

## MODELISATION DES COMPOSANTS ELECTRIQUES

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>IV.1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>76</b>  |
| <b>IV.2</b> | <b>Le champ photovoltaïque</b>                               | <b>77</b>  |
| <b>IV.3</b> | <b>Le stockage batterie</b>                                  | <b>80</b>  |
| IV.3.1      | Modèle de la capacité  | 81         |
| IV.3.2      | Modèle du rendement faradique                                | 82         |
| IV.3.3      | Modèle de la tension   | 82         |
| IV.3.4      | Validation du modèle   | 83         |
| <b>IV.4</b> | <b>Le système pile à combustible</b>                         | <b>86</b>  |
| IV.4.1      | Description du système                                       | 86         |
| IV.4.2      | Résultats expérimentaux                                      | 88         |
| IV.4.3      | Modèle électrique  | 90         |
| IV.4.4      | Modèle thermique   | 92         |
| IV.4.4.a    | <i>Bilan thermique du système pile</i>                       | 93         |
| IV.4.4.b    | <i>Puissance thermique dégagée par la réaction</i>           | 93         |
| IV.4.4.c    | <i>Flux échangé avec l'extérieur par la pile</i>             | 94         |
| IV.4.4.d    | <i>Flux évacué par les gaz</i>                               | 94         |
| IV.4.5      | Les périphériques  | 94         |
| IV.4.6      | Validation du modèle   | 97         |
| IV.4.6.a    | <i>Validation du modèle thermique</i>                        | 97         |
| IV.4.6.b    | <i>Validation du modèle électrique</i>                       | 100        |
| <b>IV.5</b> | <b>Le système électrolyseur</b>                              | <b>101</b> |
| IV.5.1      | Modélisation électrique et thermique                         | 101        |
| IV.5.2      | Les périphériques  | 103        |
| IV.5.3      | Validation du modèle   | 103        |
| IV.5.4      | Loi d'échelle de l'électrolyseur                             | 104        |
| <b>IV.6</b> | <b>Le stockage de gaz</b>                                    | <b>105</b> |
| <b>IV.7</b> | <b>Gestion et conversion de l'énergie au sein du système</b> | <b>106</b> |
| IV.7.1      | L'architecture du système                                    | 106        |
| IV.7.2      | Les convertisseurs   | 107        |
| IV.7.2.a    | <i>Les hacheurs (DC/DC)</i>                                  | 108        |
| IV.7.2.b    | <i>L'onduleur (convertisseur DC/AC)</i>                      | 109        |
| <b>IV.8</b> | <b>Conclusion</b>  | <b>110</b> |
|             | <b>Références bibliographiques</b>                           | <b>111</b> |

## **IV.1 Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre, les modèles sélectionnés pour notre outil de simulation. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système. D'autre part, des travaux ont déjà été réalisés au laboratoire en ce qui concerne les batteries au plomb (thèse de S. Biscaglia [IV-2]), les systèmes hybrides (thèse de C. Dumbs [IV-6]) et l'USEH (thèse S. Busquet, [IV-3]). Les résultats obtenus seront en partie réutilisés pour la modélisation de notre système. En revanche, en ce qui concerne la pile à combustible, nous avons réalisé un certain nombre d'expérimentations afin de caractériser ses comportements électrique et thermique, qui seront présentés au paragraphe IV.4.

Les composants modélisés sont :

- le système champ photovoltaïque : modélisation des modules PV et du module MPPT ;
- le pack batteries (plomb-acide) ;
- l'USEH qui comprend les sous-systèmes suivants :
  - le système pile à combustible (incluant le cœur de pile et son système périphérique) ;
  - le système électrolyseur (incluant le cœur d'électrolyse et son système périphérique) ;
  - le stockage de gaz (hydrogène) ;
- et les convertisseurs électriques, DC/DC et DC/AC.

## IV.2 Le champ photovoltaïque

Les Figure IV-1 et Figure IV-2 présentent les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque de 125 W<sub>crête</sub> produit par Photowatt [IV-11] pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.

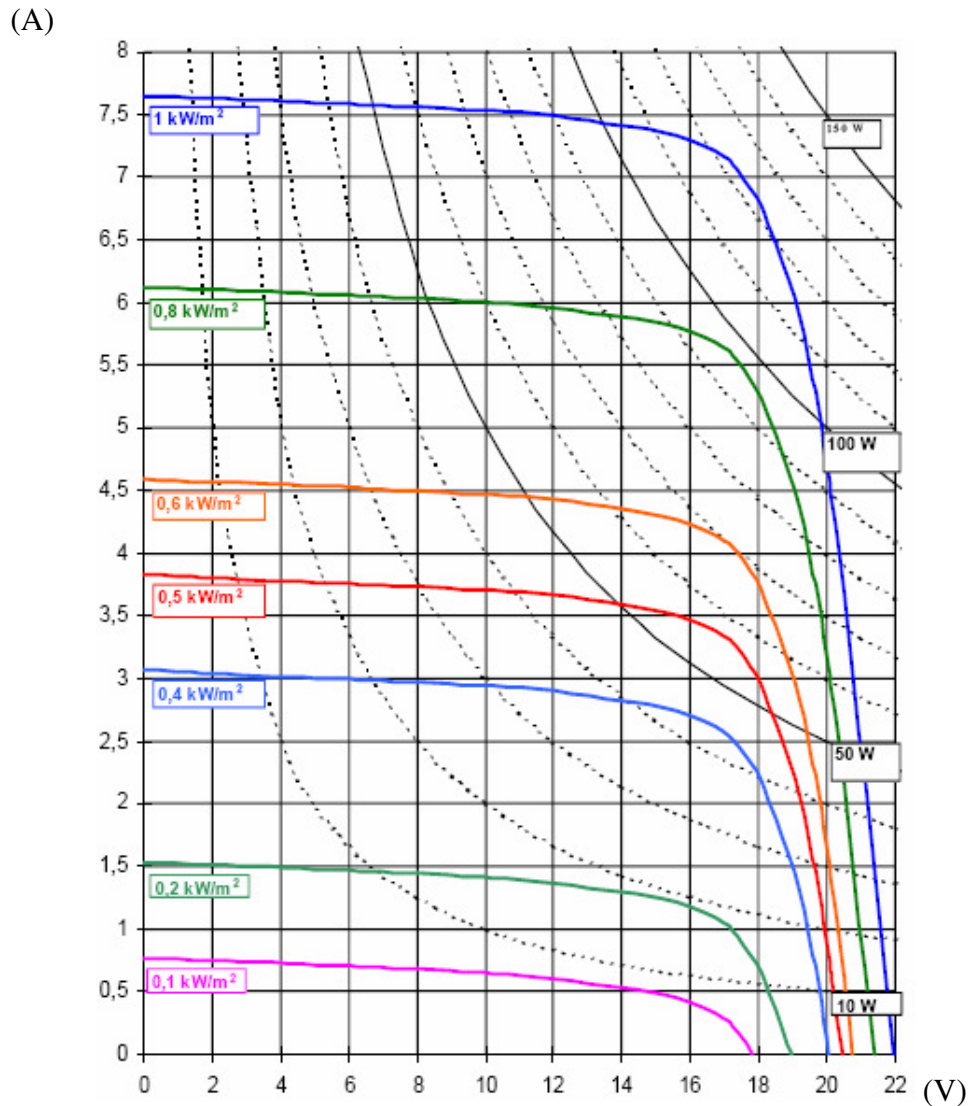


Figure IV-1 : caractéristiques I-U d'un module Photowatt PW 6-110 pour différentes irradiances solaires, à 25 °C [IV-11].

Quand l'ensoleillement croît, l'intensité de court-circuit augmente, les courbes U-I se décalent vers les valeurs croissantes, permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. En revanche, quand la température croît, la tension du module en circuit ouvert diminue et la conversion photovoltaïque est donc moins importante (voir figure suivante).

