

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**Département d'automatique**  
Laboratoire de Commande des Processus



**Projet de fin d'étude**

En vue de l'obtention du diplôme

**De Master en Automatique**

**THEME**

**DIAGNOSTIC DES CONVERTISSEURS  
MULTICELLULAIRES**

**Proposé et dirigé par :**

M.S. BOUCHERIT    Professeur à l'ENP  
K. BENMANSOUR    Docteur à l'ENP

**Etudié par :**

BENMERABET Mourad  
MOKRETARI Nassim

**Juin 2013**

**Ecole Nationale Polytechnique**  
10, Avenue Hassen Badie, El-Harrach, Alger

**ملخص :**

تعنى هذه المذكرةُ بتشخيص المحولات المتعددة الخلايا، إذ الجزء الأول يختص بتشخيص الأنواع الثلاثة للعطل الواردة في المحوّل و التي تشمل : عطل الخلية ، قدم المكثفة ، و عطل القاطعة في الدارة المغلقة. وذلك بواسطة خطط المراقبة و التي تتمثل في : المراقبة بواسطة نسق الانزلاق و نسق الانزلاق العالي و المراقبة المتأقلمة .

أما الجزء الثاني ، يختص بدراسة تجريبية للتحقق من صحة بعض النتائج النظرية المتحصل عليها.

كلمات مفتاحية : المحولات المتعددة الخلايا، تشخيص العطل ، عطل الخلية ، قدم المكثفة، عطل القاطعة في الدارة المغلقة، المراقبة بواسطة نسق الانزلاق ، نسق الانزلاق العالي ، المراقبة المتأقلمة، دراسة تجريبية.

**Résumé :**

Ce manuscrit apporte une contribution au diagnostic du convertisseur multicellulaire, la première partie traite du diagnostic des trois défauts qui peuvent survenir dans le fonctionnement du convertisseur à savoir : le défaut cellule, le vieillissement des capacités et le défaut interrupteur et cela en utilisant différentes stratégies d'observation : l'observateur par mode glissant, l'observateur par mode glissant d'ordre supérieur et l'observateur adaptatif.

La deuxième partie traite d'une étude expérimentale ayant servié pour vérifier les résultats théoriques obtenus.

**Mots clés :** convertisseur multicellulaire, diagnostic de défauts, défaut cellule, vieillissement des capacités, défaut interrupteur, observateur par mode glissant, observateur par mode glissant d'ordre supérieur, observateur adaptatif, étude expérimentale.

**Abstract :**

This manuscript contributes to the diagnosis of multicellular converter, the first part deals with the diagnosis of three faults that may occur in the operation of the converter namely: the failure cell, aging capacity and the failure switch, this using different observation strategies: the sliding mode observer, the observer of higher order sliding mode and adaptive observers.

The second part deals with an experimental study that served to verify the theoretical results obtained.

**Keywords:** multicellular converter, fault diagnosis, fault cell, aging capacity, fault switch, sliding mode observer, sliding mode observer of higher order, adaptive observer, experimental study.

Nous tenons à remercier Monsieur M.S. BOUCHERIT et Monsieur K. BENMONSOUR, encadreurs de ce travail, pour leur aide, leurs encouragements et leurs précieux conseils. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nos plus vifs remerciements vont aux membres du jury. A Monsieur BERKOUK de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury. A Monsieur O. BENZINEB d'avoir accepté de juger ce travail et nous avoir fait l'honneur de participer au jury.

Nous remercions aussi tous nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et en particulier ceux du Laboratoire de Commande des Processus pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs efforts.

---

*Nous dédions ce travail,  
à nos parents  
à nos frères et sœurs,  
à nos familles  
et à nos amis.*

.

---

---

*Liste des symboles.*

*Introduction générale.*

## **Chapitre I. Diagnostic du convertisseur multicellulaire.**

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. Etat de l'art sur les diagnostics aux défauts.....</b>	<b>2</b>
I.1.1.Défaut.....	2
I.1.2.Classification des défauts.....	2
I.1.2.1.Selon leurs provenances .....	2
I.1.2.2.Selon leurs caractéristiques temporelles.....	3
I.1.3.Procédures de détection et de localisation des défauts.....	3
I.1.4.Principe du diagnostic des défauts .....	4
I.1.5.Classification des méthodes de diagnostic.....	4
I.1.5.1.Méthodes de diagnostic à base d'observateurs.....	5
<b>I.2. Diagnostic des convertisseurs multicellulaires .....</b>	<b>7</b>
I.2.1.Diagnostic de défaut cellule des convertisseurs multicellulaires .....	7
I.2.1.1.Observateur par mode glissant .....	8
I.2.1.2.Observateur par mode glissant d'ordre 2 .....	15
I.2.1.3.Observateur adaptative .....	20
I.2.2.Diagnostic du vieillissement des capacités des convertisseurs .....	27
IV.2.2.1.Les causes de défaillance .....	27
IV.2.2.2.Etude du vieillissement des capacités du convertisseur 3 cellules ....	28
I.2.3.Etude du cas du blocage d'interrupteur .....	30
<b>Conclusion.....</b>	<b>35</b>

## **Chapitre II. Etude expérimentale.**

<b>Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>II-1. Description de la manipulation.....</b>	<b>37</b>
<b>II-2. Quelques résultats expérimentaux .....</b>	<b>41</b>
<b>II-3. Diagnostic du convertisseur alimenter par source continue.....</b>	<b>45</b>
<b>II-4. Diagnostic du convertisseur par alimenter source photovoltaïque.....</b>	<b>50</b>

---

---

Conclusion..... 56

*Conclusion générale.*

*Bibliographie*

---

---

# Table des Notations

- $V_{TB_k}$  : La tension aux bornes de l'interrupteur du bas de la  $k^{\text{ème}}$  cellule.  
 $E$  : La tension d'entrée.  
 $V_s$  : La tension de sortie appliquée à la charge  $RL$ .  
 $i_s$  : Le courant de charge dans le récepteur  $RL$ .  
 $u_k$  : L'état de la cellule  $k$  (l'état de l'interrupteur  $u_k$ )  
 $V_{C_k}$  : Tensions internes aux bornes des condensateurs  $C_k$   
 $V_{TB_k}$  : La tension aux bornes de l'interrupteur du bas de la  $k^{\text{ème}}$  cellule  
 $\alpha_k$  : Valeur moyenne de  $u_k$  sur une période de découpage.  
 $T_d$  : Période de découpage.  
 $f_d$  : Fréquence de découpage.  
 $\alpha$  : Rapports cycliques.  
 $S_i$  : Surfaces de glissement.  
 $X$  : Vecteur d'états du système.  
 $f(x)$  et  $g(x)$  : Champs de vecteurs lisses.  
 $h(x)$  : Fonction scalaire lisse.  
 $L_f h$  et  $L_g h$  : Dérivées de Lie de  $h(x)$  vis-à-vis de  $f(x)$  et de  $g(x)$  respectivement.  
 $E(X)$  : Matrix de découplage de système MIMO.  
 $[v_1 \dots v_m]^T$  : Nouvelles entrées du système après linéarisation.  
 $K_I$  et  $K_P$  : Paramètres du régulateur PI.  
 $q_i$  : Modes de fonctionnement du modèle hybride.  
 $f_{q_i}(X)$  : Dynamiques continue de  $q_i$ .  
 $T_{ij}$  ou  $T(i, j)$ : Transition de  $q_i$  à  $q_j$ .  
 $\hat{x}$  : Estimée du vecteur d'état  $x$ .  
 $f(\hat{x}, u)$  : Estimée de la fonction  $f(\hat{x}, u)$  à l'aide des  $\hat{x}$ .  
 $\mathcal{L}_i$  : Gains corrective de l'observateur par mode glissant.  
 $e_i = \hat{y}_i - y_i$  : Erreur d'observation.  
 $S = I - \hat{I}$  : Surface de glissement.  
 $\hat{V}_{c1}, \hat{V}_{c2}, \hat{I}$  : Les estimées des états.  
 $k_i$  : Constantes de Lipschitz positive.  
 $\varphi_{u,x_0}$  : Matrice de transition du système.  
 $q$  dans  $f(t, x, q)$  : Séquence de commande prenant uniquement des valeurs discrètes.  
 $P1$  et  $P2$  : Matrices définies symétriques positives.  
 $r_i$  : nième résidu.  
 $e_1^+$  :  $e_1/vc1ref$   
 $e_2^+$  :  $e_2/vc2ref$   
 $e_3^+$  :  $I/Iref$

# Introduction Générale

En industrie, un grand nombre de procédés s'appuie sur des entraînements électriques à vitesse variable. Mis à part les systèmes mécaniques, qui subissent souvent des dommages dus à des agents extérieurs, les dispositifs les plus sensibles à différents dommages sont les appareils d'électronique de puissance, c'est parmi ces appareils d'électronique de puissance qu'on trouve les convertisseurs statiques.

Et c'est parmi ces convertisseurs statiques qu'on trouve le convertisseur multicellulaire série, une invention brevetée par Meynard et Foch au début des années 90 et pensée comme une solution permettant d'atteindre les niveaux de tensions désirés avec des composants d'électronique de puissance disponibles sur le marché. Ce convertisseur présente plusieurs caractéristiques parmi lesquelles l'évolution de la tension de sortie sur plusieurs niveaux fraction de la pleine tension d'entrée, ce qui l'intègre dans la famille des structures multiniveaux. Sa structure permet aussi de répartir la contrainte en tension sur les différents interrupteurs ce qui assure une transmission haute tension avec protection des commutateurs.

L'objectif de ce travail consiste en la familiarisation avec les convertisseurs statiques, leurs modélisations, leurs commandes ainsi que recenser d'une part les travaux qui ont été fait sur le diagnostic des CMC et d'autre part continuer dans la lancé de ces travaux.

Le travail a été ainsi organisé en cinq chapitres :

- Le 1<sup>er</sup> chapitre concernera le diagnostic des CMC, nous établirons ainsi une logique décisionnelle à base d'observateurs sur tous les types de défauts que peut avoir un convertisseur et nous l'appliquerons à un convertisseur 3 cellules.
- le 2<sup>ème</sup> chapitre portera sur une petite étude expérimentale sur le comportement du CMC en cas de blocage-cellule validant ainsi les données observées dans le 4<sup>em</sup> chapitre.

On achèvera ces 2 chapitres par une conclusion générale qui retrace la somme des résultats obtenus à travers les chapitres précédents. Aussi, nous proposerons des perspectives de travaux envisagés avec d'autres stratégies pour pallier aux problèmes ou difficultés que nous avons rencontrés durant l'accomplissement de ce travail.

---



# Chapitre I

## Diagnostic du convertisseur multicellulaire

Le développement de l'automatisation des systèmes industriels vise à améliorer leurs performances. Cette course à la performance a conduit à l'élaboration de système de plus en plus complexe multipliant les risques de dysfonctionnement pouvant mettre en péril le système lui-même et son environnement. Par conséquence, pour un grand nombre d'application, il est nécessaire d'implanter un système de diagnostic de défaut afin de détecter et d'isoler le défaut.

Un système de diagnostic de défaut doit permettre de caractériser le mode de fonctionnement d'un système en enregistrant des informations, en reconnaissant et en indiquant les anomalies de comportement.

Le grand problème de l'automaticien est de représenter les processus industriels avec une précision suffisante et un modèle à structure simple. Mais l'apparition d'un défaut sur ces systèmes engendre des conséquences énormes. Pour cette raison, le diagnostic des défauts fait l'objet de plusieurs recherches débutant des années 70.

Le diagnostic se base sur la procédure de détection et d'isolation des défauts (FDI). Le rôle d'une telle procédure est de détecter la présence du défaut et de localiser sa provenance le plus rapidement possible.

## I.1. Etat de l'art sur les diagnostics aux défauts

### I.1.1. Définition du défaut

C'est un événement qui agit sur un système et qui peut changer ses propriétés conduisant à une dégradation des performances du procédé voir à son instabilité [19], il peut être aussi défini comme étant un écart non permis d'au moins une propriété structurale ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal.

### I.1.2. Classification des défauts

Les défauts peuvent être classés selon deux différents critères : leurs provenances ou leurs caractéristiques temporelles.

#### I.1.2.1. Selon leurs provenances

- **Défauts actionneurs** : Les défauts actionneurs détruisent le signal d'entrée du système. ils peuvent causer une perte totale ou partielle de l'actionneur. Une perte totale peut se produire, par exemple, à la suite d'une coupure d'un fil électrique reliant l'actionneur au système. Un exemple de perte partielle d'un actionneur est la fuite hydraulique ou la chute de tension d'alimentation.
- **Défauts capteurs** : Ils caractérisent une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Une des solutions pour augmenter la tolérance aux défauts capteurs est de dupliquer les capteurs (redondance matérielle), un principe de vote est alors appliqué pour décider si une faute est présente ou non. Néanmoins, cette approche entraîne un coût important mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter.
- **Défauts systèmes** : Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, ils représentent des changements dans les paramètres du système, ce qui induit un changement du comportement dynamique de celui-ci. Deux types de défauts peuvent être distingués : des défauts additifs et des défauts multiplicatifs. les défauts additifs influencent la moyenne du signal de sortie du système, alors que les défauts multiplicatifs induisent des changements sur la variance et les corrélations du signal de sortie du système ainsi que des changements dans les caractéristiques spectrales de la dynamique du système.

