

**Article 8. Analyse de performance des batteries d'accumulateurs**  
**M. Fanampisoa Béatrice<sup>1,2</sup>, E. J. R. Sambatra<sup>1,2</sup>, A. J. C. Rakotoarisoa<sup>1,3</sup>, N. J. Razafinjaka<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>EDT Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana

<sup>2</sup>Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diégo-Suarez,  
Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana

<sup>3</sup>Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana

Correspondante : fbmilaso@gmail.com

## Résumé

Parmi les types de système de stockage existants, les batteries électrochimiques semblent adéquates dans les pays en voie de développement. Dans les systèmes de production liés à un système de stockage, la grande problématique se centralise toujours sur la partie stockage. Beaucoup de solutions sont déjà proposées dans des ouvrages mais elles ne couvrent pas encore la totalité des besoins humains.

Ainsi, pour étoffer les solutions proposées afin de combler ces besoins, cette contribution met en valeur l'analyse de performance des batteries électrochimiques.

Pour cela, dans un premier temps, les matériaux des éléments constitutifs des batteries existantes seront identifiés avec leurs critères de performances respectifs. Cette étape se focalisera sur l'analyse de chaque critère de chaque élément constitutif des batteries. Cette analyse va identifier la batterie la plus performante par rapport aux éléments constitutifs. Cette identification mènera à valider l'approche méthodologique en se référant au travail antérieurement fait [1].

Afin de continuer dans l'avancement de l'optimisation de l'efficacité énergétique, l'étude vise particulièrement les batteries adaptées aux systèmes de production de source éolienne et/ou solaire photovoltaïque, cas de Madagascar.

**Mots clés :** Batteries Electrochimiques, Matériaux des CASE, Solaire photovoltaïque, Eolienne, système hybride.

## 1. INTRODUCTION

Dans le domaine de la production des énergies électriques à partir des énergies renouvelables, le stockage est toujours une principale problématique. Dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles et déjà exposées. Parmi ces solutions, les batteries d'accumulateurs électrochimiques est l'une des plus adéquates dans des pays en voie de développement comme Madagascar. La fabrication des batteries d'accumulateurs s'évolue progressivement et plusieurs technologies sont déjà commercialisées dans le monde. Leur utilisation dépend de plusieurs facteurs. Alors, il faut bien choisir une batterie avant de l'utiliser. La performance d'une batterie est un critère clé pour la choisir, c'est pour cela que papier relate l'analyse de performance des batteries d'accumulateurs. Pour cette analyse, ce sont les éléments constitutifs des batteries qui seront les bases de l'analyse.

Ce travail fait suite à celui qui a été déjà fait antérieurement qui consistait à l'étude comparative technico-économique des batteries électrochimiques [1].

## 2. BATTERIES D'ACCUMULATEURS ELECTROCHIMIQUES

### 2.1. Définition

La batterie est le stockage le plus utilisé. Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

### 2.2. Caractéristiques techniques

Techniquement, une batterie électrochimique est caractérisée par plusieurs critères de performance, à savoir les puissances disponibles, la capacité de stockage, le coût, la densité massique et volumique, la fiabilité, la durée de vie, l'autodécharge, le rendement, l'autonomie, le temps de réponse et de décharge, l'impact environnemental, les contraintes opératoires, le recyclage, la profondeur de décharge.

En plus des caractéristiques techniques de la batterie, les éléments constitutifs de la batterie jouent des principaux rôles pour rendre performante la batterie. La valeur de la performance de la batterie principalement en termes de cyclabilité et la puissance dépendent de l'importance des éléments constitutifs de la batterie, tels que [2] :

- L'électrolyte est le facteur principal pour la puissance,
- La cyclabilité dépend de :
  - o La « respiration » des masses actives (variation du volume spécifique lors des changements de phase),
  - o La solubilité des masses actives,
  - o La stabilité chimique de l'électrolyte en oxydation comme en réduction,
  - o La corrosion du collecteur de courant.

