

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA  
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2020

Faculté : Science de l'ingénierat

Département : Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention de diplôme de : MASTER

## Etude de l'influence de la température sur la batterie au plomb-acide pour véhicule

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Présenté par : Atoui Sihem

Devant le jury :

Président : Saadi Med Nacer

Grade MCB Annaba

Directeur de mémoire : Lafifi Med Mourad

Grade MCA Annaba

Examineur : Bensaker Bachir

Grade Pr. Annaba

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents surtout ma mère qui m'a toujours soutenu.*

*Aux très chers défunts : mon frère Mourad & sa femme Houaria*

*A leurs enfants Adem & Aya que dieu les protège.*

*A ma sœur Leila son mari Fares et leurs enfants Naoufel & Yanis.*

*A mon frère Houari, sa femme Djihene et leurs enfants Zaki, Meriem et Ghozlène.*

*A mon frère Rachid, sa femme Hiba*

*A mes frères : Mohamed & Elhechmi.*

*A toute ma famille d'Oran*

*A toutes mes amies*

# *Remerciements*

*A mon encadreur Mr Lafifi M. M. pour son soutien.*

*A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Liste des tableaux

Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau1	Données de la simulation1	28
Tableau2	Données de la simulation2	33
Tableau3	Résultats de la simulation sur la batterie VRLA 12V 20Ah	36
Tableau4	Résultats de l'expérimental sur la batterie VRLA 12V 20Ah	36
Tableau5	Prélèvements des données de l'expérience faite sur la batterie VRLA 12V 20Ah	37

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>Fig1</b>	Une batterie de démarrage	8
<b>Fig2</b>	Quelques modèles de batterie au plomb-acide pour véhicule électrique	9
<b>Fig3</b>	Schéma générale d'une batterie au plomb-acide	11
<b>Fig4</b>	Constitution d'une cellule au plomb-acide	11
<b>Fig5</b>	Réactions chimiques en décharge et charge d'une cellule au plomb-acide	13
<b>Fig6</b>	Etat de charge et état de profondeur de décharge	14
<b>Fig7</b>	Graphe de décharge d'une cellule au plomb-acide	15
<b>Fig8</b>	Charge/Décharge d'une cellule au plomb-acide	16
<b>Fig9</b>	Schéma équivalent d'une batterie au plomb-acide	19
<b>Fig10</b>	Modèle de la batterie au plomb sur Simulink	22
<b>Fig11</b>	Modèle systématique de la batterie au plomb-acide	22
<b>Fig12</b>	Courant de charge Simulation1	23
<b>Fig13 a-b-c-d-e-f-g</b>	Résultats sur l'oscilloscope Simulation1	24--27
<b>Fig14</b>	Graphe de l'effet de la température sur les grandeurs : SOC/DOC/Tension/Température de l'électrolyte Simulation1	28
<b>Fig15</b>	Courant de charge Simulation2	29
<b>Fig16 a-b-c-d-e-f-g</b>	Résultats sur l'oscilloscope Simulation2	30--33
<b>Fig17</b>	Graphe effet de la température sur les grandeurs : SOC/DOC/Tension/Température de l'électrolyte Simulation2	34
<b>Fig18 a</b>	Temps de décharge Vs température 25°-30°-35°-40°	39
<b>Fig18 b</b>	Temps de décharge Vs température 45°-50°-55°-60°	40

## Liste des abréviations

Symbole	
Pb	Plomb
Ni-Cd	Nikel-cadmium
Ni-MH	Nikel métal hydrure
Li-ion	Lithium ion
PbO <sub>2</sub>	Dioxyde de plomb
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acide sulfurique
CTd	Capacité de la batterie associée au temps de décharge Td
Td	Temps de décharge
Id	Courant de décharge de la batterie associé au temps Td
Vn	Tension nominale
Vcut-off	Tension de fin de décharge
SOC	State of charge = Etat de charge
DOC	Depth of charge = Profondeur de décharge
CC	Courant Constant
CV	Tension Constante
VRLA	Valve Regulated Lead-Acid = Batterie de plomb-acide à Valve de regulation
AGM	Absorbed glass material = batterie étanche à bavettes de fibre en verre absorbantes

# Liste des matières

Dédicace.....	1
Remerciements.....	2
Liste des tableaux.....	3
Liste des figures.....	4
Liste d'abréviations.....	5
1-Introduction générale.....	8
2-Applicatio de la batterie au plombacide.....	8
2-1 Véhicule thermique.....	8
2-2 Véhicule hybride.....	9
2-3 Véhicule électrique.....	9
3-Généralités sur les batteries.....	10
3-1 Cellule électrochimique.....	10
3-1-1 La cathode.....	10
3-1-2 L'anode.....	10
3-1-3 L'électrolyte.....	10
3-1-4 le séparateur .....	10
3-2 Différents types de technologie de batteries.....	10
4-batterie au plomb-acide.....	10
4-1 Principe de fonctionnement de la batterie au plomb-acide.....	11
4-2 Réactions chimiques.....	12
4-2-1 Réaction chimiques en décharge.....	12
4-2-2 Réaction chimique en charge.....	12
4-3 Caractéristiques de la batterie au plomb-acide.....	13
4-3-1 Capacité.....	13
4-3-2 Tension.....	14
4-3-3 Etat de charge .....	14

4-3-4 Etat de profondeur de décharge.....	14
4-3-5 Charge de la batterie au plomb-acide.....	15
4-3-6 Décharge de la batterie au plomb-acide.....	15
4-3-7 Densité d'énergie massique.....	16
4-3-8 Densité de puissance massique.....	16
4-3-9 Cyclabilité.....	16
5-Différents types de batteries au plomb-acide.....	17
5-1 Batterie ouverte.....	17
5-2 Batterie à recombinaison de gaz.....	17
6-Modélisation de la batterie au plomb-acide.....	18
6-1 Modèle chimique.....	18
6-2 Modèle de type « boîte noir ».....	18
6-3 modèle par circuit électrique équivalent.....	18
7-Effet de la température sur le comportement de la batterie au plomb-acide.....	21
8-Simulation sur interface Matlab & Simulink.....	22
8-1 Simulation par une sollicitation par un courant de charge/décharge.....	23
8-2 Simulation par une sollicitation par un courant de charge/décharge plusieurs cycle.....	29
8-3 Influence de la température sur le temps de décharge d'une batterie au plomb-acide.....	35
Conclusion générale.....	41
Liste des références bibliographiques.....	42

## **1- Introduction Générale :**

Depuis l'invention de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté en 1859, les batteries ne cessent d'évoluer et de s'imposer par leurs usages. Du véhicule thermique au véhicule électrique, de l'électronique portable au système de secours stationnaires. Pourtant, si dans chacune de ces applications les batteries occupent un rôle essentiel, elles en constituent également presque toujours un maillon faible de par leur durée de vie limitée, la difficulté de prévoir leur fin de vie et celle d'estimer de façon fiable leur réserve énergétique disponible à chaque instant.

Aujourd'hui, plus de 160 ans d'étude sur l'accumulateur au plomb et pourtant il est loin d'être un produit suranné, il continue de faire l'objet de diverses recherches et reste l'accumulateur le plus vendu dans le monde à raison de son faible coût, de la grande maturité de cette technologie, mais aussi son aptitude à être recyclé à moindre coût (neutralisation de l'acide et récupération du plomb).

Ce travail représente une contribution à l'étude de l'influence de la température ambiante sur les performances de la batterie au plomb-acide.

## **2- Applications de la batterie au plomb-acide :**

### **2-1-Véhicule thermique :**

Dans les véhicules équipés d'un moteur à combustion interne, la batterie sert surtout à démarrer ce dernier, à alimenter le circuit d'allumage de la bougie ainsi que l'alimentation du circuit lumière. Une fois l'engin en marche, l'énergie électrique additive est fournie au véhicule par l'alternateur. Comme pour la plus part des batteries elles ne sont pas conçues pour des décharges profondes et une décharge complète. Autrement dit une limite haute et basse qui doit être respecté lors de son fonctionnement et ce pour la sauvegarde de cette dernière.

Ce type de batterie est connue sous le nom de batteries de démarrage ou S.L.I.(starting, lighting, ignition)



**Fig 1** batterie de démarrage

## 2-2 Le véhicule hybride [8]

Est un véhicule équipé d'un système de motorisation mixte thermique/électrique et de deux systèmes de stockage d'énergie : un réservoir de carburant et une batterie relativement gonflée par rapport à celle d'un véhicule thermique.

- A faible vitesse, le moteur électrique remplace le moteur thermique et le véhicule passe en mode tout électrique tant que la batterie le permet .
- A grande vitesse et lors des accélérations fortes, le moteur thermique assure la locomotion du véhicule.
- pendant les phases de freinage, le freinage régénératif joue le rôle de frein moteur et recharge la batterie

## 2-3 Véhicule électrique

Le fonctionnement d'une voiture électrique est très simple. Au lieu d'un moteur thermique (essence ou diesel), le véhicule est équipé d'une batterie, placée à l'avant, à l'arrière ou sur la totalité de la plate forme du bas de caisse.

Donc pour fonctionner, le véhicule électrique a besoin de l'énergie électrique embarquée, à l'instar des réservoirs de carburant pour les véhicules à moteur thermique.

La batterie au plomb était un composant principal des chaînes de traction pour voitures électriques, elle a été montée jusqu'au début des années 1990 sur des modèles classiques comme les Citroën AX et Peugeot 106 puis elle a cédé la place à de nouvelles technologies telle la batterie Lithium-ion[7]. On la trouve encore sur quelques types d'engins (chariots élévateurs, fauteuils roulants...) et aussi pour alimenter les accessoires du véhicule



**Fig2** Quelques batteries au plomb pour véhicule électrique

## **3 -Généralités sur la batterie**

La batterie est un dispositif physique qui transforme l'énergie chimique stockée en une énergie électrique par le biais d'une réaction chimique appelée oxydoréduction [1]. Dans ce type de réaction les électrons se déplacent d'un matériau à un autre à travers un circuit électrique.

Une batterie peut être composée d'une ou plusieurs éléments appelées cellules électrochimiques.

### **3-1 Cellule électrochimique**

Elle est constituée de deux électrodes (cathode et anode), un électrolyte et un séparateur

#### **3-1-1 La cathode :**

Appelée aussi l'électrode positif est le siège de la réaction de réduction.

Elle est constituée d'un corps oxydant, qui a la possibilité d'attirer les électrons [1]

#### **3-1-2 L'anode :**

Appelée l'électrode négatif. Elle est le lieu de la réaction d'oxydation, elle cède les électrons.[1]

#### **3-1-3 L'électrolyte :**

Est le liquide dans lequel la cathode et l'anode baignent.

La réaction entre la solution et les deux électrodes est l'origine du déplacement des électrons.[1]

#### **3-1-4 Le séparateur :**

Est un isolant qui permet de séparer les deux électrodes pour éviter un court-circuit.

### **3-2 Différents type de technologie de batteries**

Au fil des années plusieurs technologies de batteries ont été développées dans le monde automobile on peut citer :

- ✓ Batterie au Plomb acide
- ✓ Batterie au Ni-Cd
- ✓ Batterie au NiMH
- ✓ Batterie au Li-ion

Comme il a été indiqué nous allons porter notre intérêt sur les batteries au plomb acide.

## **4- Batterie au Plomb acide**

L'accumulateur au plomb a été inventé par Gaston planté, il a été en effet le premier à avoir mis au point la batterie rechargeable.

Et bien qu'il soit le plus ancien des accumulateurs, il continue à faire l'objet de diverses recherches et reste l'accumulateur le plus vendu dans le monde.

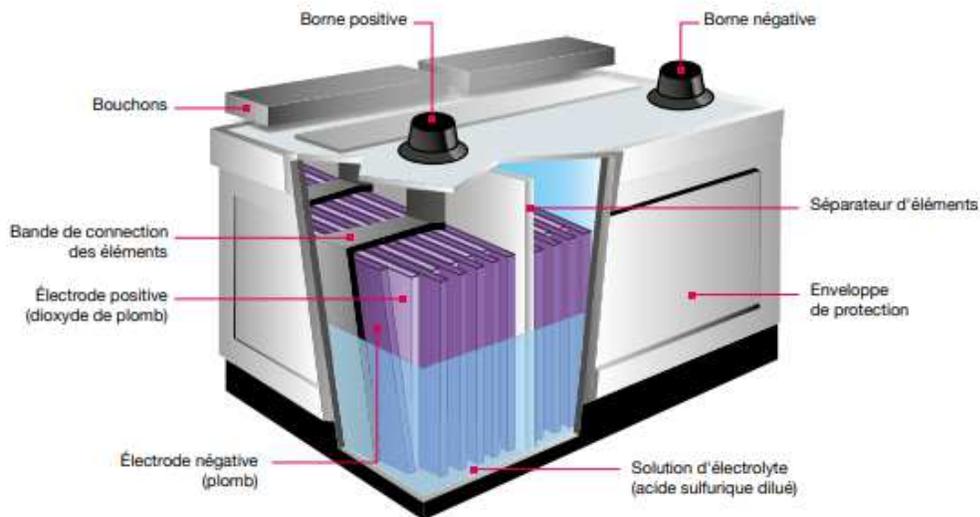
Aujourd'hui, il existe non pas un type de batterie au plomb mais différentes technologies ont survécu.

### **4-1-Principe de fonctionnement de la batterie au Plomb acide :**

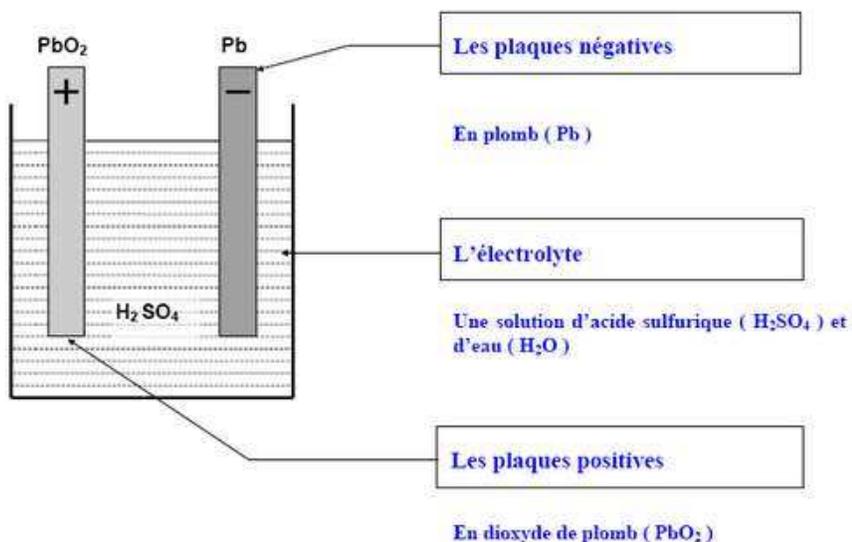
Une cellule au plomb-acide comprend deux électrodes chacune en contact avec l'électrolyte, le 1<sup>er</sup> électrode la cathode ou plaque positive contient de dioxyde de Plomb  $PbO_2$ , le 2<sup>ème</sup> électrode l'anode ou plaque négative contient du Plomb, l'électrolyte est l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ .

Une batterie comprend une ou plusieurs cellules ou unités

Voire Fig3 & Fig4



**Fig3** Schéma générale d'une batterie au Pb



**Fig4** Constitution d'une cellule au plomb

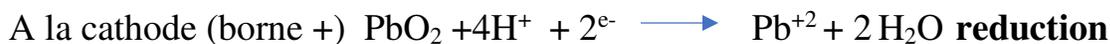
## 4-2 Réactions chimiques dans une batterie Plomb acide :

Les réactions chimiques sont des réactions d'oxydo-réduction : il y a transfert d'électrons. L'atome qui capte les électrons est appelée oxydant, l'atome qui cède les électrons est appelée réducteur.

### 4-2-1 Réaction chimique en décharge :

La décharge de la batterie au Plomb consomme les solides de électrodes.

