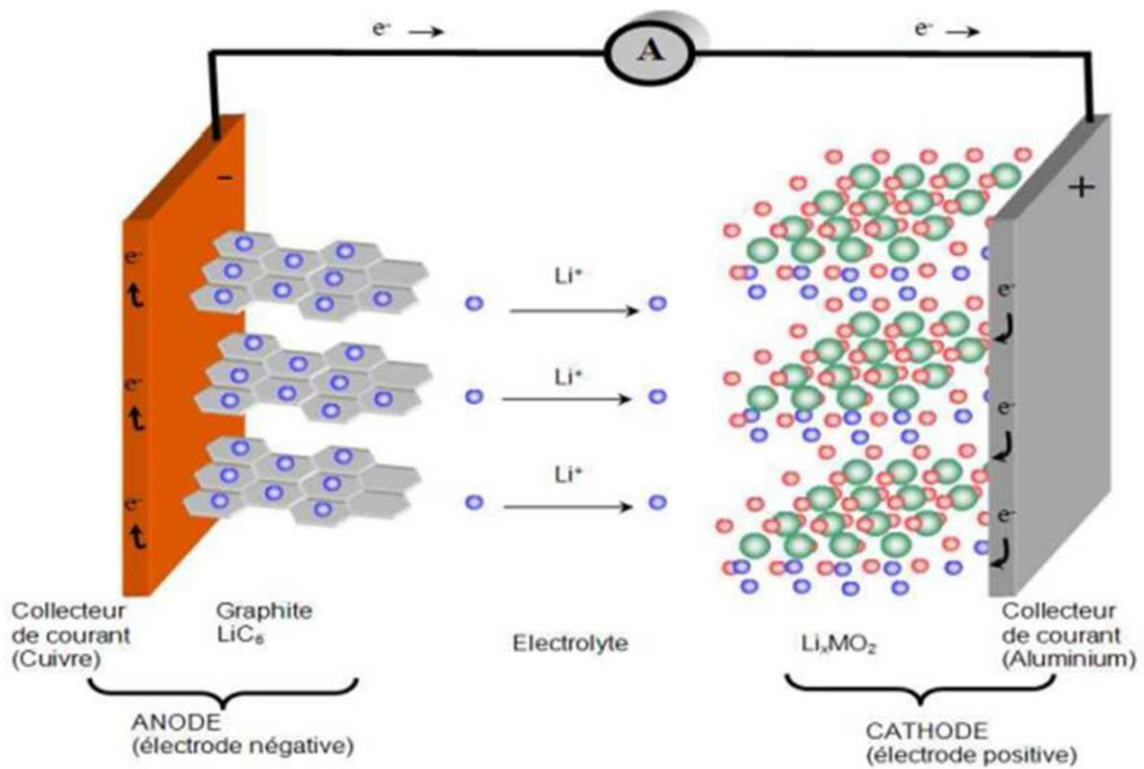


Figure (II. 21):Structure d'accumulateur lithium ion. [40]

### IV.1.1 Technologie lithium-ion

Les batteries lithium-ion actuelles sont constituées d'une électrode négative au carbone (graphite), d'un électrolyte à solvant organique (généralement des carbonates d'alkyles) dans lequel on dissout du sels de lithium et d'une électrode positive à base d'oxyde de métal constituée de composés d'insertion. On distingue les batteries lithium-ion et les batteries lithium-ion polymère. Les batteries lithium-ion polymère ont la particularité d'être composées d'un électrolyte en gel de polymère (oxyde de polyéthylène ou poly-acrylonitrile) contenant des sels de lithium ce qui limite les fuites d'électrolyte. Elles sont plus résistantes à la surcharge et ont un plus long cycle de vie. Néanmoins, pour une température équivalente, leur conductivité ionique inférieure à celle d'un électrolyte liquide. Dans le cas des batteries lithium-ion, l'électrolyte le plus largement utilisé est constitué de sel  $\text{LiPF}_6$  dissout dans un solvant, généralement issu d'un mélange de carbonate d'éthylène (EC), de carbonate de propylène (PC) et de carbonate d'éthyle méthyle (EMC). L'appellation lithium-ion ou Li-ion provient du fait que la technologie est basée sur l'insertion et la désinsertion des ions lithium des deux électrodes dans les deux sens selon l'état de charge ou de décharge. Pendant la décharge, un électron est libéré à l'électrode négative (anode) et est acheminé par l'intermédiaire du circuit externe vers l'électrode positive (cathode). Simultanément, un ion  $\text{Li}^+$  est intercalé dans le matériau de la cathode et un ion lithium est libéré de l'anode pour préserver l'électro-neutralité de l'électrolyte. Ce principe de fonctionnement est illustré par la **(figure II.22)**, dans le cas d'une cathode lamellaire type NMC.