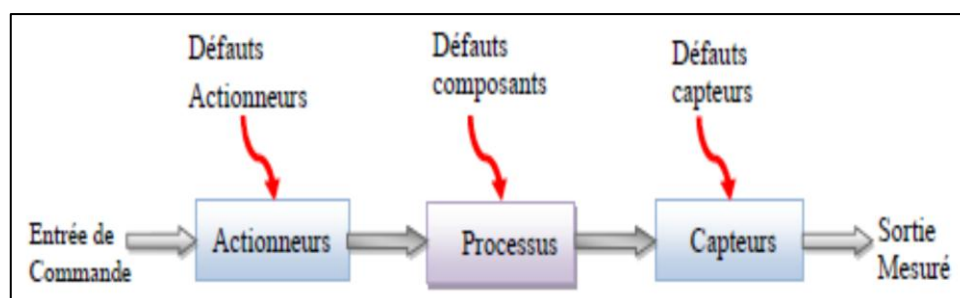


Figure I.1 : Types du défauts

### I.1.2.2. Selon leurs caractéristiques temporelles

- **Abrupts** : Il correspond à un arrêt total ou partiel de l'élément en question, la propriété principale de ce type de défauts est la discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable.
- **Intermittentes (valeurs aberrantes)**: Il s'agit d'un type de défauts caractéristiques de faux contacts (câblage partiellement endommagé). C'est un cas particulier de défauts abrupts avec la propriété d'un signal qui revient de façon aléatoire aux valeurs normales.
- **Graduels (dérives)**: Il s'agit de défauts très difficiles à détecter, car leurs évolutions temporelles sont les mêmes que celles d'une modification paramétrique lente. Ce type de défauts est essentiellement caractéristique d'une usure de pièce.

### I.1.3. Procédures de détection et de localisation des défauts

La procédure de détection et de localisation des défauts passe par trois étapes essentielles :

1. **La détection** : C'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas. Elle consiste dans la plus part des cas à générer le vecteur résidu qui est nul en fonctionnement normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.
2. **La localisation** : Cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie.
3. **L'identification** : Elle consiste à déterminer l'allure de la panne en vue de déterminer le type de maintenance ou de correction (accommodation, reconfiguration) à réaliser sur l'installation. Cette étape nécessite la connaissance d'un modèle de panne.

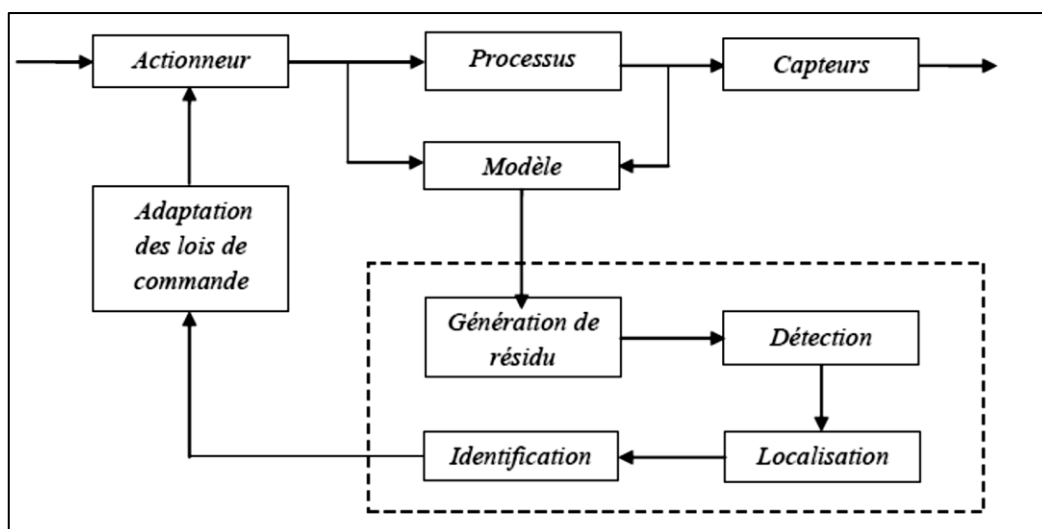


Figure I.2 : Etape de diagnostic a base du modèle.

### I.1.4. Principe du diagnostic des défauts

Le principe de base du diagnostic des défauts repose sur la notion de redondance qui est subdivisées en deux types, matérielle (ou physique) et analytique [21]. La première est dite traditionnelle et consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. Elle a l'avantage d'être conceptuellement simple mais elle est coûteuse et conduit à des installations encombrantes. Elle est, par conséquent, utilisée uniquement pour la surveillance des sous-ensembles critiques d'un système. Un autre inconvénient est que les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps.

La deuxième approche consiste à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système et nécessite donc un modèle du système à surveiller. Pour éviter les fausses alarmes ou les manques de détection, ces algorithmes doivent tenir compte des bruits de mesure, des perturbations ainsi que des erreurs de modélisation. Les méthodes basées sur cette approche sont plus simples, plus flexibles, moins coûteuses et plus écologiques que l'approche traditionnelle.

### I.1.5. Classification des méthodes de diagnostic

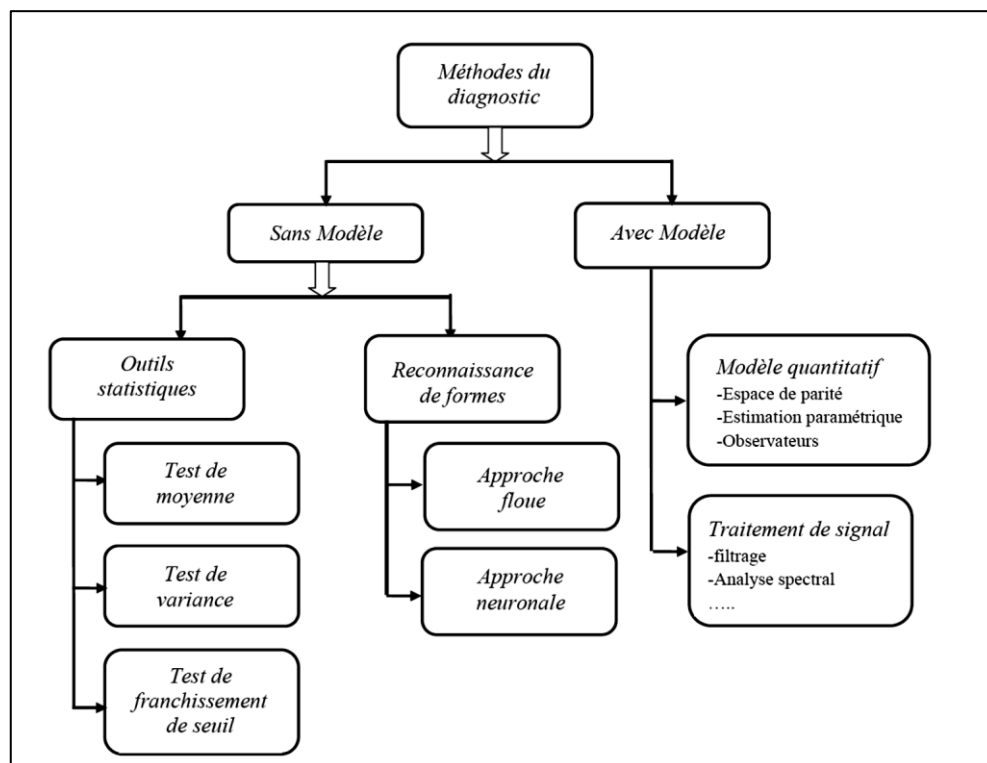


Figure I.3 : Les différentes méthodes de diagnostic

La figure IV.3 montre les différentes méthodes de diagnostic les plus utilisées. Les méthodes de diagnostic sont classées en deux catégories selon la disponibilité ou non du modèle.

Les méthodes qui ne sont pas basées sur un modèle mathématique se reposent soit sur l'information de mesure telle que la moyenne ou la variance, on parle alors des méthodes basées sur des outils statistiques, soit sur le changement d'une dynamique ou bien celle de sa dérivée première ou secondaire, on parle alors des méthodes basées sur la reconnaissance de formes. On

peut trouver dans cette sous-catégorie plusieurs approches comme la logique floue et les réseaux neurones.

Les méthodes qui sont basées sur un modèle utilisent en générale le principe de la redondance physique et analytique, on peut trouver plusieurs approches, telles que les méthodes de l'espace de parité ou les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondance on faussant intervenir des variable mesurable et cela en testant la cohérence des mesures par rapport à leurs estimée données par le modèle [22], l'estimation paramétrique basée sur le principe d'estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé et cela en considérant que l'influence du défaut se reflète sur les paramètre du système [23], les observateurs et les méthodes basées sur le traitement de signal .Par la suit, nous allons appliquer le principe diagnostic à base d'observateurs au convertisseur multicellulaire.

### I.1.5.1. Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes de diagnostic des défauts à base d'observateurs sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (Issues de l'observateur). Cette technique se voit donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles. De très nombreux travaux ont été développés concernant la synthèse d'observateurs pour le diagnostic des systèmes physiques.

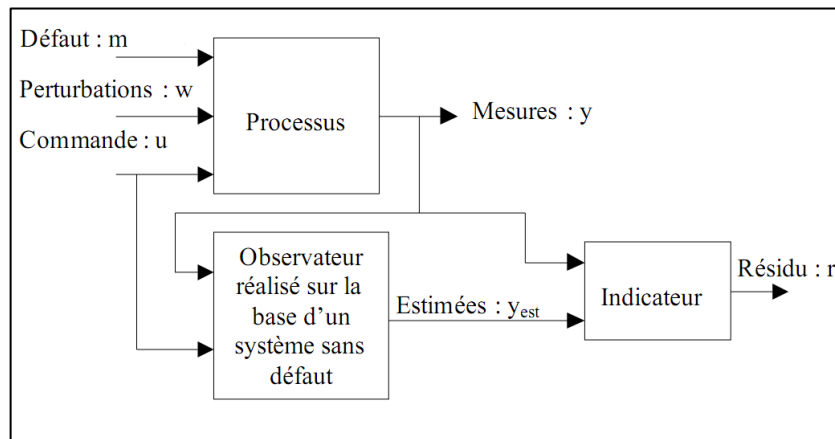


Figure I.4: étape de génération des résidus

#### i) Génération des résidus

Le résidu prend l'expression suivante :

$$r_i = R(y_i - \hat{y}_i)$$

Où :

$r_i$  dénote le  $i$ ème résidu.

$R$  représente un opérateur mathématique (norme, moyenne, dérivé, etc.).

$y_i$  est la  $n^{\text{ème}}$  sortie mesurée du système.

$\hat{y}_i$  est la  $n^{\text{ème}}$  sortie estimée du système.

Les résidus sont conçus pour être égaux ou converger vers zéro, dans le cas sans défaut et quitter de manière significative la valeur zéro après l'occurrence d'un défaut. Par conséquent, il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation correcte.

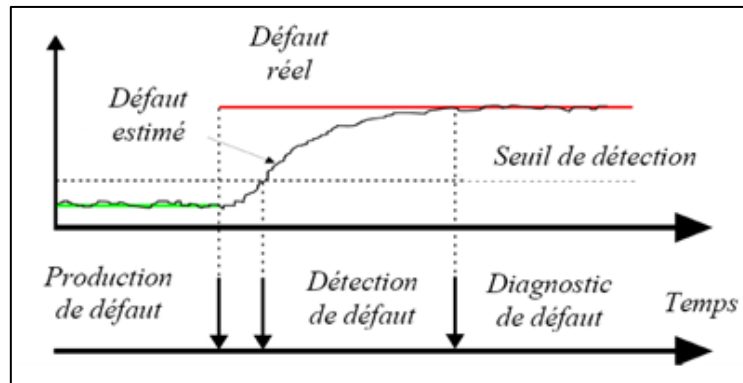


Figure I.5 : Processus de détection d'un signal de défaut

La figure IV.4 illustre le processus de détection où le vrai signal de défaut change à l'instant de l'apparition du défaut. Après l'apparition du défaut le bloc *FDI* prend quelques temps pour détecter le défaut qui est atteint en faisant un test de seuil et il nécessite encore un temps supplémentaire pour que le diagnostic soit effectif afin de collecter des données entrées - sorties suffisantes pour prendre une décision. Nous notons ici, que ce niveau doit être significatif par rapport aux signaux de bruit et de perturbation. Un bon diagnostic doit minimiser l'intervalle entre le moment de l'apparition du défaut et celui de la prise de décision.

## ii) Critères de performance d'un système de diagnostic

Un système de diagnostic doit vérifier un ensemble de caractéristiques et cela à fin de bien détecté le défaut. Il doit permettre [24]:

- **La détectabilité**  
Pouvoir détecter une défaillance particulière.
- **La localisation**  
C'est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est à dire localiser) plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soit détectables.
- **La sensibilité**  
Elle caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

- **La robustesse**  
C'est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du processus et des perturbations extérieures.
- **La rapidité de la détection**  
Elle se définit d'elle-même; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel.

## I.2. Diagnostic des convertisseurs multicellulaires:

Avant de commencer le diagnostic nous devons au préalable répertorier les différents défauts que peut subir notre convertisseur multicellulaire. Pour répertorier ces défauts nous devons connaître aussi les différents composants de notre convertisseur. Le convertisseur multicellulaire comme dit précédemment comporte plusieurs cellules de commutation, ces cellules de commutation se composent de :

- Deux composants semi-conducteurs de puissance.
- Un composant passif (condensateur).
- Une jonction entre la carte de commande et nos composants semi-conducteurs.