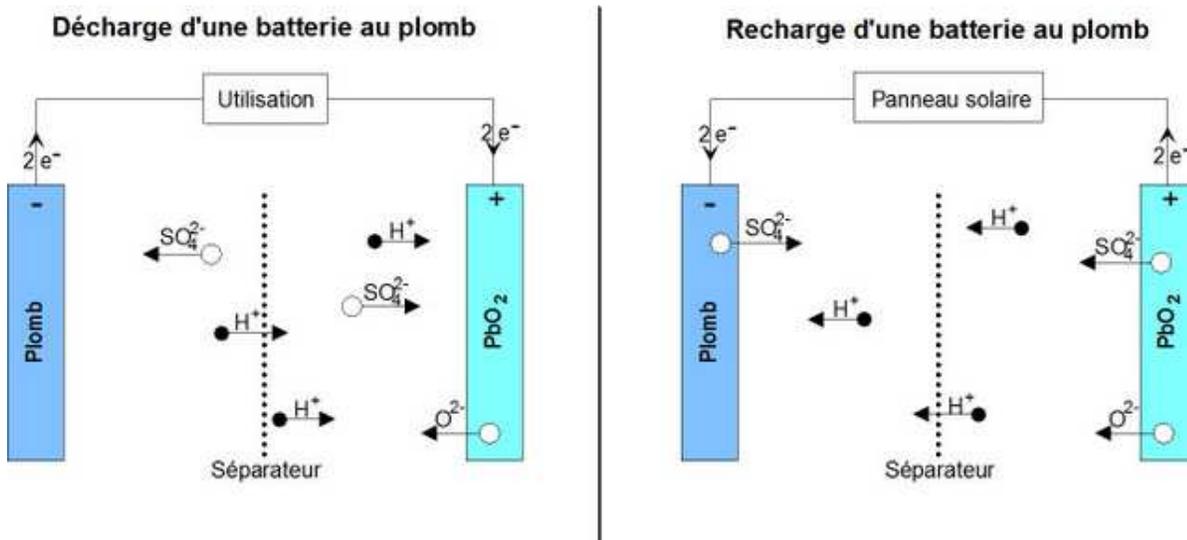
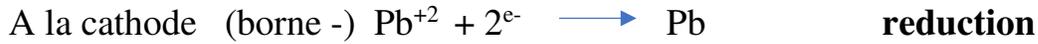
Il y a formation de sulfate de plomb  $PbSO_4$  sur les électrodes :



### 4-2-2 Réaction chimique en charge :

La charge de la batterie au Plomb forme les solides de électrodes.

Le sulfate de plomb  $\text{PbSO}_4$  disparaît des électrodes :



**Fig5** Réactions chimiques en décharge et charge de la batterie Plomb

### 4-3 Caractéristiques de la batterie au plomb acide

#### 4-3-1 Capacité : [3]

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète. Elle s'exprime usuellement en ampère heure « Ah ».

Elle est aussi un indicateur permettant de quantifier la capacité d'une batterie à délivrer un courant maximum pendant un certain temps.

La capacité se note  $C_{T_d}$  ou  $T_d$  représente une durée en heure. Ainsi  $C_{T_d} = X$  signifie que la batterie peut délivrer un courant d'intensité «  $X / T_d$  » pendant une durée  $T$ (en heure).

Autrement dit, en maintenant un tel courant, la décharge sera atteinte au bout de la durée  $T_d$ .

Une relation lie directement la capacité de la batterie au courant de décharge :

$$C_{Td} = I_{Td} * T_d$$

- $T_d$  : le temps de décharge de la batterie.
- $C_{Td}$  : la capacité de la batterie associée à l'autonomie  $T_d$ .
- $I_{Td}$  : le courant de décharge de la batterie associée au temps de décharge  $T_d$

On constate que l'autonomie diminue lorsque le courant de décharge augmente :

$$T_d = C_{Td} / I_{Td}$$

#### 4-3-2 Tension :

C'est la différence de potentiel entre les deux électrodes de la batterie.

Il est le paramètre le plus apparent.

##### **Tension nominale :**

C'est l'une des tensions typiques recommandée en mode de fonctionnement.

Pour une cellule Plomb acide la  $V_n=2.15V$

##### **Tension de fin de charge « Vcut-off » : [5]**

Une fois la batterie a atteint cette tension , elle est considérée comme vide.

Travailler au-dessous de cette tension dégrade la batterie.

Pour la batterie Pb  $V_{cut-off} = 1.75 V$ .

#### 4-3-3 Etat de charge « SOC » :

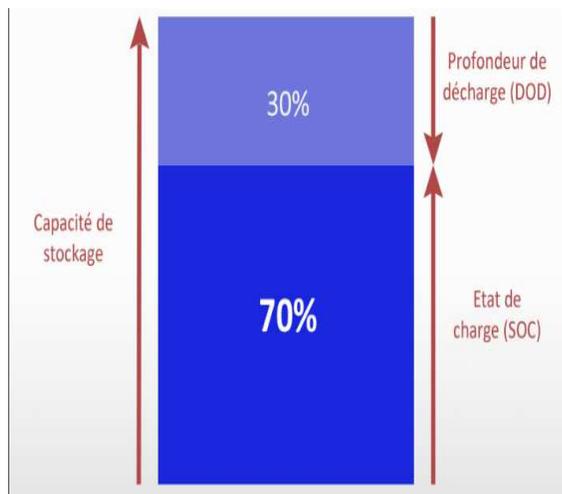
L'état de charge « State of charge » est une expression de la capacité disponible de la batterie à un instant donné exprimée en un % de sa capacité maximale.

C'est à dire l'énergie restant dans la batterie.

#### 4-3-4 La profondeur de décharge (DOD) :

Exprimé en %, est le rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale.

C'est à dire l'énergie consommée dans la batterie.



**Fig 6** Etat de charge et profondeur de décharge

#### **4-3-5 Charge de la batterie au Pb :**

Le phénomène de charge d'une batterie au Plomb, comme indiqué à la **Fig8**, consiste à lui appliquer un courant continue d'une valeur quelconque, ce qui permettra l'apparition d'une tension de 2.3 V à 2.4V/Elément aux bornes de la batterie.

En pratique l'opération se fait en 2 phases :

1. La phase **CC** « Constant curent » au cours de laquelle la tension /élément est inférieure à 2.3V, cette tension augmente au fur et à mesure que la batterie se charge.
2. La phase **CV** « Constant voltage » Elle commence dès que la tension/élément atteint 2.2V ; le chargeur ajuste le courant de tel sorte la tension reste égale à cette dernière. Le courant au cours de cette phase est donc une fonction décroissante du temps, il tend théoriquement vers zéro asymptotiquement.

#### **4-3-6 Décharge de la batterie au plomb :**

La fin de la décharge est déterminée par une tension d'arrêt fixée « V cut-off » ,voir **Fig7** & **Fig8**.

Travailler au-dessous de cette tension de seuil pourra détériorer la batterie.

Pour une cellule au plomb-acide la tension  $V_{cut-off} \sim 1.7-1.9$  V.

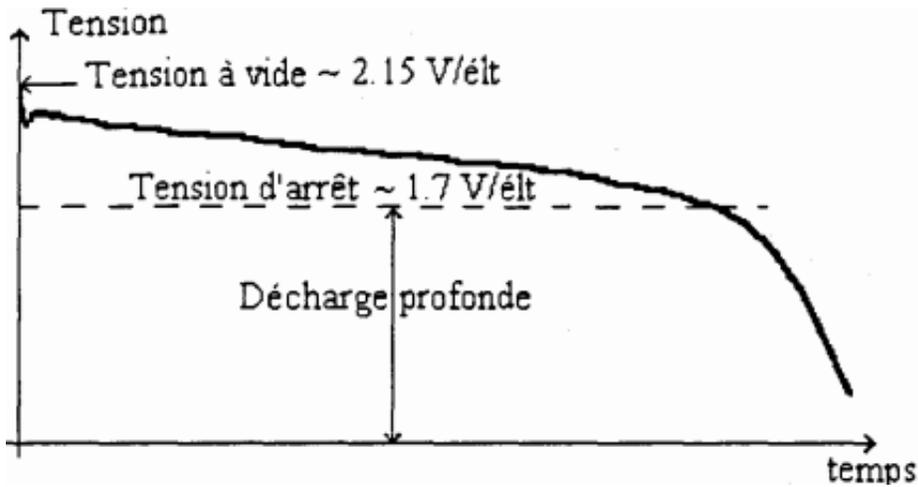


Fig 7 graphe de décharge d'une cellule au Pb [5]

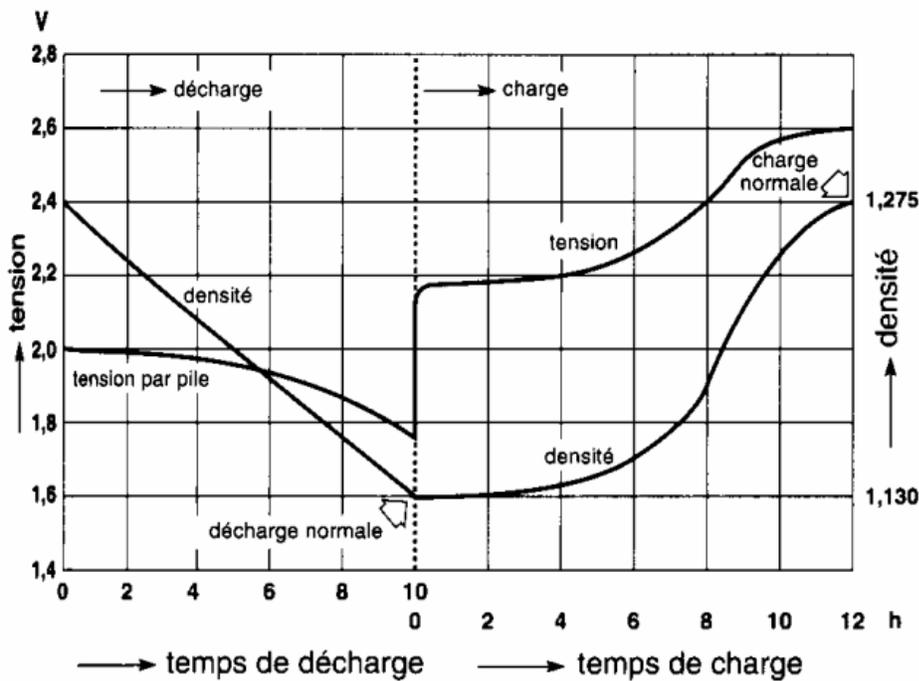


Fig8 charge décharge d'un élément au Pb

### 4-3-7 Densité d'énergie massique

Appelée aussi énergie spécifique, en Wh/kg, correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse de la batterie.

Pour un poids donné, une batterie qui possède une énergie spécifique élevée stockera plus d'énergie [4]. Pour une batterie au plomb-acide, la densité massique 30-50 Wh/kg

### 4-3-8 Densité de puissance massique

Celle-ci représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse de la batterie. Pour une batterie au plomb-acide, la puissance massique 700 W/kg

### 4-3-9 Cyclabilité

Elle est exprimée en nombre de cycle (période entre une charge et Décharge), caractérise la durée de vie de la batterie, c'est-à-dire le nombre de fois où elle peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge. Pour une batterie au plomb-acide 400-1200 cycles

## 5- Différents types de batterie au plomb-acide

Au fil des années la batterie au plomb s'est améliorée, il existe :

### 5-1 Batterie ouverte [2]

Une batterie ouverte est une batterie à électrolyte liquide dotée de bouchons permettant de la remplir. Les batteries ouvertes ne sont pas étanches : le liquide qui est à l'intérieur s'évapore peu à peu, il faut donc contrôler régulièrement son niveau et compléter si nécessaire avec de l'eau distillée.

Une batterie ouverte peut être soit :

- **Sèche**, une batterie sèche ne contient pas encore de liquide, il faudra la remplir d'acide sulfurique avant de pouvoir l'utiliser. Les batteries sèches présentent l'avantage de pouvoir être transportée sans danger.
- **Humide**, une batterie humide contient déjà le liquide. On trouve rarement des batteries humides dans le commerce parce qu'elles sont dangereuses à transporter et ne peuvent pas être stockées longtemps.

### 5-2 Batterie étanche ou batteries à recombinaison de gaz (VRLA)<sup>[6]</sup>

VRLA (Valve Regulated Lead Acid) est une batterie à soupape. L'hydrogène et l'oxygène se recombinent à l'intérieur de la batterie pour former de l'eau. Si la pression interne devient trop forte, une vanne-soupape relâche les gaz

Ces batteries n'ont pas besoin d'être remplies avant utilisation et ne nécessitent pas de maintenance :

- type **AGM** (Absorbed Glass Mat) : une fine feuille de fibre, imbibée d'électrolyte (70% d'eau et 30 % d'acide) est placée entre les plaques de plomb de la batterie. Cette batterie peut fournir un courant élevé, de courte durée.

- type **GEL** : l'électrolyte est figé par l'addition de gel de silice  $\text{SiO}_2$ . Ces batteries sont étanches et peuvent être placées dans n'importe quelle position et peuvent en général supporter un grand nombre de cycle. Elles ont une bonne résistance au froid.

## **6-Modélisation des batteries au plomb-acide :**

La modélisation en générale consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans des systèmes physiques par une représentation souvent mathématique.

La modélisation des sources électrochimiques est intéressante pour plusieurs raisons. En effet un modèle complet d'une batterie permet de prédire son comportement dans certaines conditions de fonctionnement, de comprendre les dégradations dues à des conditions particulières de fonctionnement, d'interpréter l'influence de certains paramètres. D'une manière générale, la modélisation permet de réduire l'effort expérimental et de gagner en temps, en énergie et en investissement.

Parmi les méthodes de modélisation des batteries nous trouvons :

### **6-1 Modèle chimique :**

C'est un modèle complexe qui prend en considération les phénomènes typiquement électrochimiques. Généralement il consiste en des modèles mathématiques représentés par des équations aux dérivées partielles difficiles à résoudre.

### **6-2 Modèle type « boîte noir » :**

Ce modèle traite la batterie comme un processus accessible uniquement via ses entrées-sorties et ne tient de compte que des mesures externes prises sur la batterie comme le courant, la tension, la température de fonctionnement.

On peut citer les modèles à base de réseau de neurones artificiels ou logique floue

### **6-3 Modèle par circuit électrique équivalent :**

Ce type de modèle est bien répandu et largement utilisé selon les applications et le type de batterie

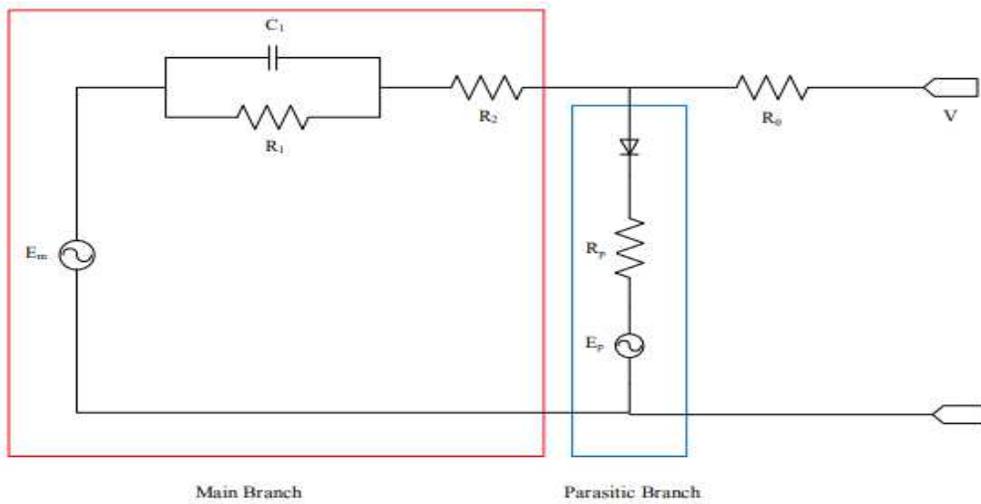
Notre travail s'est intéressé par le modèle de la batterie au Plomb exploité au Matlab&Simulink.

Le circuit électrique équivalent de la batterie est celui de la **fig9**.