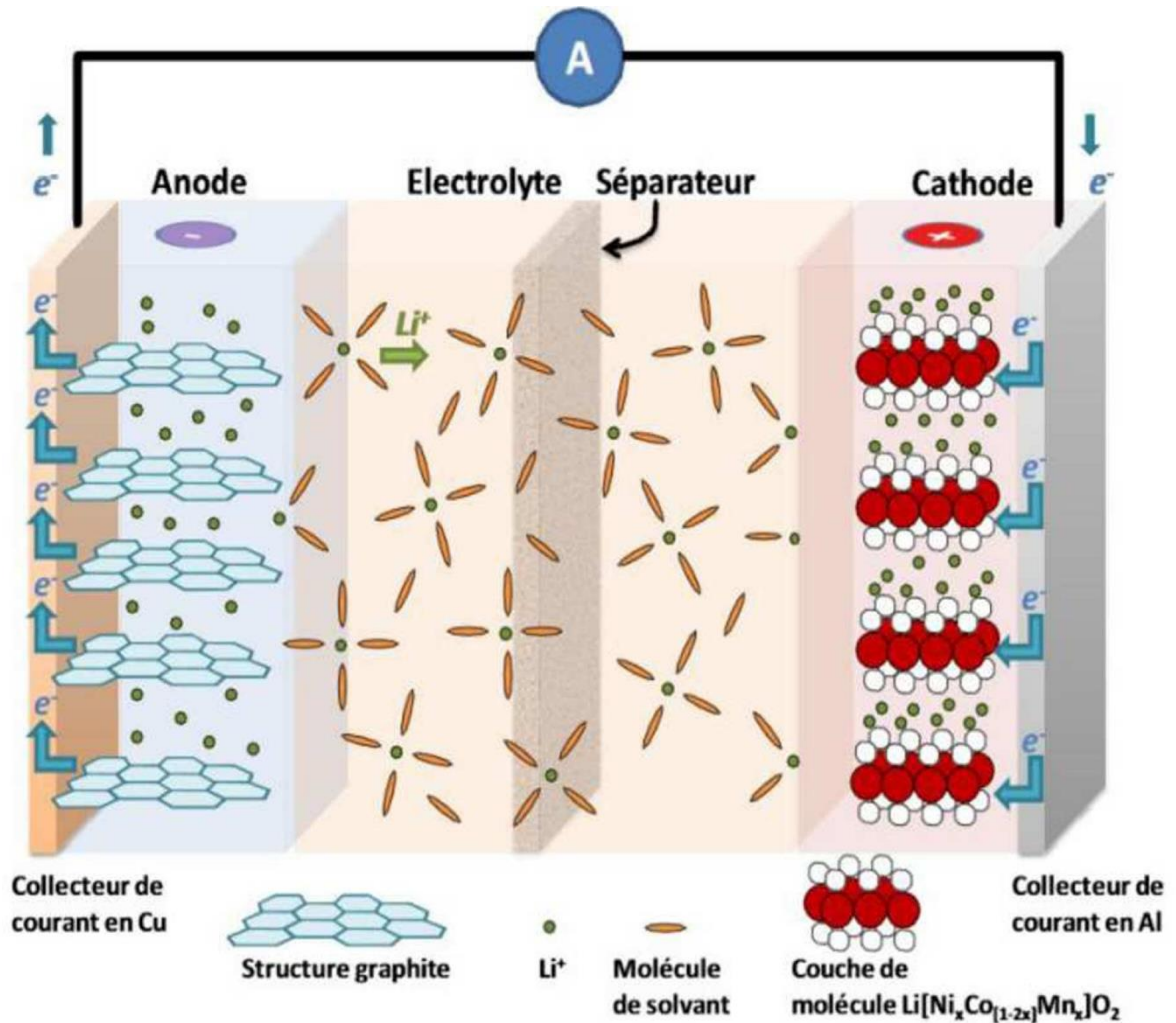


Figure (II.22): Structure et principe de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion

Le coût élevé dû à la matière première et à la fabrication, reste un des principaux inconvénients de la technologie lithium, même si une production à grande échelle pourrait permettre d'abaisser sensiblement le prix. Compte tenu de l'augmentation des besoins en stockage d'énergie dans un grand nombre d'applications, le marché actuel présente différentes technologies de batteries lithium-ion distinguées par leur taille, leur chimie (composition des anodes et cathodes) et leur forme. Le développement de matériaux et composants moins chers conduisant à des batteries plus performantes est donc essentiel.[41]



## IV.1.2 Description tituants internes des batteries Li-ion

## 1) Electrode négative

Les matériaux d'électrode négative des batteries lithium-ion fonctionnent à bas potentiel (proche de 0 V vs Li/Li+). Ce sont des composés d'insertion à base de carbone sous forme graphite ou dopés par de l'étain ou du silicium, ou à base d'oxydes de métaux. La figure II.23. représente les tensions à vide des différents types de carbone utilisables pour l'électrode négative.

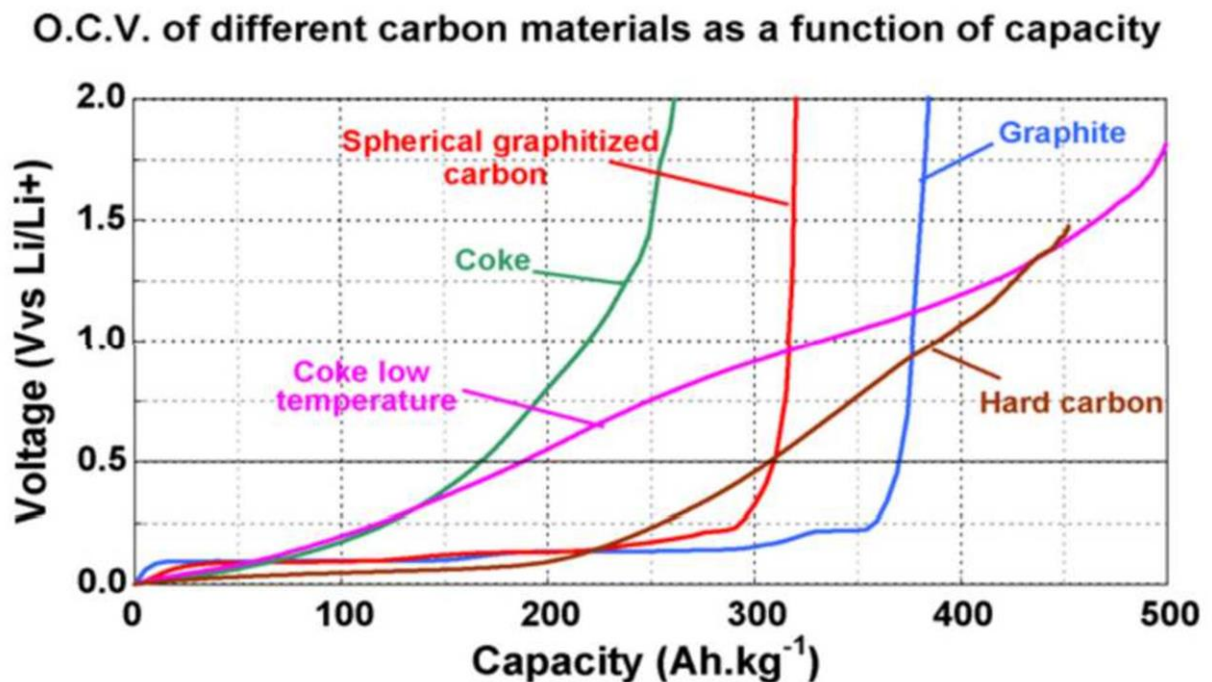


Figure (II. 23) : Tension à vide des différentes électrodes négatives existantes xiv.[41]

Les électrodes les plus répandues sont les électrodes de carbone sous forme de graphite. Grâce à sa structure lamellaire, le graphite possède des propriétés de conductivité électronique intéressante notamment lorsque l'on dope celui-ci par des accepteurs d'électron. De plus, il se prête à l'insertion de différents atomes, ions et mêmes molécules. Dans le cas du lithium, au maximum un atome de lithium pour six atomes de carbone peut être intercalé à pression atmosphérique, ce qui donne la composition  $\text{Li}_x\text{C}_6$  avec  $x=1$ .

