

## Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel)

Ahmed Ould Mohamed Yahya <sup>1</sup>, Abdel Kader Ould Mahmoud <sup>1</sup> et Issakha Youm <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables 'CRAER',  
Université de Nouakchott, Maurétanie

<sup>2</sup> Laboratoire des Semi-conducteurs et Energie Solaire 'LASES',  
Faculté des Sciences et Techniques, Université de Dakar, Sénégal

**Résumé** - Ce travail a pour but l'étude de simulation du fonctionnement physique d'un accumulateur électrochimique intégré dans un système hybride sur le site du CRAER, en utilisant le logiciel Matlab à partir de modèles mathématiques. Nous avons déterminé l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement du système de stockage, en particulier la température, pour un transfert optimal de l'énergie produite vers les charges. Le modèle utilisé permet de reconstituer correctement l'état de charge et de décharge du système de stockage. Par ailleurs, l'intérêt de cette modélisation est de mettre en évidence l'aspect de la gestion optimale des diverses conversions énergétiques, du point de vue processus physico – chimique.

**Abstract** – The purpose of this work is the simulation study of the physical operation of an electrochemical accumulator integrated in a hybrid system on the site of the CRAER, by using the Matlab software starting from mathematical models. We determined the influence of various parameters on the operation of the storage system, in particular the temperature, for an optimal transfer of the energy produced towards the loads. The model used makes it possible to correctly reconstitute the state of load and discharge of the system of storage. Furthermore, the interest of this modelling is to highlight the aspect of the optimal management of various energy conversions, from the physical and chemical process point of view.

**Mots clés:** Modélisation - Système de stockage - Système hybride - Simulation sur Matlab.

### 1. INTRODUCTION

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement, comme la Mauritanie et le Sénégal. Ces pays possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. L'extension des réseaux électriques à ces zones serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Une expérimentation d'un système hybride de moyenne puissance a été mise au point au niveau du site de la Faculté des Sciences et Techniques de Nouakchott. Pour assurer, une meilleure autonomie du système, un stockage électrochimique a été envisagé.

Tout en tenant compte de l'équilibre entre l'énergie électrique générée par le système hybride et la demande énergétique n'est pas toujours en adéquation, ce manque d'énergie sera compensé par l'introduction d'un stockage électrochimique tampon dans le système.

D'où, l'objectif de ce travail est d'établir un modèle fiable capable de fonctionner dans des conditions climatiques du sahel.

### 2. PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE

La chaîne de production électrique du système hybride se compose des éléments suivants :

- seize (16) panneaux photovoltaïques (1,2 kW) connectés au bus continu;

- deux (02) éoliennes de puissance chacune, 1,5 kW et 3 kW, de marque Bornay, reliées au bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur à diodes;
- un groupe électrogène de secours de puissance nominale, 5 kW.

Le dispositif de stockage de l'énergie implanté dans ce système hybride est relié directement au bus continu. On dispose donc de 24 éléments d'accumulateurs, de 2 V chacun connectés en série. Le bus continu est relié au réseau alternatif via un onduleur réversible de puissance 4,5 kW, de marque Trace Engineering, SW.

Le système de production est totalement automatisé. Divers capteurs de mesure ont été installés et nous permettent d'obtenir les données de l'ensemble du système hybride : la vitesse et la direction du vent, de l'ensoleillement sur le plan horizontal, la température ambiante, la température des modules, la production électrique des aérogénérateurs, la production électrique du champ de modules photovoltaïques, du groupe électrogène et de la tension de fonctionnement du bus continu.

Le dispositif expérimental (Fig. 1) est couplé à une unité de dessalement d'eaux saumâtres (osmose inverse) et aussi à d'autres équipements.