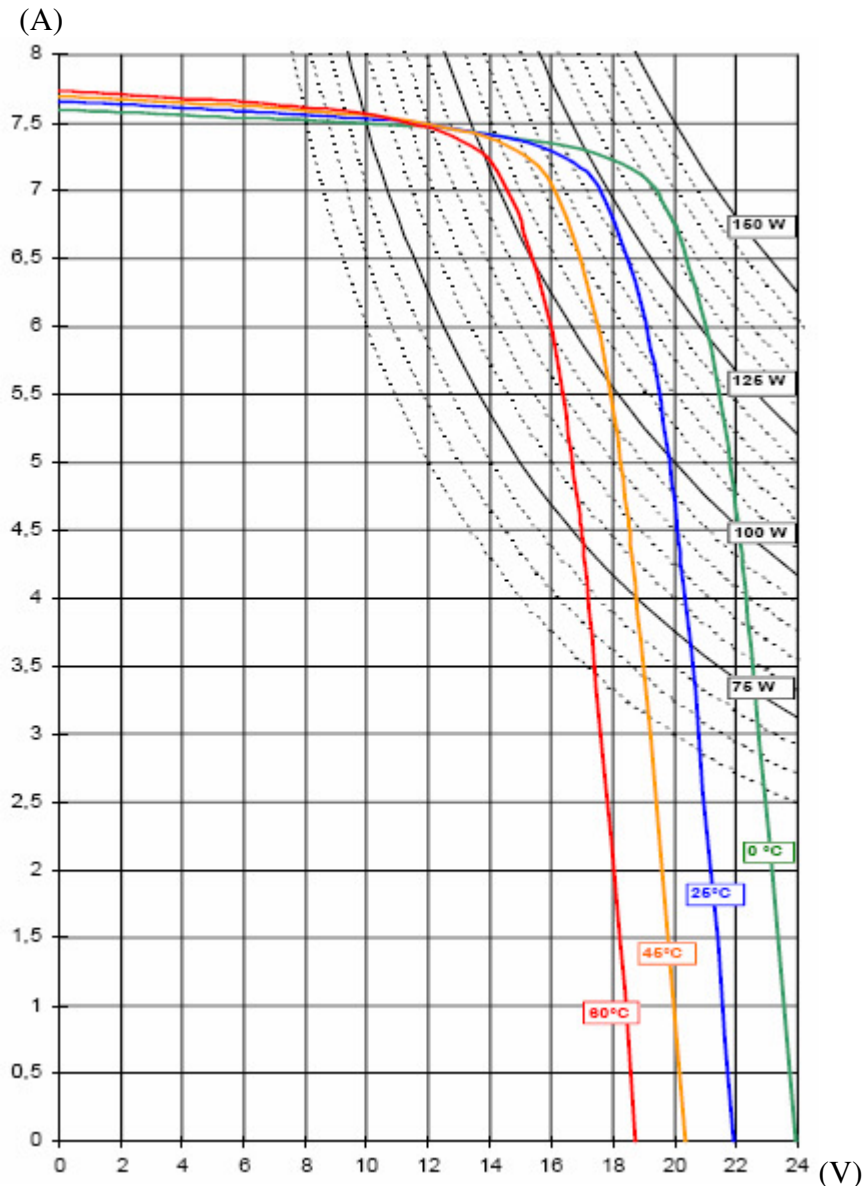


Figure IV-2 : caractéristiques I-U d'un module Photowatt PW 6-110 pour différentes températures [IV-11].

Le comportement des modules photovoltaïques a été largement étudié depuis plus de 20 ans. Des modèles plus ou moins complexes existent. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité et de sa qualité de résultats [IV-6]. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). Sa validation a déjà été réalisée au Centre d'Énergétique et Procédés sur une installation photovoltaïque de 3 kW, à Sophia-Antipolis [IV-6].

Dans les systèmes réels, le champ peut être raccordé à un appareil permettant de tirer parti du maximum de puissance solaire disponible au niveau du champ (MPPT, Maximum Power Point Tracking) en ajustant le niveau de tension sur la courbe caractéristique du module. L'intégration du module MPPT simplifie les équations présentes dans le modèle à une diode. Une seule équation empirique (équation IV-1) permet de connaître, en fonction des caractéristiques du constructeur du module, la puissance maximale  $P_{max}$  disponible à ses bornes, dans les conditions d'ensoleillement et de température considérées [IV-8].

$$P_{\max} = \frac{G_i}{G_i^\circ} \times [P_{\max}^\circ + \mu_{P_{\max}} \times (T_M - T_M^\circ)] \quad \text{équation IV-1}$$

avec :  $G_i$  : irradiation solaire globale du lieu considéré ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;  
 $G_i^\circ = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$  : irradiation solaire dans les conditions standards ;  
 $P_{\max}^\circ$  : puissance maximale du module dans les conditions standards ;  
 $\mu_{P_{\max}}$  : coefficient de variation de la puissance en fonction de la température ;  
 $T_M$  : température de fonctionnement du module en fonction de l'irradiation solaire et de la température ambiante, définie ci-après ;  
 $T_M^\circ = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  : température du module dans les conditions standards.

La température de fonctionnement du module est définie par l'équation suivante :

$$T_M = T_{\text{amb}} + G_i \times \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \quad \text{équation IV-2}$$

Avec :  $T_{\text{amb}}$  est la température ambiante ( $^\circ\text{C}$ )  
 où NOCT est la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de  $800 \text{ W}/\text{m}^2$ , une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  et une masse d'air optique AM égale à 1.

Finalement, la puissance du champ PV composé de N modules s'écrit :

$$P_{\text{MPPT}} = N \times P_{\max} \quad \text{équation IV-3}$$

Les données du module photovoltaïque PW 6-110 produit par Photowatt que nous souhaitons simuler sont résumées ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\max}^\circ = 125 \text{ W}_{\text{crête}} \\ \mu_{P_{\max}} = -0,43 \text{ } \%/^\circ\text{C} \\ \text{NOCT} = 43 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et dans sa facilité d'utilisation. On peut simuler tout type de module PV à partir des caractéristiques techniques données du constructeur.

### IV.3 Le stockage batterie

Le choix s'est porté sur des accumulateurs au plomb puisque c'est le principal type de batteries aujourd'hui utilisé dans les systèmes avec source photovoltaïque nécessitant du stockage électrique (voir chapitre II).

Le modèle utilisé pour la simulation a été développé par le CIEMAT (Research Center for Energy, Environment and Technology, Espagne, [IV-5]).

Il définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge. Enfin, le modèle intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène), phénomène propre aux batteries au plomb provoquant une importante élévation de la tension en fin de charge (voir paragraphe II.4.1.a.ii).

Les phénomènes d'autodécharge et de vieillissement n'ont pas été pris en compte.

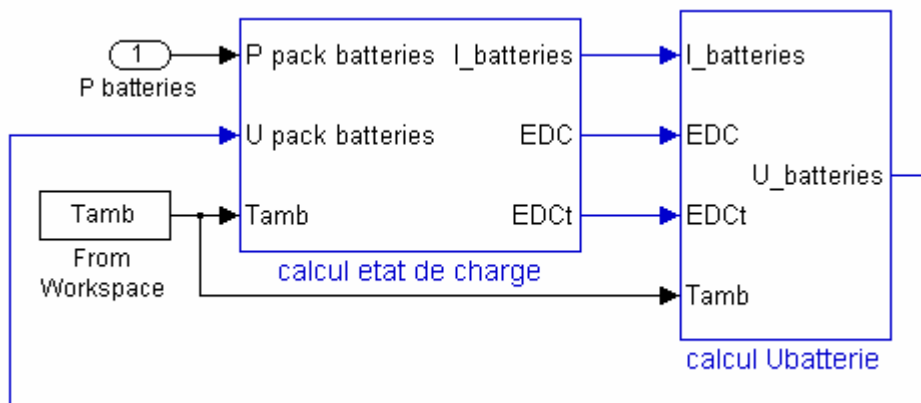


Figure IV-3 : schéma SIMULINK du modèle de batterie au plomb.

La figure ci-dessus présente le modèle du block batteries, dans son environnement Simulink. La puissance aux bornes de la batterie et la température ambiante (données d'entrées du modèle) permettent de calculer le courant imposé au block (équation IV-4), de mettre à jour l'état de charge *EDC* (dans l'objet « calcul état de charge relatif ») et finalement de calculer la tension du block (donnée de sortie du modèle).

$$I_{bat} = P_{bat}/U_{bat} \quad \text{équation IV-4}$$

### IV.3.1 Modèle de la capacité

$C_T$  représente la capacité limite disponible en décharge quand le courant tend vers 0.

$$C_T = 1,67 \times C_{10} \times (1 + 0,005 \times \Delta T) \quad \text{équation IV-5}$$

avec :  $C_{10}$  = capacité nominale de la batterie

$$\Delta T = T_{\text{amb}} - T_{\text{ref}} \text{ (où } T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C)}$$

La capacité ( $C_{bat}$ ) totale disponible en fonction du régime de décharge ( $I_{bat}$ ) est alors donnée par la relation suivante :

$$C_{bat} = C_{10} \times \frac{C_T}{1 + 0,67 \times \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0,9}} \quad \text{équation IV-6}$$

$I_{10}$  = courant de décharge en 10 h

Les tensions dépendent de deux états de charge  $EDC$  et  $EDC_T$  qui sont calculés selon les équations suivantes :

$$EDC = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} \quad \text{équation IV-7}$$

$$EDC_T = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_T} \quad \text{équation IV-8}$$

Et la capacité  $Q_{bat}$  du block batteries à l'instant  $t$  s'obtient en fonction de la valeur du courant  $I_{bat}$ , du rendement faradique de charge  $\eta_{charge}$  (décrit ci-après) et de l'état de charge calculé à l'instant précédent  $Q_{t-1}$  selon :

$$Q_{bat} = \begin{cases} Q_{t-1} + \eta_{charge} \times Q(t) & \text{si } I_{bat} > 0 \\ Q_{t-1} + Q(t) & \text{si } I_{bat} < 0 \end{cases} \quad \text{équation IV-9}$$

$$Q(t) = \int_0^t I_{bat}(t) \times dt \quad \text{équation IV-10}$$

Lorsque  $t = 0$ ,  $Q_{t-1}$  est la capacité initiale du block batteries.

### IV.3.2 Modèle du rendement faradique

Le rendement faradique est pris en compte dans le cas de la charge [IV-6] dans l'équation IV-10. Il est fonction du courant de charge  $I_{bat}$  et de l'état de charge  $EDC$  comme le montre l'équation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp\left(\frac{a}{b + \frac{I_{bat}}{I_{10}}}(EDC - 1)\right) \quad \text{équation IV-11}$$

où  $a = 20,73$  et  $b = 0,55$  pour le type de batteries testés.