Lors de l'intercalation du lithium dans le graphite, un motif régulier de couches remplies et faiblement remplies de lithium est obtenu. Ce mode d'insertion est un processus thermodynamique qui consiste à remplir peu d'espaces inter plans, mais de les remplir entièrement.



## 2) Electrode positive

L'électrode positive des batteries au lithium est composée généralement d'un matériau d'insertion. Pour les générateurs lithium-ion utilisant un électrolyte liquide ou polymère, les oxydes de métaux de structure hexagonale  $\text{LiMO}_2$  avec M pouvant être du cobalt ou du nickel, ou de structure cubique (spinel) tel que  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , pour lesquels l'insertion et la désinsertion du lithium se produit autour de 4 V vs Li/Li+. Le cobalt tend à être remplacé partiellement ou complètement pour des raisons d'approvisionnement et de coût. En effet, la production annuelle de cobalt est de 60000 tonnes. Son prix élevé est expliqué pour des raisons géopolitiques. C'est un matériau historique utilisé notamment dans les applications portables

et de coût. En effet, la production annuelle de cobalt est de 60000 tonnes. Son prix élevé est expliqué pour des raisons géopolitiques. C'est un matériau historique utilisé notamment dans les applications portables.

## 3) L'électrolyte

L'électrolyte est composé d'un solvant dans lequel on ajoute un sel (milieu ionisé). Plusieurs combinaisons sel-solvant sont possibles et des maxima de conductivités ont été observés pour des solutions de sels de lithium (le plus souvent fluoré) dans l'acetonitrile (AN), la butyrolactone ( $\gamma$ BL), le carbonate de diméthyle (DMC), le carbonate d'éthylène (EC), le carbonate de propylène (PC). Souvent ces solvants sont utilisés en combinaison, car un seul solvant présente rarement toutes les propriétés requises. Les sels les plus utilisés dans les électrolytes pour les batteries au lithium sont le lithium hexa fluoro phosphate ( $\text{LiPF}_6$ ) et le lithium tetra fluo borate ( $\text{LiPF}_4$ ). Il existe d'autres sels tels que le perchlorate de lithium ( $\text{LiClO}_4$ ), ( $\text{LiAsF}_6$ ), le tetra fluoro borate de lithium ( $\text{LiBF}_4$ ) ou encore ( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ), mais ces sels présentent des inconvénients de stabilité ainsi que des risques d'explosivité et de conductivité. La présence de fluor (ou de chlore) induit la nécessité d'envisager un risque d'émission d'halogénure d'hydrogène (HF principalement) en cas de décomposition thermique.

Il est important de comprendre que la batterie de puissance pour l'application automobile est en cours d'industrialisation et est une stratégie scientifique récente. Cependant, le saut technologique pour la commercialisation est actuellement en cours. Les avancées dans le domaine des batteries à base de lithium ont été nombreuses dans les vingt

dernières années. L'intérêt majeur de cette technologie est de proposer des densités d'énergie plus élevées que les autres technologies. Cette grande densité énergétique vient du fait que le potentiel de l'électrode positive est de l'ordre de 2 à 5

V vs Li/Li+. Les batteries au lithium peuvent être composées d'une large gamme de matériaux ; la figure II.24 regroupe les potentiels électriques des différentes électrodes susceptibles d'être utilisées dans ces batteries : de nombreuses configurations sont possibles. Cependant, la différence de potentiel entre les deux électrodes ne doit pas être trop élevée pour que l'électrolyte soit suffisamment stable.

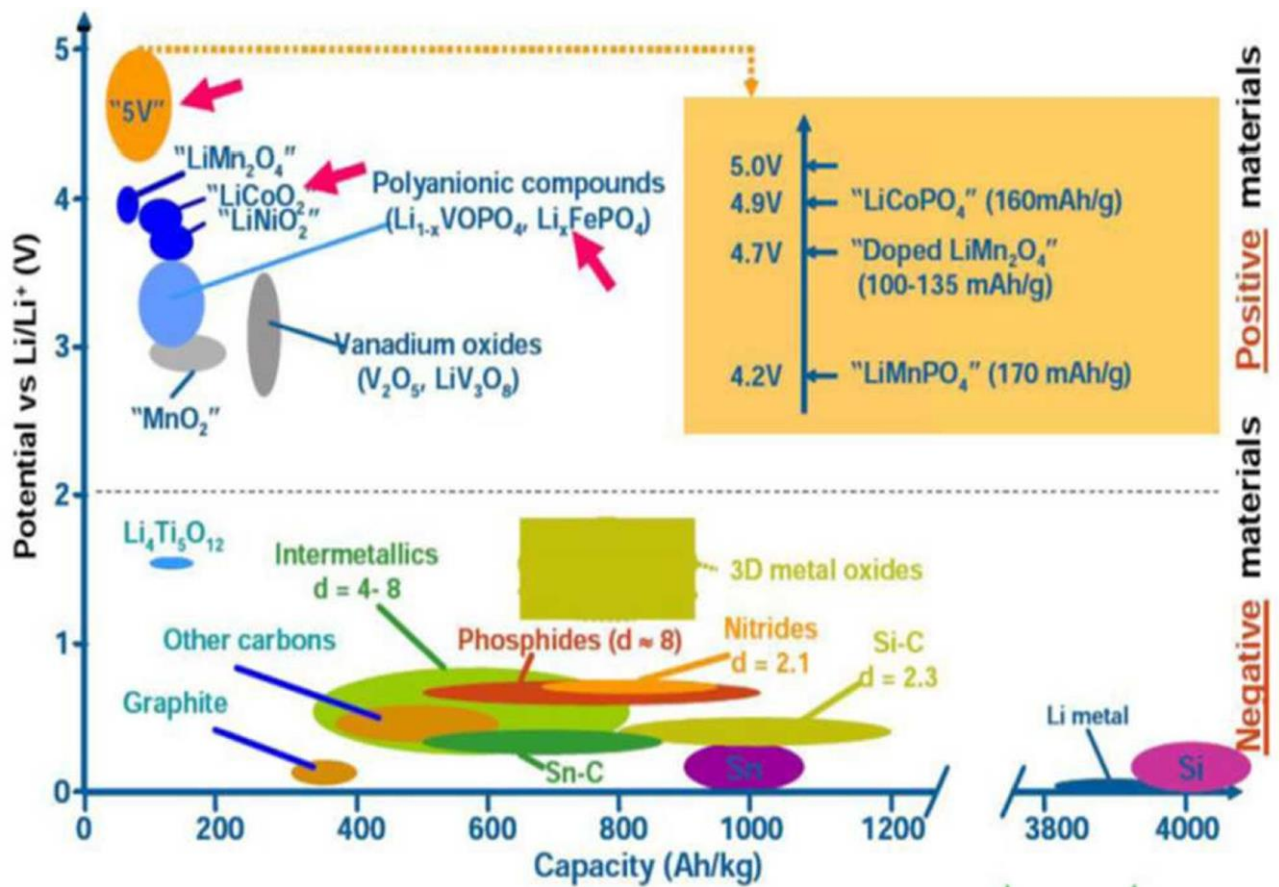
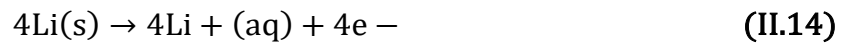