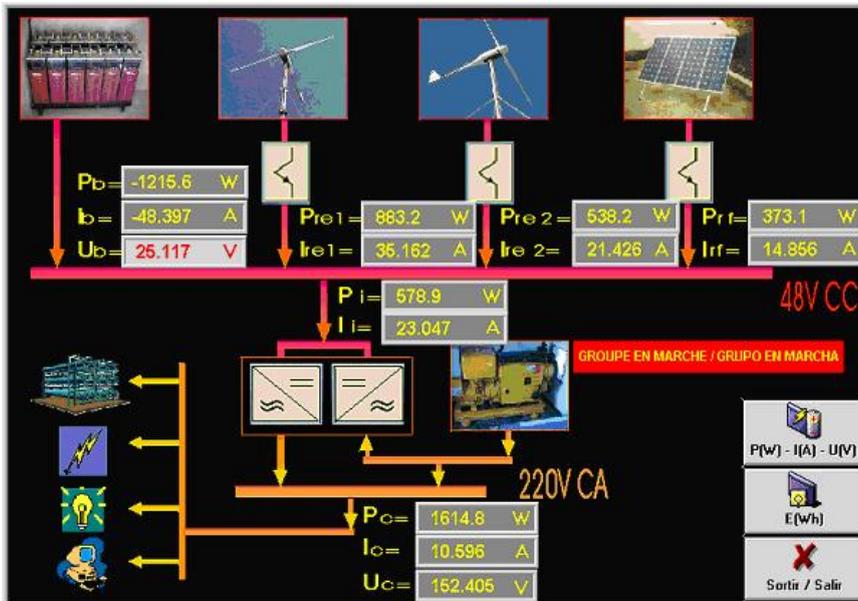


Fig. 1: Dispositif expérimental du CRAER

### 3. ASPECTS THEORIQUES DE LA MODELISATION

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer. L'étude de la modélisation du système de stockage électrique est considérée par plusieurs auteurs très complexe [1, 5, 6].

En effet, la littérature offre de nombreuses solutions, généralement des équations empiriques, et il est difficile souvent de les appliquer. La plupart des modèles proposés utilisent des grandeurs et des paramètres, dont les valeurs doivent être ajustées, particulièrement à chaque type de batterie. Ceci exige nécessairement des expériences coûteuses avant de concevoir un système, gênant ainsi l'utilisation répandue de ces modèles. Les conditions de fonctionnement produites par les systèmes photovoltaïques sont liées à l'état du système de stockage. A notre avis, un bon

équilibre entre la précision et la simplicité est réalisé par l'utilisation d'un modèle généralement basé sur l'observation du phénomène physico - chimique de la charge et de la décharge du système de stockage.

Le modèle mathématique donné par l'équation (1), décrivant au mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge est donné ci-après :

$$V = n \cdot E \pm n \cdot R \cdot I \tag{1}$$

Dans notre cas, le stockage, au point de vue physique, est étudié pour tout le système à partir d'une batterie de stockage. Le circuit équivalent du système de stockage peut être représenté comme dans la figure 2 :

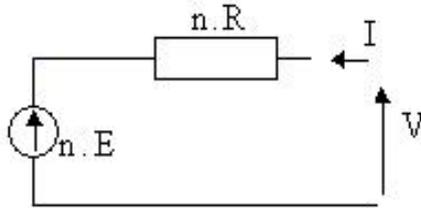


Fig. 2: Schéma électrique équivalent du système de batterie

### 3.1 Modèle de la capacité

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, selon les modèles proposés dans la littérature [1, 5, 6], il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge  $\bar{I}$ , donnée par l'équation (2).

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant  $I_{10}$ , correspondant au régime de fonctionnement  $C_{10}$ , dans lequel  $\Delta T$  est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

$$C = C_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left[ \frac{\bar{I}}{I_{10}} \right]^{0.9}} (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \tag{2}$$

La capacité  $C$  sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie 'EDC'. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie 'Q'.

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C}$$

L'évolution temporelle de 'Q' dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

### 3.2 Equation de la tension en décharge

L'expression de la tension de la batterie est établie à partir des équations (1) et (2) et à une étude bibliographique approfondie [1, 2, 5, 6], qui nous permet de donner une structure liée des éléments internes de la batterie en fonction de la force électromotrice, de la résistance interne et de l'influence des paramètres.

$$V_d = n_b \{ 2.085 - 0.12(1 - EDC) \} - n_b \frac{|I|}{C_{10}} \left[ \frac{4}{1 + |I|^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right] \cdot (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \tag{3}$$