Ce modèle a été présenté par:

Mr Robyn A. Jackey , technical consultant at Mathwork corp:

#A simple effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection #



**Fig9** schéma équivalent d'une batterie au plomb

Les équations du modèle sont définies par :

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + \theta)(1 - SOC)$$

Où :

$E_m$  tension en circuit ouvert

$E_{m0}$  tension en circuit ouvert en pleine charge

$K_E$  une constante en  $V/C^\circ$

$\theta$  température de l'électrolyte en  $^\circ C$

$SOC$  l'état de charge

$$R_0 = R_{00} [1 + A_0(1 - SOC)]$$

Où :

$R_0$  résistance interne

$R_{00}$  valeur de la résistance pour  $SOC=1$

$A_0$  une constante

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad C_1 = \tau_1 / R_1$$

Où :

$R_1$  Résistance de la branche principale

$R_{10}$  une constante

$DOC$  profondeur de décharge

$C_1$  capacité de la branche en farades

$\tau$  constante de temps en seconde

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22} I_m / I^*)}$$

Où :

$R_2$  Résistance de la branche principale

$R_{20}$  une constante

$R_{21}$  une constante

$R_{22}$  une constante

$SOC$  état de charge

$I_m$  courant de la branche principale

$I^*$  courant nominal de la batterie

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_{0^*} K_l}{1 + (K_c - 1) (I/I^*)^\delta}, K_l = LUT(\theta)$$

Ou :

$K_c$  constante

$C_{0^*}$  no-load capacité à  $0^\circ$  en As

$\Theta$  température de l'électrolyte en  $^\circ\text{C}$

$I$  courant de décharge

$I^*$  courant nominal

$$\theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{\left( P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right)}{C_\theta} d\tau$$

$\Theta$  température de l'électrolyte en  $^\circ\text{C}$

$\Theta_a$  température ambiante en  $^\circ\text{C}$

$\Theta_{init}$  température initiale en  $^\circ\text{C}$

$P_s$  les pertes de puissance  $I_2R$  en  $R_0$  et  $R_2$  en watts

$R_\theta$  résistance thermique en  $^\circ\text{C}/\text{Watts}$

$C_\theta$  capacité thermique en joule/ $^\circ\text{C}$

$$Q_e(t) = Q_{e\_init} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau$$

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(\theta, \theta)}, \quad DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)}$$

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)}$$

Où :

$Q_e$  quantité de charge extraite Amp/s

$Q_{e\_init}$  quantité initiale de charge extraite Amp/s

$I_m$  courant de la branche principale Amp

$SOC$  état de charge

$C$  capacité de la batterie

$\Theta$  Température de l'électrolyte

$I_{avg}$  courant de décharge moyen

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}/(\tau_p s + 1)}{V_{p0}} + A_p \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)\right)$$

Où :

$I_p$  les pertes de courant dans la branche parasite

$V_{PN}$  tension de la branche parasite

$G_{p0}$  constante

$\tau_p$  constante de temps de la branche parasite

$V_{p0}$  une constante

$A_p$  une constante

$\Theta$  température de l'électrolyte en  $^\circ\text{C}$

$\Theta_f$  température de congélation de l'électrolyte en  $^\circ\text{C}$

## 7-Influence de la température sur les performances de la batterie au

### Plomb-acide

De tous les facteurs environnementaux, la température ambiante est celui qui influe le plus sur le comportement de la batterie en termes de charge et décharge. L'explication réside dans les réactions électrochimiques dépendantes de la température. Une augmentation de la température accélère les réactions, une baisse de cette dernière les ralentit. Cette tendance est décrite par la loi d'Arrhenius, qui affirme qu'une augmentation de 10°C double les cinétiques des réactions.

La loi d'Arrhenius, permet de décrire la variation de la vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température :

$$K=A \exp^{(-E_a / RT)}$$

Où :

$E_a$  est l'énergie d'activation de la réaction.

A facteur pré-exponentiel

R constante des gaz parfaits (8.314 j/mol\*k)

T température en (K)

La température va influencer sur la plupart des grandeurs du système électrochimique plomb acide :

- La capacité.
- L'autodécharge.
- La durée de vie.

Pour valoriser tout cela nous avons exploité le modèle de la batterie au plomb de la **fig9** et qui est déjà modélisé sur l'interface Matlab & Simulink

Nous avons travaillé sur la variation de la température ambiante dans un intervalle [25°-55°] et analyser son influence sur les grandeurs :

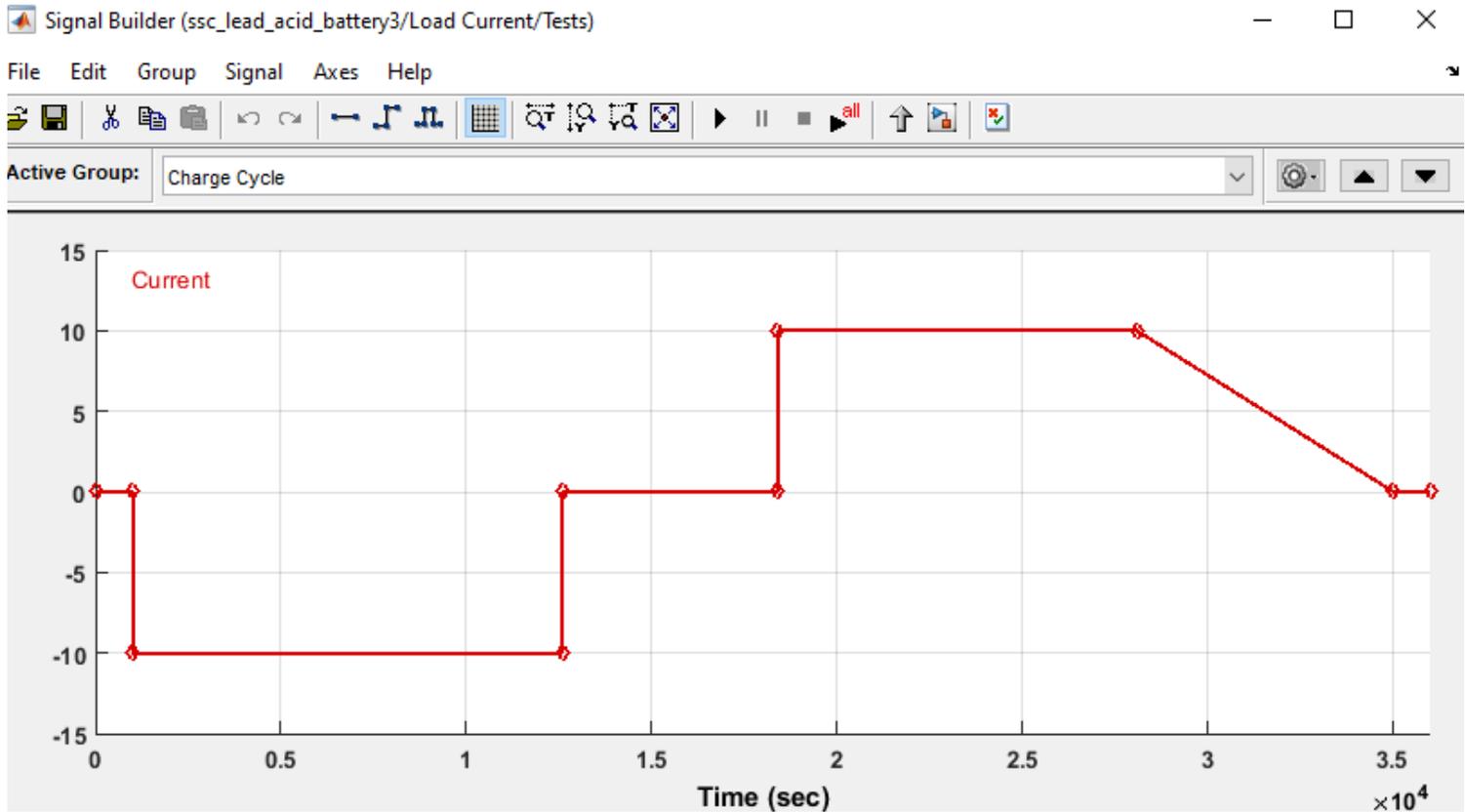
**SOC / DOD /Tension et la température de l'électrolyte.**



## 8-1-Simulation par une sollicitation par un courant d'une charge /décharge Fig12

Le courant de la **Fig12** est l'entrée choisie pour évaluer les paramètres :

- SOC « état de charge »
- DOD « profondeur de déchargé »
- Tension de la batterie
- Température de l'électrolyte



**Fig12** courant charge « 1 cycle »

Pour un intervalle de température ambiante [25°,55°], nous avons prélevé l'évolution des paramètres choisis sur oscilloscope comme indiqués aux **Fig13a-b-c-d-e-f-g**.