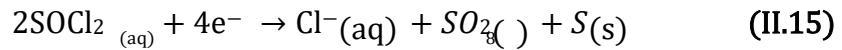
Figure (II. 24) : présentation des électrodes positives et négatives des batteries Li-ion selon leur potentiel électrique vs Li/Li+ et leur capacité de stockage par unité de masse. [42]

#### 4) Mécanisme Chimique

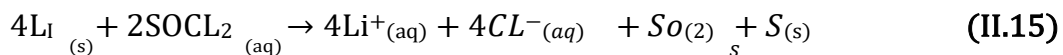
**Demi-équation d'oxydation :**



**Demi-équation de la réduction :**



**Réaction globale:**



Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Li-ion sont résumés dans le tableau

Caractéristiques de l'accumulateur Lithium-ion (Li-ion)	
Electrode positive	LiCoO <sub>2</sub>
Electrode négative	C <sub>6</sub>
Tension (V)	3,6
Densité d'énergie massique ( Wh/kg)	120-250
Densité d'énergie volumique ( Wh/L)	300-600
Nombre de cycles	500-2000
Température de fonctionnement	-20à 60°C
Coûts (€.KWh)	1000-2000
Autodécharge / %	10

Tableau (II.5) : caractéristiques d'un accumulateur au Li-ion.[39]

#### IV.1.3 Avantages et Inconvénients

##### 1) Avantages

- Haute densité d'énergie pour un poids très bas, grâce aux propriétés physiques du lithium.
- Aucun effet mémoire.
- Faible autodécharge (10% par mois).

##### 2) Inconvénients

- Danger si fuite de l'électrolyte.
- Manipulation nécessitant une extrême précaution. [34]

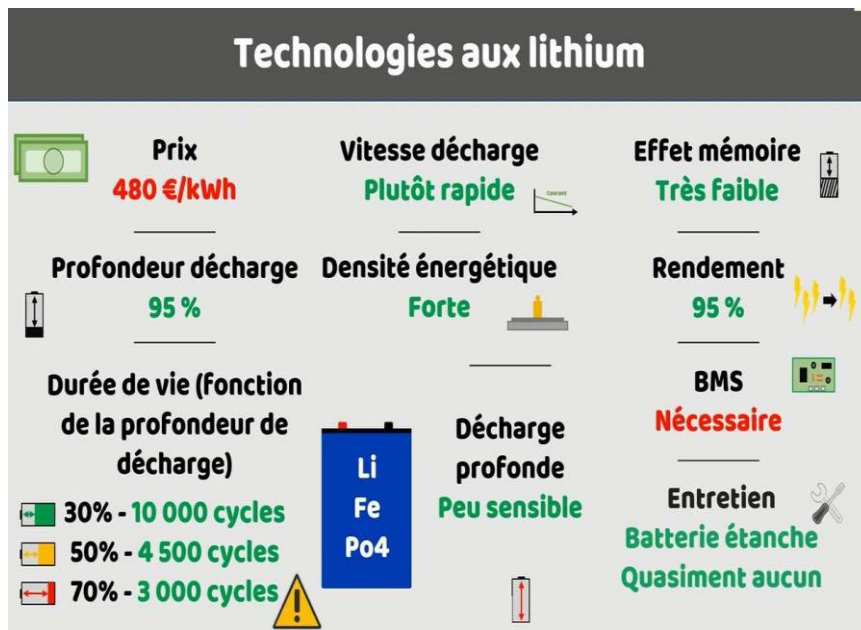


Figure (II. 25): Technologies au lithium Li Fe Po4 selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

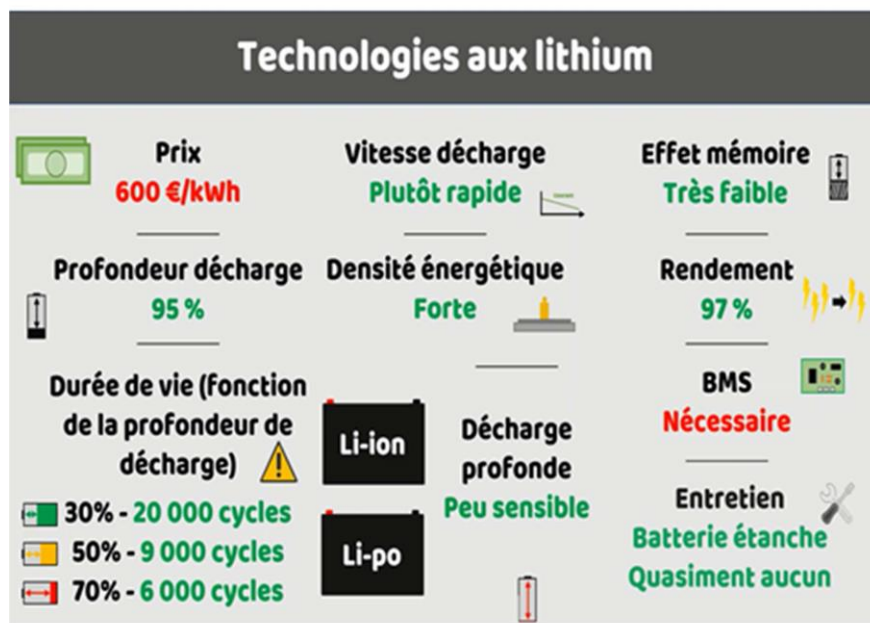


Figure (II. 26): technologies au lithium Li-ion Li-po selon différents critères (prix, vitesse décharge, profondeur décharge, rendement,...etc)

## CONCLUSION

La croissance grandissante de la miniaturisation des téléphones portable, de l'appareillage ménager et des microordinateurs portables, entraîne de facto la miniaturisation des accumulateurs d'énergie. A ce titre plusieurs technologies existent sur le marché. Notre étude a résumé l'importance des différentes technologies. Dans le chapitre premier, nous avons détaillé les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur dont dépend le durée de vie. Il s'agit des accumulateurs :

Plomb-acide, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mis en évidence les technologies existantes en présentant l'historique, les réactions électrochimiques ayant lieu et les caractéristiques électriques pour chaque technologie.