### 3.3 Equation de la tension en charge

En effet, l'équation de la charge présente la même structure que l'équation (3) qui fait apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne, équation (4).

$$V_c = n_b \cdot \{2 + 0.16.EDC\} + n_b \cdot \frac{I}{C_{10}} \left[ \frac{6}{1 + |I|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0,036 \right] (1 - 0.025. \Delta T) \quad (4)$$

La modélisation de la charge est plus ardue que nous le pensons, car il faut tenir compte d'un ensemble de deux états possibles, sous forme de surcharge et de décharge profonde. L'expression de la surcharge tient compte de deux phénomènes physiques qui sont :

- le gassing dont la tension est  $V_g$  ;
- la saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus. Alors la tension de batterie est  $V_{ec}$ .

En ce qui concerne la surcharge, nous avons l'équation (5) :

$$V_{sc} = n V_g + n (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t - t_g}{\tau_g}\right) \right] \quad (5)$$

$$V_g = \left[ 2.24 + 1.97 \cdot \ln\left(1 + \frac{I}{C_{10}}\right) \right] \cdot (1 - 0.002 \cdot \Delta T) \quad (6)$$

$$V_{ec} = \left[ 2.45 + 2.011 \cdot \ln\left(1 + \frac{I}{C_{10}}\right) \right] \cdot (1 - 0.002 \cdot \Delta T) \quad (7)$$

$$\tau_g = \frac{1.73}{1 + 858 \cdot \left(\frac{I}{C_{10}}\right)^{1.67}} \quad (8)$$

Nous pouvons résumer ces phénomènes en général, pour les systèmes de stockage sous forme de tableau de description de fonctionnement des batteries (**Tableau 1**).

**Tableau 1:** Description de la zone de fonctionnement des batteries

Tension de batterie	Zone de fonctionnement		Conditions de fonctionnement
$V_{sc}$	Saturation	$I > 0$	$V = V_{ec}$ $\eta_c = 0$
	Gazage		$V_{ec} \geq V \geq V_g$
$V_c$	Charge		$V < V_g$ $0 < \eta_c < 1$
$V_{edc}$	Transition	$I = 0$	$V_c \geq V \geq V_{dc}$
	Charge / Décharge		
$V_{dc}$	Décharge	$I < 0$	$V > 0.9 V_N$
	sur décharge		$V_N \geq V \geq 0.7 V_N$
	Décharge profonde		$V < 0.7 V_N$

L'importance de cette modélisation sur l'étude de l'état interne des batteries du point de vue du processus physico – chimique est de permettre une meilleure gestion des transformations énergétiques. Le processus de transformation de  $PbSO_4$  en  $Pb$  et  $PbO_2$  au sein de la batterie est accompagné d'un dégagement de l'acide dans l'électrolyte.

Il est exigé que le courant entre dans la batterie par l'anode, en raison de la diffusion et de la densité de l'électrolyte qui est plus grande à l'intérieur des électrodes que dehors.

Dans le cadre des applications photovoltaïques, il doit y avoir une certaine considération de l'influence des paramètres  $\{ E \text{ (f.e.m)} \text{ et } R \text{ (résistance interne de la batterie)} \}$  suivants :

- Le dégagement de l'acide qui provoque une augmentation de  $E$  et une diminution de  $R$  et ainsi une diminution du courant de charge  $I_{ch}$  avec  $R$ . L'augmentation de la tension à travers les bornes de la batterie est exprimée par l'équation de la décharge (3).
- Lorsque la charge est presque complète, la matière active commence à devenir rare. Le courant continue à passer, bien que la batterie ne conduit plus à des réactions chimiques. Au lieu de cela, le courant provoque une simple électrolyse de l'eau, en le décomposant en oxygène à l'électrode positive et en hydrogène à l'électrode négative (c'est l'état de gazage : équations (6) et (7)).