En prenant en compte cette composition on peut répertorier les défauts majeurs que peut subir notre convertisseur :

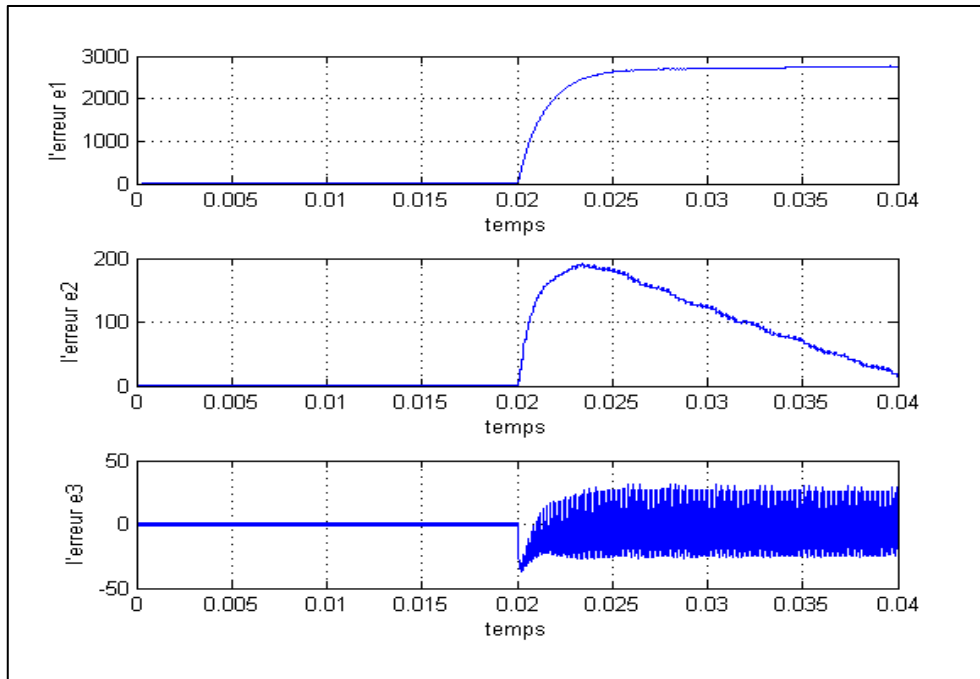
- **Défauts cellule :**  
Où la cellule de commutation reste bloquée sur un état c'est-à-dire l'actionneur prendra une valeur de commande fixe soit ' $u = 0$ ' ou ' $u = 1$ '. Ce défaut se manifeste non pas à cause d'une défaillance des composants semi-conducteurs mais à cause de la jonction entre la carte de commande et ces semi-conducteurs et ainsi le signal de commande n'arrive pas à la gâchette des composants donc la cellule reste bloquée sur un état.
- **Défauts condensateur :**  
Qui regroupe soit une défaillance fonctionnelle brusque ou un vieillissement.
- **Défauts interrupteurs :**  
On peut résumer ces défauts par :
  - **Interrupteur en circuit ouvert** : Des multiples dégradations subies par le composant peuvent amener l'interrupteur de puissance dans cet état.
  - **Interrupteur en court-circuit** : Le composant reste à l'état passant. C'est le mode de défaillance le plus fréquent et le plus probable.

### I.2.1. Diagnostic de défaut cellule des convertisseurs multicellulaires

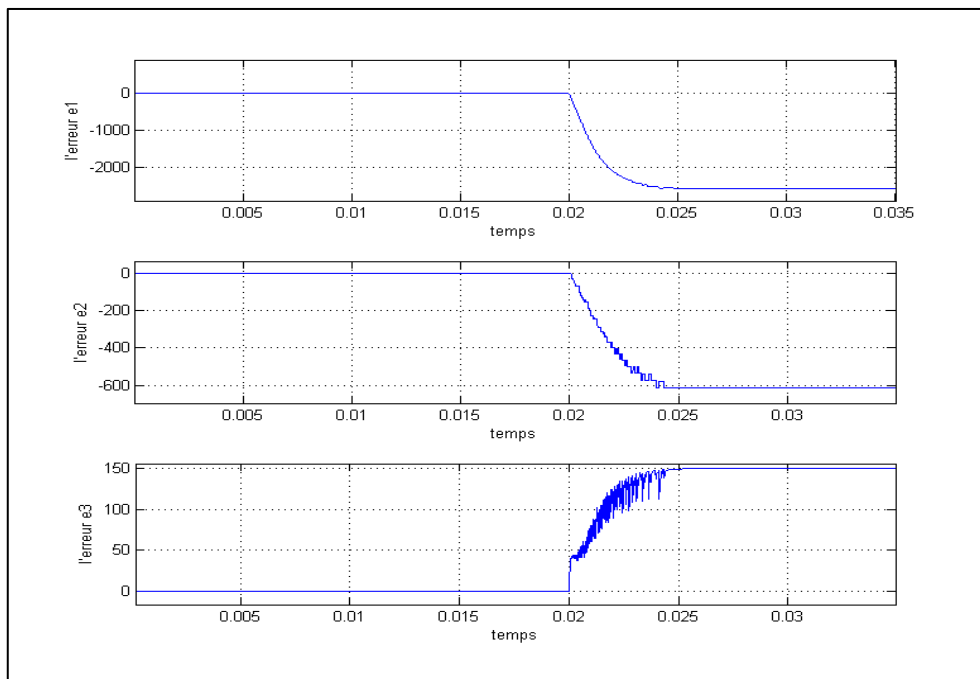
Nous allons utiliser la méthode d'observateur pour la génération des résidus. On utilisera dans cette partie les observateurs étudiés dans le chapitre III puis on comparera les résultats de diagnostic par la suite.

### I.2.1.1. Diagnostic à base d'un observateur par mode glissant

Nous allons tester tous les cas possibles de défauts cellule et cela pour voir le comportement des erreurs d'observation en présence d'un défaut. Après cela, nous établissons un modèle d'expertise et ce afin de trouver une solution pour localiser le défaut sachant le comportement dynamique de chaque cas. Nous utiliserons une commande par mode glissant développée dans le chapitre II. Les résultats de la simulation sont les suivants :