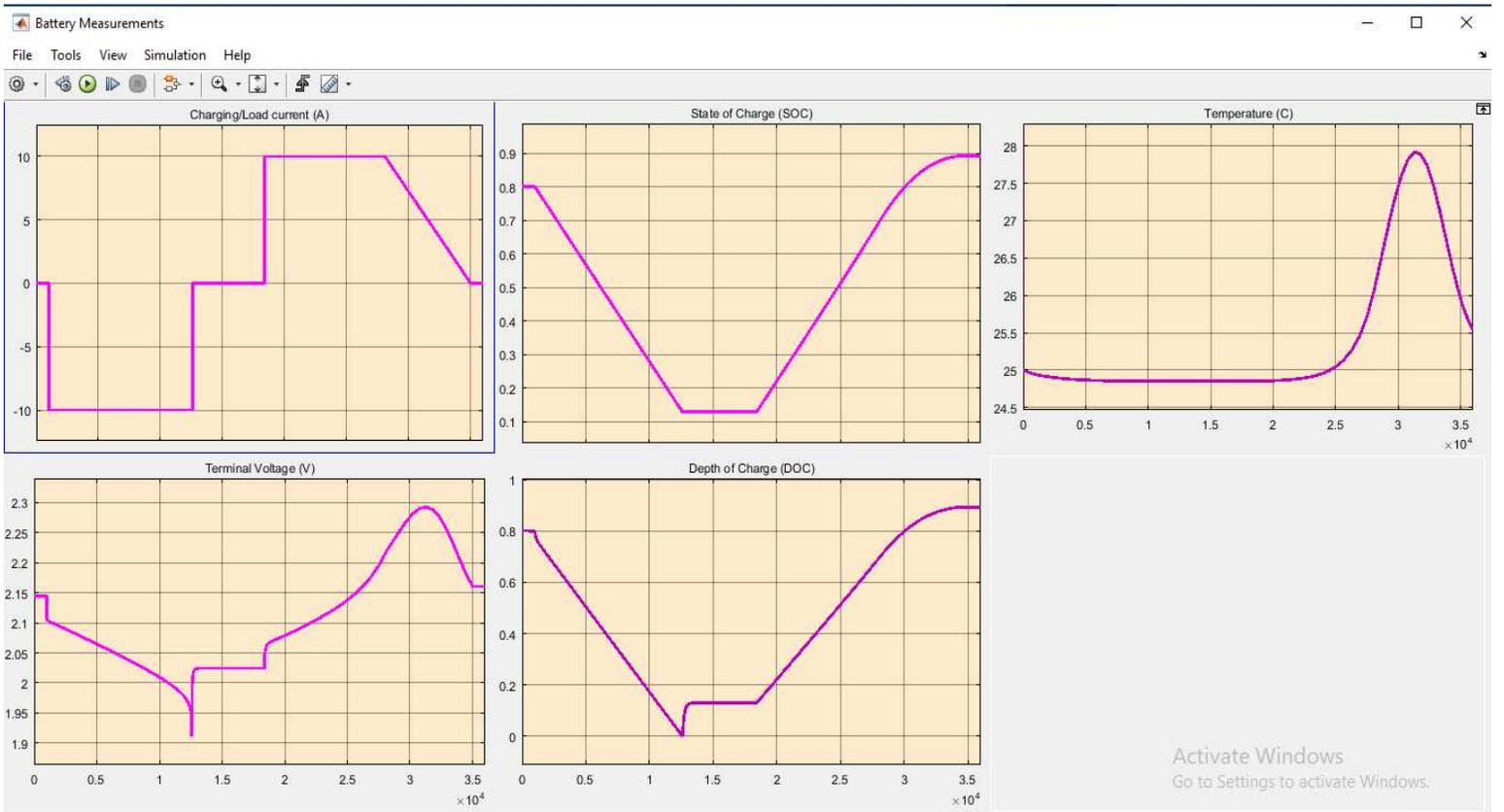


Figure13-a température 25

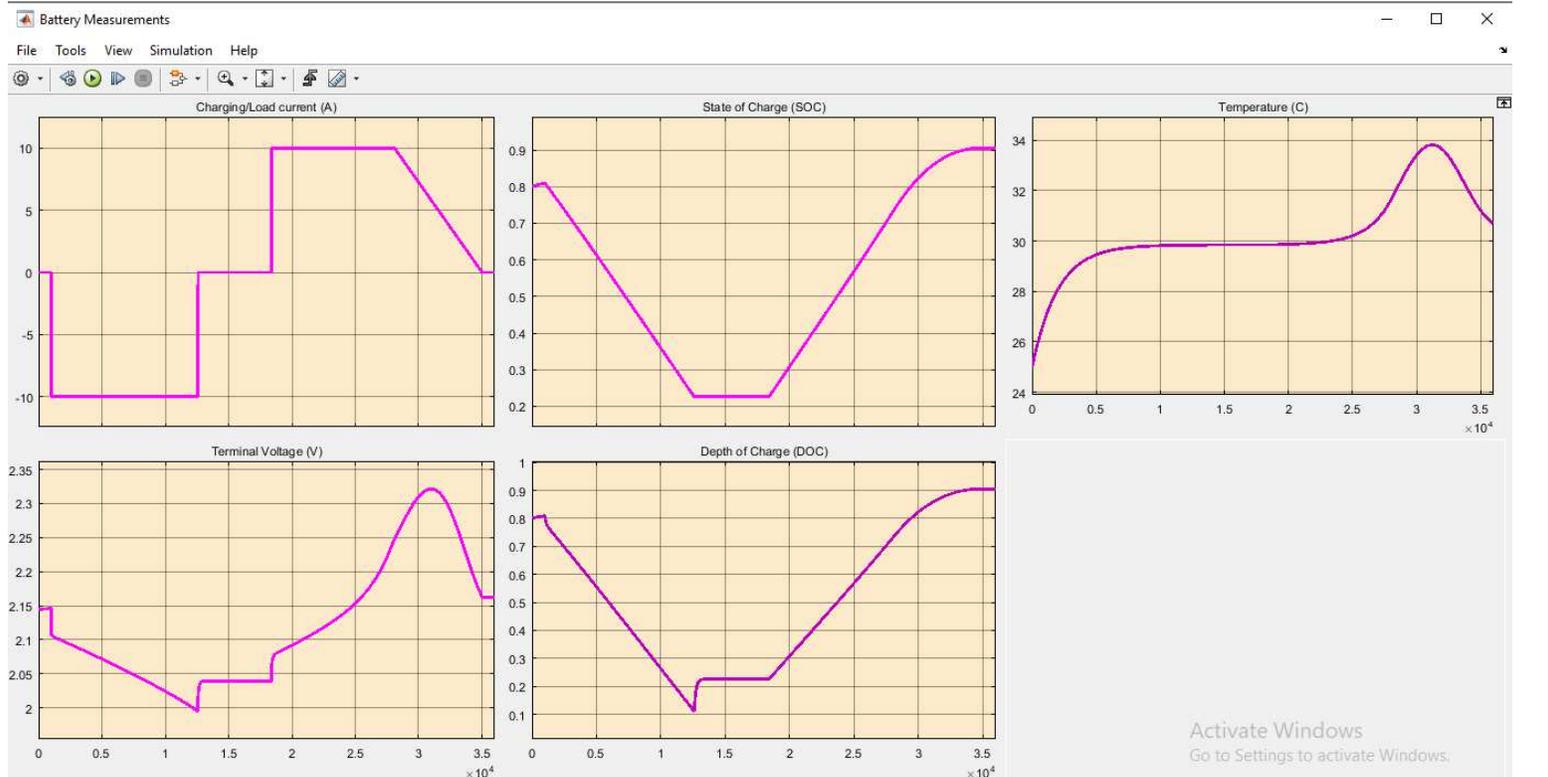


Figure13-b température 30°

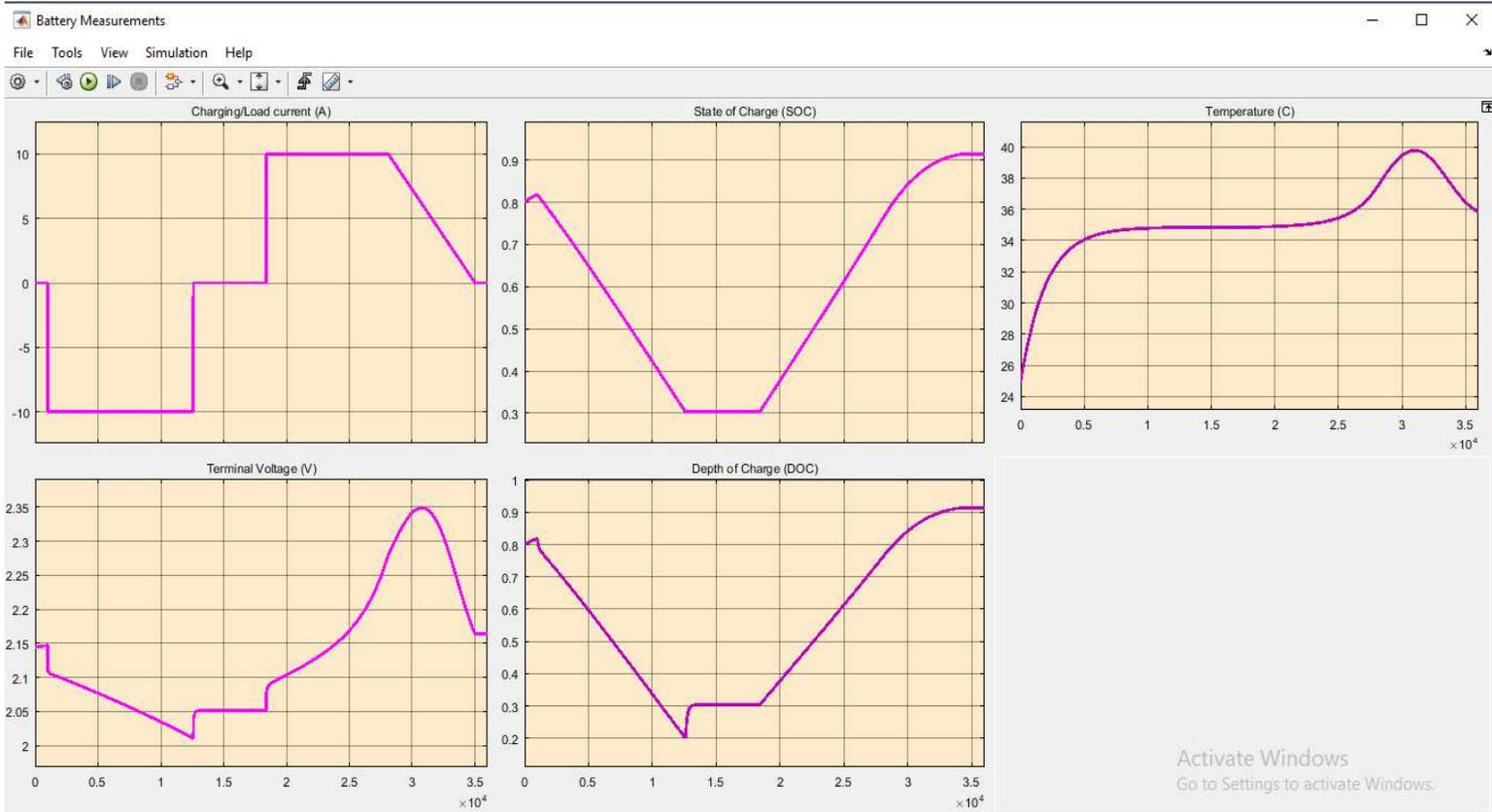


Figure13-c temperature 35°

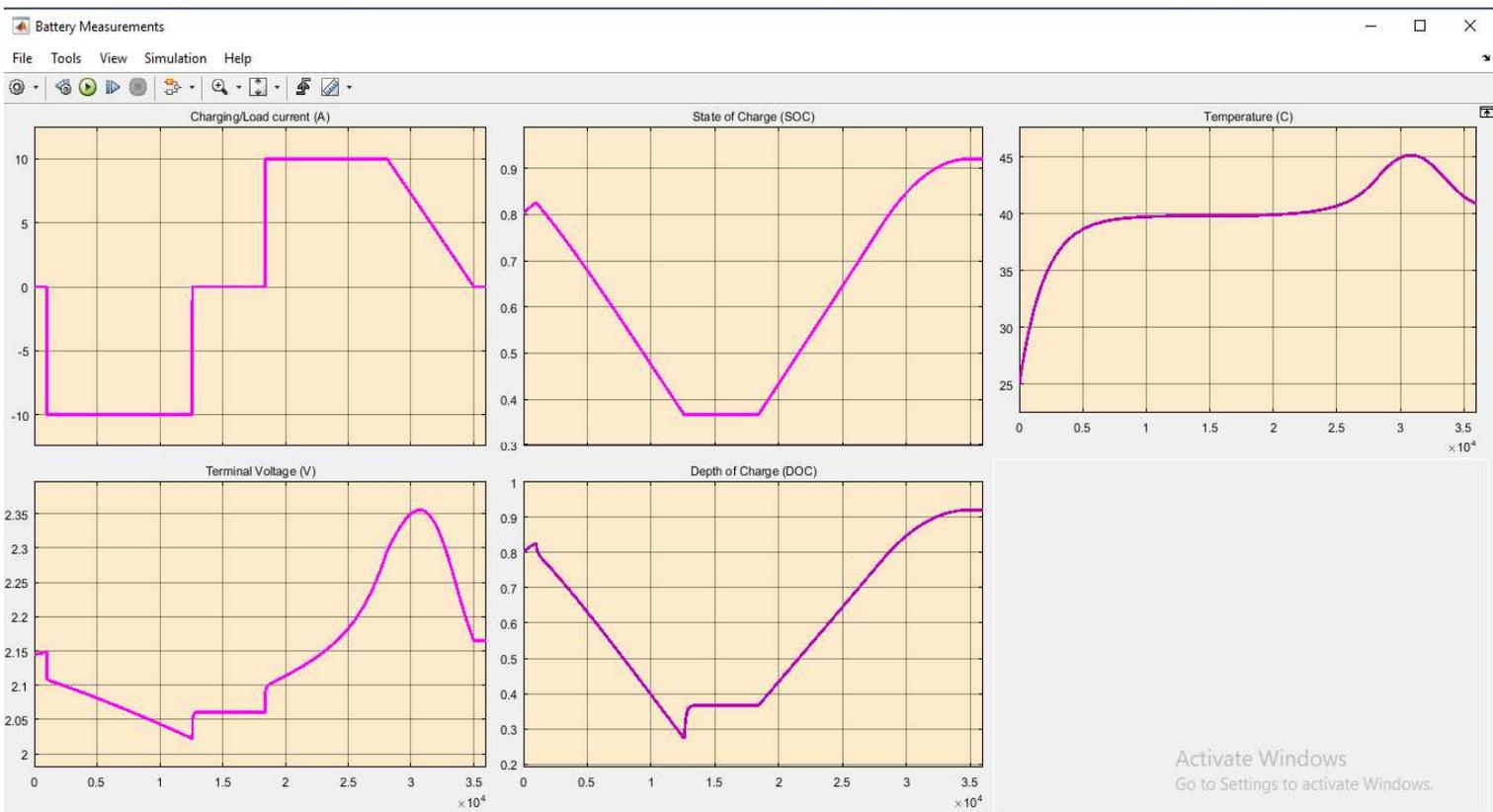


Fig13-d temperature 40°

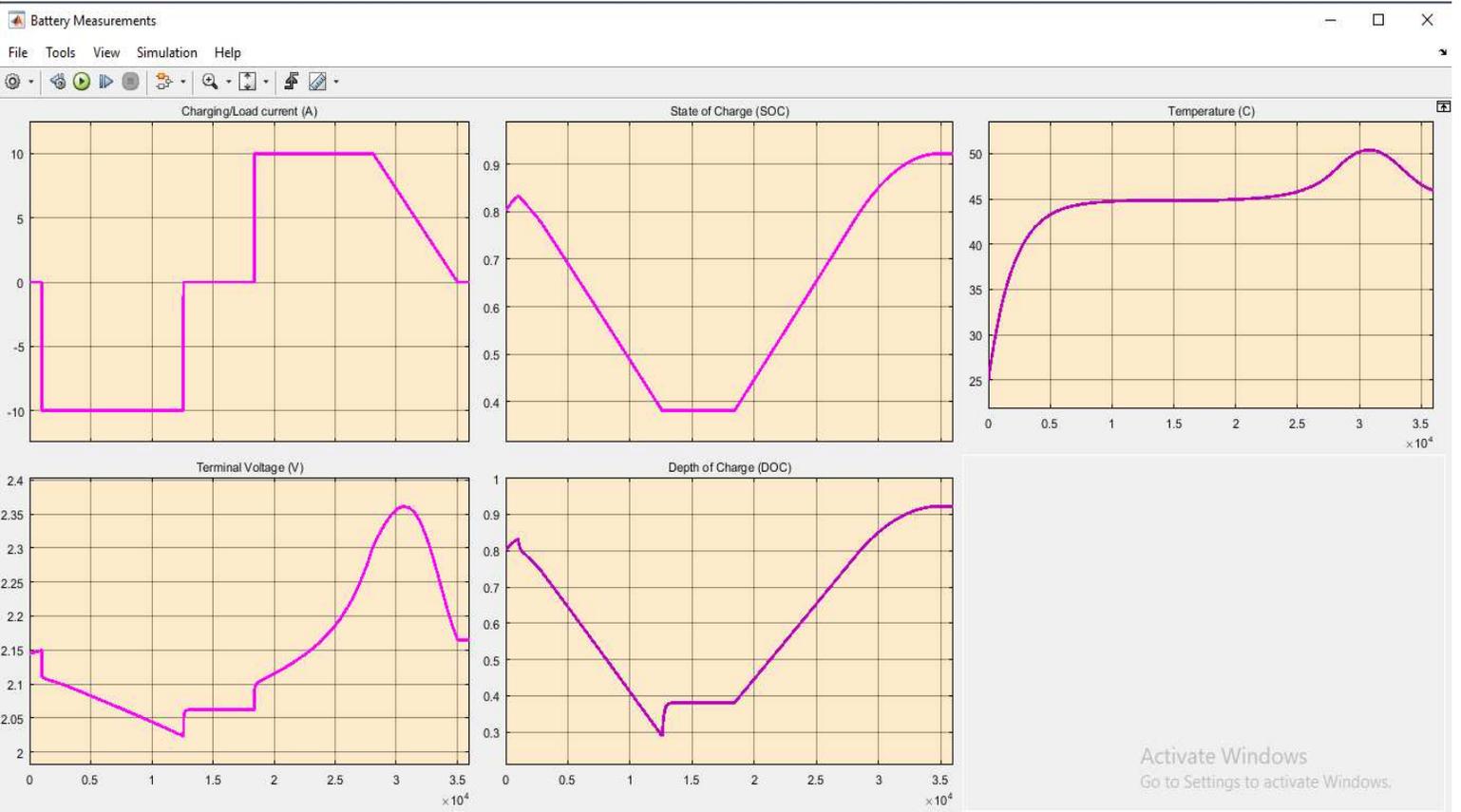


Fig13-e température 45°

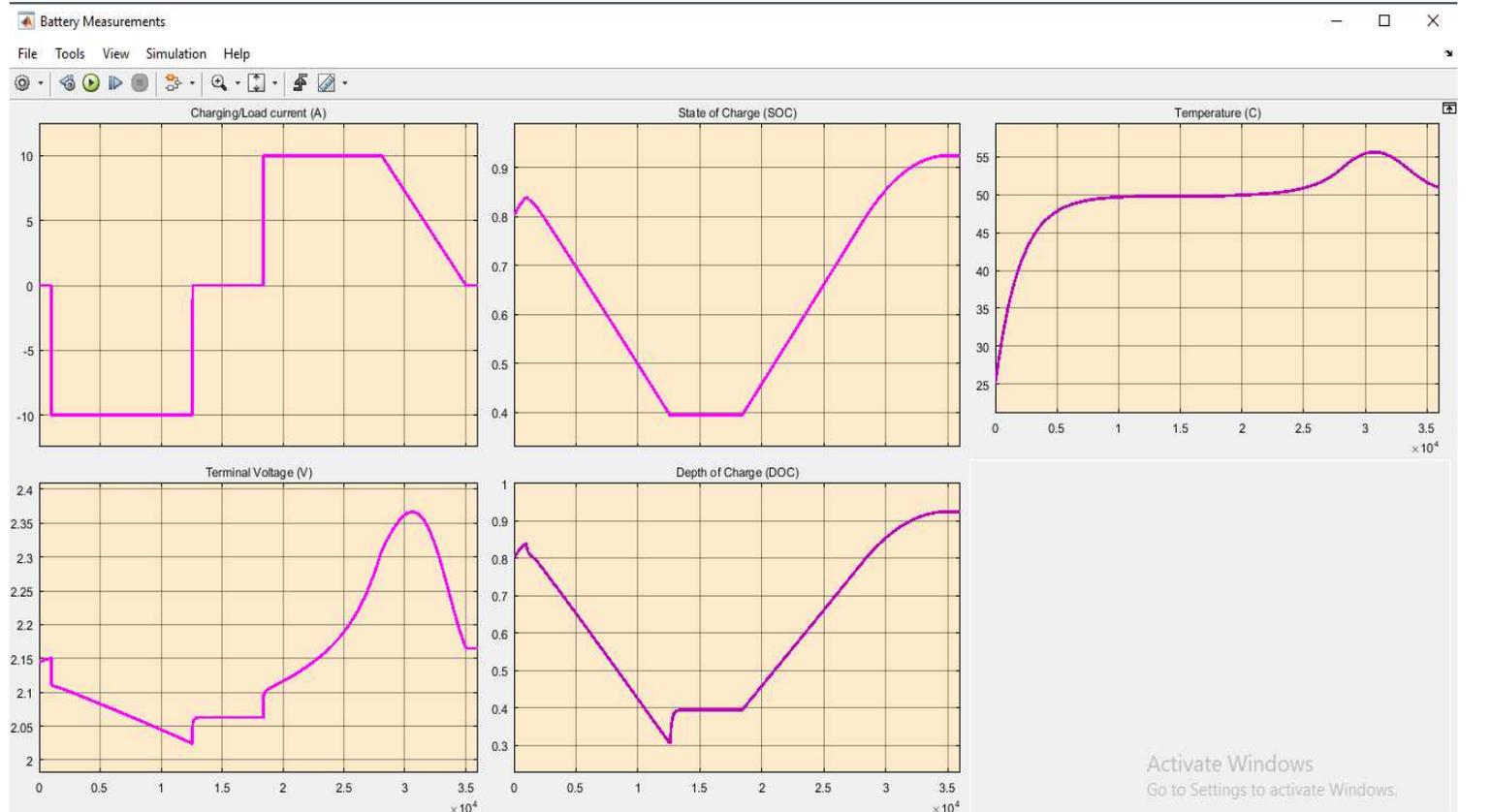


Fig13-f température 50°

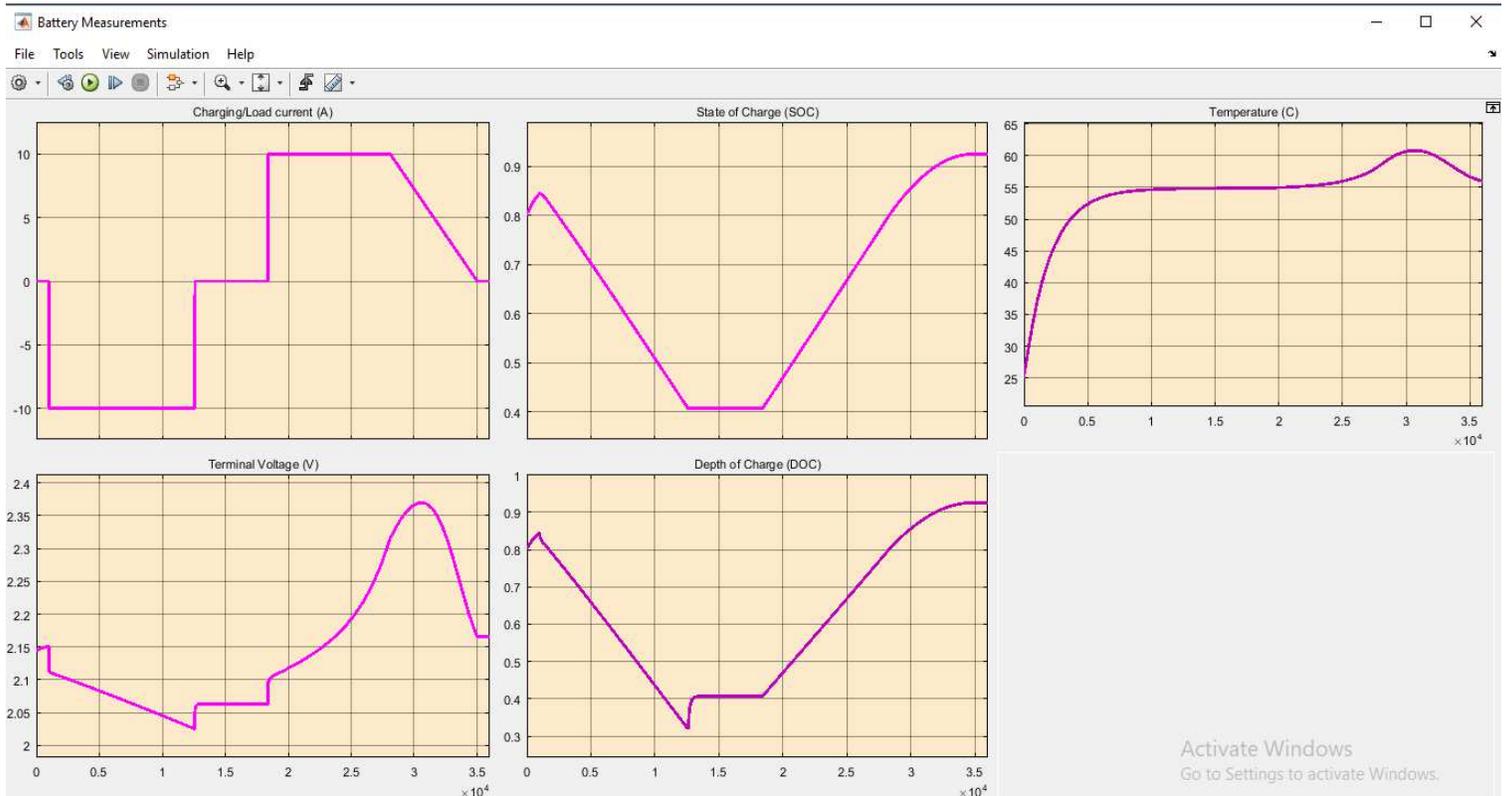


Fig13-g température 55°

Nous constatons pour la température ambiante 25° que :

- Pendant la décharge le SOC « l'état de charge » suit une courbe décroissante jusqu'au niveau de 12% et il continue sur ce palier pendant (~93mn) puis quand la batterie se met en charge il commence à augmenter
- Pour la température interne la courbe suit le niveau de la température ambiante pendant la décharge puis elle indique un pique quand la batterie arrive à sa charge max.
- Pour la tension, en phase de décharge elle commence à diminuer jusqu'à sa tension de fin de décharge, ici 1.91V puis elle commence à augmenter avec le processus de chargement de la batterie.
- Le DOD « profondeur de décharge » suit la même évolution comme le SOC.

Pour les températures ambiantes de 30° jusqu'à 55°, nous constatons la même évolution avec une différence dans les niveaux bas et haut des grandeurs simulés (SOC/DOC/Tension/Température).

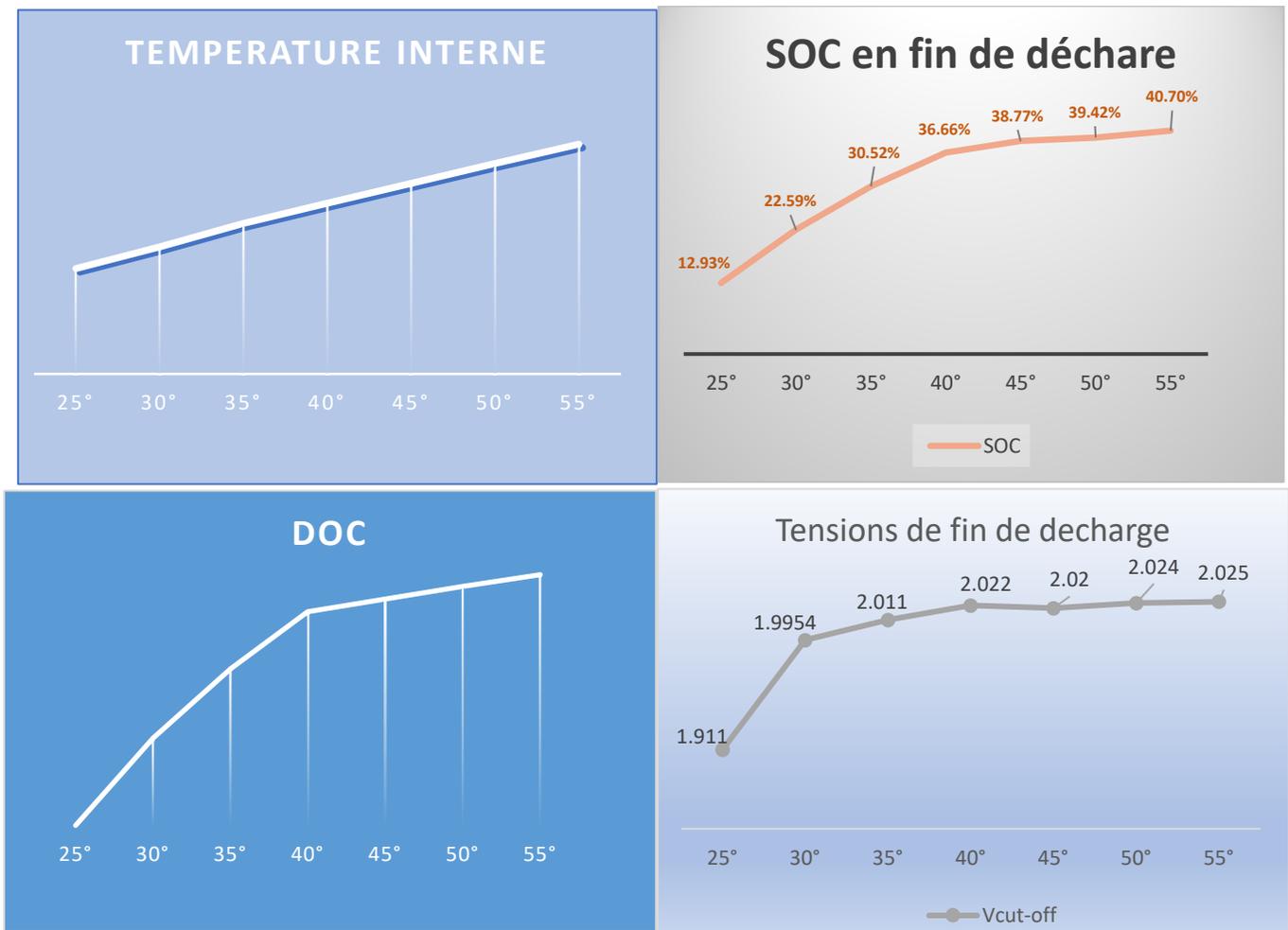
Puis pour analyser les résultats nous avons illustré les variations à travers des graphes **Fig14** en choisissant comme référence :