### IV.3.3 Modèle de la tension

La s-fonction 'sfUBAT5' (voir Figure IV-3) calcule la tension de la batterie selon la valeur du courant  $I_{bat}$  :

$$V_{bat} = \begin{cases} V_{bat\_dech} & \text{si } I_{bat} < 0 \\ V_{bat\_ch} & \text{si } I_{bat} > 0 \text{ ou } = 0 \text{ et si } V_{bat\_ch} < V_g \\ V_{bat\_oc} & \text{si } I_{bat} > 0 \text{ et si } V_g \leq V_{bat\_oc} \leq V_{ec} \\ V_{ec} & \text{sinon} \end{cases}$$

où les tensions ont les expressions suivantes :

- en décharge :

$$V_{bat\_dech} = [1,965 + 0,12 \times EDC] - \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \times \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) \times (1 - 0,007 \times \Delta T) \quad \text{équation IV-12}$$

- en charge :

$$V_{bat\_ch} = [2 + 0,16 \times EDC] + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \times \left( \frac{6}{1 + I_{bat}^{0,6}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \times (1 - 0,025 \times \Delta T) \quad \text{équation IV-13}$$

- en surcharge :

$$V_{bat\_oc} = V_{ec} + (V_g - V_{ec}) \times e^{\left(-\frac{t - t_g}{\tau_g}\right)} \quad \text{équation IV-14}$$



$t_g$  est l'instant où commence le « gassing ». Ainsi  $(t-t_g)$  est la durée pendant laquelle s'opère le gassing. La constante de temps  $\tau_g$  s'exprime suivant :

$$\tau_g = \frac{1,73}{1+852 \times \left( \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right)^{1,67}} \quad \text{équation IV-15}$$

La tension de gassing  $V_g$  et la tension de fin de charge  $V_{ec}$  ont pour expression :

$$V_g = \left[ 2,24 + 1,97 \times \ln \left( 1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] \times (1 - 0,002 \times \Delta T) \quad \text{équation IV-16}$$

$$V_{ec} = \left[ 2,45 + 2,011 \times \ln \left( 1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] \times (1 - 0,002 \times \Delta T) \quad \text{équation IV-17}$$

#### IV.3.4 Validation du modèle

Les caractéristiques du type de batteries retenu pour la simulation sont les suivantes :  
 Type : PowerSafe, 12XP160 fabriquée par ENERSYS (batterie plomb acide fermée) ;  
 Capacité nominale :  $C_{nom} = C_{10} = 140 \text{ Ah}$  ;  
 $I_{10} = 14 \text{ A}$  ;  
 $U_{nom} = 12 \text{ V}$ .

La validation de ce modèle a été pleinement réalisée dans les thèses de C. Dumbs [IV-6] et de O. Gergaud [IV-7]. Ce dernier montre que, contrôlé en puissance, le modèle du CIEMAT livre une réponse satisfaisante. En l'occurrence, dans le cadre de notre étude, le fonctionnement du système repose sur des égalités de puissance entre la fourniture et la consommation, les dimensionnements sont basés sur des bilans énergétiques annuels, ce qui confirme la bonne utilisation faite du modèle.

Ce modèle reste cependant discutabile sur certains points.

1. L'équation IV-12 et l'équation IV-13 utilisées pour le calcul de la tension révèlent une discontinuité entre la charge et la décharge à courant nul. En effet, les premiers termes de ces équations qui correspondent à la tension à vide de l'élément ne sont pas égaux pour un même  $EDC$  (de 35 à 75mV d'écart pour un  $EDC$  variant de 0 à 1). Nous avons choisi arbitrairement de calculer la tension du block batteries, lorsque le courant est nul, à l'aide de l'équation IV-13.

2. Les figures suivantes présentent quelques courbes de charge et de décharge à 25°C pour l'élément choisi.

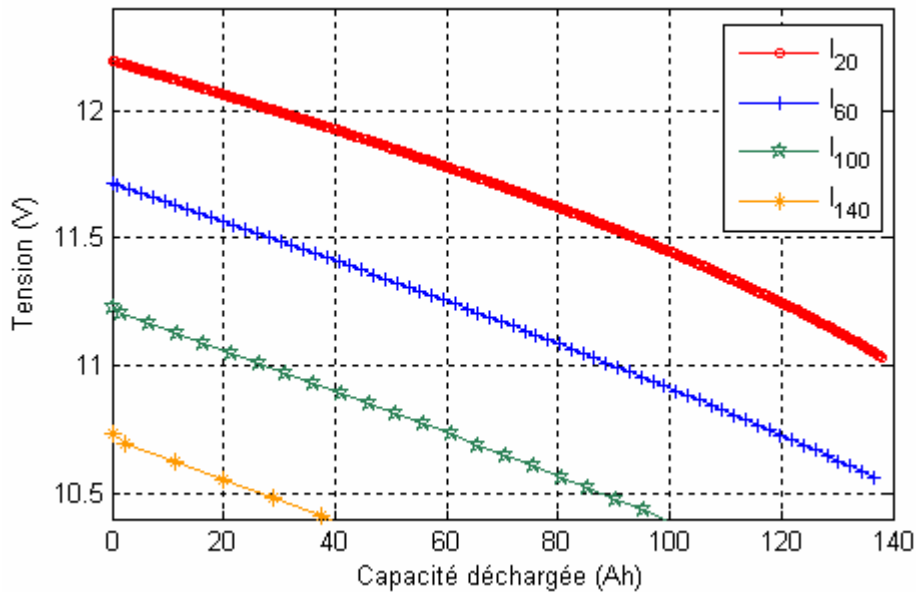


Figure IV-4 : courbes de décharge de la batterie au plomb à différents régimes.

On peut noter que l'importante diminution de la tension en fin de décharge, caractéristique des batteries au plomb, n'est pas parfaitement modélisée. Dans le cadre des simulations qui nous préoccupe, l'état de charge des batteries varie entre 30 % et 95 %. Ce défaut de modélisation n'aura donc aucune incidence sur les résultats de simulation.

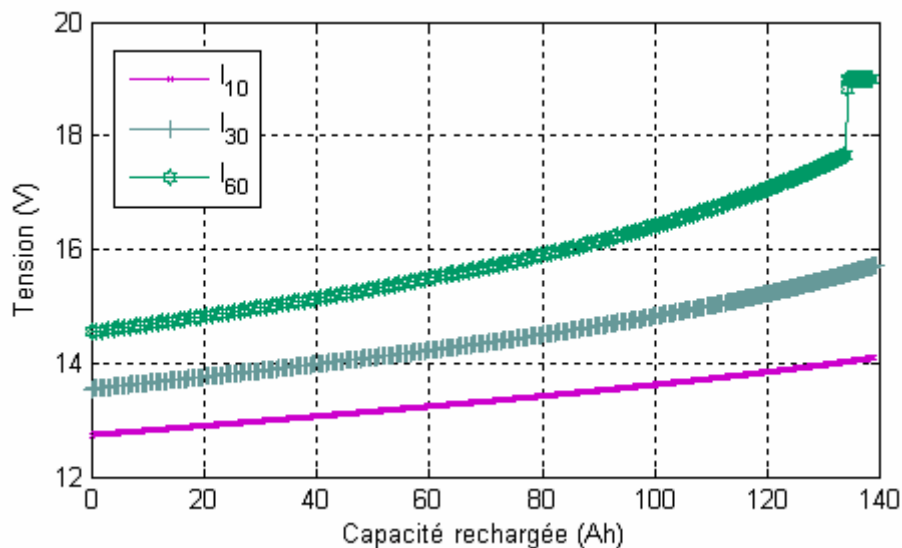


Figure IV-5 : courbes de charge de la batterie au plomb à différents régimes (10A, 30A, 60A).

3. Les courbes de charge présentées sur la figure ci-dessus font apparaître la phase de dégazage dans le cas de la recharge à 60 A, illustrée par la brusque élévation de la tension en fin de charge.

En pratique, une recharge complète de batteries au plomb s'effectue en plusieurs étapes :

- une phase 'courant constant' jusqu'à atteindre une certaine valeur de tension, à partir de laquelle démarre
- une phase 'tension constante' qui se poursuit soit jusqu'à ce que le courant atteigne une valeur nulle, soit pendant une durée déterminée.

Cette seconde phase permet la recharge complète de la batterie tout en évitant sa dégradation. Mais une telle recharge (qui dure généralement plus de dix heures) ne s'adapte qu'à des applications permettant un repos prolongé de la batterie.

Dans le cas d'applications avec source renouvelable, la batterie est constamment sollicitée. Son état de charge oscille entre deux bornes inférieure et supérieure. Ceci permet de protéger la batterie contre des états de charge extrêmes (ainsi que les phases de gassing), néfastes à sa durée de vie.

L'impact des erreurs de ce modèle sur les résultats de simulation reste néanmoins négligeable dans le cadre de l'utilisation qui en est faite, pour les raisons invoquées précédemment.