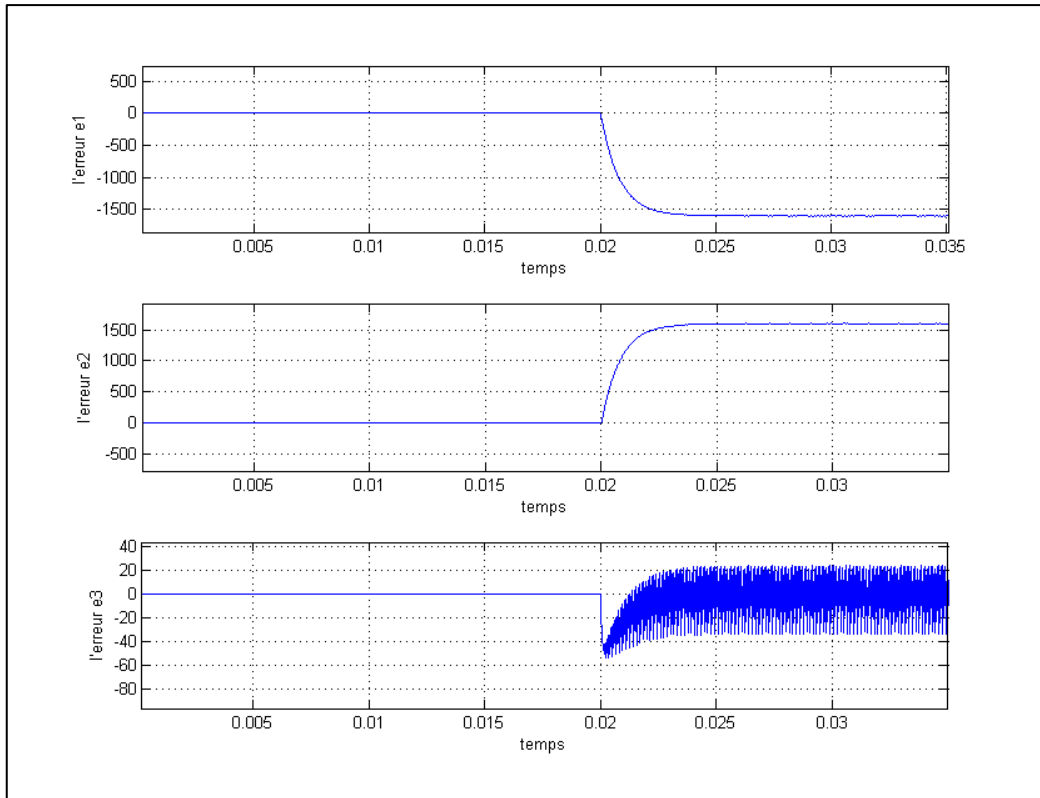


**Figure I.6:** Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=0$

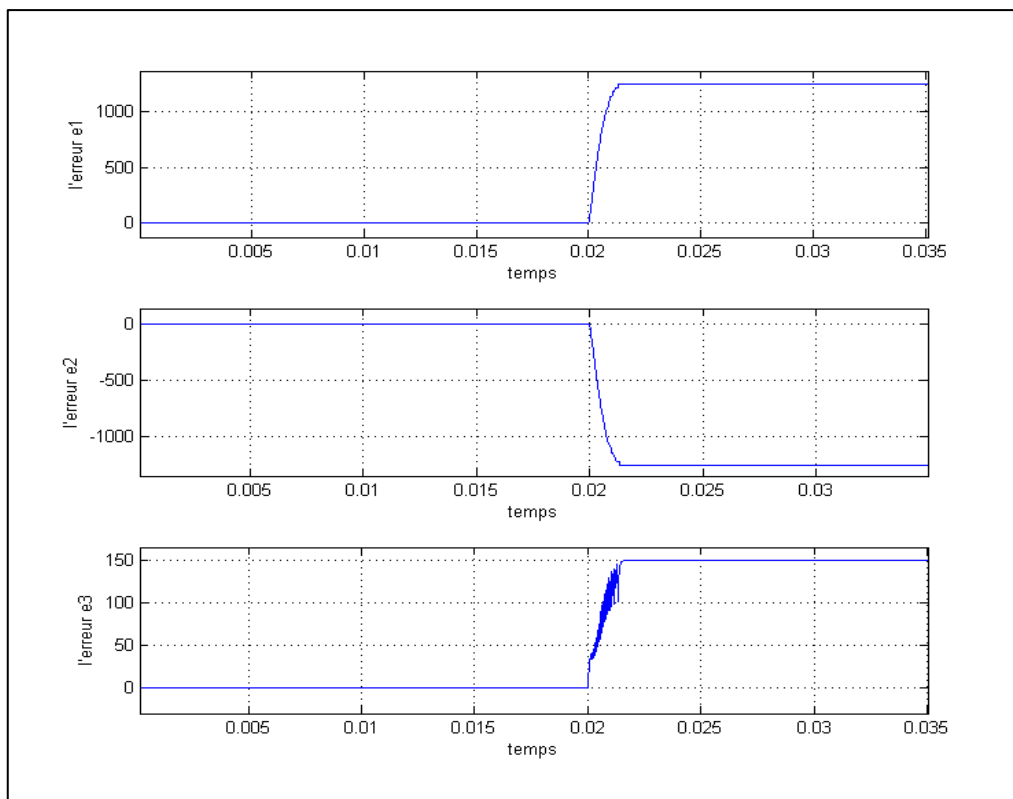


**Figure I.7:** Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=1$

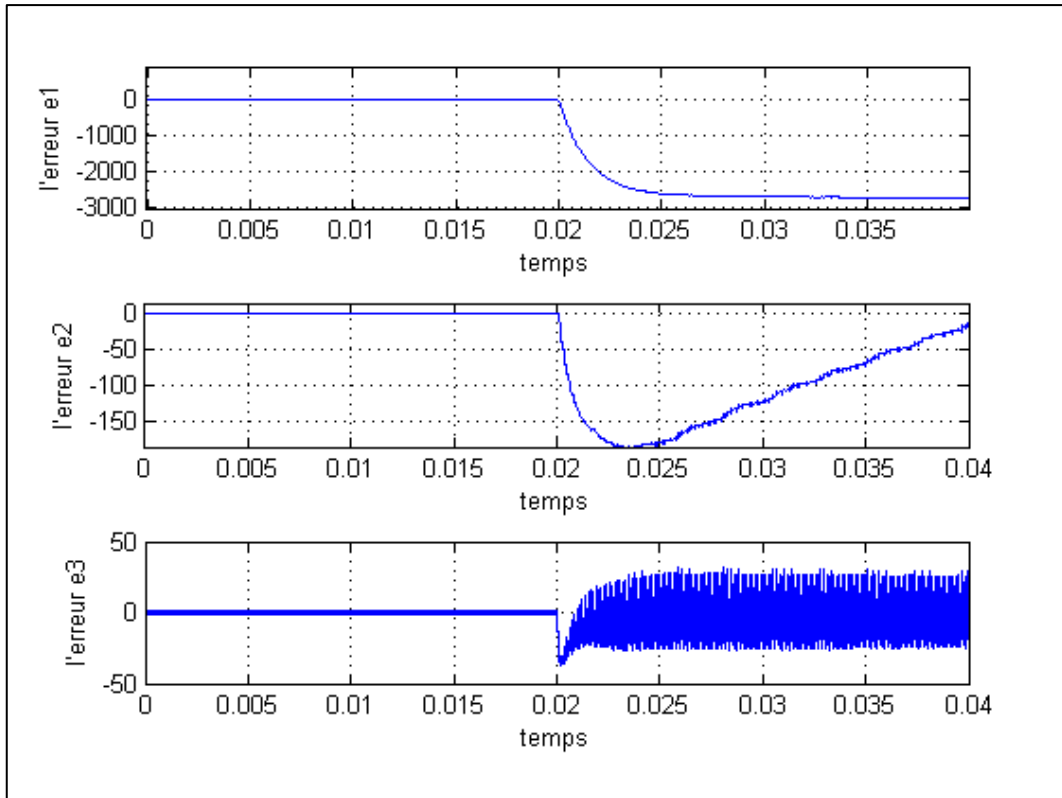




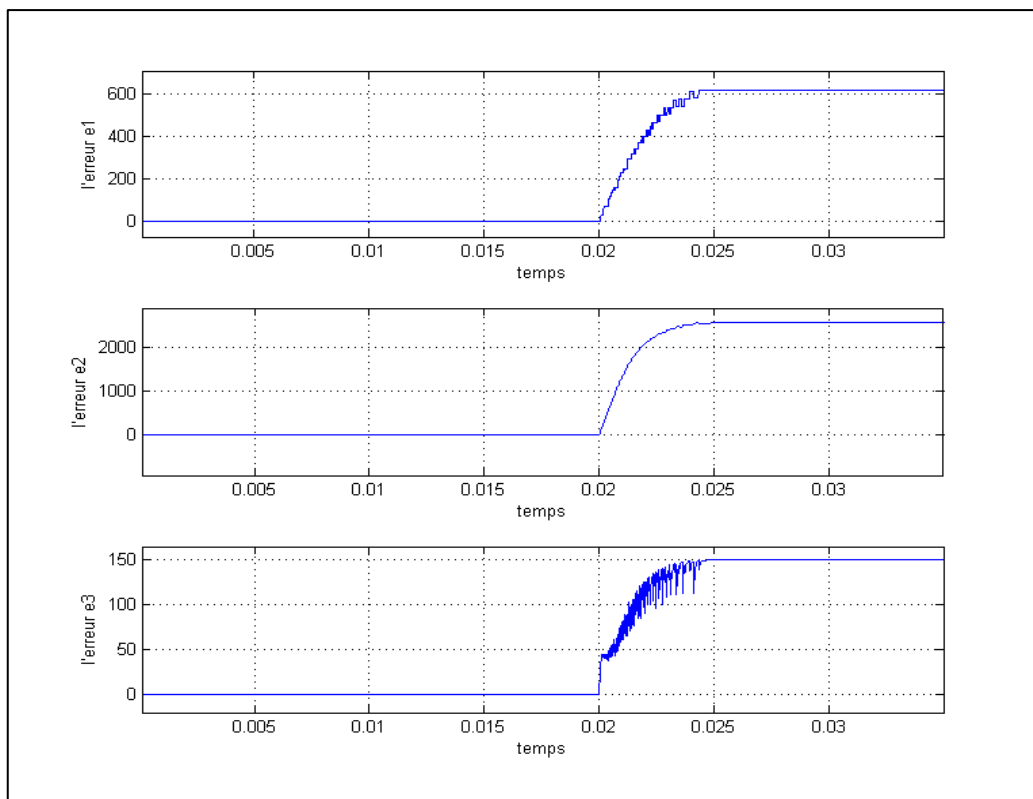
**Figure I.8** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_2=0$



**Figure I.9** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_2=1$



**Figure I.10** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_3=0$



**Figure I.11** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_3=1$

Les résultats obtenus peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Etat bloqué	Conséquence sur les erreurs d'observation
$u_1 = 0$	$e_1$ augmente, $e_2$ augmente, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_1 = 1$	$e_1$ diminue, $e_2$ diminue, $e_3$ augmente.
$u_2 = 0$	$e_1$ diminue, $e_2$ augmente, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_2 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ diminue, $e_3$ augmente.
$u_3 = 0$	$e_1$ diminue, $e_2$ diminue, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_3 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ augmente, $e_3$ augmente.

**Tableau I.1:** Signature de fonctionnement avec défaut

A partir du tableau IV.1, il est apparent que la génération d'un défaut provoque un changement sur les dynamiques des erreurs d'observation. Un simple test de comparaison entre les erreurs d'observation et des seuils prédéfinis donne une information sur la présence d'un défaut ou non.

Pour localiser le défaut, c'est-à-dire connaître son endroit de production et sa nature (bloqué en fermeture ou en ouverture) Nous nous appuyons sur les informations tirées de la table de signature précédente, la procédure de diagnostic doit être la plus rapide possible.

Nous définissons les erreurs d'observation des tensions flottantes et du courant de charge comme indicateurs aux résidus.

$$\begin{cases} e_1 = V_{c1} - \hat{V}_{c1} \\ e_2 = V_{c2} - \hat{V}_{c2} \\ e_3 = I - \hat{I} \end{cases}$$

Nous avons pris donc trois résidus  $R(i)$  associés à chaque commande  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Ces résidus sont générés en faisant un test de seuil sur les erreurs d'observation et peuvent prendre trois états (-1, 0, 1). L'état 0 pour indiquer qu'il n'y a pas de défaut, l'état -1 pour un défaut bloqué en ouverture ( $u_i = 0$ ) et l'état 1 pour un défaut bloqué en fermeture ( $u_i = 1$ ).

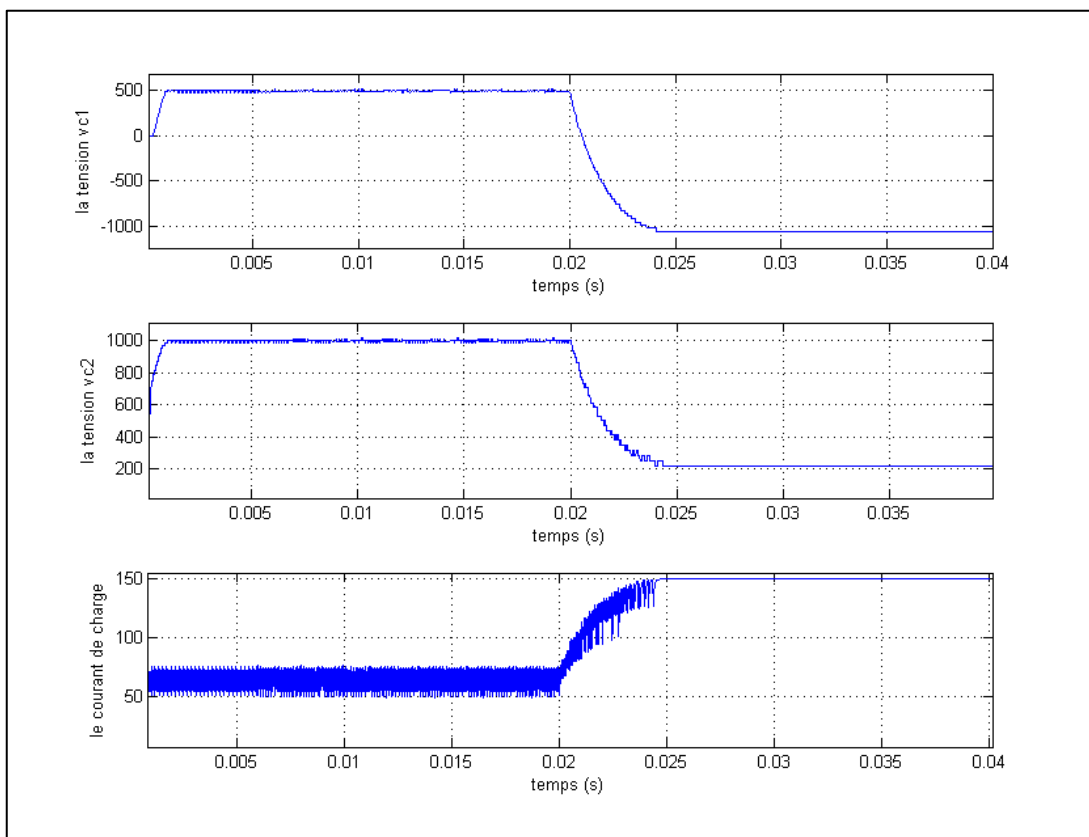
Le tableau suivant nous donne le résidu à utiliser pour détecter le défaut :

Etat bloqué	R(1)	R(2)	R(3)
$u_1 = 1$	1	0	0
$u_1 = 0$	-1	0	0
$u_2 = 1$	0	1	0
$u_2 = 0$	0	-1	0
$u_3 = 1$	0	0	1
$u_3 = 0$	0	0	-1

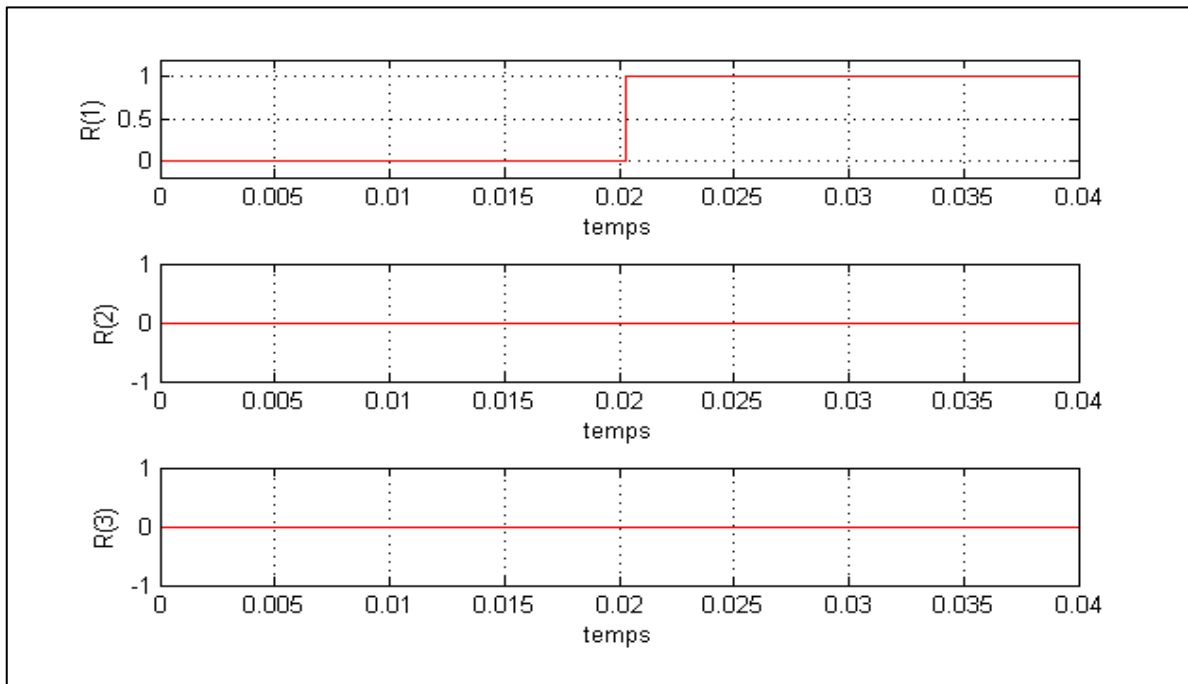
**Tableau I.2 :** Allocation des résidus

Nous avons testé les résidus pour chaque cas de blocage cellule, voici quelques résultats représentatifs des tests :

- Pour un blocage de  $u_1 = 1$  à  $t=0.02s$  :



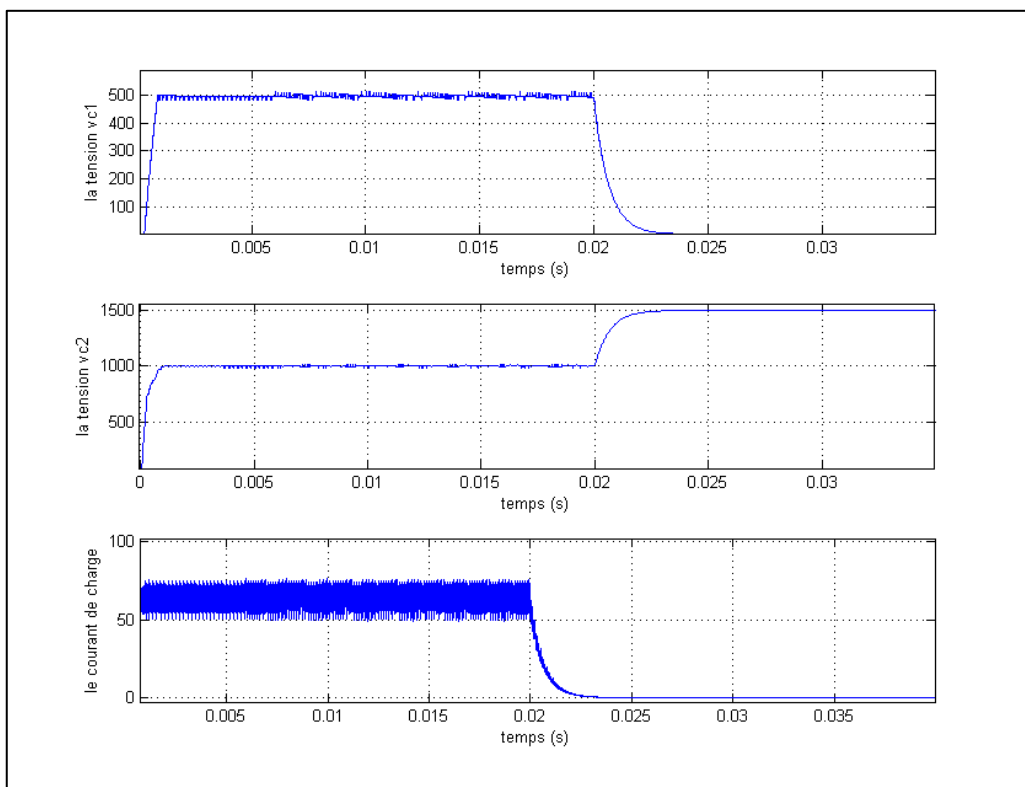
**Figure I.12:** Signaux du système dans le cas d'un blocage de  $U_1$  à 1