- Température de la batterie la plus haute
- La valeur du SOC la plus basse (fin de décharge)
- La valeur du DOC la plus basse (fin de décharge)
- La tension de fin de décharge Vcut-off

Les données sont figurées dans le tableau ci-dessous :

	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°
Température C°	27.92°	33.63°	39.77°	45.17°	50.4°	55.63°	60.81°
SOC fin de décharge %	12.93%	22.59%	30.32%	36.66%	38.77%	39.42%	40.70%
DOC fin de charge %	0.01%	11.10%	19.90%	27.20%	28.80%	30.40%	31.90%
Vcut-off en V	1.911	1.9954	2.011	2.022	2.02	2.024	2.025

**Tableau1** résultats de la simulation 1



**Fig14** effet de la température sur SOC/DOD/Tension/température interne

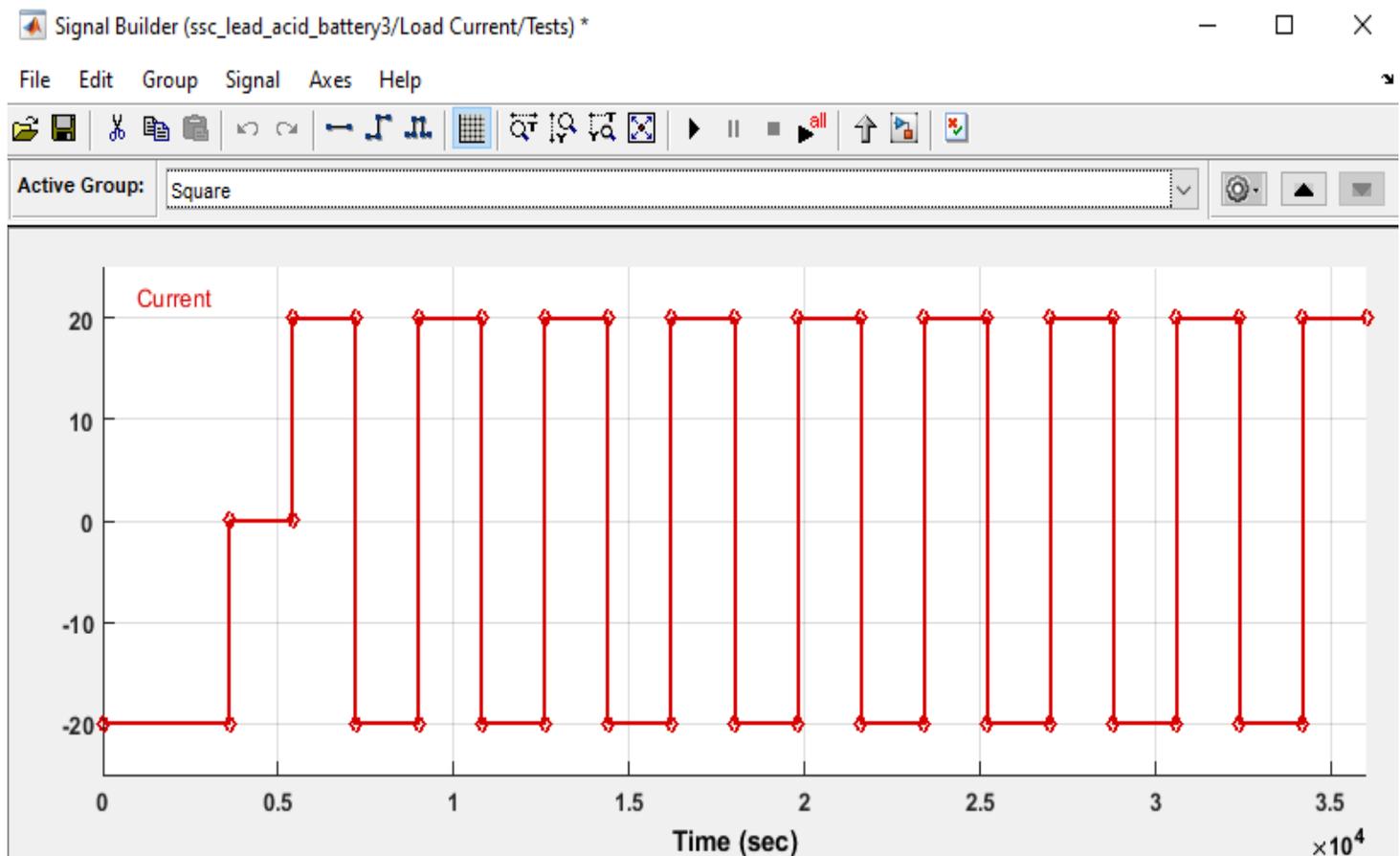
D'après les graphes, quand la température augmente :

- La température de l'électrolyte
  - Le SOC en fin de charge
  - Le DOD en fin de charge
  - La tension de fin de charge
- } Augmentent aussi.

Cela signifie que lors de l'augmentation de la température ambiante les limites des grandeurs suscités sont déplacés et le domaine de fonctionnement de la batterie aussi. Ainsi l'influence de la température est directe sur la durée de vie de la batterie.

## 8-2-Simulation par sollicitation par un courant de la Fig15 (plusieurs cycles)

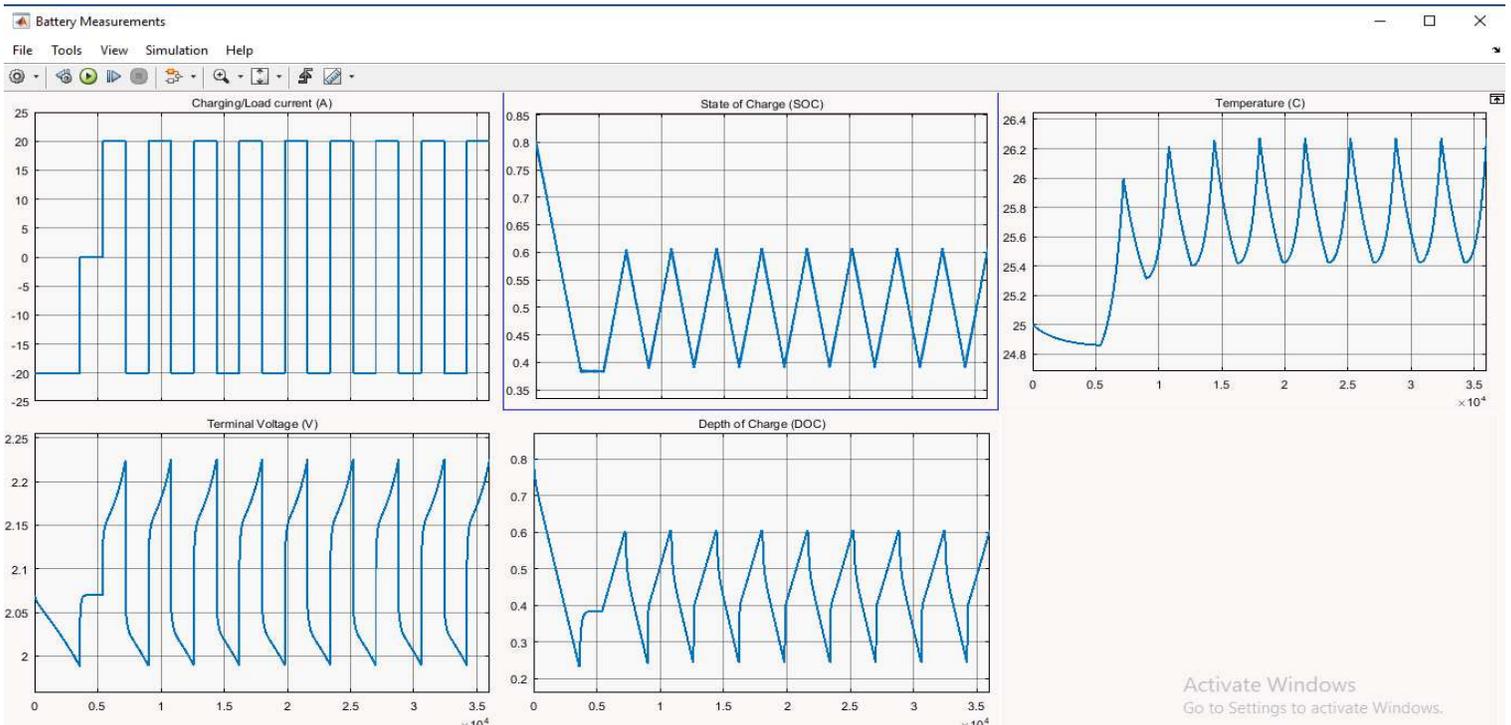
Dans la deuxième partie de la simulation nous avons choisis un courant de la **Fig15** ou il y a répétition de cycle de charge-décharge. C'est-à-dire que dans ce cas la batterie est soumise à un régime où la fréquence de décharge et charge est très élevée et que sa capacité est bien éprouvée.