### 2.3. Éléments constitutifs des batteries électrochimiques

Un accumulateur est un système physico-chimique réversible pouvant convertir l'énergie chimique en énergie électrique grâce à des réactions d'oxydoréduction. L'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie chimique lorsque le système est en mode accumulateur (le système est en mode charge) puis restituée sous forme d'énergie électrique lorsqu'il se trouve en mode générateur (le système est alors en décharge) Une batterie est définie en général par l'association de plusieurs accumulateurs.

Principalement, une batterie est constituée de :

- Cathode (électrode positive) dans laquelle se déroule la réduction des métaux ;
- Anode (électrode négative) qui assure l'oxydation des métaux ;
- Electrolyte qui imprègne les électrodes pour permettre la circulation des ions ;
- Séparateur qui sert à éviter au maximum le court-circuit dans la batterie ;
- Conducteurs de courant.

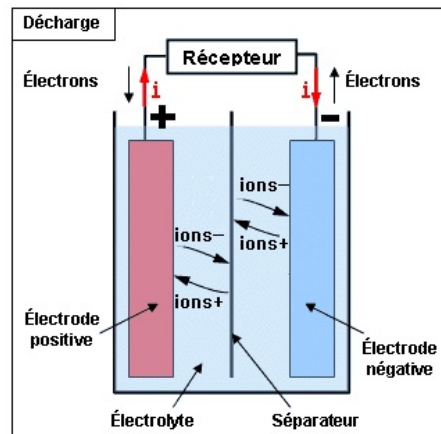


Figure 27 : Schéma général d'une batterie

(Source : site Sciences de l'Ingénieur de l'ENS Paris-Saclay)

## 3. ANALYSE DE PERFORMANCE DES BATTERIES D'ACCUMULATEURS

Par rapport à notre travail antérieur [1], on a eu un résultat en prenant les caractéristiques techniques des batteries comme critères de comparaison. Mais dans ce présent travail, nos critères de références sont les éléments constitutifs de la batterie.

### 3.1. Approche méthodologique

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation. Pour évaluer la performance des batteries d'accumulateurs, l'approche adoptée dans le cadre de cette contribution se base sur la « Matrice de décision multicritère (MDM) ». La MDM permet d'évaluer plusieurs options dans des situations où toutes possibilités semblent plausibles. Pour ce faire, l'approche consiste à parcourir les 5 étapes suivantes :

- Identifier l'objectif de la démarche et le type de décision ;
- Dresser la liste des solutions possibles ;
- Elaborer la liste des critères à prendre en compte ;
- Evaluer chacune des solutions vis-à-vis de chacune des critères ;
- Pondérer les jugements pour désigner la solution ayant les meilleures évaluations.

#### 3.1.1. Identification de l'objectif de la démarche et le type de décision

Dans cette étape, la décision à prendre concerne la batterie la plus performante. Ceci fait référence aux besoins de Madagascar par rapport à ses possibilités. Selon les besoins actuels du pays et les configurations de sources de production les plus en vogue, le critère « type » est attribué aux « accumulateurs électrochimiques ».

#### 3.1.2. Liste des solutions possibles

Il s'agit concrètement des technologies de batterie à évaluer. Notre travail consiste à évaluer les éléments constitutifs des batteries afin de déterminer leur performance. Pour cela, nos cibles principales sont les matériaux de l'anode, de la cathode, de l'électrolyte et du séparateur.

Comme il existe plusieurs types des matériaux, les matériaux suivants constitueront la base de notre étude. Il faut noter que d'autres matériaux ont été recensés mais avaient été délibérément supprimés de la liste due à l'insuffisance de données techniques les concernant. Ainsi, à titre non exhaustif, les matériaux retenus pour l'analyse comparative sont regroupés dans le tableau suivant.