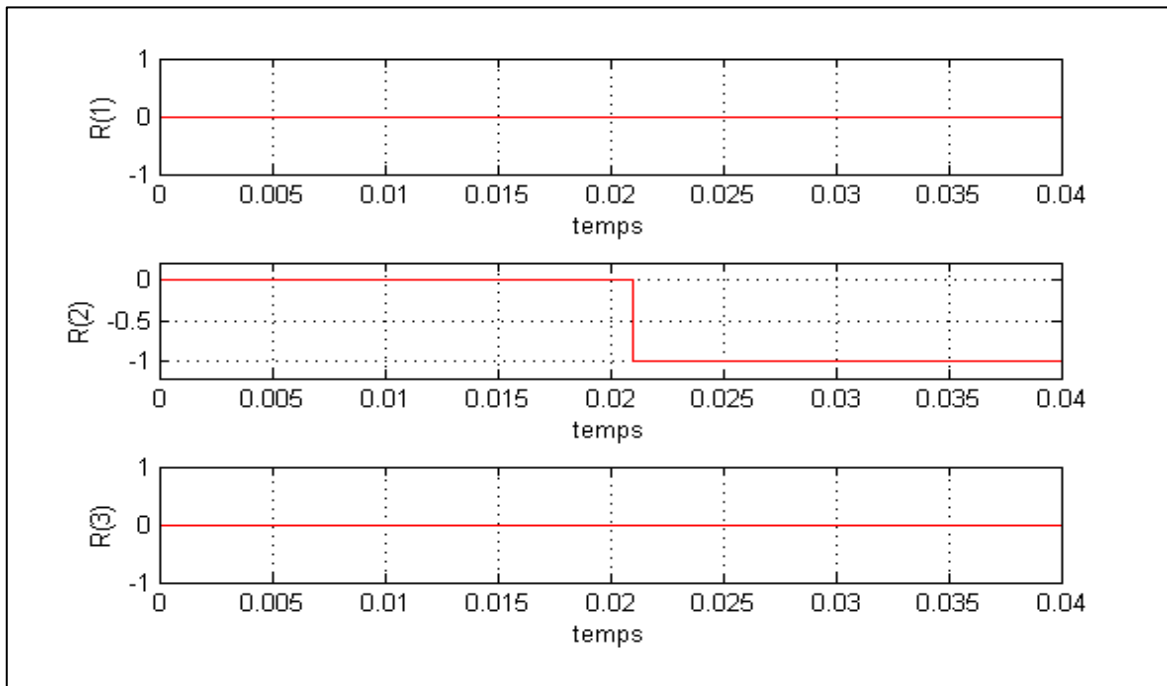
**Figure I.13:** Réponse des résidus en présence du défaut

Initialement à 0, le résidu R(1) passe à 1 après 0.0003 s de l'apparition du défaut.

- Pour blocage de  $u_2=0$  à  $t=0.02s$  :



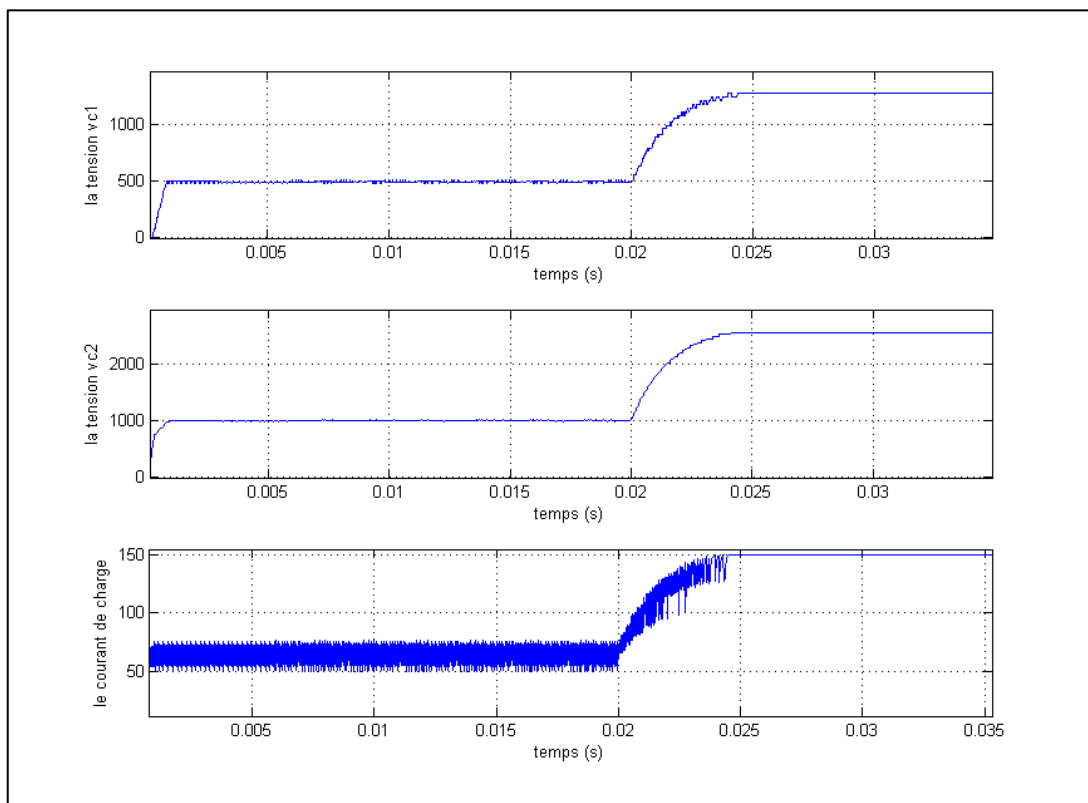
**Figure I.14:** Signaux du système dans le cas d'un blocage de U2 à 0



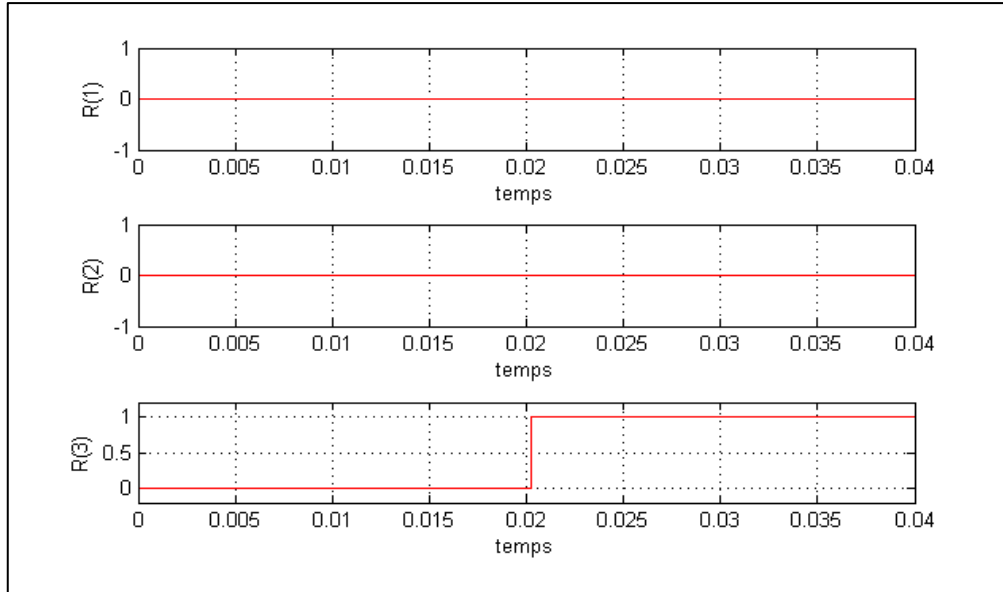
**Figure I.15:** Réponse des résidus en présence de défaut

Initialement à 0, le résidu R(2) passe à -1 après 0.001s de l'apparition du défaut.

- Pour un blocage de  $U_3=1$  à  $t=0.02s$  nous avons :



**Figure I.16:** Blocage de  $U_3$  à 1



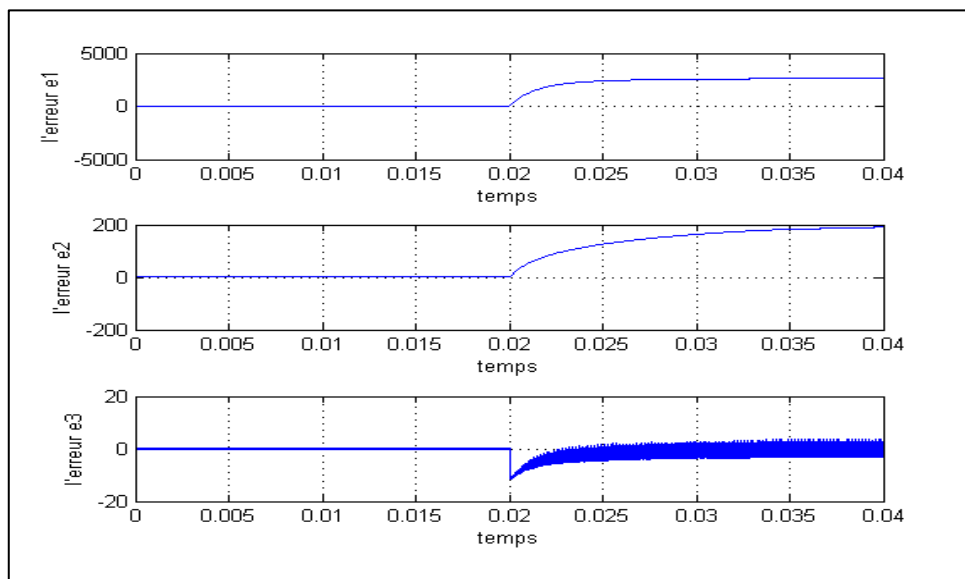
**Figure I.17:** Réponse des résidus en présence de défaut

Initialement à 0, le résidu R(3) passe à 1 après 0.0003s de l'apparition du défaut

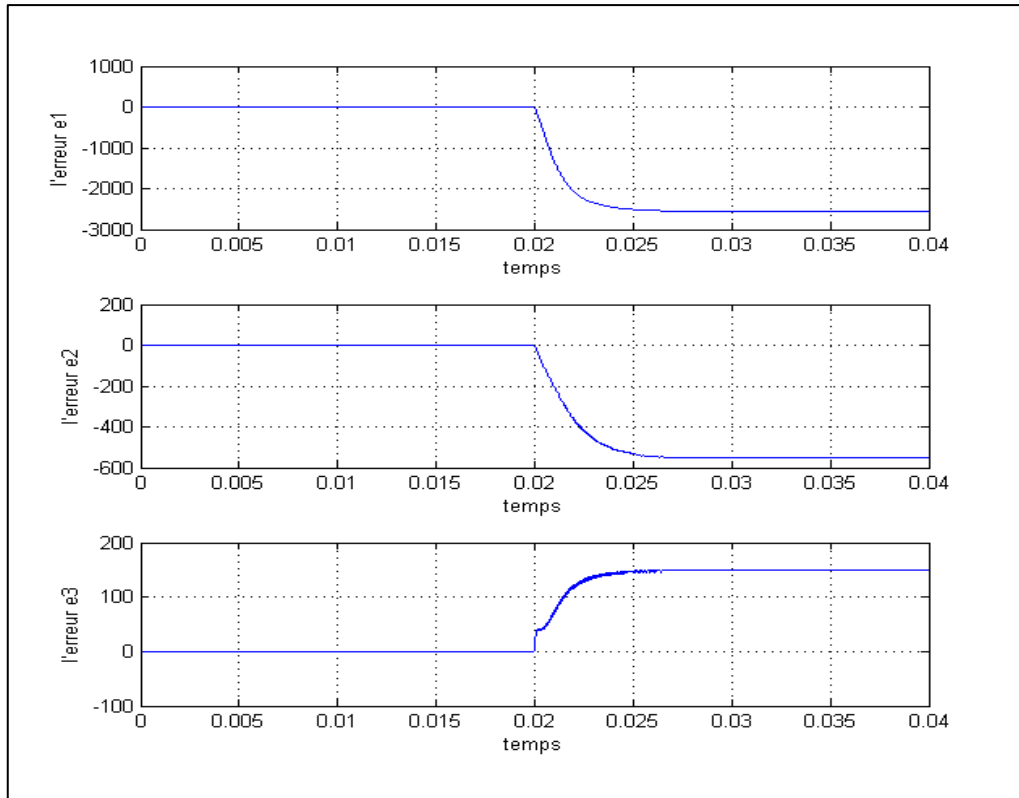
Ces tests montrent que les états des résidus générés coïncident parfaitement avec les états des défauts et sont générés avec un temps de prise très court . Ceci valide les règles de décision choisis.