## ***IV.4 Le système pile à combustible***

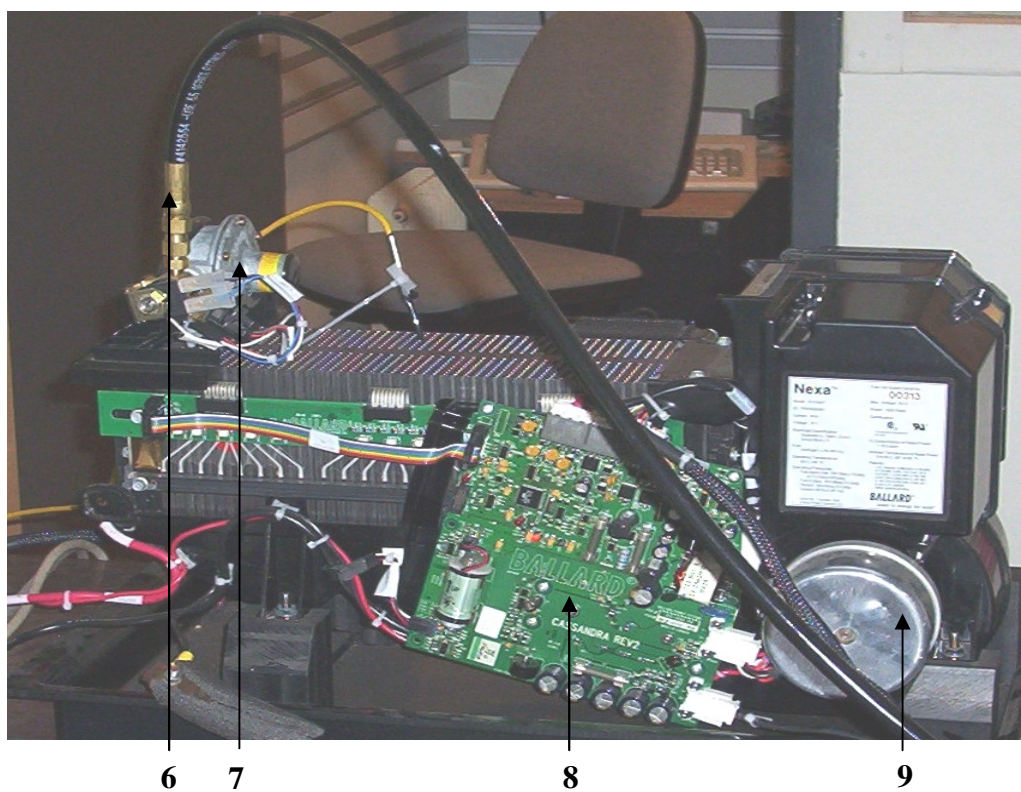
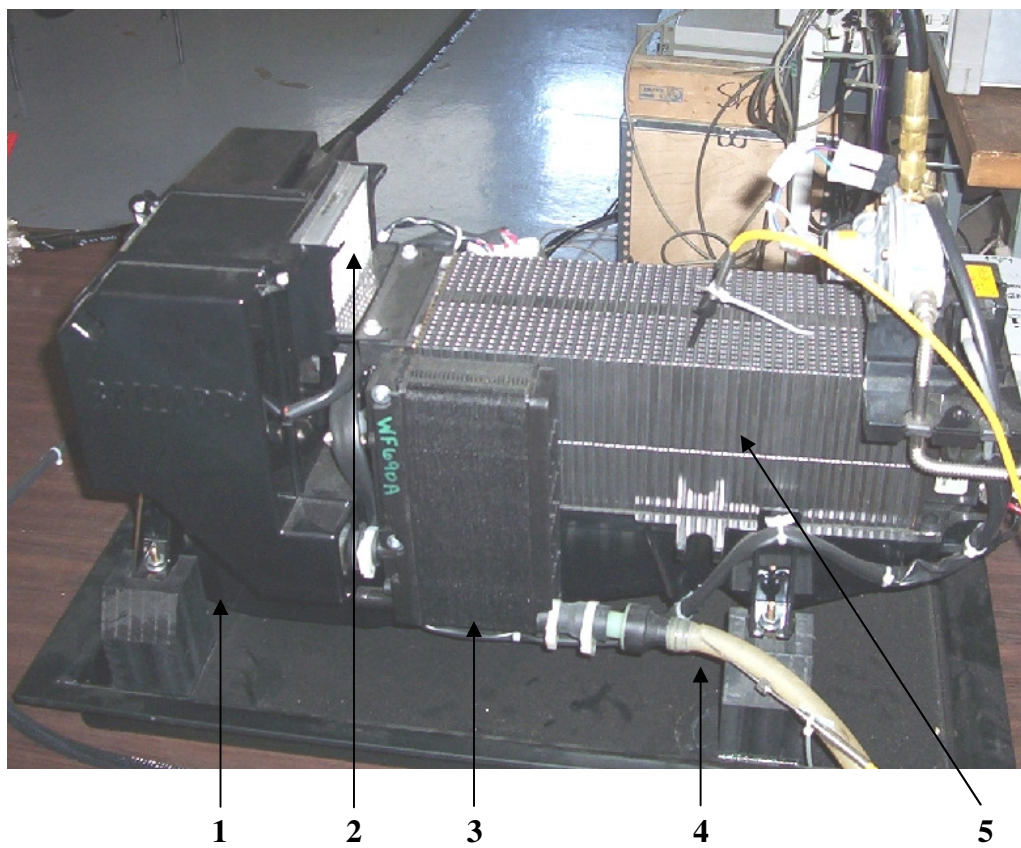
### **IV.4.1 Description du système**

Le système pile à combustible modélisé dans le cadre de notre étude possède les caractéristiques suivantes :

- module NEXA™ fabriqué par Ballard ;
- puissance maximale = 1,2 kWe ;
- technologie PEM (à membrane échangeuse de protons) ;
- 50 cellules en série ;
- surface des cellules : 100 cm<sup>2</sup> ;
- alimentée en hydrogène pur ( $P_{\min} = 1,2$  bar) et en air ambiant ( $P = 1,15$  bar) ;
- refroidissement à air pulsé.

Dans les deux photos suivantes, certains organes de la pile apparaissent :

1. entrée air refroidissement ;
2. entrée air 'process' ;
3. humidificateur de l'air 'process' ;
4. sortie air 'process' résiduel et hydrogène en excès ;
5. cœur de pile ;
6. entrée hydrogène ;
7. régulateur de pression ;
8. carte électronique de contrôle de la pile ;
9. compartiment moteur du ventilateur.



*Figure IV-6 : vues de côté de la pile à combustible NEXA de Ballard ; les différents organes du système.*

#### IV.4.2 Résultats expérimentaux

On peut présenter quelques relevés de mesures faites à l'occasion de diverses campagnes de test. Les données présentées ici ont été enregistrées par le logiciel qui accompagne la pile.

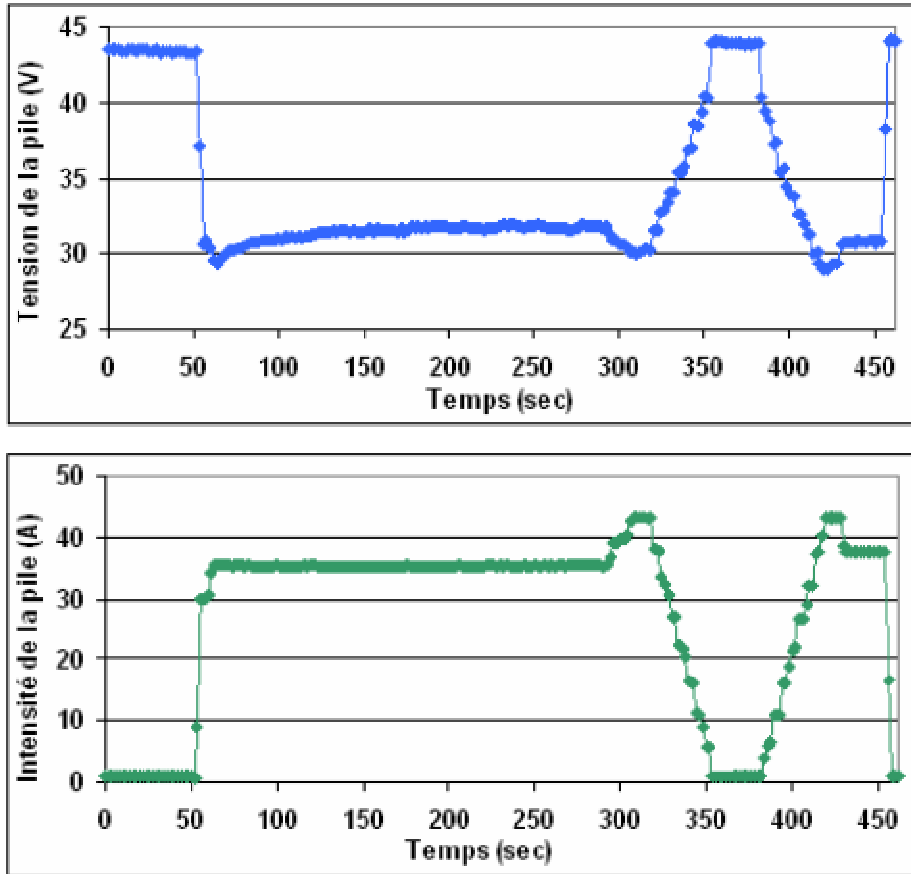


Figure IV-7 : essai à courant constant suivi d'une variation de l'intensité de 43 à 1A en aller-retour.

Il s'agit d'un essai à intensité constante (35 A) suivi d'une variation du courant de 43 à 1 A, en aller-retour. Cet essai permet de tracer la caractéristique tension-intensité de la pile relative à son fonctionnement électrique, illustrée par la figure suivante.

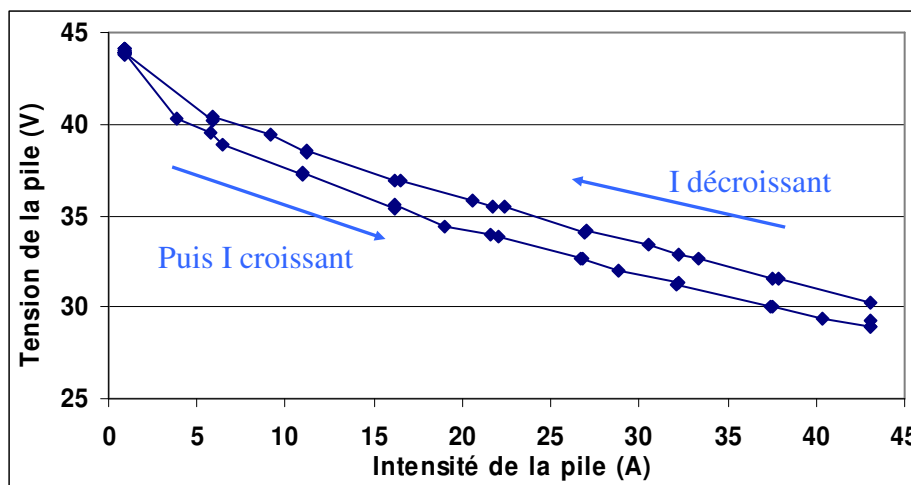


Figure IV-8 : caractéristique Courant-Tension de la pile à combustible Nexa à  $T_{moyen} = 50^{\circ}C$ .