Les inconvénients, les avantages et les conséquences de ce processus du point de vue intérêt pour la gestion de fonctionnement du système de stockage peuvent se résumer comme suit :

- Les inconvénients incluent la perte d'eau de l'électrolyte et de la corrosion de la grille positive. Si le gazage est très important, de la matière active peut être perdue des plaques par la drague créée par les bulles,
- Les avantages incluent l'action de l'agitation des bulles, qui tendent à homogénéiser l'électrolyte et par conséquent à éliminer la stratification de l'électrolyte. La stratification signifie un gradient de densité croissant vers le fond de la batterie. Elle cause la corrosion des grilles, particulièrement les parties inférieures.
- Les conséquences, si l'eau est perdue, alors la batterie est intoxiquée. Du point de vue maintenance, il faut rajouter de l'eau dans les éléments de batterie. Autrement dit, si n'importe quelle pièce des plaques cesse d'être couverte par le liquide, les dommages irréversibles peuvent apparaître. Par conséquent, l'entretien est donc nécessaire, la fréquence dépend de l'ampleur de la perte.

### 3.4 Rendement de charge

Deux types de rendement sont à distinguer : le rendement faradique (coulombien) et le rendement énergétique. Le premier concerne la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie, il ne fait pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Le rendement énergétique tient compte du rendement faradique et des pertes par effet Joule. Le rendement par effet Joule correspond aux pertes résistives, et le rendement faradique (dont la valeur avoisine les 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge).

$$\eta_c = 1 - \exp \left[ \frac{20.73}{\frac{I}{I_{10}} + 0.55} \cdot (EDC - 1) \right] \quad (9)$$

L'évolution du rendement énergétique ou rendement global est représentée (rendement coulombien + pertes par effet Joule) pour la batterie en charge, en fonction de son état de charge et de la puissance injectée ou soutirée.

## 4. RESULTATS DE LA SIMULATION

Les simulations sont effectuées pour étudier l'influence des paramètres et de leur variation sur le comportement du système de stockage tampon, en vue de le rentabiliser dans un contexte économique sahélien.

**4.1 Influence de la température**

**4.1.1 Capacité**

La température de la batterie influence énormément le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage.

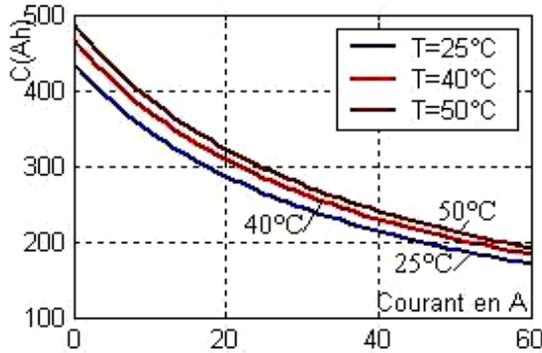


Fig. 3: Influence de la température sur la capacité

La figure 3 montre que l’augmentation de la température est accompagnée d’une remontée modérée avec celle de la capacité de stockage des batteries. Si cette température baisse jusqu’à la valeur  $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alors la capacité est proche de 440 Ah pour un minimum. Elle peut atteindre des valeurs maximum de 45 °C pour une valeur qui approche les 500 Ah. Nous considérons que les constructeurs de ces éléments de batterie ont tenu compte des différents climats où ces équipements seraient installés afin d’avoir des rendements maximums, en fonctionnement.

**4.1.2 Etat des batteries**

La profondeur de décharge, exprimée par l’équation, est donnée sous la forme  $(1 - \text{EDC})$ , c’est le complément de l’état de charge. Le régime de charge (ou de décharge) est utilisé pour exprimer le rapport entre la capacité nominale d’une batterie et le courant de charge (ou de décharge).

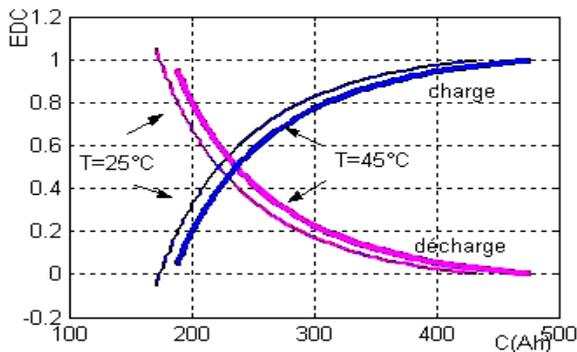


Fig. 4: Influence de la température sur l’état des batteries

EDC s’exprime en fonction de la durée de charge en heures et du courant. Dans notre cas, le système de stockage de capacité d’une valeur de 2600 Ah, est déchargée à 26 A, le régime de décharge serait alors de 100 heures et la valeur du courant de décharge est désignée comme  $I_{100}$ .