### I.2.1.2. Diagnostic à base d'un observateur par mode glissant d'ordre supérieur

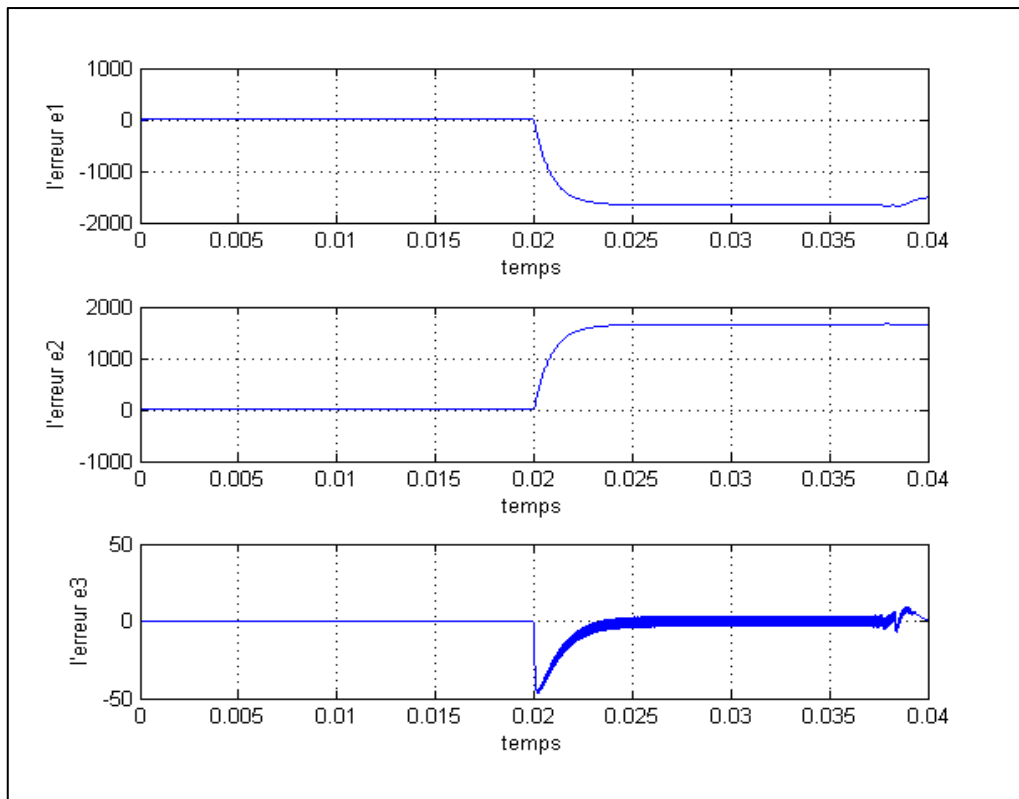
Nous allons procéder de la même manière que précédemment mais cette fois-ci en utilisant l'observateur par mode glissant d'ordre supérieur étudié en III.2.2. , nous introduisons une série de blocage de la commande pour voir le comportement des erreurs d'observations et ainsi établir une table de signature.



**Figure I.18 :** Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=0$

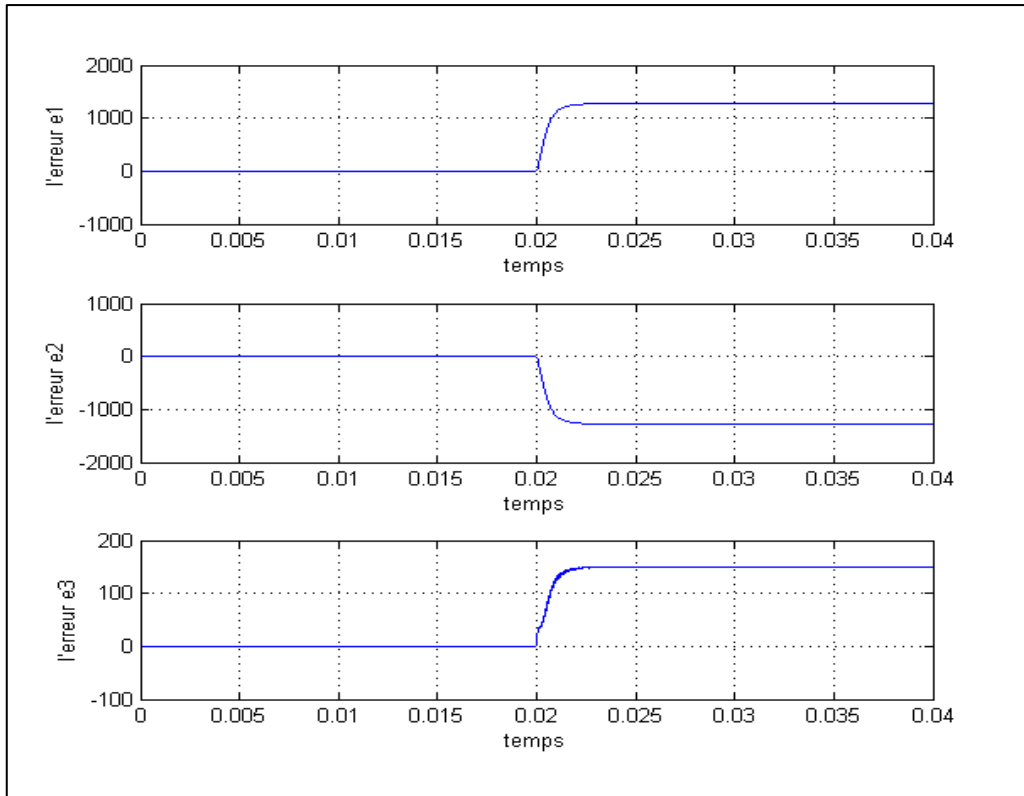


**Figure I.19** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=1$

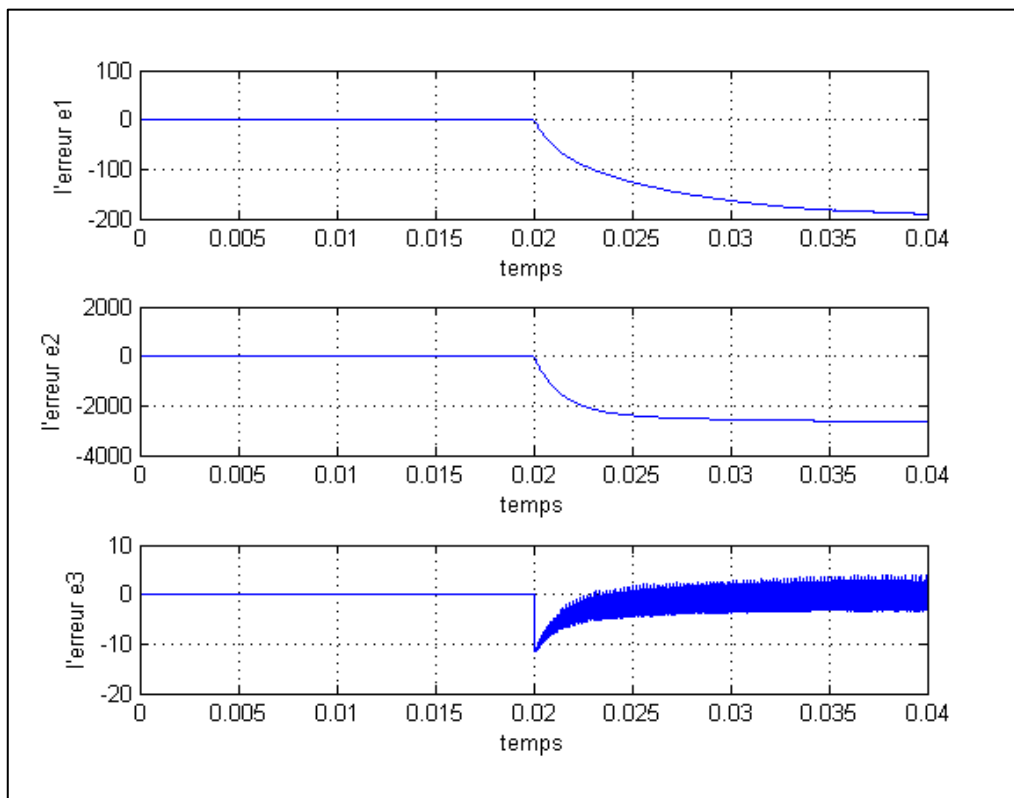


**Figure I.20** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U2=0$

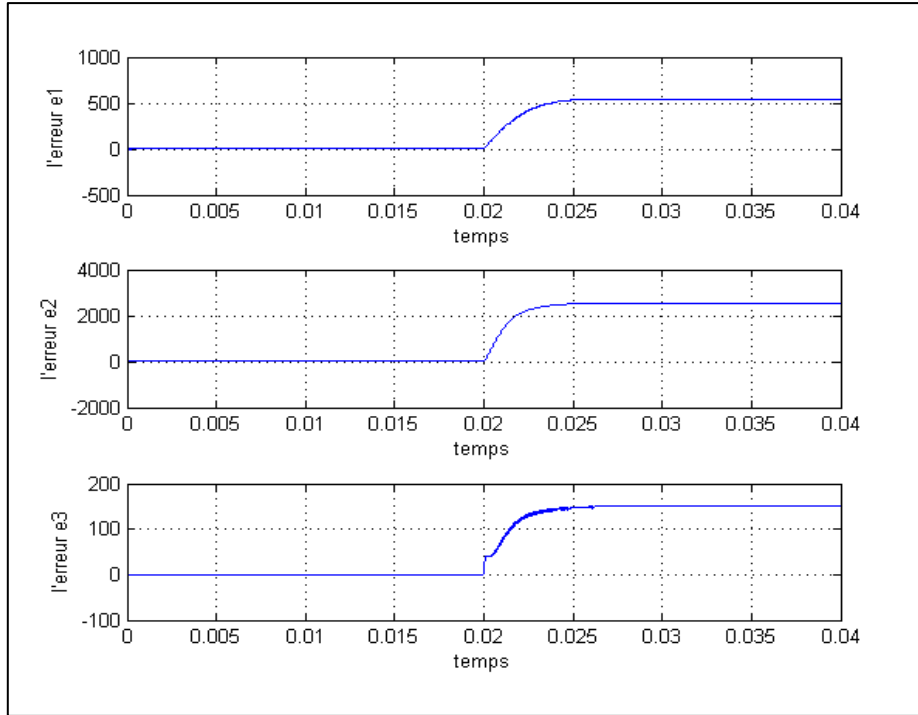




**Figure I.21** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_2=1$



**Figure I.22** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_3=0$


**Figure I.23** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U_3=1$ 

Etat bloqué	Conséquence sur les erreurs d'observation
$u_1 = 0$	$e_1$ augmente, $e_2$ augmente, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_1 = 1$	$e_1$ diminue, $e_2$ diminue, $e_3$ augmente.
$u_2 = 0$	$e_1$ diminue, $e_2$ augmente, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_2 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ diminue, $e_3$ augmente.
$u_3 = 0$	$e_1$ diminue, $e_2$ diminue, $e_3$ diminue puis oscille autour de 0.
$u_3 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ augmente, $e_3$ augmente.

**Tableau I.3:** Signature de fonctionnement avec défaut

Nous constatons que la réponse des erreurs d'observation est pratiquement la même que celle où on a utilisé un observateur par mode glissant d'ordre 1. Nous allons alors essayer de générer les résidus d'une autre manière.

Prenons cette fois-ci notre vecteur résidu comme suit :

$$\begin{cases} r(1) = \text{sign}(e_1^+) + \text{sign}(e_2^+) \\ r(2) = \text{sign}(e_1^+ \cdot e_2^+) - 1 \\ r(3) = e_3^+ \end{cases}$$

Les résidus générés nous donnent à la fois la détection de la panne et sa localisation.

Etat bloqué	Résidu utilisé
$u_1 = 1$	$r(1)$ et $r(3)$
$u_1 = 0$	$r(1)$ et $r(3)$
$u_2 = 1$	$r(2)$ et $r(3)$
$u_2 = 0$	$r(2)$ et $r(3)$
$u_3 = 1$	$r(1)$ et $r(3)$
$u_3 = 0$	$r(1)$ et $r(3)$

**Tableau I.4 :** Allocation des résidus

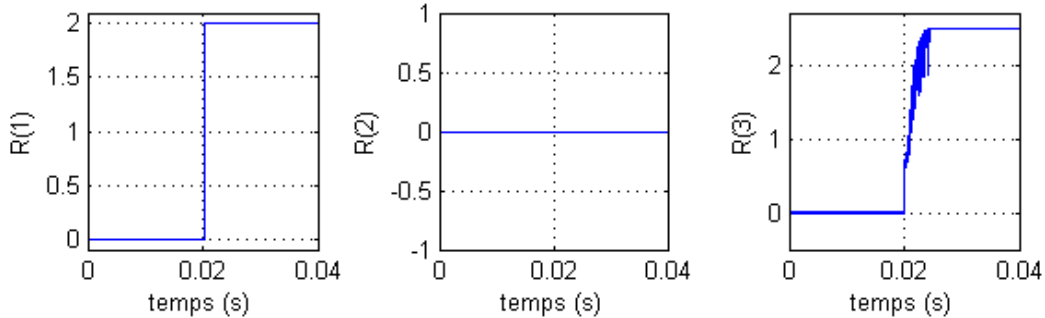
Le tableau suivant montre l'affectation de chaque résidu et son comportement en présence des défauts

Etat bloqué	R(1)	R(2)	R(3)
$u_1 = 1$	( +2 )	0	( + )
$u_1 = 0$	( -2 )	0	( - )
$u_2 = 1$	0	( -1 )	( + )
$u_2 = 0$	0	( -1 )	( - )
$u_3 = 1$	( -2 )	0	( + )
$u_3 = 0$	( +2 )	0	( - )

**Tableau I.5 :** Affectation des résidus

La détection de défauts ce fait a l'aide du résidu R(3), pour R(3) positive la commande  $u_i$  est bloquée à 1 dans le cas contraire la commande est bloquée à 0. Pour la localisation en utilisera les résidus R(1) et R(2), nous allons . voici quelques résultats représentatifs des tests :

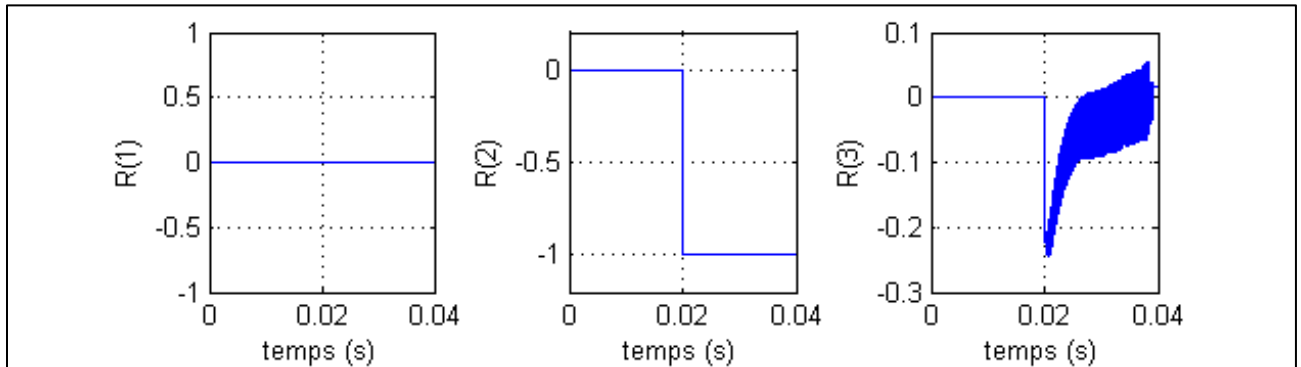
- Pour blocage de  $u_1 = 1$  à  $t=0.02s$



**Figure I.24 :** Réponse des résidus en présence de défaut sur U1

Initialement à 0, en présence du défaut le résidu R(3) change de signe et devient négative après 0.0001s de l'apparition du défaut et le résidu R(1) passe à 2 après 0.0003 de la détection du défaut.