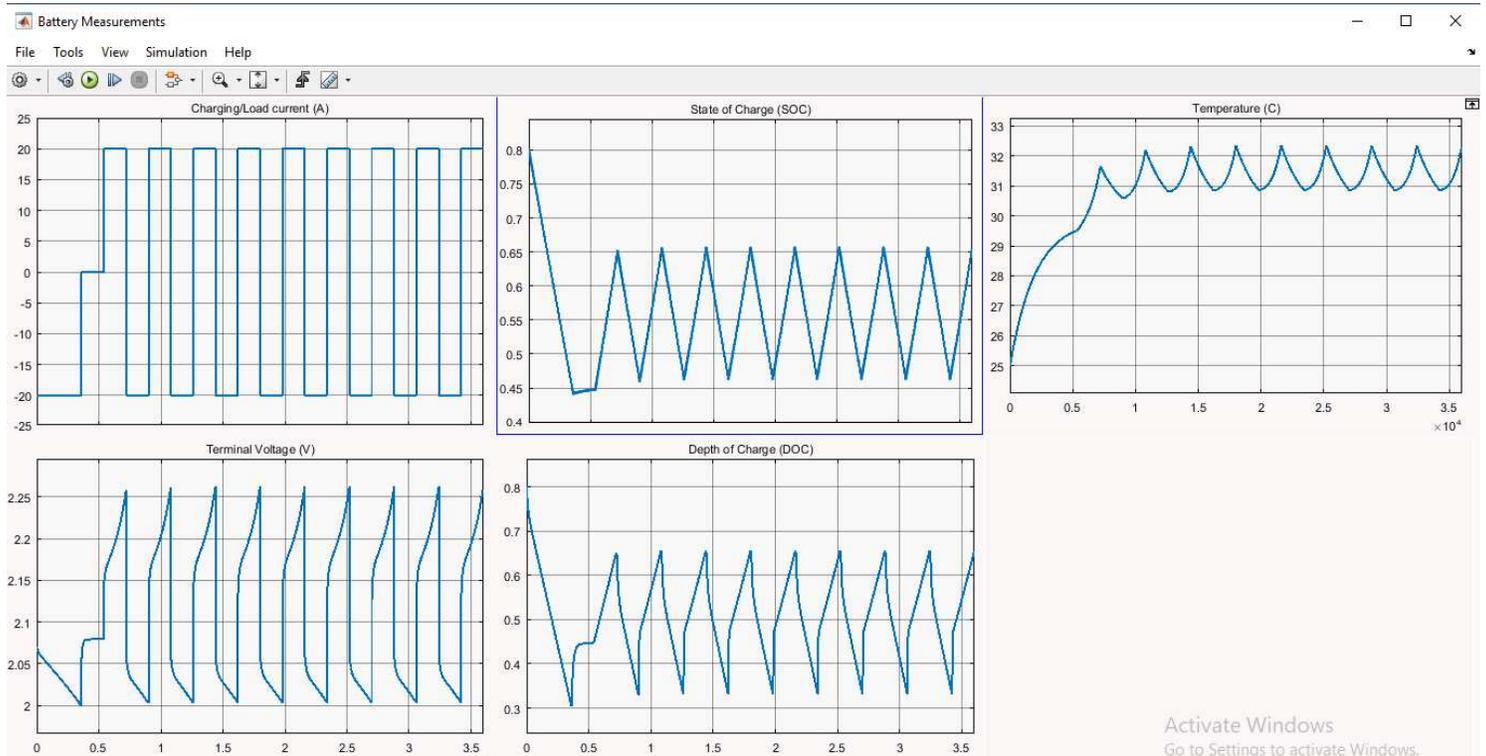
**Fig15** courant de charge décharge simulation2

Avec la même procédure que la partie1, nous avons changé la température ambiante sur un palier de 25° jusqu'à 55°, puis prélever les variations des grandeurs (SOC/DOC/Tension/Température) sur oscilloscope.

Les résultats de l'oscilloscope ont donné les **Fig16-a-b-c-d-e-f-g** :