Les points de fonctionnement ici présentés correspondent à un régime électrique stationnaire. L'hystérésis observée sur cette courbe est due à l'évolution de la température (décroissance) au cours de cet essai.

La dynamique électrique de la pile est rapide. Le régime transitoire observé lors d'un brusque changement de l'intensité demandée révèle un temps de réponse inférieur à 300 ms, comme le montre la Figure IV-9.

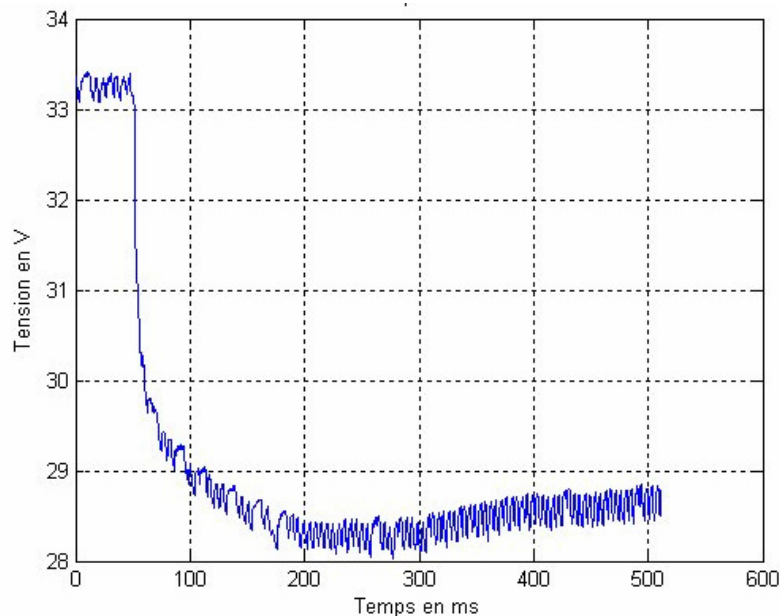


Figure IV-9 : évolution de la tension de la pile lors d'un échelon de courant de 20 à 40 A.

La légère remontée de la tension à partir de  $t = 300$  ms est encore une fois due à l'évolution de la température (à 40 A, l'échauffement de la pile est important).

Ces mesures montrent l'importance de l'impact du comportement thermique de la pile sur sa réponse électrique. La figure suivante présente l'évolution de la température au cours de l'essai présenté dans la Figure IV-7.

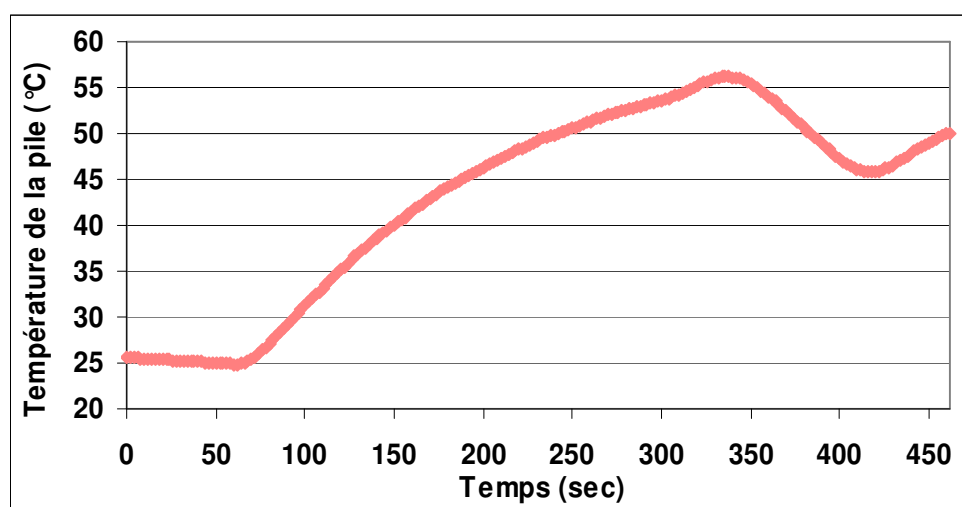


Figure IV-10 : évolution de la température au cours de l'essai à courant constant suivi d'une variation du courant.

Plusieurs modèles sont donc nécessaires pour simuler correctement le comportement de la pile. Le modèle électrique permet de calculer le point de fonctionnement en fonction du courant demandé, de la température et de la pression des gaz. Le modèle thermique permet de calculer l'évolution de la température dans le composant.

#### IV.4.3 Modèle électrique

Le modèle utilisé dans la simulation a été développé au laboratoire, il est décrit en détail dans l'article référencé [IV-4]. Ce modèle électrique est semi-empirique. Il permet une cohérence mathématique de l'équation utilisée par rapport à la forme de la courbe caractéristique expérimentale.

$$V_{cell}(J) = E_{oc} + \frac{b}{\ln\left(\frac{J}{J_d \times e^2}\right)} + \left(\frac{b}{4 \times J_d} - \Delta\right) \times J \quad \text{équation IV-18}$$

où  $V_{cell}$             potentiel d'une cellule (V) ;  
 $J$                     densité de courant ( $A.m^{-2}$ ) ;  
 $E_{oc}$                 tension de circuit ouvert de la cellule (V) ;  
 $J_d, b, \Delta$         paramètres du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène.

L'équation IV-18 permet de modéliser le comportement de la tension pour des fortes densités de courant (effondrement). Dans cette zone, apparaissent des problèmes de diffusion des espèces actives qui peuvent entraîner une détérioration irréversible des composants. Elle est généralement 'évitée' en imposant une tension limite (environ 0,5 V/cellule pour la pile à combustible) afin de préserver la durée de vie des cellules.

Afin de se rapprocher des équations théoriques de Nernst et de Butler-Volmer, les quatre paramètres  $E_{oc}$ ,  $b$ ,  $J_d$  et  $\Delta$  doivent dépendre de la température et de la pression partielle en oxygène. Ils s'expriment en fonction de trois termes comme le montre l'équation IV-19.

$$\begin{bmatrix} E \\ J_d \\ b \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \\ J_{d1} & J_{d2} & J_{d3} \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ \Delta_1 & \Delta_2 & \Delta_3 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \frac{1}{T} \\ T \times \ln(P_{O_2}) \end{bmatrix} \quad \text{équation IV-19}$$

Douze constantes doivent finalement être déterminées en utilisant quatre couples ( $J-V_{cell}$ ) pour quatre paires ( $T, P_{O_2}$ ) différentes. Ces constantes sont déterminées à partir de résultats expérimentaux, par minimisation de la différence entre la courbe théorique et les données mesurées, en utilisant la méthode du Simplex comme algorithme d'optimisation.



Les coefficients électriques pour la pile à combustible NEXA sont donnés dans le tableau suivant.

|       |      |      |                         |
|-------|------|------|-------------------------|
| E_fc  | 1,14 | 1,03 | - 8,85.10 <sup>-2</sup> |
| Jd_fc | 1,19 | 1,07 | - 9,22.10 <sup>-2</sup> |
| b_fc  | 5,44 | 4,90 | - 4,21.10 <sup>-1</sup> |
| Δ_fc  | 0,57 | 0,52 | - 4,46.10 <sup>-2</sup> |

Tableau IV-1 : coefficients de l'équation électrique pour la pile à combustible NEXA.

### Rendement faradique :

Les débits d'hydrogène et d'oxygène consommés par la pile sont directement proportionnels à l'intensité et au rendement faradique de l'appareil.

$$F_{\text{gaz}} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \frac{1}{\eta_F} \quad \text{équation IV-20}$$

avec :

$F_{\text{gaz}}$  flux de gaz (mol.s<sup>-1</sup>) ;

$n_c$  nombre de cellules ;

$I$  intensité du composant (A) ;

$\eta_F$  rendement faradique ;

$n$  nombre de moles d'électrons échangés par mole d'eau ( $n = 2$  pour H<sub>2</sub>,  $n = 4$  pour O<sub>2</sub>).

Le rendement faradique  $\eta_F$  provient du fait qu'une partie de l'hydrogène et de l'oxygène migre à travers la membrane et se recombine sans que l'on puisse en récupérer l'énergie. Ce rendement est généralement très proche de 1.

Le rendement faradique de la pile est considéré constant quel que soit le point de fonctionnement :

$$\eta_F = 0,99$$

#### IV.4.4 Modèle thermique

Le refroidissement des cellules de la pile s'opère par ventilation d'air ambiant au niveau du cœur de pile. La figure suivante présente les mesures faites par le logiciel de la pile relatives au fonctionnement du ventilateur, pendant un essai à intensité constante (45 A).