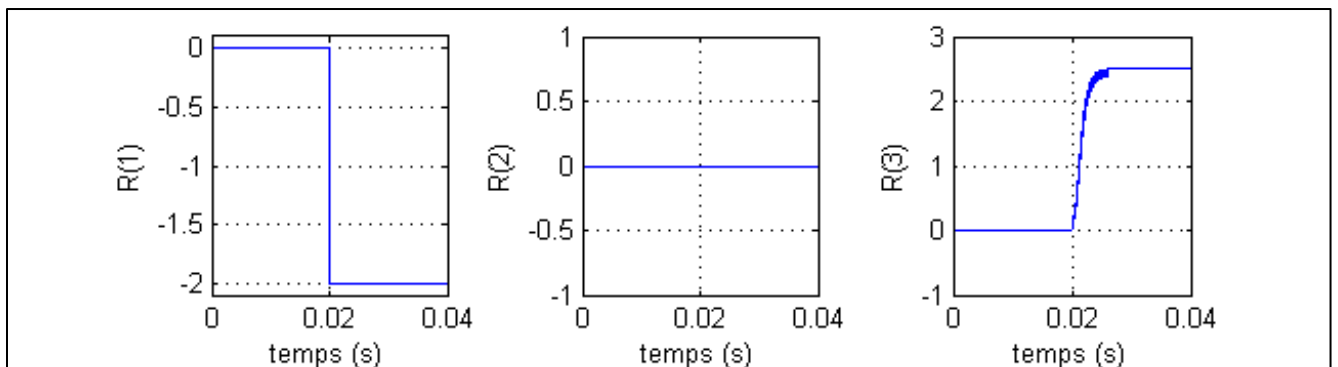
- Pour un blocage de  $u_2 = 0$  à  $t=0.02s$



**Figure I.25** : Réponse des résidus en présence de défaut sur U2

Initialement à 0, le résidu R(3) change de signe et devient négatif après 0.0001s de l'apparition du défaut et le résidu R(1) passe à -1 après 0.0001 de la détection du défaut.

- Pour un blocage de  $u_3 = 1$  à  $t=0.02s$



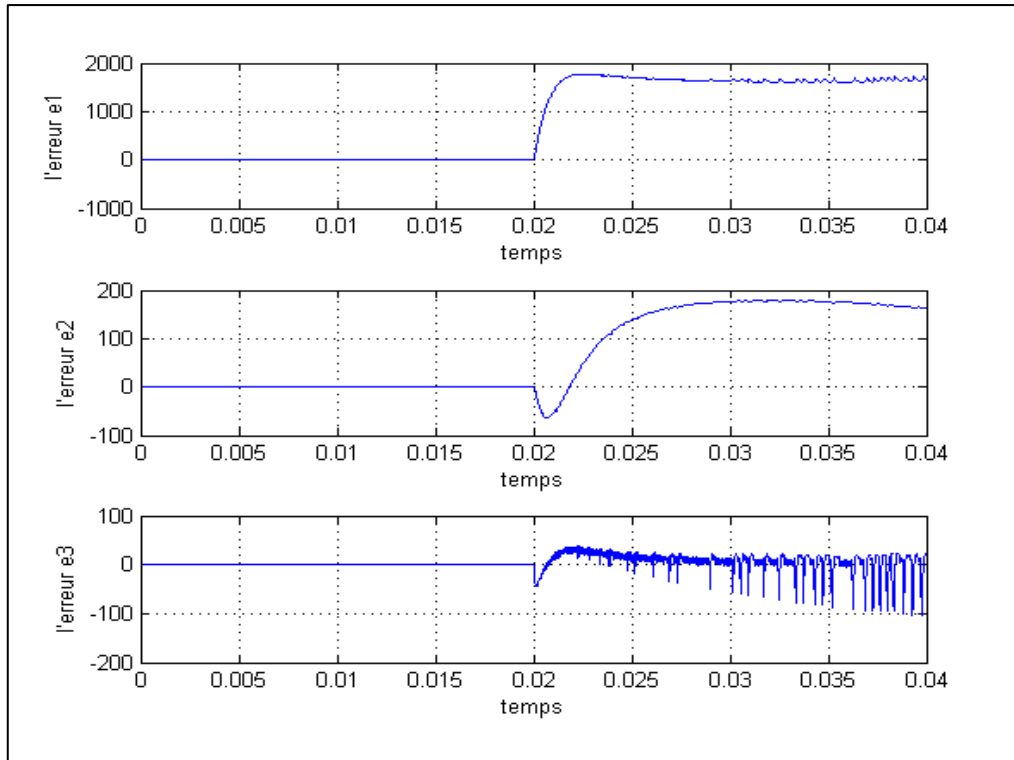
**Figure I.26** : Réponse des résidus en présence de défaut sur U3

Le résidu R(3) change de signe et devient positif après 0.0001s de l'apparition du défaut et le résidu R(1) passe à -2 après 0.0001 de la détection du défaut nous constatons que notre résidu a bien détecté le défaut.

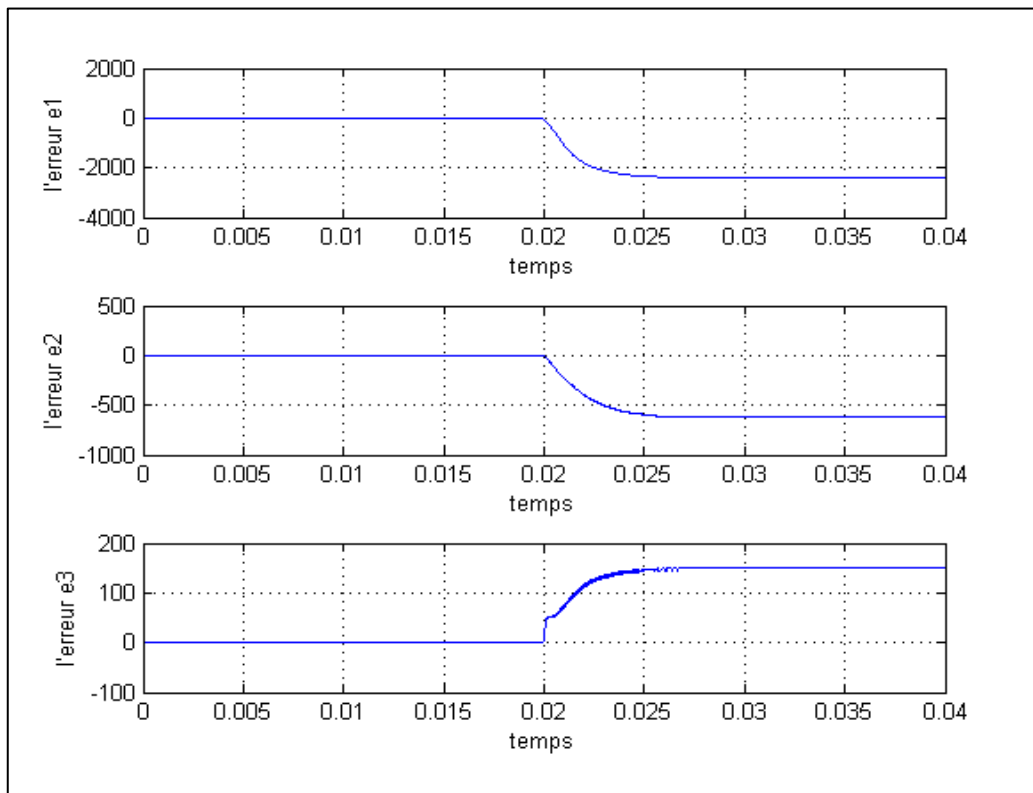
Ces tests montrent que les états des résidus générés coïncident parfaitement avec les états des défauts et sont générés avec un temps de prise très court. Ceci valide les règles de décision choisies.

### I.2.1.3. Diagnostic à base d'un observateur adaptatif

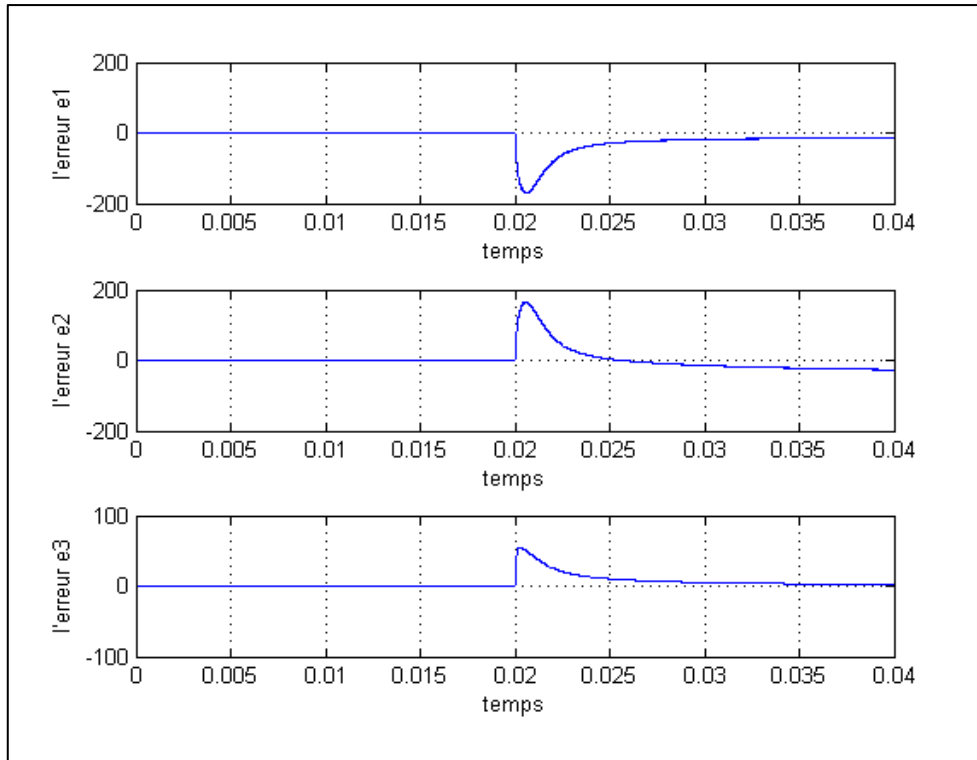
Nous allons procéder de la même manière que précédemment, nous introduisons une série de blocages cellule pour voir le comportement des erreurs d'observations et cela pour établir la table de signature :



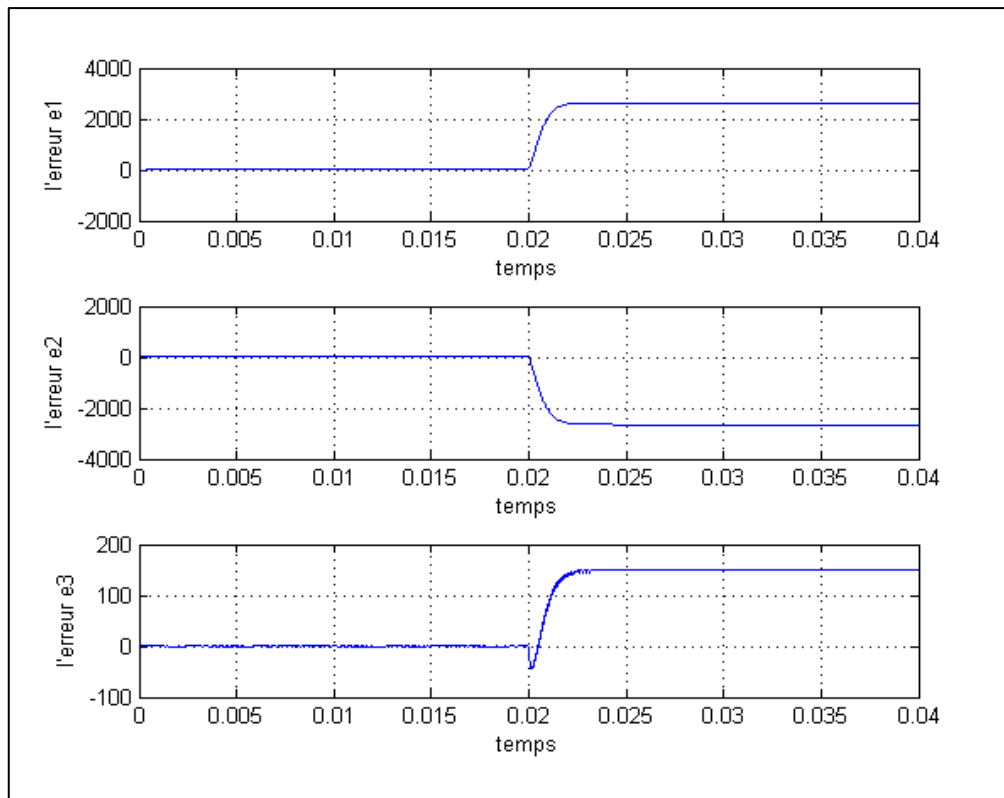
**Figure I.27** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=0$