**Tableau 3 : Liste des matériaux de l'anode, de la cathode, de l'électrolyte et du séparateur [3], [4], [5]**

Éléments constitutifs des batteries	Cathode	Anode	Electrolyte	Séparateur
<b>Matériaux recensés</b>	LiNiO <sub>2</sub> , NiOOH, LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , PbO <sub>2</sub> , LiFePO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , LiCoO <sub>2</sub> , LNiMnCoO <sub>2</sub>	Pb, LiC <sub>6</sub> , LTO, Silicium Cadmium, Graphite,	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KOH, LiPF <sub>6</sub>	Polyéthylène (PE), Polypropylène(PP), Tricouche PP-PE-PP, Laine de verre de fibre

### 3.1.3. Liste des critères à prendre en compte

Plusieurs éléments de comparaison des matériaux sont proposés dans la littérature. Les critères sont très variables selon les besoins et les niveaux de précision souhaités. Dans le cadre de cet travail, l'ensemble des critères recensés sont pris en considération dans le choix et à base de MDM. Les éléments constituant la MDM sont composés des critères regroupés dans le tableau suivant et classés selon la nature des éléments constitutifs.

**Tableau 4 : Critères de comparaison des matériaux [3], [4], [5] et [6]**

<b>Matériaux de la Cathode</b>									
Critères	LCO	LNO	LMO	PbO <sub>2</sub>	NMC	NCA	LFP	Li-S	Li-Air
<b>Cyclabilité</b>	500-1000	300-600	300-700	600-1200	1000-3000	500	1000-2000	100	50
<b>Energie spécifique [Wh/kg]</b>	150-200	150-200	100-150	30-50	150-200	200-260	90-120	500	3600
<b>Fem [V]</b>	3,6	3,6	3,7	2	3,6-3,7	3,6	3,2-3,3	2,2	3,0-3,2
<b>Potentiel [V]</b>	4,2	3,7	4,1	1,8	5,1	4,2-4,3	4	3	3,8
<b>Capacité spécifique [mAh/g]</b>	280	220	140	220	180	200	165	1000	2000
<b>Masse molaire [g/mol]</b>	97,8	97,6	178,9	239,2	95,759	96,045	157,7	39	35,876
<b>Matériaux de l'Anode</b>									
Critères	Graphite LiC <sub>6</sub>		Cadmium	Pb	Silicium				
<b>Densité [%]</b>	12,1		8,9	11,3	9,7				
<b>Changement de volume [%]</b>	10		410	211	270				
<b>Capacité spécifique [mAh/g]</b>	260-400		477	224	350				
<b>Masse volumique [g/cm<sup>3</sup>]</b>	6,18		8,69	11,35	8,1				
<b>Masse molaire [g/mol]</b>	78,9		112,4	207,2	28,1				
<b>Température de fonctionnement [°C]</b>	-20 à 60		-20 à 60	-20 à 60	-20 à 60				
<b>Potentiel [V]</b>	0,2 - 1		0,4	1,69	1,2				
<b>Force électromotrice [V]</b>	2		1,45	2,05	1,5				
<b>Matériaux de l'Electrolyte</b>									
Critères	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		LiPF <sub>6</sub>	KOH					
<b>Densité [g/cm<sup>3</sup>]</b>	0,487		1,2	2,4					
<b>Conductance [ms/cm]</b>	16		9,5	8,2					
<b>Masse molaire [g/mol]</b>	98,078		372,9	56,1056					
<b>Masse volumique [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,84		1,55	2,044					
<b>conductivité ionique (environ 1 S/m)</b>	0,03		0,002-0,1	0,04					
<b>Température (-20 à 70°C)</b>	-20 à 60		-20 à +60	30 à 70					
<b>Matériaux du Séparateur</b>									
Critères	Bois	PE : (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>	PP : (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	Laine de verre de fibre					
<b>Densité [g/cm<sup>3</sup>]</b>	55	0,93	0,96	27					
<b>Porosité (30-80%)</b>	65	40-60	40-80	85					
<b>Masse volumique [g.cm<sup>-3</sup>]</b>	1,2	0,90-0,93	0,94-0,96	0,012					
<b>Epaisseur [mm]</b>	0,060	0,035	0,025	0,05					
<b>Conductivité thermique [W/m.K]</b>	0,038	0,045	0,047	0,039					
<b>Energie grise [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	161	26 000	30 000	270					
<b>Prix [euro/m<sup>2</sup>]</b>	25	1,8	2	15					