La figure 4 représente l'état de charge en fonction de la capacité, qu'il soit en charge et soit en décharge :

- dans le cas de la charge, la température et l'état de décharge suivent la même évolution.
- par contre dans le cas de la décharge, la température en diminuant est accompagnée d'un état de décharge qui augmente. Ces états peuvent conduire dans le cadre de la maintenance des batteries, à un meilleur suivi de leur état pour le site étudié et pour une meilleure optimisation.

#### 4.1.3 Tension des batteries

Les courbes de la tension de batterie  $\{V(I)\}$  subissent l'influence de la température (Fig. 5 et 6) de la même manière que l'état de la batterie EDC pour les deux cas: charge et décharge, parce que  $V = f(\text{EDC}, t, T, I)$ . Par exemple, dans le cas de la décharge, la température en diminuant, l'état de décharge suit.

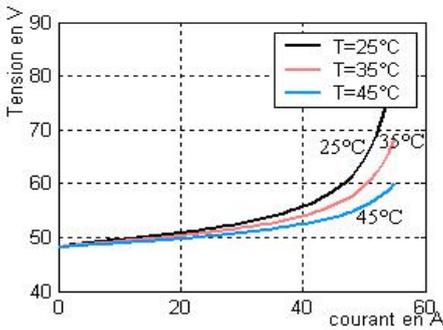


Fig. 5: Influence de la température sur la tension (charge)

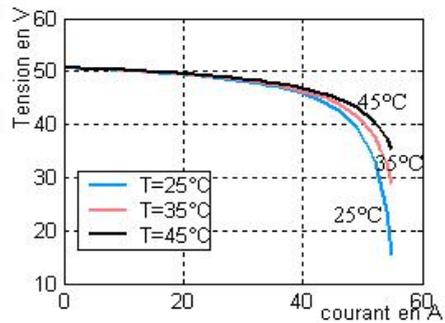


Fig. 6: Influence de la température sur la tension (décharge)

#### 4.2 Influence du temps

Pour étudier l'influence du temps, on cherche à s'approcher à une gestion proche en temps réel, de l'état de charge de la batterie, qui à son tour est déterminant pour l'exploitation efficace du système de stockage.

##### 4.2.1 Etat des batteries

L'influence du temps (durée de charge ou décharge) sur l'état de la batterie, illustré par la figure 7, permet d'étudier les deux cas suivants :

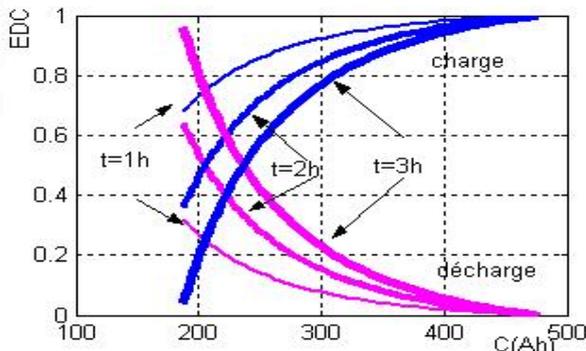


Fig. 7: Influence du temps sur l'état de la batterie

- dans le cas de la charge, plus la durée du temps augmente, plus l'état de charge des batteries est en dessous de 1 (par exemple, pour  $t = 3 \text{ h}$  et  $C = 200 \text{ Ah}$ , nous avons une valeur pour EDC proche de 0,2 EDC).
- dans le cas de la décharge, plus la durée du temps est importante (pour  $t = 3 \text{ h}$ , pour  $C = 200 \text{ Ah}$ , nous avons une valeur qui approche les 0,8 EDC).

On note que l'état de décharge atteint sa valeur maximale pour une décharge de longue durée. Alors qu'il enregistre pour cette même durée, dans le cas de la charge, un phénomène inverse.