Enfin, le troisième et dernier chapitre, nous avons présenté les comparaisons entre les accumulateurs et ce pour la densité d'énergie volumique, la densité d'énergie massique et enfin la durée de vie.

Nous pouvons dire à présent que les accumulateurs Li-ion, Li-Po et LiFePO<sub>4</sub> présentent les meilleures caractéristiques électriques.

**CHAPITRE III**

**RESULTATS DE  
SIMULATIONS ET  
DISCUSSIONS**

### III.Introduction

La modélisation est une traduction des paramètres du problème dans un langage accessible par la méthode de résolution utilisée, ou bien, c'est une façon de décrire le problème sous une forme qui introduit sa réalisation.

La modélisation d'un problème d'aide multicritère à la décision consiste, généralement, à définir les actions et les critères et à choisir le type de la problématique. Notons que la définition de l'ensemble des critères est parfois l'une des étapes les plus délicates. Pour ce faire, nous allons présenter, dans ce chapitre, les démarches constituant l'élaboration du modèle du problème décrit précédemment.

### IV.Langage de développement

#### IV.1.Choix du langage

MATLAB (matrix laboratory) est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement puissant, complet et facile à utiliser, destiné au calcul scientifique et à la visualisation. Développé par la société MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ deux million en 2017 [42]) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (boîte à outils).

#### IV.2.Les particularités du langage MATLAB

MATLAB permet un travail interactif, soit en mode commande, soit en mode programmation ; tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques. Considéré comme un des meilleurs langages de programmation (C ou Fortran), MATLAB possède les particularités suivantes par rapport à ces langages :

La programmation facile.

La continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes.

La gamme étendue des nombres et leurs précisions.

La bibliothèque mathématique très compréhensive.

L'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires.

La possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C ou Fortran).

Pour l'interface graphique, des représentations scientifiques, et même artistiques des objets peuvent être créés sur l'écran en utilisant des expressions mathématiques. Les graphiques sur MATLAB sont simples et attirent l'attention des utilisateurs, vu les possibilités importantes offertes par ce logiciel.

## **V. Application de l'aide multicritère à la décision pour le choix d'un système de stockage**

### **V.1. Présentation et identification du problème**

Cette étude consiste à concevoir un outil qui permet de faciliter aux décideurs la tâche d'appréciation des nombreuses propositions de batteries et sélectionner certain d'entre elle répondant au mieux à leurs objectifs. Parmi les problématiques de référence d'aide multicritère à la décision, il est adéquat d'adopter la problématique de rangement afin de classer les différents batteries.

En effet, d'après notre analyse des besoins et des objectifs, il s'agit de classer les batteries selon un ensemble de critères. Le classement cherché, permettra aux décideurs de choisir la plus approprié conformément à leurs préférences.

### **V.2. Définition de l'ensemble des critères**

Cette étape est aussi importante que la précédente puisque c'est en fonction de ces critères que nous allons évaluer nos batteries : Pb AGM, Pb GEL, LITHIUM, NICKEL selon ces trois critères :

- Critères prix .
- Critères rendement .
- Critères profondeur de charge .



	Prix	Rendement	Profondeur décharge
Pb AGM	190	95	80
Pb GEL	200	90	90
LITHIUM	480	95	95
NICKEL	500	80	85
Les poids	0.4	0.35	0.25

**Tableau (III.1) :** les poids de l'évaluation des différentes batteries selon les différents critères

### V.3. La matrice de décision

$$E = \begin{bmatrix} 190 & 95 & 80 \\ 200 & 90 & 90 \\ 480 & 95 & 95 \\ 500 & 80 & 85 \end{bmatrix}$$

### V.4. Implémentation des méthodes TOPSIS

La mise en œuvre de la solution préconisée et le test de son efficacité passe, inévitablement, par la programmation informatique. Ainsi, nous avons été amenées à concevoir une application pour tester les différentes possibilités lors de l'établissement des classements des batteries.

Dans le présent chapitre, nous présentons l'application mise en œuvre pour les solutions, nous donnons dans ce qui suit un bref aperçu sur l'environnement de programmation pour ensuite décrire les fonctionnalités de l'application.

#### III.4.1. Les étapes suivies pour l'implémentation

Pour implémenter les méthodes multicritères, nous avons utilisé plusieurs fonctions prédéfinies sous Matlab et nous avons implémenté d'autres fonctions.

### · Les fonctions prédéfinies

Avant de parler des programmes et de leurs caractéristiques, nous devons d'abord vous présenter Les fonctions prédéfinies utilisées et notre démarche pour programmer et formaliser les méthodes proposées.

inv(X)	Renvoie l'inverse de la matrice carrée X.
length(X)	Renvoie la longueur d'un vecteur X.
max(X)	Renvoie le plus grand élément de X. Ou X est un vecteur ligne contenant l'élément maximal de chaque colonne.
setdiff(A,B,'rows')	Pour deux matrices A et B avec le même nombre de colonnes, renvoie les lignes de A qui ne sont pas dans B et les met dans C. Les lignes de la matrice C seront dans l'ordre.
size(M)	Fournit les dimensions de la matrice M
sum	Si A est un vecteur sum(A) rend la somme des éléments, Si A est une matrice, sum(A) traite les colonnes de A comme vecteurs, rendre un vecteur de la ligne des sommes de chaque colonne.
zeros	zeros(n) retourne nxn matrice de zéros, zeros (m,n) retourne, un mn matrice de zéros.