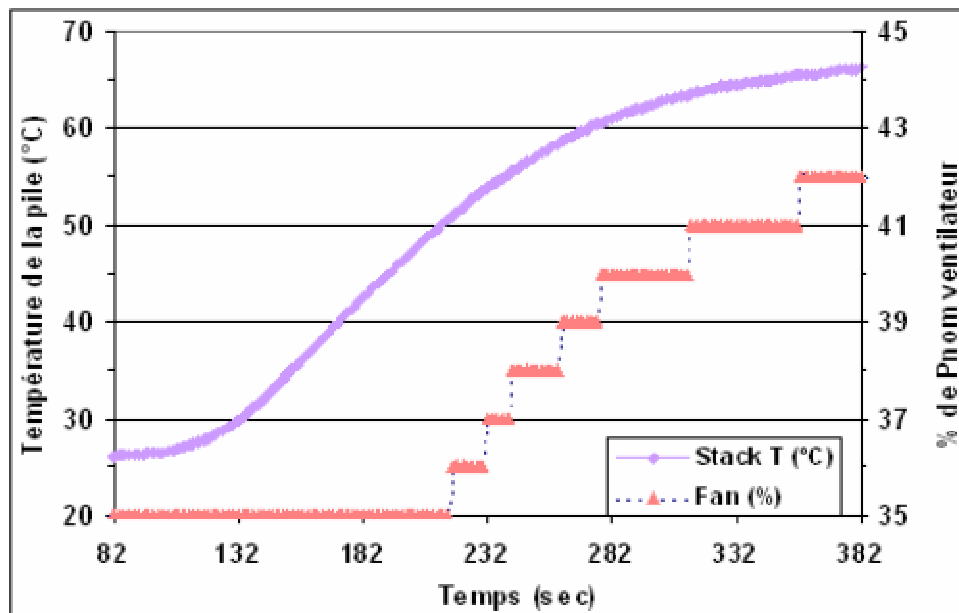


Figure IV-11 : illustration du fonctionnement du ventilateur et évolution de la température au cours de l'essai.

On met en évidence l'asservissement du ventilateur en fonction de la température de fonctionnement de la pile, dans la figure suivante.

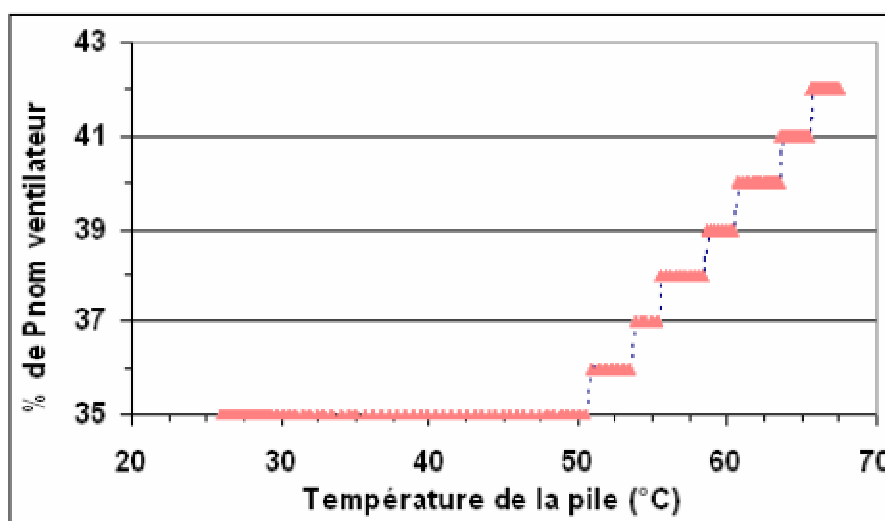


Figure IV-12 : comportement du ventilateur en fonction de la température de la pile.

On observe que pour  $T_{pile} < 50,5 \text{ °C}$  le régime du ventilateur est constant, égal à 35 % de son régime nominal, qui nous est par ailleurs inconnu. Pour  $T_{pile} > 50,5 \text{ °C}$ , le régime du ventilateur croît linéairement avec la température de la pile, à raison de 1 % par palier de 2°C en moyenne. Des essais complémentaires confirment ce comportement dans une gamme de températures s'étalant de 50 à 70 °C.

Une modélisation analytique du fonctionnement du ventilateur est ici délicate voire impossible au vu du peu d'informations disponibles sur ce composant (dimensions, régime nominal, consommation électrique). La prise en compte de son comportement au niveau des équations thermiques sera faite de manière empirique, en introduisant un coefficient d'échange de la pile avec l'extérieur, variable selon la température.

#### IV.4.4.a Bilan thermique du système pile

Le bilan thermique au niveau de la pile conduit à l'équation suivante :

$$C_p \left( \frac{d\theta}{dt} \right) = P_{th} - \varphi_{ext} - \varphi_{gaz} \quad \text{équation IV-21}$$

où :

$$\theta = T_{pile} - T_{ambiante} \text{ ;}$$

$P_{th}$  : puissance thermique dégagée par la réaction ;

$\varphi_{ext}$  : flux échangé avec l'extérieur par la pile ;

$\varphi_{gaz}$  : flux évacué par les gaz.

L'évolution de la température dépend de la capacité thermique du composant  $C_p$ , de la puissance thermique produite par la réaction électrochimique  $P_{th}$  et de la perte liée au contact avec l'extérieur  $\varphi_{ext}$ . On peut ajouter à ce modèle un terme lié au flux de gaz  $\varphi_{gaz}$  entrant, bien que cette quantité reste négligeable devant les précédentes.

#### IV.4.4.b Puissance thermique dégagée par la réaction

$$P_{th} = N_s \times (U_{tn} - U) \times I \quad \text{équation IV-22}$$

où :

$N_s$  nombre de cellules ;

$U$  tension d'une cellule (V) ;

$U_{tn}$  tension thermoneutre d'une cellule (V) ( $U_{tn} = 1,48 \text{ V}$ ) ;

$I$  intensité (I).

#### IV.4.4.c Flux échangé avec l'extérieur par la pile

L'équation suivante permet de calculer dans le cas général, le flux de chaleur échangé avec l'extérieur.

$$\varphi_{ext} = h_{ext} \times \theta \quad \text{équation IV-23}$$

où  $h_{ext}$  est le coefficient d'échange de la pile avec l'extérieur ( $W.K^{-1}$ ).

Comme indiqué précédemment, nous avons introduit un coefficient d'échange de la pile avec l'extérieur qui varie linéairement avec la température, quand  $T_{pile} > 323 K$ , selon les phénomènes observés et commentés en début de paragraphe.

$$\left. \begin{array}{l} \text{pour } T_{pile} \leq 323 K : \quad h_{ext1} \\ \text{pour } T_{pile} > 323 K : \quad h_{ext2} = kh \times T_{pile} - h_0 \end{array} \right\} \quad \text{équation IV-24}$$

Les paramètres  $h_{ext1}$ ,  $h_0$  et  $kh$  seront définis dans le paragraphe de validation (IV.4.6.a).

#### IV.4.4.d Flux évacué par les gaz

$$\varphi_{gaz} = (C_{p H_2} \times F_{H_2} + C_{p air} \times F_{air}) \times \theta \quad \text{équation IV-25}$$

où :  $C_{p i}$  capacité molaire calorifique du gaz  $i$  ( $J.mol^{-1}.K^{-1}$ ) ;  
 $F_i$  débit molaire de gaz  $i$  ( $mol.s^{-1}$ ).

et :

$$C_{p H_2} = 30 J.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_{p air} = 29,12 J.mol^{-1}.K^{-1}$$

### IV.4.5 Les périphériques

Le système périphérique assure la gestion des flux et la pression des gaz consommés par la pile, ainsi que sa température. Il est composé de divers appareils, comme un ventilateur (pour assurer le refroidissement de la pile), un compresseur (pour l'alimentation en air de la pile), des électrovannes et des capteurs (de pression, de tension, de courant, etc.).

**Le système périphérique est connecté en parallèle du cœur de pile.** La tension à ses bornes est donc identique à celle aux bornes du cœur de pile. En revanche, une partie du courant produit par la pile alimente le système périphérique.

On a donc :  $I_{pile} = I_{periph} + I_{utilisateur}$ .

A l'aide de mesures relevées lors de tests effectués au laboratoire sur la pile à combustible NEXA, la consommation électrique des périphériques a pu être évaluée. La figure suivante présente l'évolution de cette consommation au cours de l'acquisition de la courbe caractéristique U-I de la pile, de 0 à 50 A. Le courant mesuré ne concerne ici que la partie réellement fournie par la pile à l'utilisateur ( $I_{utilisateur}$ ).

La puissance consommée par le système périphérique s'échelonne entre environ 30 W à courant  $I_{\text{utilisateur}}$  nul, et 120 W environ à 50 A. On note un bruit important dans le signal de  $I_{\text{périph}}$  dû au découpage du courant alimentant les moteurs du ventilateur et du compresseur.