### 4.2.2 Tension des batteries

Les courbes de la tension batterie, dans le cas de décharge,  $\{V(I)\}$  subissent l'influence de la durée de manière identique que celles correspondantes à l'état de charge 'EDC', car  $V = f(\text{EDC}, t, T, I)$ .

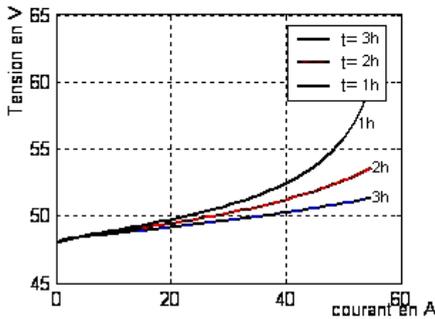


Fig. 8: Influence du temps sur la tension (charge)

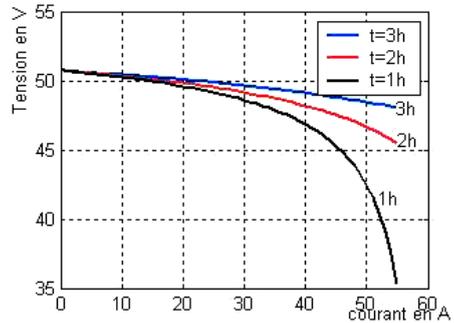


Fig. 9: Influence du temps sur la tension (décharge)

### 4.3 Résistance de la batterie

Le cas de la résistance en décharge correspond à l'augmentation substantielle de la résistance, car le courant ne peut passer facilement dans la batterie. Retournons au deuxième terme de l'équation (3) qui nous montre que la résistance interne est directement liée à l'état de décharge de l'accumulateur. Lorsque la batterie est chargée, la résistance interne est faible et elle devient importante pour un état de décharge proche de 0, ce qui dégradera fortement le rendement en décharge dans cette zone de fonctionnement.

La figure 10 représente l'évolution de la résistance interne pour notre accumulateur, composé de 24 éléments en série.

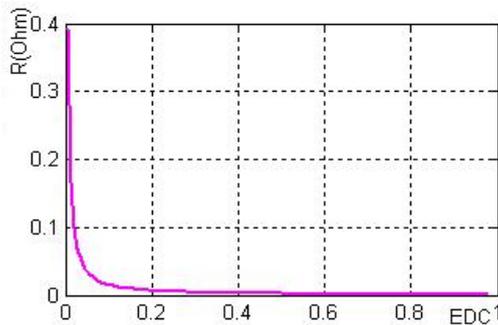


Fig. 10: Résistance de la batterie (décharge)

La résistance interne de la batterie dépend donc de l'état de charge. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque la pleine charge est atteinte. Dans un raisonnement à courant constant, il y aura d'autant plus de pertes que la pleine charge est atteinte et que le rendement en charge de l'accumulateur serait donc plus faible dans cette zone (Fig. 11).

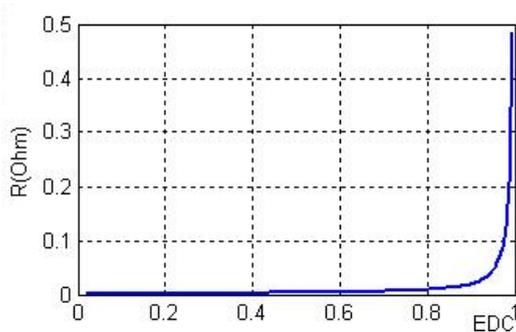


Fig. 11: Résistance de la batterie (charge)

## 5. DISCUSSION

Les figures (3-11) nous montrent que le modèle proposé et utilisé, permet de reconstituer correctement l'état de charge et de décharge du système de stockage (batteries).

Les conditions de fonctionnement sont donc liées au rendement du système de stockage (**Tableau 1**). Dans ce cadre d'une part, le rendement du système de stockage est d'autant plus faible que l'état de charge s'approche de la saturation. Dans la zone de saturation, la tension  $V$  est égale à  $V_{ec}$  et le rendement est nul.

D'autre part, le rendement du système de stockage dépend de son état avant la décharge. Plus le système de stockage est chargé en amorçant la décharge, plus il enregistre un rendement important. Dans cette optique, il faudra tenir compte des limites de la zone de fonctionnement du système pour la charge et la décharge. C'est là tout l'enjeu énergétique pour avoir une maintenance correcte.