TABLE 5.2 - Fonctions prédéfinies utilisées

### · Les fonctions implémentées

- **La fonction TOPSIS** : cette fonction pour résoudre un problème de l'AMD avec la méthode TOPSIS. Elle retourne un vecteur de classement des attributs par la méthode TOPSIS. Pour utiliser cette fonction utiliser le code suivant :

$$C = \text{TOPSIS}(x, w, s)$$

x : la matrice de décision. w : le vecteur de poids.

s : le vecteur de signe (1 pour maximisation et -1 pour minimisation). c : le vecteur de classement des attributs par la méthode TOPSIS.

**III.4.2. Résolution avec la méthode TOPSIS**

Les poids avec le matrice d'évaluation de différent types de batterie selon :

**1. La méthode se présente comme suit :**

$$E' = \frac{190}{\sqrt{(190)^2 + (200)^2 + (480)^2 + (500)^2}} = 0.2547 \quad (III.2)$$

$$E' = \frac{200}{\sqrt{(190)^2 + (200)^2 + (480)^2 + (500)^2}} = 0.2681 \quad (III.3)$$

$$E' = \frac{480}{\sqrt{(190)^2 + (200)^2 + (480)^2 + (500)^2}} = 0.6434 \quad (III.4)$$

$$E' = \frac{500}{\sqrt{(190)^2 + (200)^2 + (480)^2 + (500)^2}} = 0.6702 \quad (III.5)$$

**2. Calculer le produit des performances normalisées par les coefficients:**

$$E' = \frac{95}{\sqrt{(95)^2 + (90)^2 + (95)^2 + (80)^2}} = 0.5265 \quad (III.6)$$

$$E' = \frac{90}{\sqrt{(95)^2 + (90)^2 + (95)^2 + (80)^2}} = 0.4988 \quad (III.7)$$

$$E' = \frac{95}{\sqrt{(95)^2 + (90)^2 + (95)^2 + (80)^2}} = 0.5265 \quad (III.8)$$

$$E' = \frac{80}{\sqrt{(95)^2 + (90)^2 + (95)^2 + (80)^2}} = 0.4434 \quad (III.9)$$

**3. Déterminer les profils idéal (a\*) et anti-idéal (a\*) :**

$$E' = \frac{80}{\sqrt{(80)^2 + (90)^2 + (90)^2 + (85)^2}} = 0.4562 \quad (III.10)$$

$$E' = \frac{90}{\sqrt{(80)^2 + (90)^2 + (90)^2 + (85)^2}} = 0.5132 \quad (III.11)$$

$$E' = \frac{95}{\sqrt{(80)^2 + (90)^2 + (90)^2 + (85)^2}} = 0.5458 \quad (III.12)$$

$$E' = \frac{85}{\sqrt{(80)^2 + (90)^2 + (90)^2 + (85)^2}} = 0.4847 \quad (III.13)$$

**\*Matrice des performances normalisées :**

$$E' = \begin{bmatrix} 0.2547 & 0.5265 & 0.4562 \\ 0.2681 & 0.4988 & 0.5132 \\ 0.6434 & 0.5265 & 0.5458 \\ 0.6702 & 0.4434 & 0.4847 \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

**\*Pondération des performances**

$$E'' = \begin{bmatrix} 0.1018 & 0.1842 & 0.1140 \\ 0.1072 & 0.1745 & 0.1283 \\ 0.2573 & 0.1842 & 0.1354 \\ 0.2680 & 0.1551 & 0.1211 \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

A) Idéal et anti-idéal

$$a^* [0.2680; 0.1842; 0.1354]$$

$$a [0.1018; 0.1551; 0.1140]$$

• Les distance idéal

$$D^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (e''_{ij} - e^*_j)^2} \quad \text{(III.16)}$$

$$D^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (e''_{ij} - e^*_j)^2} \quad \text{(III.17)}$$

$$D^*_1 = \sqrt{(0.2681 - 0.10188)^2 + (0.1843 - 0.1840)^2 + (0.1354 - 0.11405)^2} \quad \text{(III.18)}$$

$$=0.168.$$

$$- D^*_2 = \sqrt{(0.2681 - 0.10724)^2 + (0.1843 - 0.1746)^2 + (0.1354 - 0.12831)^2} \quad \text{(III.19)}$$

$$=0.161.$$

$$- D^*_3 = \sqrt{(0.2681 - 0.25738)^2 + (0.1843 - 0.1843)^2 + (0.1354 - 0.13544)^2} \quad \text{(III.20)}$$

$$=0.011.$$

$$- D^*_4 = \sqrt{(0.2681 - 0.2681)^2 + (0.1843 - 0.15520)^2 + (0.13544 - 0.12118)^2} \quad \text{(III.21)}$$

$$=0.032.$$

• les distances anti-idéales

$$- D^*_1 = \sqrt{(0.10188 - 0.10188)^2 + (0.15520 - 0.18430)^2 + (0.11405 - 0.11405)^2} \quad \text{(III.22)}$$

$$=0.029.$$

$$- D^*_2 = \sqrt{(0.10188 - 0.10724)^2 + (0.1552 - 0.17460)^2 + (0.11405 - 0.12931)^2} \quad \text{(III.23)}$$

$$=0.025.$$

$$- D^*_3 = \sqrt{(0.10188 - 0.25738)^2 + (0.15520 - 0.18430)^2 + (0.11405 - 0.13544)^2} \quad \text{(III.24)}$$

$$=0.160.$$

$$- D^*_4 = \sqrt{(0.10188 - 0.26810)^2 + (0.15520 - 0.15520)^2 + (0.11405 - 0.12118)^2} \quad \text{(III.25)}$$

$$=0.166.$$

• Les coefficients

$$C1 = \frac{D \cdot i}{D \cdot i + D_i} \Rightarrow C1 = \frac{0.029}{0.168 + 0.029} \tag{III.26}$$

$$C2 = \frac{0.025}{0.025 + 0.161} = 0.133 \tag{III.27}$$

$$C3 = \frac{0.160}{0.160 + 0.011} = 0.937 \tag{III.28}$$

$$C4 = \frac{0.166}{0.166 + 0.032} = 0.5 \tag{III.29}$$

C3 > C4 > C1 > C2.