**Figure16-a** température 25°



**Figure 16-b** température 30°

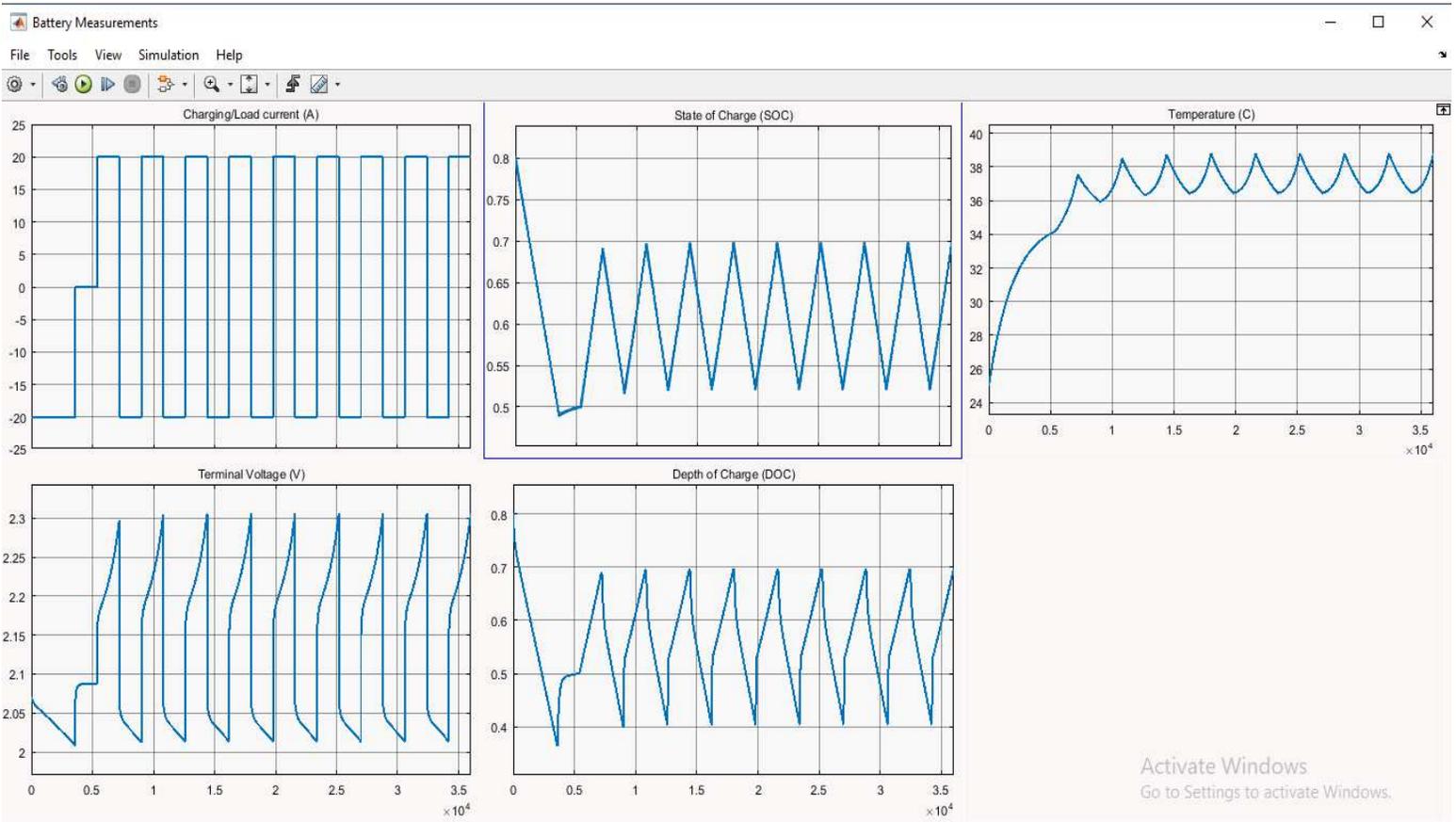


Figure 16-c température 35°

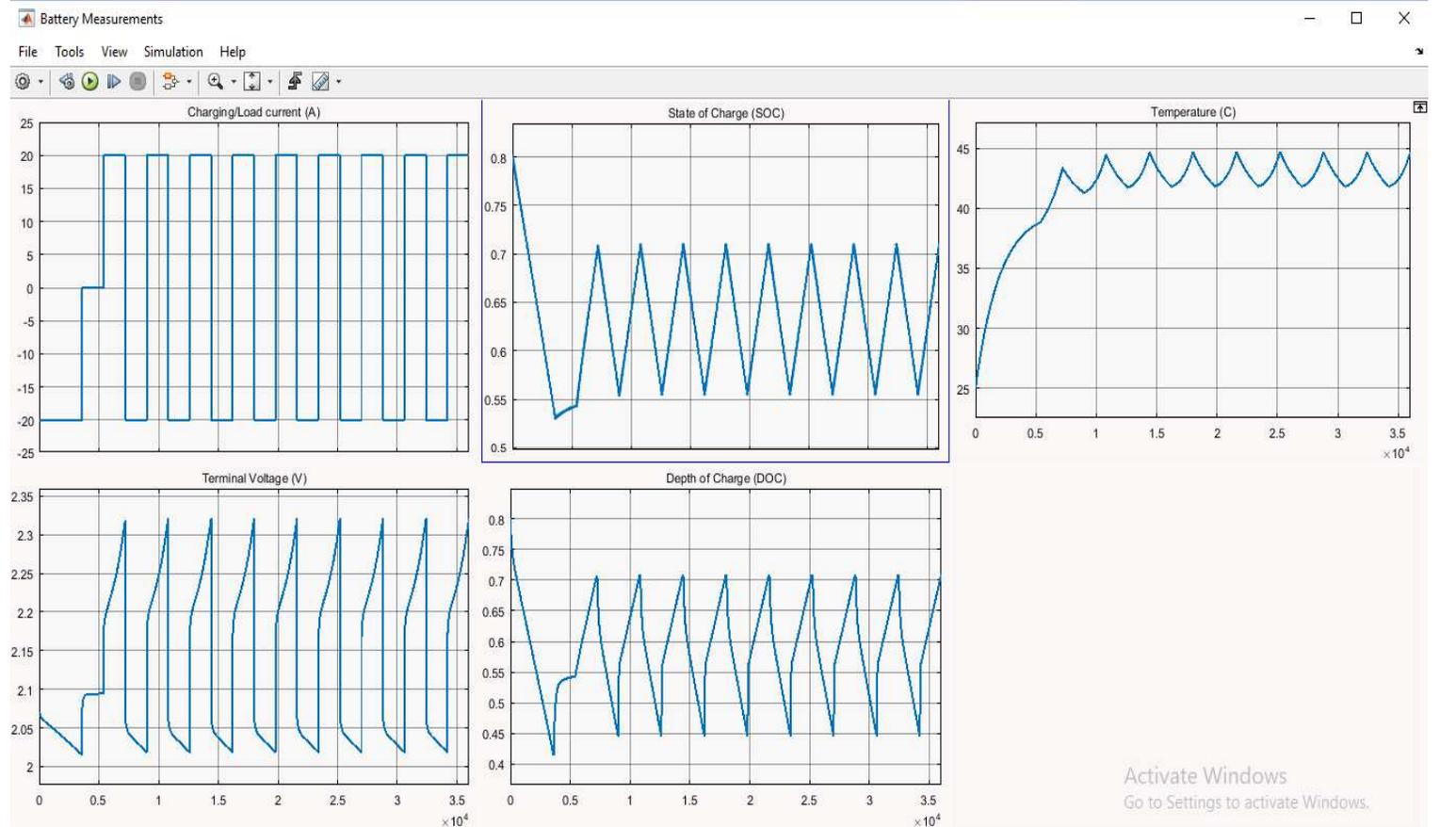


Figure 16-d température 40°

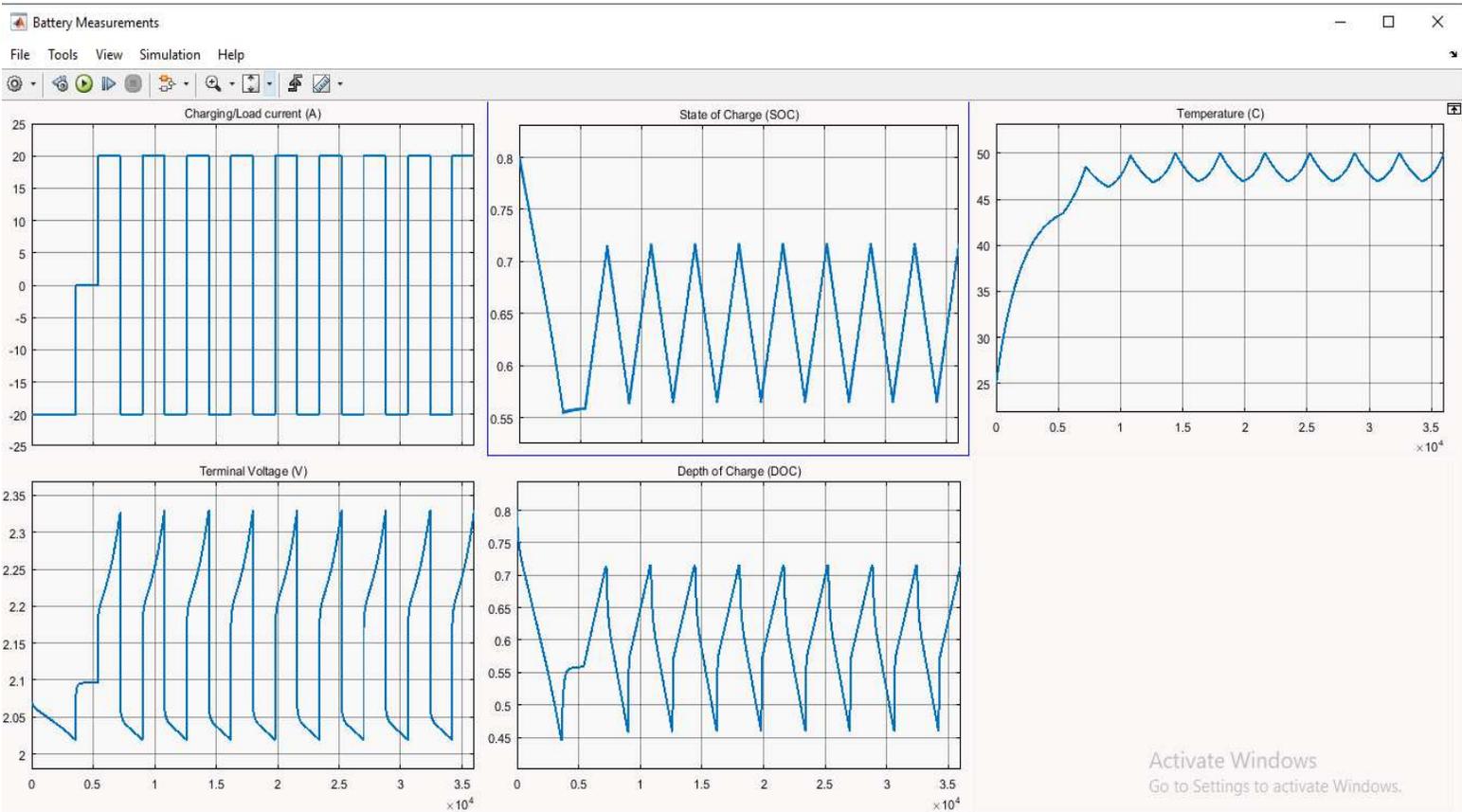


Figure 16-e temperature 45°

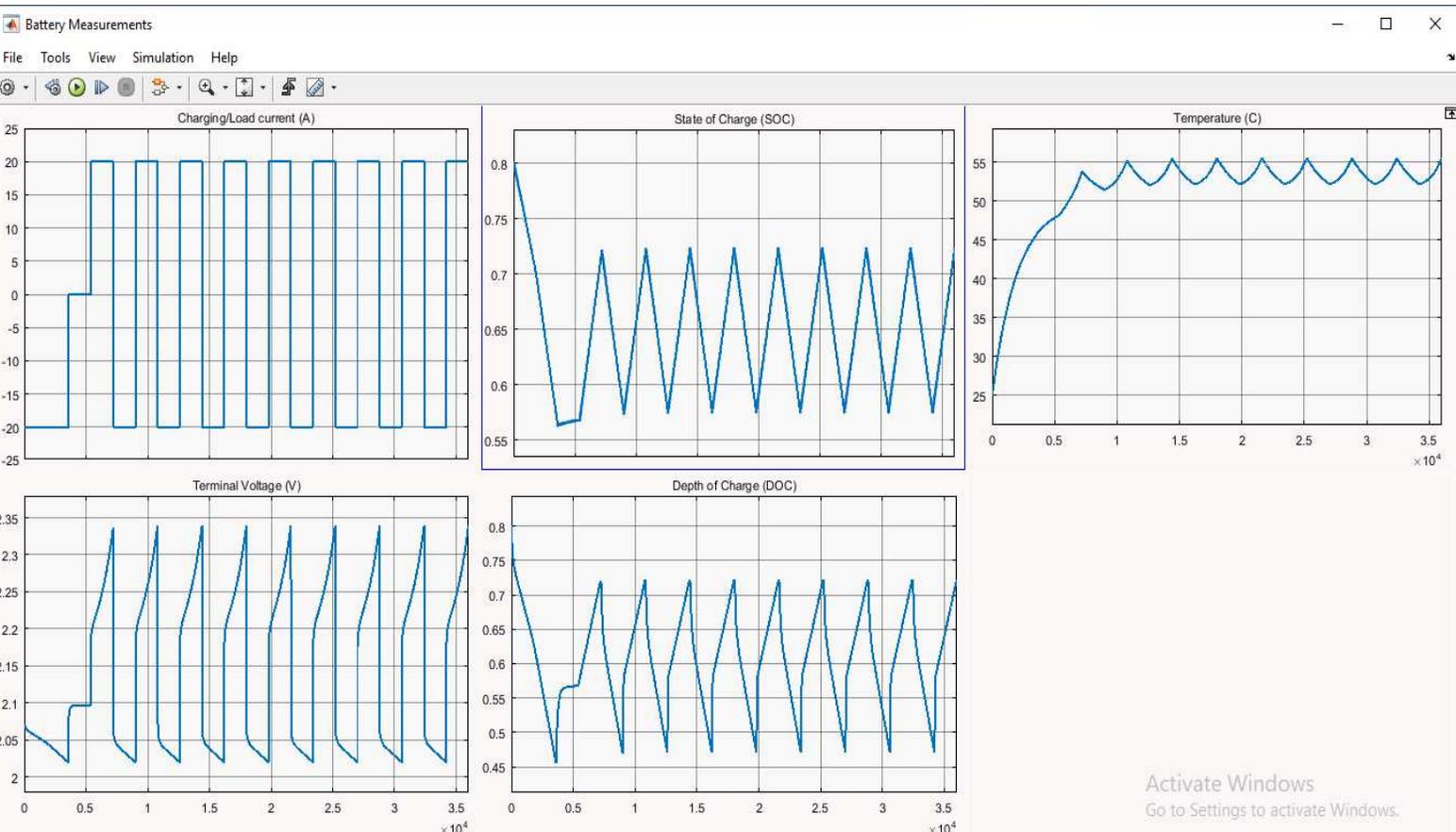


Figure 16-f temperature 50°

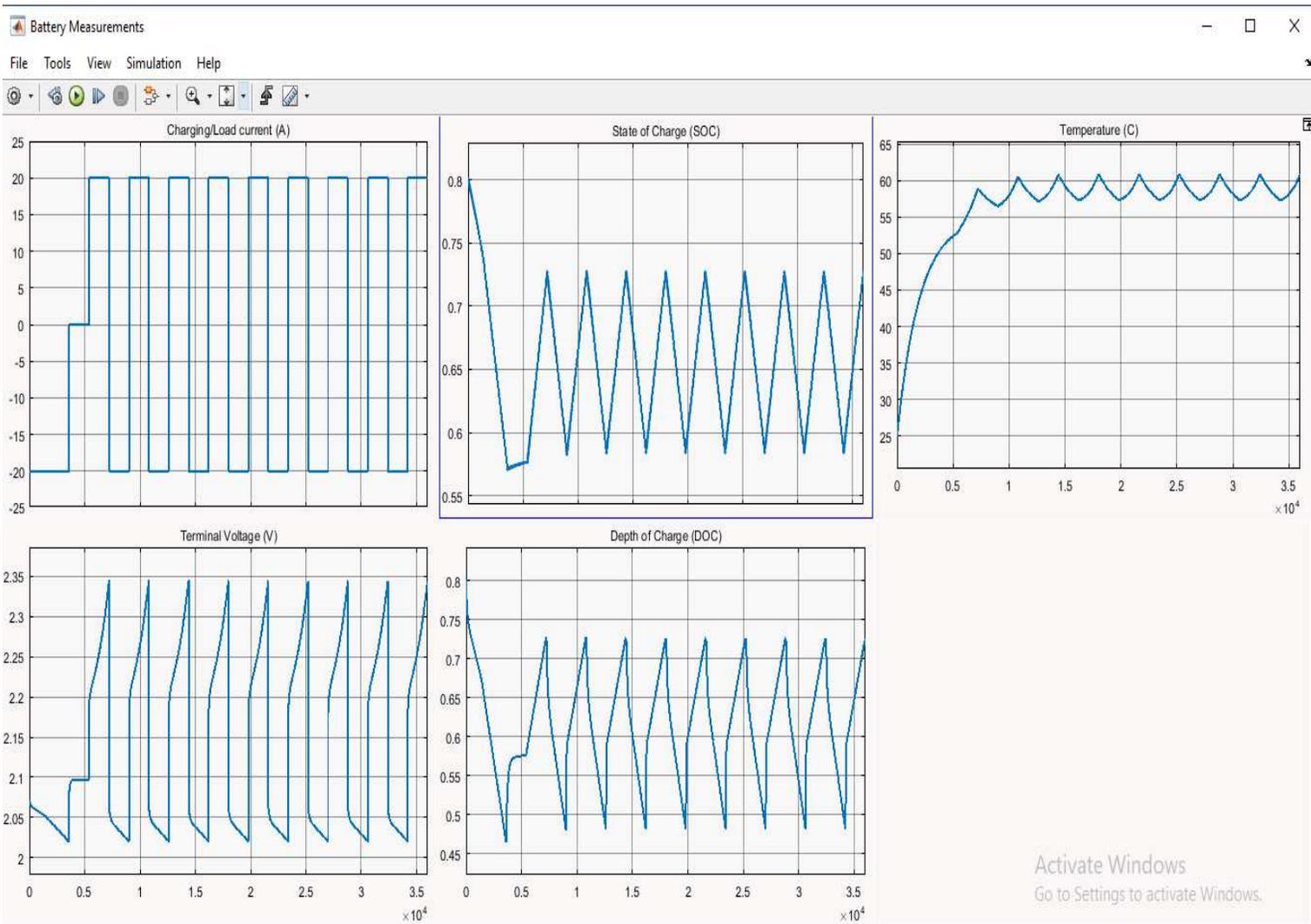


Figure16-g température55°

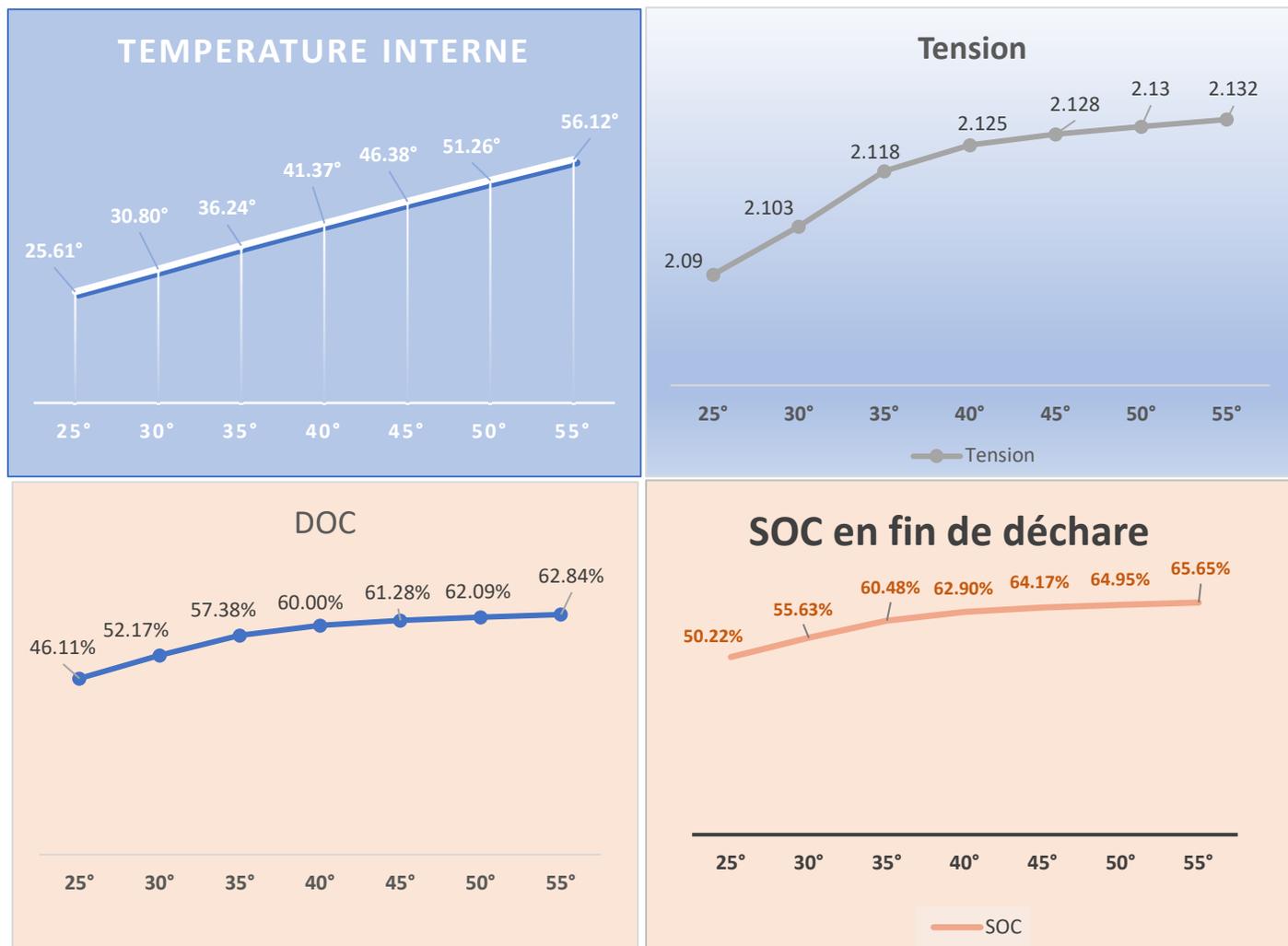
Cette fois ci nous avons choisis la valeur moyenne pour élaborer les graphes de la **Fig17**.

Les données sont illustrées au tableau ci-dessous :

	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°
Temperture°C	25.61°	30.8°	36.24°	41.37°	46.38°	51.26°	56.12°
SOC%	50.22%	55.63%	60.48%	62.90%	64.17%	64.95%	65.65%
DOD%	46.11%	52.17%	57.38%	60.00%	61.28%	62.09%	62.84%
Tension en V	2.09	2.103	2.118	2.125	2.128	2.13	2.132

**Tableau2** résultats de la simulation partie2

Les graphes ont donné :



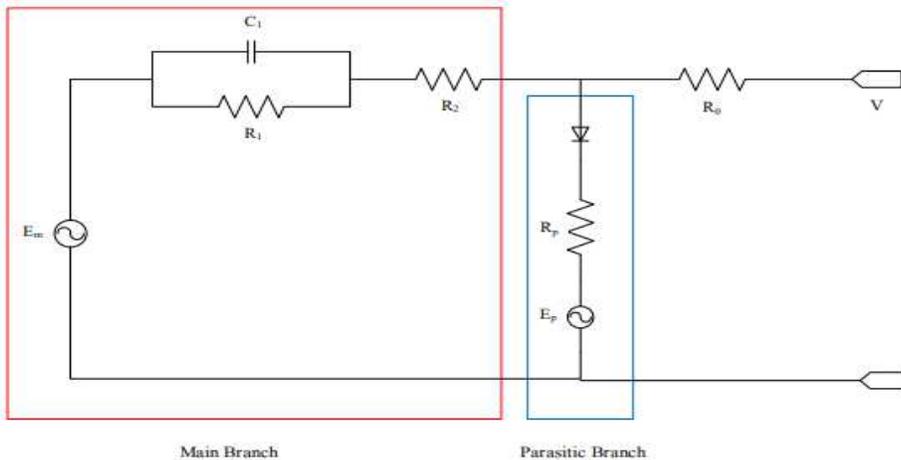
**Fig17** simulation 2 /effet de la température sur le SOC/DOD/Tension

Nous constatons aussi comment les grandeurs SOC/DOD/Tension/Température de l'électrolyte augmentent avec la température ambiante.

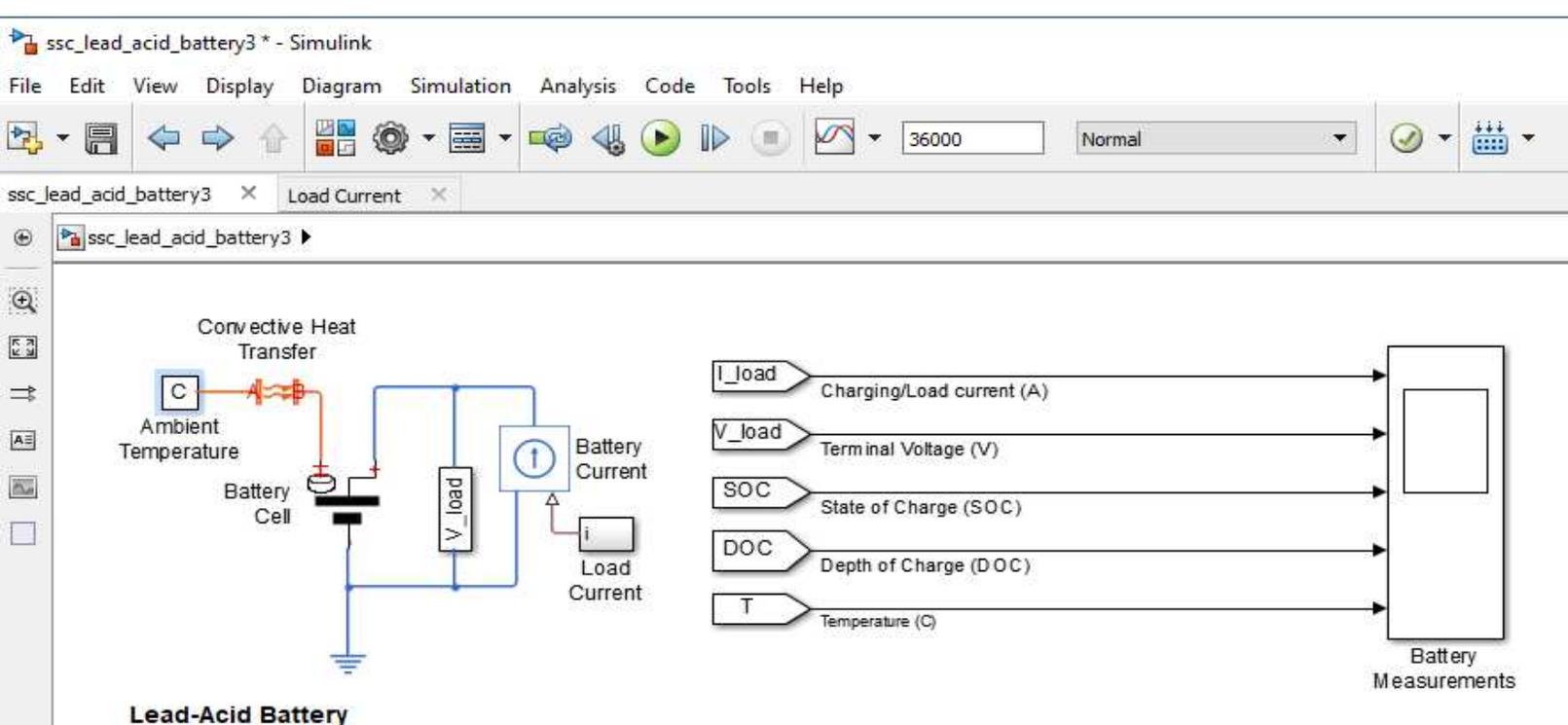
### 8-3 Influence de la température sur la charge /décharge de la batterie au plomb :

Nous avons enrichi notre étude par le travail de Mr Boonyang Plangklang de l'université de Thaïlande, « Mathematical Model and experiment of temperature effect on discharge of lead- acid battery for PV »

Son travail a été basé sur le même modèle de batterie de la **Fig9** et **Fig10** et étudie l'effet de la température sur la décharge de cette dernière.