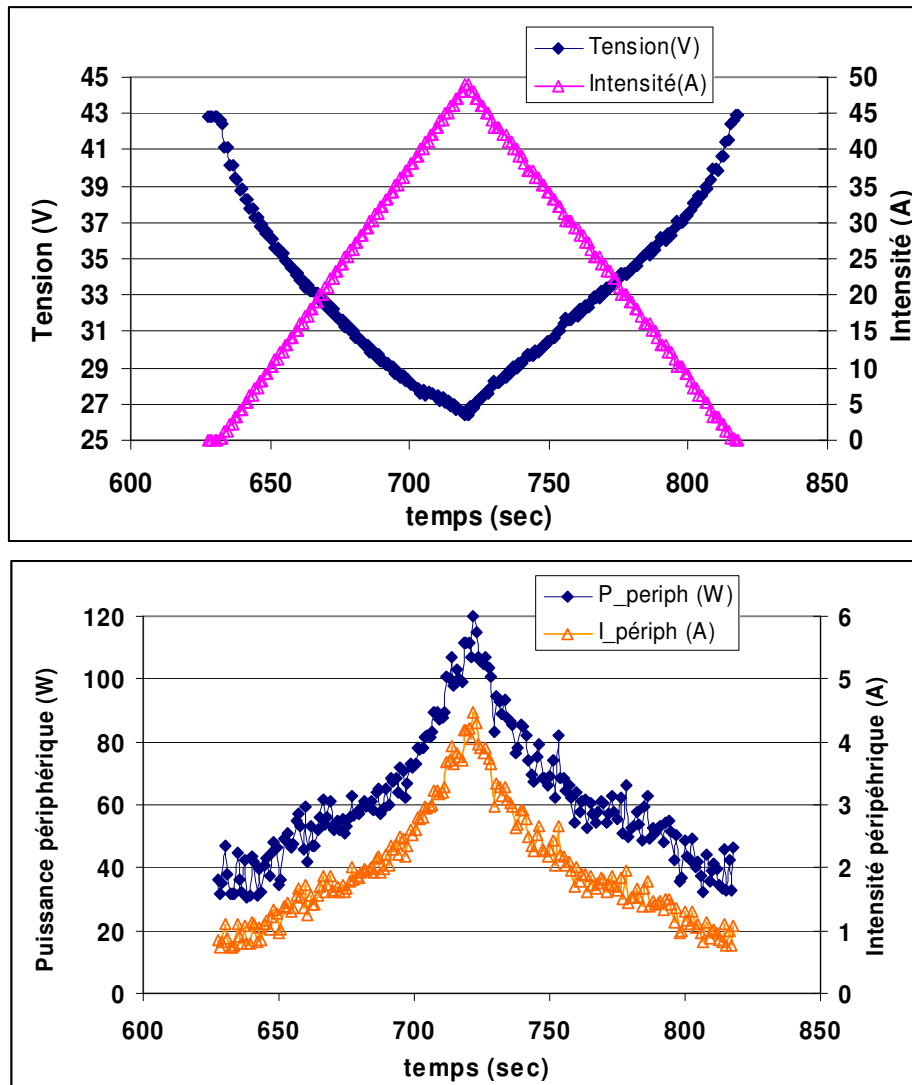


Figure IV-13 : évolution de la consommation des périphériques de la pile Ballard au cours d'un essai de courbe U-I.

Dans la figure suivante, on représente  $I_{\text{périph}}$  en fonction de  $I_{\text{pile}}$  pour déterminer la corrélation entre ces deux grandeurs. Pour une meilleure appréciation des tendances, ici le signal a été lissé.

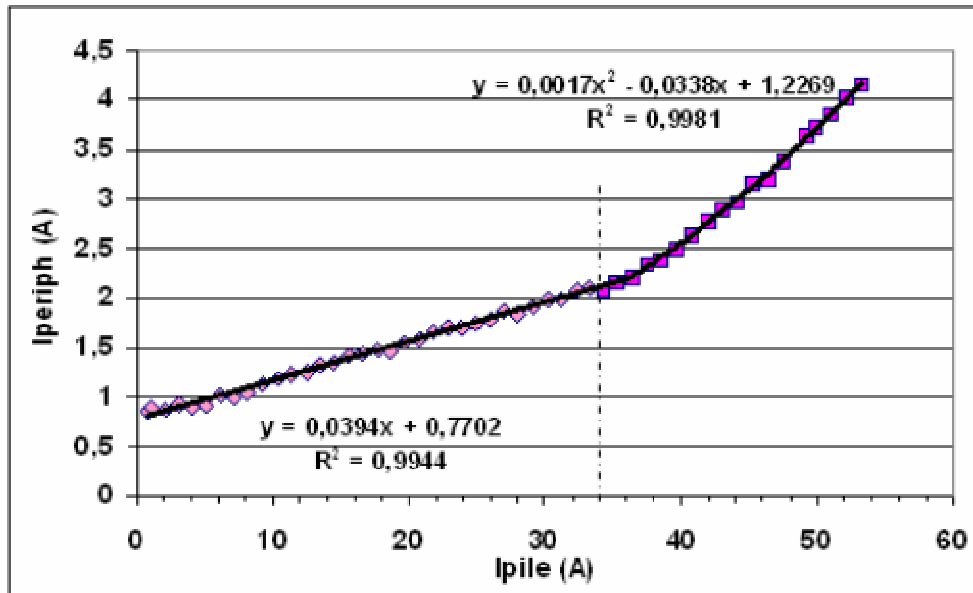


Figure IV-14 : évolution du courant du système périphérique en fonction du courant total délivré par la pile.

On peut séparer le domaine de variation de  $I_{\text{périph}}$  en deux parties :

1. pour  $I_{\text{pile}} < 34$  A, la courbe croît linéairement ;
2. pour  $I_{\text{pile}} > 34$  A, la courbe croît selon une fonction polynomiale d'ordre deux.

Les équations des courbes ont été déterminées par régression d'ordre 1 pour  $I_{\text{pile}} < 34$  A et d'ordre 2 pour  $I_{\text{pile}} > 34$  A. Ce comportement a été pris en compte dans le simulateur de la manière suivante :

| Régime de la pile                  | Régime des périphériques   |
|------------------------------------|--|
| $I_{\text{utilisateur}} = 0$ A     | $P_{\text{périph}} = 30$ W   |
| $I_{\text{utilisateur}} \leq 34$ A | $P_{\text{périph}} = (0,0394 * I_{\text{pile}} + 0,7702) * U_{\text{pile}}$                              |
| $I_{\text{utilisateur}} > 34$ A    | $P_{\text{périph}} = (0,0017 * I_{\text{pile}}^2 - 0,0338 * I_{\text{pile}} + 1,2269) * U_{\text{pile}}$ |

Tableau IV-2 : les différentes consommations des périphériques.

Mais la modélisation de ce comportement reste assez simple et sa réutilisation doit se faire avec précaution. Des essais complémentaires permettraient d'accéder à des informations plus détaillées et finalement de produire un modèle plus fin.

#### **IV.4.6 Validation du modèle**

La validation des différentes parties du modèle de la pile est présentée dans ce paragraphe.

La validation du modèle thermique est faite sur deux essais :

1. un essai à courant constant (Figure IV-15) ;
2. un essai où l'intensité varie de 0 à 55 A (Figure IV-16).

La validation du modèle électrique est faite sur des courbes caractéristiques U-I à différentes températures, obtenues en balayant la plage de fonctionnement en courant de la pile, à taux constant ( $dI/dt = 1 \text{ A.s}^{-1}$ ). Les résultats sont présentés Figure IV-17.

##### IV.4.6.a Validation du modèle thermique

Lors de ces deux essais, nous avons comparé la réponse du modèle thermique à la température mesurée de la pile. Nous avons pu déterminer par optimisation les valeurs des paramètres  $C_p$ ,  $h_{\text{ext1}}$ ,  $kh$  et  $h_0$  (voir paragraphes IV.4.4.a et IV.4.4.c).

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| $C_p$             | 5700 J.K <sup>-1</sup>  |
| $h_{\text{ext1}}$ | 52,98 W.K <sup>-1</sup> |
| $h_0$             | 212 W.K <sup>-1</sup>   |
| $kh$              | 0,82 W.K <sup>-2</sup>  |

*Tableau IV-3 : valeur des coefficients du modèle thermique pour la pile à combustible.*

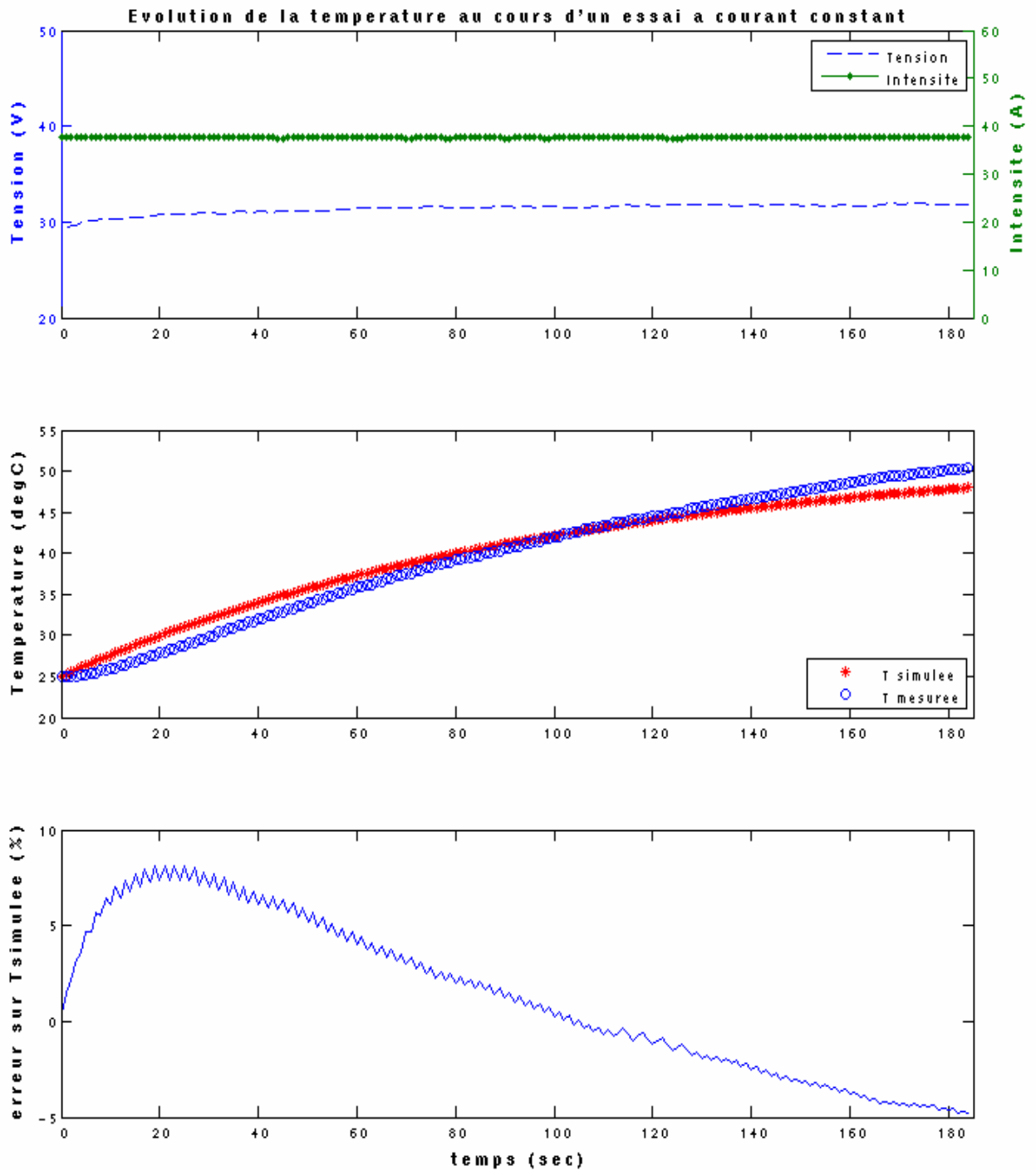


Figure IV-15 : essai à courant constant ; évolution de la température de la pile.