### 3.1.4. Evaluation des matériaux vis-à-vis des critères

Considérant les valeurs brutes du Tableau 2, cette étape consiste à classer chaque critère par l'attribution de notes correspondant à leurs valeurs selon chaque matériau, ceci est présenté dans le tableau 3.

**Tableau 5 : Classification des critères par attribution des notes par pas d'intervalle**

Pour les cathodes		Cy <sub>c</sub>	Esc	Fem <sub>c</sub>	Po <sub>c</sub>	Cs <sub>c</sub>	Mm <sub>c</sub>	Note		
Valeur minimale		50	30	2	1,8	140	35,876	0.1		
valeur maximale		3 000	3 600	3,7	5,1	2 000	239,20	1		
Pas d'intervalle		300	360	0,37	0,51	200	23,92	0.1		
Pour les anodes		da	ChVa	Csa	Mva	Mma	Tfa	Poa	Fem	Note
Valeur minimale		8,9	10	260	6,18	28,1	-20	0,2	1,45	0.1
valeur maximale		12,1	410	477	11,35	207,2	60	1,69	2,05	1
Pas d'intervalle		1,21	41	47,7	1,135	20,72	6	0,169	0,205	0.1
Pour les électrolytes		de	Coe	Mme	Mve	Cie	Tfe	Note		
Valeur minimale		0,487	8,2	56,1056	1,55	0,002	-20	0.1		
valeur maximale		2,4	16	372,9	2,044	0,1	70	1		
Pas d'intervalle		0,24	1,6	37,29	0,2044	0,01	7	0.1		
Pour les séparateurs		Ds	Pos	Mvs	Es	CTs	Eg	Prix	Note	
Valeur minimale		0,93	40	0,9	0,025	0,038	161	1,8	0.1	
valeur maximale		55	80	1,2	0,06	0,047	30 000	25	1	
Pas d'intervalle		5,5	8	0,12	0,006	0,0047	3 000	2,5	0.1	

Pour chaque critère, une note normalisée de 0,1 à 1 et en 9 intervalles pourrait être attribuée à un critère donné. A titre d'exemple, pour les capacités spécifiques des matériaux de la cathode de :

- 140mAh/g ∈ [0; 199], la note est de 0,1 ;
- 280 mAh/g ∈ [200 ; 399], la note est de 0,2.

Pour la suite, une hiérarchisation des critères selon la littérature ainsi que les particularités des modes d'utilisation à Madagascar est effectuée. Ceci consiste à affecter des coefficients de pondération selon l'importance des critères. Les valeurs peuvent varier de 0,1 à 1. Avec ces coefficients et les notes affectées à chaque matériau selon les critères, on doit affecter une pondération entre ces deux.

Pour avoir cette pondération, la formule suivante est nécessaire :

$$Ponderation = Coefficient \times note \tag{1}$$

Pour déterminer la performance d'une technologie d'accumulateur, il faut appliquer la formule ci-avant pour tout critère des matériaux de la cathode, de l'anode, de l'électrolyte et du séparateur.