**Fig9** schéma équivalent d'une batterie au plomb



**Fig10** modèle de la batterie au plomb sur Simulink

La simulation a été faite sur une gamme de température de 25° à 60°.

Elle a montré que plus la température augmente plus la décharge est lente.

Et pour confirmer les résultats, une expérience a été mise en place sur une batterie plomb de type VRLA 12V 20Ah  $V_{\text{cut-off}} 9.6\text{V}$ .

La simulation a donné:

Température	Temps de décharge de la batterie en mn
25°	40
30°	47
35°	50
40°	55
45°	58
50°	62
55°	67
60°	70

**Tableau3** Résultats de la simulation sur la batterie VRLA 12V 20Ah

Il est bien clair que le temps de décharge est plus long si la température augmente

L'Experimental a donné:

Température	Temps de décharge de la batterie en mn
25°	40
30°	45
35°	48
40°	49
45°	50
50°	49
55°	49
60°	32

**Tableau4** Résultats de l'experimental sur la batterie VRLA 12V 20Ah

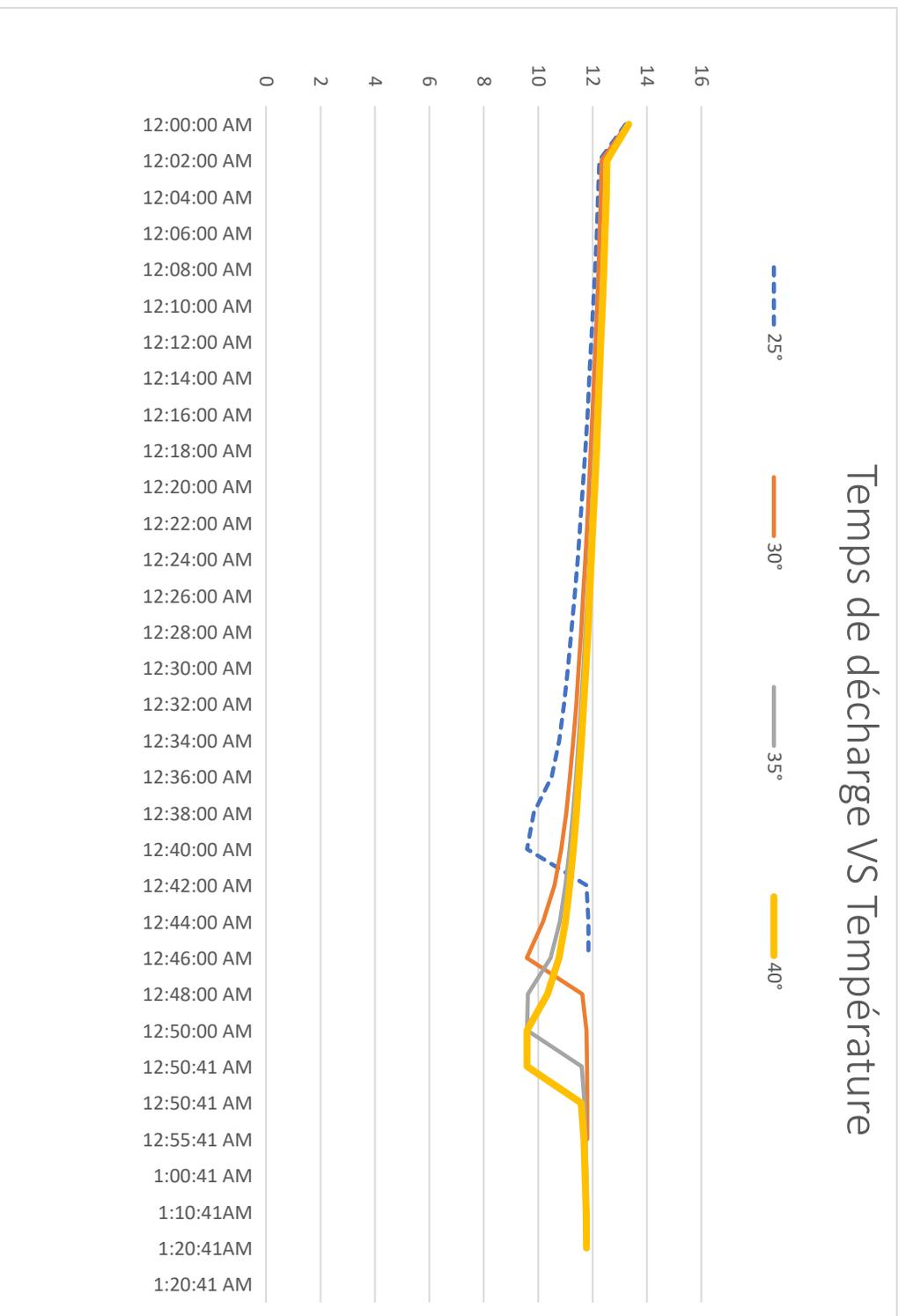
L'expérience faite sur la batterie VRLA 12V a démontré une similitude avec les résultats obtenus en simulation, outre cela qu'en haute température à partir de 45°C la batterie commence à entrer dans la phase de disfonctionnement et à la température de 60°C celle-ci est déclarée hors service.

L'ensemble des données représenté dans le tableau5 a été traité à l'aide du logiciel Excel ce qui nous permis d'illustrer les graphes de la **Fig18-a-b**.

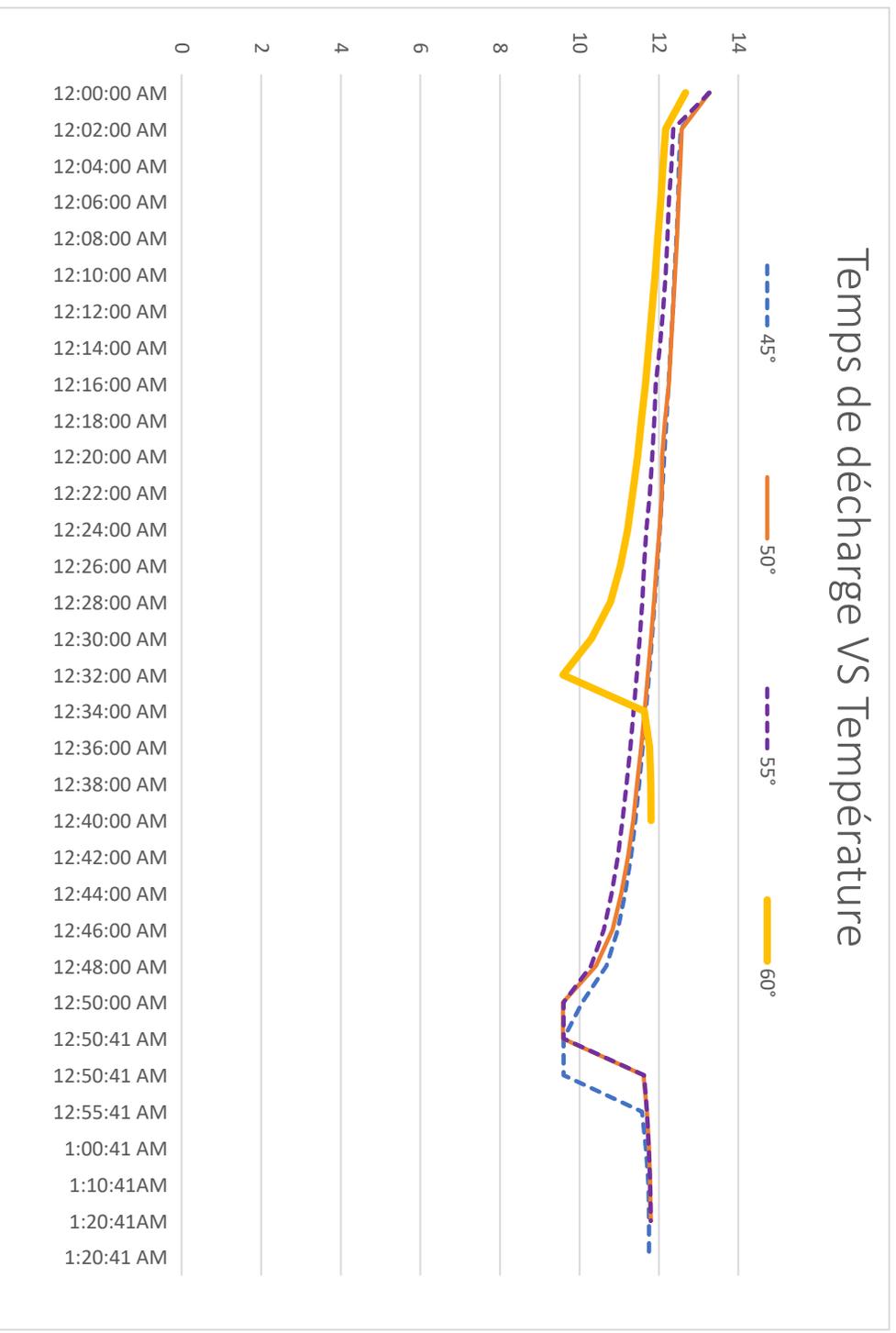
**Tableau5** de prélèvements des données de l'expérience faite sur batterie VRLA 12V 20Ah

	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
12:00:00 AM	13.22	13.27	13.35	13.33	13.25	13.27	13.27	12.67
12:02:00 AM	12.25	12.33	12.47	12.53	12.55	12.57	12.36	12.17
12:04:00 AM	12.2	12.3	12.44	12.5	12.5	12.53	12.31	12.1
12:06:00 AM	12.15	12.26	12.4	12.45	12.48	12.49	12.25	12.04
12:08:00 AM	12.09	12.22	12.35	12.41	12.44	12.45	12.21	11.97
12:10:00 AM	12.02	12.16	12.3	12.36	12.39	12.4	12.17	11.9
12:12:00 AM	11.95	12.11	12.24	12.3	12.35	12.35	12.1	11.82
12:14:00 AM	11.88	12.05	12.19	12.25	12.29	12.3	12.02	11.74
12:16:00 AM	11.81	11.99	12.13	12.2	12.24	12.25	11.92	11.66
12:18:00 AM	11.73	11.93	12.07	12.14	12.19	12.15	11.88	11.56
12:20:00 AM	11.64	11.87	12.01	12.08	12.13	12.08	11.83	11.46
12:22:00 AM	11.55	11.8	11.95	12.01	12.08	12.07	11.77	11.34
12:24:00 AM	11.45	11.73	11.88	11.95	12.02	12.01	11.68	11.21
12:26:00 AM	11.34	11.65	11.81	11.89	11.96	11.94	11.62	11.03
12:28:00 AM	11.22	11.58	11.73	11.82	11.89	11.87	11.58	10.78
12:30:00 AM	11.09	11.49	11.66	11.75	11.82	11.8	11.51	10.3
12:32:00 AM	10.95	11.4	11.58	11.67	11.75	11.72	11.44	9.59
12:34:00 AM	10.77	11.29	11.49	11.59	11.67	11.64	11.36	11.63
12:36:00 AM	10.5	11.17	11.39	11.5	11.59	11.55	11.28	11.76
12:38:00 AM	9.84	11.03	11.28	11.4	11.5	11.45	11.18	11.79

12:40:00 AM	9.6	10.85	11.16	11.29	11.4	11.35	11.08	11.8
12:42:00 AM	11.77	10.6	11	11.16	11.29	11.22	10.96	
12:44:00 AM	11.85	10.18	10.8	11	11.15	11.05	10.81	
12:46:00 AM	11.85	9.59	10.46	10.76	10.96	10.83	10.61	
12:48:00 AM		11.62	9.62	10.34	10.68	10.41	10.29	
12:50:00 AM		11.77	9.6	9.6	10.07	9.59	9.6	
12:50:41 AM		11.79	11.6	9.6	9.6	9.59	9.6	
12:50:41 AM		11.8	11.7	11.58	9.6	11.61	11.62	
12:55:41 AM		11.8	11.74	11.68	11.57	11.7	11.7	
1:00:41 AM			11.77	11.72	11.67	11.75	11.74	
1:10:41AM			11.79	11.76	11.73	11.78	11.78	
1:20:41AM			11.79	11.77	11.75	11.79	11.79	
1:20:41 AM					11.75			



**Fig18-a** temps de décharge Vs température 25°-30°-35°-40°



**Fig18-b** temps de décharge Vs température 45°-50°-55°-60°

Conclusion de l'expérience :

La température affecte directement le temps de décharge, plus la température augmente plus le temps de décharge de la batterie est grand.

## **9-Conclusion générale :**

Comme il a été mentionné précédemment, la batterie au plomb-acide a été et reste encore la source d'énergie la plus répandue et la plus utilisée du fait qu'elle représente l'avantage du prix de revient le plus faible parmi les autres sources d'énergie ainsi que par le savoir-faire de la simplicité de sa technologie. Elle demeure encore un équipement de choix pour l'automobile surtout pour le véhicule hybride et thermique dans le contexte d'amélioration de sa durée de vie. Cependant l'amélioration n'est possible qu'en ayant une bonne maîtrise du respect des limites hautes et basses des grandeurs dépendantes de la température ambiante. Cela signifie qu'on doit concevoir un système de surveillance intelligent permettant d'assurer une durée maximale de disponibilité de cet équipement. En effet les grandeurs que nous avons exhibées lors de l'étude en simulation nous ont permis de constater que la température a des effets directs sur les performances de la batterie et son augmentation peut engendrer un dysfonctionnement voir une destruction complète de cet équipement.

## Bibliographies:

- [1] Handbook of battery David linden & Thomas B.Reddy.
- [2] <http://energie-developpement.blogspot.com/2011/10/apercu-des-differents-types-de.html>
- [3] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/capacite-batteries.php>
- [4] Electric vehicle technologie expand , James larminie- John lowry
- [5] Thèse : Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique,  
Université de liège
- [6] <https://sitelec.org/cours/abati/accu/accu.htm>.
- [7] <https://www.automobile-propre.com/dossiers/batteries-voitures-electriques/>
- [8] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-voiture-hybride-7282/>
- [9] <https://www.batterie-solaire.com/Accumulateur-plomb-principe-fonctionnement.htm>
- [10] Charge des batteries d'accumulateurs au plomb, ED6120 Aide-mémoire INRS .
- [11] <https://fr.wikibooks.org/wiki/Batterie-plomb>.
- [12] Revue: A simple, effective Lead-acid battery modeling process for electrical system component selection, Robyn A. Jackey the Mathwork corporation,2007-1-0778
- [13] Revue: Mathematical model and experiment of temperature effect on discharge of lead-acid battery for PV, Boonyang Plangklang, Pornchai Pornharuthai  
<http://dx.doi.org/10.4236/epe.2013.51006>
- [14] Revue: The VRLA modular wound design for 42 V mild hybrid systems, F.Trinidad, C.Gimeno, Gutiérrez, doi:10.1016/S0378-7753(02)00716-4
- [15] Revue: A comparative study of lead-acid batteries and lithium ion phosphate batteries  
Cristianne Brasil, Charles L.S Melo, University of the state of Amazonas-UEA  
Manaus - AM-Brazil
- [17] The influence of temperature on the option of batteries and other electrochemical energy storage systems,Dr. René Groib
- [16] Battery management system volume1- Battery modeling ,Gregory -L-Pleh.
- [17] [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)