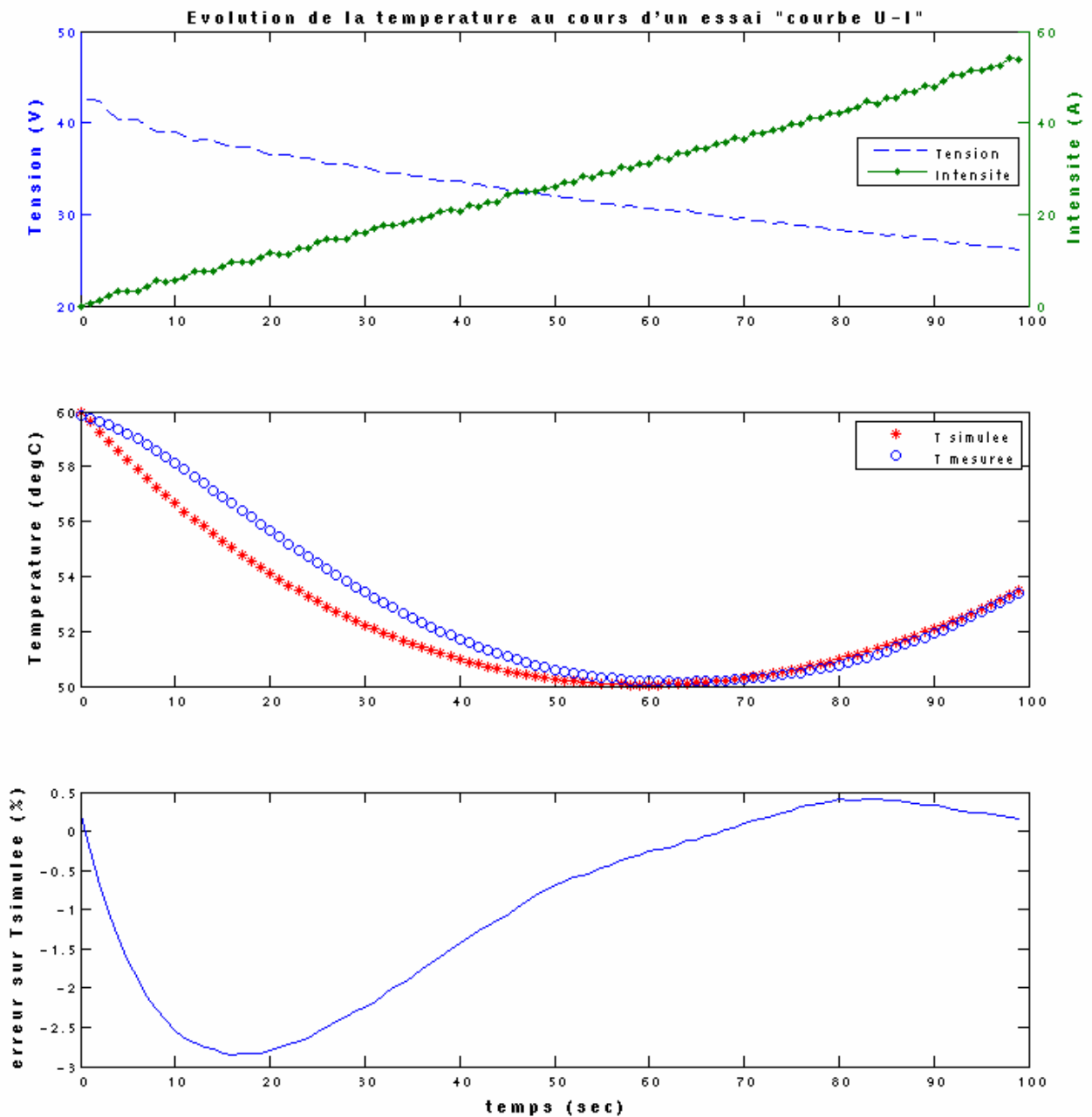


Figure IV-16 : essai courbe U-I ; évolution de la température de la pile.

Les erreurs calculées entre la température simulée et les données mesurées varient entre -5 et 7 % pour l'essai à courant constant et entre -3 et 0,5 % lors de l'essai 'courbe U-I'. Bien que ces erreurs semblent relativement importantes (au moins en ce qui concerne l'essai à courant constant), elles n'engendrent que peu d'erreurs sur le modèle électrique, comme l'indique la Figure IV-17.

#### IV.4.6.b Validation du modèle électrique

Le modèle électrique a été testé sur cinq courbes U-I à différentes températures. La bonne corrélation entre les courbes simulées et les courbes expérimentales permet de valider les valeurs des paramètres électriques (voir paragraphe IV.4.3) et de confirmer la faible influence des erreurs du modèle thermique.

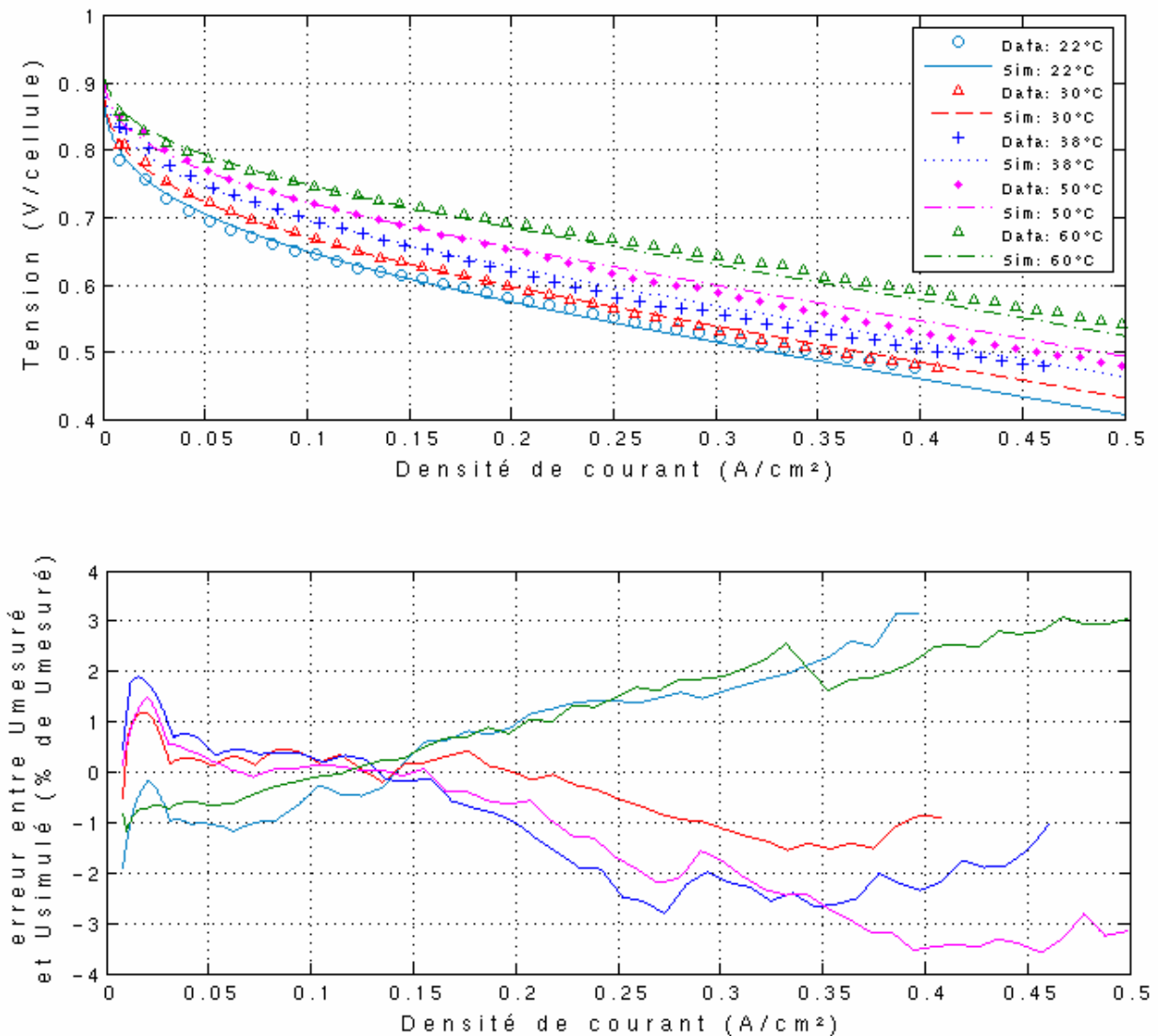


Figure IV-17 : comparaison des courbes caractéristiques U-I expérimentales et simulées à différentes températures pour la pile Ballard NEXA (P=1,2 bar).

L'erreur de simulation des tensions varie de - 4 % à 3 % sur l'ensemble des courbes testées, et ce, sur toute la plage de densité de courant considérée.