Performance de la batterie par rapport à la cathode, anode, électrolyte et séparateur :

$$P_c = \sum_{i=1}^{nbc_c} (Cc_i \ nc_i)$$

$$P_a = \sum_{i=1}^{nbc_a} (Ca_i \ na_i)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^{nbc_e} (Ce_i \ ne_i)$$

$$P_s = \sum_{i=1}^{nbc_s} (Cs_i \ ns_i) \tag{2}$$

Finalement, la performance des accumulateurs est déterminée par rapport à la somme des performances de tous leurs matériaux constitutifs, tel que résume la formule suivante :

$$P_{batterie} = \sum P_{c,a,e,s}$$

ou

$$P_{batterie} = P_c + P_a + P_e + P_s \tag{3}$$

P<sub>batterie</sub> : Performance de la batterie

Puisqu'on a déjà la formule, on va l'appliquer en comparant la technologie d'accumulateur (Plomb Acide) la plus utilisée à Madagascar et la technologie la plus adéquate (Lithium-ion) pour Madagascar vis-à-vis du travail antérieur [1].

### 3.2. Analyse de performance entre la batterie Lithium-ion et Plomb acide

Pour la batterie lithium-ion et la batterie Plomb Acide, le tableau 4 illustre leurs matériaux de la cathode, de l'anode, de l'électrolyte et du séparateur.

**Tableau 6 : Elements constitutifs des Li-ion et PI-Ac**

	Cathode	Anode	Electrolyte	Séparateur
Batterie Li-ion	LiCoO <sub>2</sub>	Graphite	LiPF <sub>6</sub>	PE
Batterie Pb-Ac	PbO <sub>2</sub>	Pb	2H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Laine de verre de fibre

En suivant les démarches du MDM, le tableau 5 résume les notes attribuées aux matériaux par rapport aux critères de décision.

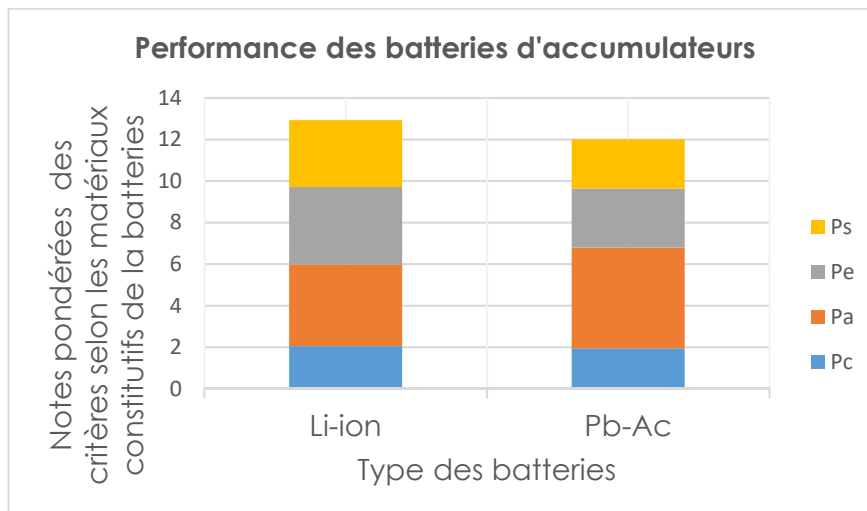
**Tableau 7 : Performance des éléments constitutifs des Li-ion et PI-Ac**

Cathodes				Electrolytes			
Paramètres	Coefficient	LiCoO <sub>2</sub>	PbO <sub>2</sub>	Paramètres	Coefficient	LiPF <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Cyc	0,8	0,4	0,5	De	0,7	0,5	0,3
Esc	0,8	0,1	0,1	Coe	0,8	0,6	1
Femc	0,6	1	0,6	Mme	0,6	1	0,3
Poc	0,6	0,9	0,4	Mve	0,6	0,8	0,9
Csc	0,8	0,2	0,2	Cie	1	1	0,3
Mmc	0,7	0,5	1	Tfe	0,9	0,9	0,9
Anodes				Séparateurs			
Paramètres	Coefficient	LiC <sub>6</sub>	Pb	Paramètres	Coefficient	PE	Laine de verre
Da	0,7	1	1	Ds	0,7	0,1	0,6
ChVa	0,6	0,1	0,6	Pos	0,6	0,8	1
Csa	0,8	0,9	0,5	Mvs	0,6	0,8	0,1
Mva	0,7	0,6	1	Es	0,8	0,6	0,9
Mma	0,7	0,4	1	CTs	0,9	0,1	0,1
Tfa	0,8	1	1	Egs	0,8	0,9	0,1
Poa	0,6	0,6	1	Prix	1	0,9	0,4
Fem	0,6	1	1				