VI. Description de l'interface utilisateur

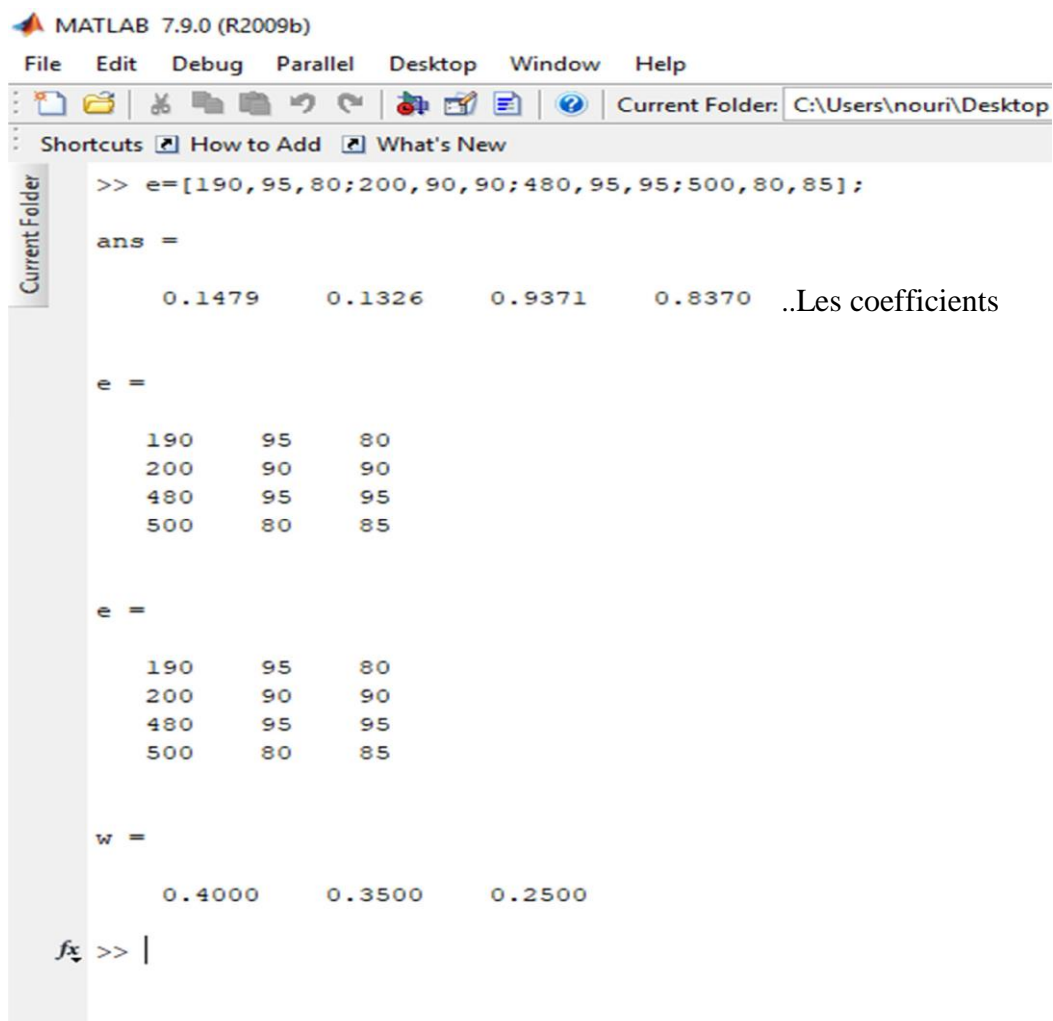


Figure III.1 – Fenêtre d'accueil de la fonction TOPSIS

## VII. Explication du système et interprétation des résultats

```

1 function [ cc ] = topsis (e,w )
2 e=[190,95,80;200,90,90;480,95,95;500,80,85];
3 w=[0.4,0.35,0.25];
4 sqrtxij=sqrt (sum (e () .^2));
5 N =e./repmat (sqrtxij,[size (e,1) 1]);
6 wj=eye (size (w,2));
7 wj=eye (size (w,2)) .*repmat (w,size (w,2),1);
8 V=N*wj;
9 Apositive=max (V);
10 Anegative=min (V);
11 Apositivee=repmat (Apositive,size (V,1),1);
12 Anegativee=repmat (Anegative,size (V,1),1);
13 s1=(V-Apositivee).^2;
14 s2=(V-Anegativee).^2;
15 for (j=1:1:size (s1,1))
16     sumApositive (j)=sum (s1 (j,:));
17 end
18 for (j=1:1:size (s2,1))
19     sumAnigetive (j)=sum (s2 (j,:));
20 end
21 dPositive=sqrt (sumApositive);
22 dNigetive=sqrt (sumAnigetive);
23 sumD=dNigetive+dPositive;
24 cc=dNigetive./sumD;
25 end
26

```

Figure III.2 - Algorithme de la fonction TOPSIS



---

## VIII. Conclusion

Le présent travail consiste à modéliser, à concevoir et à mettre en œuvre un système interactif d'aide multicritère à la décision pour traiter un problème d'évaluation et de sélection batteries.

Dans notre étude, la méthodologie adaptée consiste à déterminer la meilleure batterie, les critères et leurs poids pour pouvoir trouver une famille de critères cohérente. Au stade de résolution, notre choix s'est porté sur les méthodes multicritères (TOPSIS), ces méthodes nous a permis de classer les batteries du meilleur au moins bon.

Afin de rendre exploitable cette modélisation, un programme informatique a été développé en utilisant le langage MATLAB. Ainsi, on peut dire que cette étude a atteint, en grande partie l'objectif fixé au départ. Il s'agit de mettre en œuvre une application basée sur le caractère décisionnel. Notre but n'était pas de leur imposer une solution, mais de leur proposer une solution de compromis afin de répondre à la problématique posée. Par ailleurs, cette application n'est pas figée, elle peut être utilisée d'autre problème multicritères.

Les résultats obtenus lors de notre étude ont montré que l'aide multicritère à la décision représente certainement l'outil le plus adéquat pour permettre de déterminer la meilleure batterie dans notre cas la batterie lithium est la meilleure selon les différents critères.



# **CONCLUSION GENERAL**

**VII. CONCLUSION GENERAL**

Dans cette étude on a présenté les différents principes des méthodes d'aide à la décision, nous avons illustré quelques exemples pour mieux cerner les avantages et inconvénients des méthodes multi-attributs et de sur-classement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mis en évidence les technologies existantes en présentant l'historique, les réactions électrochimiques ayant lieu et les caractéristiques électriques pour chaque technologie.

Afin de rendre exploitable cette modélisation, un programme informatique a été développé en utilisant le langage MATLAB. Ainsi, on peut dire que cette étude a atteint, en grande partie l'objectif fixé au départ. Il s'agit de mettre en œuvre une application basée sur le caractère décisionnel. Notre but n'était pas de leur imposer une solution, mais de leur proposer une solution de compromis afin de répondre à la problématique posée. Par ailleurs, cette application n'est pas figée, elle peut être utilisée d'autres problèmes multicritères.