Par conséquent, il faut maintenir la tension des batteries dans la limite supérieure proche de la tension de charge (car la surcharge peut causer un emballement thermique et une destruction de l'enceinte totalement étanche de la batterie). Dans la limite inférieure, il est important de ne pas dépasser une tension en dessous de 0,7 de la tension nominale ( $V_N = 48 \text{ V}$ ).

Notons, par ailleurs que le fonctionnement des batteries hors de cette zone peut écourter la durée de vie de ce type d'installation par rapport à celle proposée par le constructeur. Ce qui constitue donc une contrainte de dimensionnement, de fonctionnement et de maintenance qu'il faudra toujours lever lors des études.

Par ailleurs, dans la démarche appliquée, nous avons remarqué dans notre étude que le modèle de Lorenzo ne tient pas compte de l'auto-décharge. Rappelons que l'auto-décharge est un phénomène physique qui dépend du type du système des batteries, de la température et des conditions de stockage. Dans la littérature, cette valeur est tolérée autour d'une perte de la capacité de stockage dans les environs de 0,14 %.

Notons aussi que pour plus de précision, l'étude du phénomène de charge et de décharge a été limitée à quelques heures de fonctionnement (car l'étude a montré que le modèle mathématique ne fonctionne pas pour une durée longue).

Sur un autre plan, nous avons mis en exergue dans la modélisation, l'influence de la température et du temps sur les caractéristiques des batteries (capacité, EDC et tension des batteries), ce qui n'est pas le cas dans la littérature [1].

Enfin, le modèle mathématique proposé nous a permis de reconstituer les phénomènes physiques du système de stockage et de gagner en précision dans le temps d'évaluation lors de la modélisation.

## 6. CONCLUSION

En tenant compte de la complexité de la modélisation du comportement du système de stockage (batteries), nous avons exploité le modèle de Lorenzo. Ce modèle nous a permis de caractériser le fonctionnement de des batteries. Il a permis aussi de faire les contours de la problématique de la gestion d'énergie pour un système de stockage tampon et de dégager des résultats sur le comportement physique interne du système de stockage.

Ces résultats sont d'une grande importance pour la maintenance et la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.

## NOMENCLATURE

$E = 2V$	Force électromotrice d'une batterie	$Q$	Quantité de courant stockée par la batterie
$n_b$	Nombre d'éléments de batterie en série	$t$	Durée de fonctionnement de la batterie
$R$	Résistance interne de la batterie	$V_g$	Tension de gassing
$C_{10}$	Capacité de décharge en 10 h	$V_{ec}$	Tension de saturation (repos)
$I_{10}$	Courant de décharge en 10 h	$V_{sc}$	Tension de surcharge
$\Delta T$	Echauffement de la batterie	$\eta_c$	Rendement de charge
EDC	Etat de charge de la batterie		

## REFERENCES

- [1] O. Gergaud, 'Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé à un Accumulateur', Thèse de Doctorat, ENS de Cachan, France, 2003.
- [2] J.B. Copetti, E. Lorenzo and F. Chenlo, 'A General Battery Model for PV System Simulation', Progress in Photovoltaic: Research and Applications, Vol. 1, pp. 283 - 292, 1993.
- [3] C. Trouseau, 'Validation des Outils de Simulations des Systèmes Photovoltaïques à partir de Mesures Expérimentales: Application à la Modélisation des Accumulateurs Plomb/Acide', Rapport de Travail, Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris, 1997.
- [4] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo et C. Nikita, 'Etat de l'Art des Aérogénérateurs', Ouvrage collectif, 'L'électronique de Puissance, Vecteur d'Optimisation pour les Energies Renouvelables', Ed. Novelect - Ecrin, pp. 07 - 154, Mai 2002.
- [5] A. Benattalah et R. Moustafaoui, 'Logiciel de Simulation PV', Rev. Energ. Ren: Zones Arides, CDER, pp. 55 - 61, 2002.
- [6] E. Lorenzo, 'Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems', Ed. Progensa, Sevilla Spain, 1994.