Avec ces notes et coefficients (Tableau 5), l'application des équations 1, 2 et 3 donne la décision du résultat ci-après.

### 3.3. Décision sur le choix de solutions ayant les meilleures évaluations

Sur la base de l'ensemble des critères établis précédemment, en particulier les notes attribuées aux critères ainsi que les coefficients de pondération, tous les deux sur la base de la MDM, la figure suivante illustre les évolutions des cas des batteries lithium ion et Plomb Acide en fonction des importances des critères les concernant.



**Figure 28 : Performance de batteries Li-ion et Pb-Ac**

D'après la Figure 2, entre le Li-ion et Pl-ac, la batterie la plus performante est le type au lithium-ion. Par contre, la batterie au Plomb acide n'est pas défavorable mais sa performance est inférieure à celle du lithium-ion par rapport à certains paramètres.

Puisque ce présent travail fait suite à [1], le présent résultat confirme le rang de la batterie Pb-Ac comparé à celui du Li-ion.

#### 4. CONCLUSION

Cette contribution relate la détermination de performance de batteries d'accumulateurs par rapport aux éléments constitutifs.

L'objet de ce travail consistait à collecter des données pour former une base de données vis-à-vis des matériaux constitutifs des batteries électrochimiques. Par rapport à cela, un état de l'art synthétique des cathodes, des anodes, des électrolytes et des séparateurs des batteries a été entrepris.

Le résultat de cette analyse a été permis par rapport à la méthode « matrice de décision multicritère ». L'approche proposée exploite en valorisant les multiples critères de choix par une attribution de notes par intervalles pondérés. L'ensemble de ces différentes étapes permettent une analyse fine des solutions les plus performantes.

Ainsi, de nos jours, par rapport aux batteries au Plomb acide, les types au Lithium-ion s'avèrent être les solutions les plus performantes.

Finalement, la méthode « Matrice de Décision Multicritère » est validée pour choisir la batterie adaptée que ce soit en analysant les caractéristiques techniques de la batterie ou les matériaux constitutifs.

#### 5. REFERENCES

- [1] M. Fanampisoa Beatrice, E. J. R. Sambatra, A. J. C. Rakotoarisoa, N. J. Razafinjaka, Quels systèmes de stockage de l'énergie pour Madagascar ?, Article 21, page 173 dans « Actes des Journées de Recherche des trois IST de Madagascar », 10-12 juillet 2018
- [2] Jean-François Fauvarque, Quelle frontière entre batteries et supercondensateurs ?, CNAM Electrochimie Industrielle – Paris, JE 07 - Lyon 3-6 Juillet 2007
- [3] Matthieu Ubbain, Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs lithium-ion, Estimation en ligne du SOC ET DU SOH, Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 04 juin 2009, page 22-28
- [4] Jean-François Fauvarque, Batteries ... Tout l'art de stocker l'énergie », Laboratoire d'Electrochimie Industrielle, CNAM Paris, January 8-12-2009
- [5] La technologie des batteries Passé, présent et futur de l'utilisation du nickel, La revue spécialisée du Nickel et ses applications, Vol 32, n°1, Mai 2017
- [6] Dominique Guyomard, Les matériaux d'électrodes pour batteries au lithium, l'actualité chimique, Juillet 1999