Les résultats obtenus lors de notre étude ont montré que l'aide multicritère à la décision représente certainement l'outil le plus adéquat pour permettre de déterminer la meilleure batterie dans notre cas la batterie lithium est la meilleure selon les différents critères.

## Bibliographie

- [1] Farouk Aissanou. *Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunications autonomes. PhD thesis, Institut National des Télécommunications, 2012.*
- [2] Denis Bouyssou, Didier Dubois, Marc Pirlot, and Henri Prade. *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision, volume 3, analyse multicritère.* Hermès, 2006.
- [3] W. Edwards and D. Von Winterfeldt. *Decision analysis and behavioral research*, 1986.
- [4] Vincke Philippe Préfacier, Roy Bernard. *L'aide multicritère à la décision.* Editions Ellipses, 1989.
- [5] Zeleny M. *Multiple criteria decision making.* McGraw-Hill, New-York, 1982.
- [6] FERHATI Fatima Zohra Et KAOUANE Nissia *Conception d'un outil à la décision pour le ranking des projets d'exploration dans l'amont Pétrolier( SONATRACH),* Mémoire de Master II, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2016-2017 .
- [7] [Guitouni et al. 1998] Guitouni A, Martel J-M, Vincke Ph. *Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada. 1999.*
- [8] -[Mahdi, 2007] Mahdi S. (2007). *Optimisation multi objectif par un nouveau schéma de coopération méta/exacte.* Mémoire de Master, Université Mentouri de Constantine.
- [9] Ward Edwards. *Social utilities.* Engineering Economist, 1971.
- [10] Peter Fishburn. *Intransitive indifference with unequal indifference intervals. Journal of Mathematical Psychology*, 1970.
- [11] CL. Hwang and K. Yoon. *Multiple criteria decision making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 1981.
- [12] Romualdas Ginevičius, Valentinas Podvezko, and Saulius Raslanas. *Evaluating the alternative*

*solutions of wall insulation by multicriteria methods.* Journal of Civil Engineering and Management, 2008.

[13] Abdelkader Hammami. *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau.* PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Laval, 2003.

[14] Mahmoud Saremi, Farid Mousavi, and Amir Sanayei. *Tqm consultant selection in smes with topsis under fuzzy environment.* *Expert Systems with Applications*, 2009.

[15] Branset and Marshal. *L'aide multicritère à la décision. le cerveau du décideur.* Université libre de bruxelles, 2001.

[16] Dinh, V.D. (2010). “*Diagnostic des batteries Lithium ion dans des applications embarquées*”, Thèse de Doctorat en Technologie de l'Information et des Systèmes, Université de Technologie de Compiègne.

[17] Abdelkader, A. (2004). “*Conception d'observateurs non linéaires par approche multi modèle : application au diagnostic*”. Thèse de Doctorat en automatique et traitement du signal, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Nancy.

[18] Zhang, F. et al. (2008). “*A Battery State of Charge Estimation Method using Sliding Mode Observer*”. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China , pp. 989-994.

[19] Sabouhi, H.R. et al. (2008). “*Design of A Novel Sliding Mode Observer for Chaotic Systems*”. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, “WCE” 2008*, London, U.K, Vol. 3, pp.978-988.

[20] Alireza, P. (2009). “*Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges*”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, L'institut national polytechnique de LORRAINE, Université de Nancy.

- [21] Rémi, S. (2004). “*Contribution à l’étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire*”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, l’Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [22] Hela, B. (2010). “*Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce*”, Thèse de Doctorat en microélectronique, Université du 7 Novembre à Carthage.
- [23] Dekkiche, A. (2008). “*Modèle de batterie générique et estimation de l’état de charge*”, *Mémoire d’ingénieur*, école de technologie supérieure, Université du Québec.
- [24] Jonghoon, K. et al. (2011). “*State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System*”. IEEE, vol. 60, pp. 4249-4260.
- [25] Pop, V. et al. (2005). “*State-of-the-art of battery state-of-charge determination*”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, N 12 , pp. R93–R110.
- [26] Bhangu, B. S. et al. (2005). “*Observer techniques for estimating the State-of- Charge and State-of-Health of VRLABs for Hybrid Electric Vehicles*”. *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, pp. 780-789.
- [27] Septimiu, M. et Dan, S. (2007). “*A New and Improved Model of a Lead Acid Battery*”. *FACTA UNIVERSITATIS*, vol. 20, no. 2, pp. 187-202.
- [28] [www.velo-electrique.com](http://www.velo-electrique.com). (*les différents types de batterie*), visité le : 18-05-2022.
- [29] : Belhadj, M. (2008). “*Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome*”, *Mémoire de magister en Microélectronique –Photovoltaïque*, Centre Universitaire de Bechar.
- [30] Dillenseger G. *Caractérisation de nouveaux mondes en charge pour batteries stationnaires de secours* . Thèse de doctorat ;Montpllier, Université de Montpellier II (2004)
- [31] DRIAI .S *Mémoire de licence, stockage de l’énergie dans les Piles et accumulateurs* ;Université de Bordj Bou Arréridj.(2013)

- [35] Luca, B. et al. (2001). "Discrete-Time Battery Models for System-Level Low- Power Design". IEEE, vol. 9, pp. 630-640.
- [36] SAADALLAH .N Thèse doctorat en sciences ; *Etude du mécanisme de réduction de PbO2 :Application de l'électrode à microcavité*. Université Farhat Abbas-Sétif. (2013).
- [37] Théo DONDEL Projet d'étude et réalisation, *chargeur de batterie au plomb 48V*, Institut universitaire de technologie de tours, 2006
- [38] STIEVANO .L Mémoire de Master, *convertisseurs électrochimiques de l'énergie :Batteries, accumulateurs ,super capacités*, Université de Montpellier 2.
- [39] BARCHASZ.SThèse doctorat ,*Développement d'accumulateurs lithuim/soufre*, Université GRENOBIE ,2011.
- [40] DINH VINHDO Thèse doctorat, *diagnostic de batteries lithuim ion dans des applications embarquées*, Université de Technologie de campiène, 2010
- [41] EDDAHECH ,A Thèse doctorat, *Modélisation du Vieillissement et de termination de l'état de batteries lithuim –ion pour application véhicule électrique hybrid*, Université Bordeaux 1, 2013