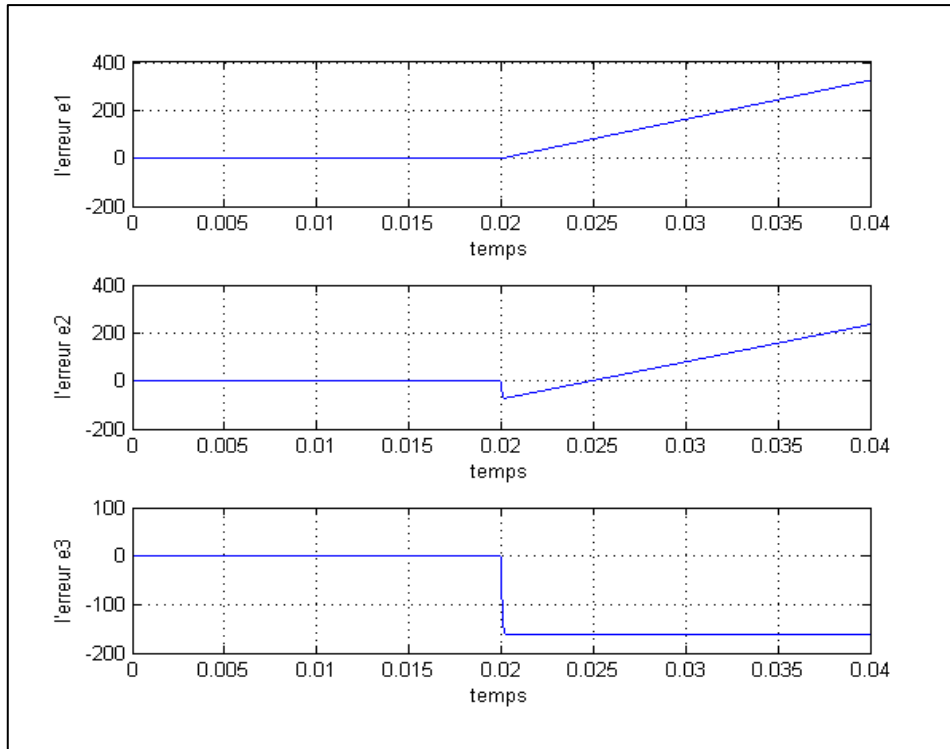
**Figure I.27** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U1=1$



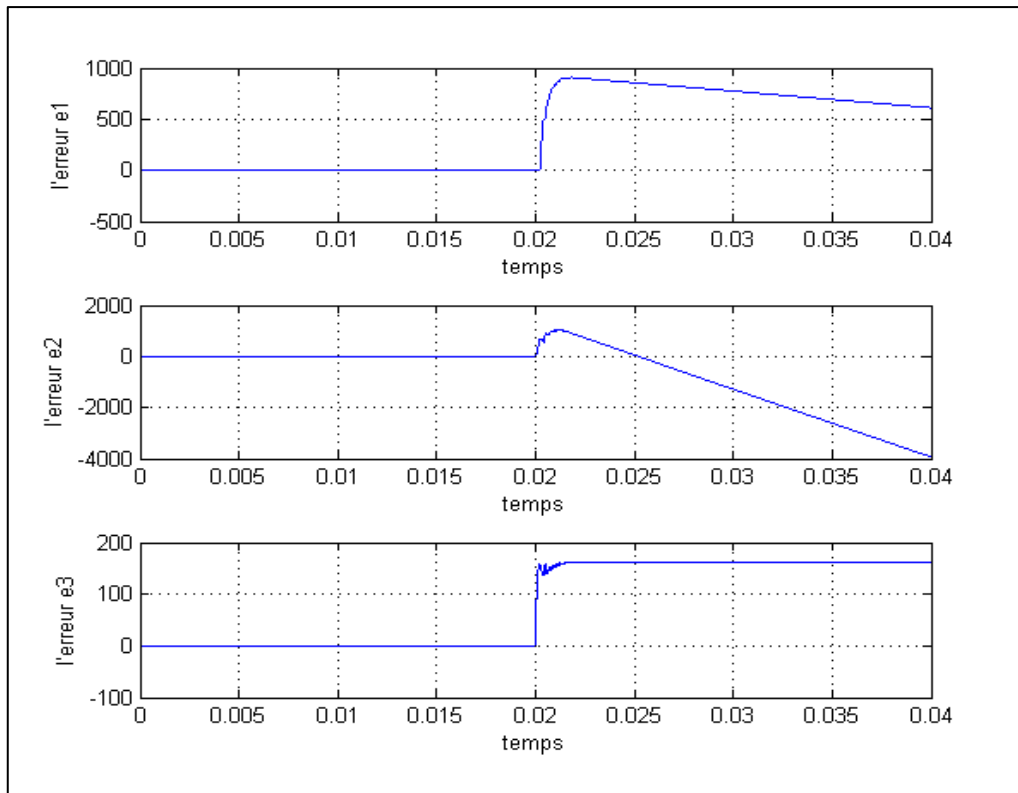
**Figure I.28** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U2=0$



**Figure I.29** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U2=1$



**Figure I.30** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U3=0$



**Figure I.31** : Erreurs d'estimation pour un blocage de  $U3=1$

Les résultats obtenus peuvent être résumée dans le tableau suivant :

Etat bloqué	Conséquence sur les erreurs d'observation
$u_1 = 0$	$e_1$ augmente, $e_2$ diminue puis augmente, $e_3$ oscille autour de 0.
$u_1 = 1$	$e_1$ diminue, $e_2$ diminue, $e_3$ augmente.
$u_2 = 0$	$e_1$ diminue puis augmente, $e_2$ augmente puis diminue, $e_3$ augmente puis diminue
$u_2 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ diminue, $e_3$ diminue puis augmente.
$u_3 = 0$	$e_1$ augment, $e_2$ diminue puis augment, $e_3$ diminue.
$u_3 = 1$	$e_1$ augmente, $e_2$ augmente puis diminue, $e_3$ augmente.

Tableau I.6: Signature de fonctionnement avec défaut

Nous remarquons que pour le cas des blocages de ( $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 1$  et  $u_3 = 1$ ) la réponse des erreurs d'observation est la même, nous proposons dans ce cas un seul résidu qui nous servira uniquement à la détection d'une éventuelle panne et il prendra la forme suivant:

$$R = \frac{e_1}{V_{c1ref}} + \frac{e_2}{V_{c2ref}} + \frac{e_3}{I_{ref}}$$

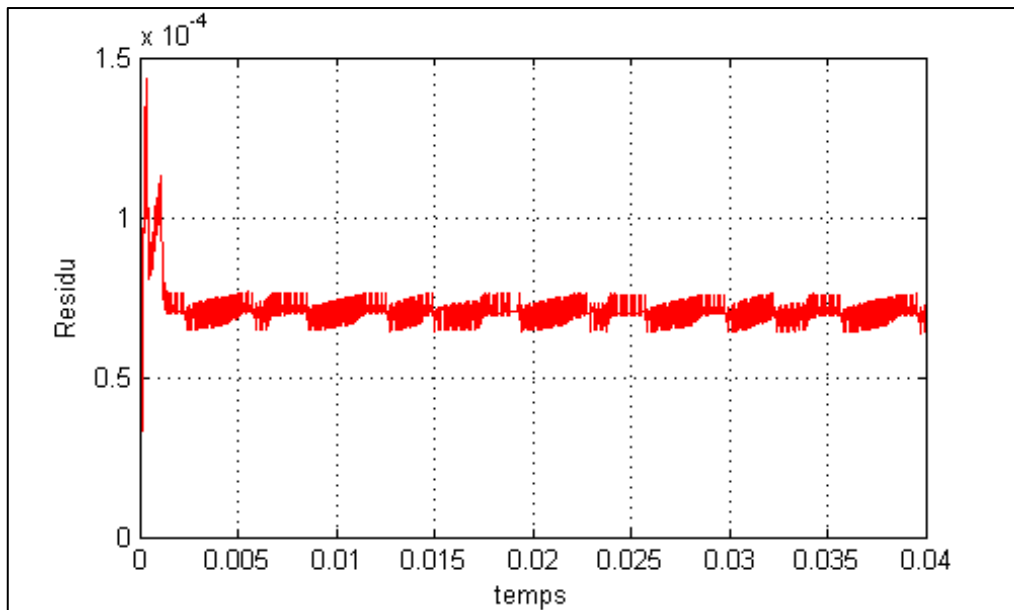


Figure I.32 : la réponse du résidu en absence du défaut



La phase de détection est réalisée par le fait que le résidu diffère de zéro en présence de défaut. La localisation des défauts se fera en utilisant une logique décisionnelle qui utilise la mesure du courant et les tensions intermédiaires, on pourra ainsi localiser la panne.. A l'aide de cette logique de décision, la localisation est assurée.

Le tableau **I.7** nous montre les résultats de simulation pour tout les cas de blocage cellule possibles. Cette simulation a été mise au point avec une commande par mode glissant. Les caractéristiques utilisées du convertisseur multicellulaire restent inchangées.

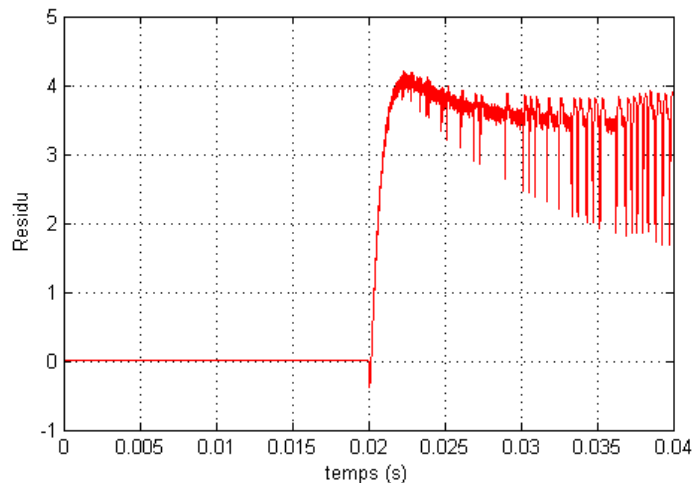
Etat bloqué	Conséquence sur les états du système
$u_1 = 1$	$V_{c1}$ diminue, $V_{c2}$ diminue, $I$ augmente.
$u_1 = 0$	$V_{c1}$ augmente, $V_{c2}$ augmente, $I$ diminue.
$u_2 = 1$	$V_{c1}$ augmente, $V_{c2}$ diminue, $I$ augmente.
$u_2 = 0$	$V_{c1}$ diminue, $V_{c2}$ augmente, $I$ diminue.
$u_3 = 1$	$V_{c1}$ augmente, $V_{c2}$ augmente, $I$ augmente.
$u_3 = 0$	$V_{c1}$ diminue, $V_{c2}$ diminue, $I$ diminue.

**Tableau I.7:** Signature de fonctionnement avec défaut

Nous remarquons que pour un blocage de la commande «  $u_i$  à 0 » le courant de charge diminue alors que pour un blocage de «  $u_i$  à 1 » le courant de charge augmente.

Nous avons testé les résidus pour chaque cas de blocage cellule, voici quelques résultats représentatifs des tests :

- Pour un blocage de  $u_1 = 0$  à  $t=0.02s$



**Figure I.33 :** la réponse du résidu en présence de défaut

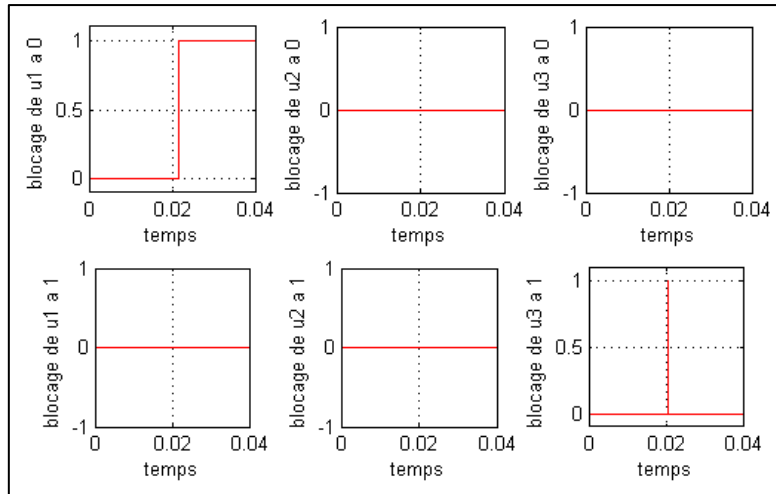


Figure I.34 : localisation du défaut

- Pour un blocage de  $u2 = 1$  à  $t=0.02s$

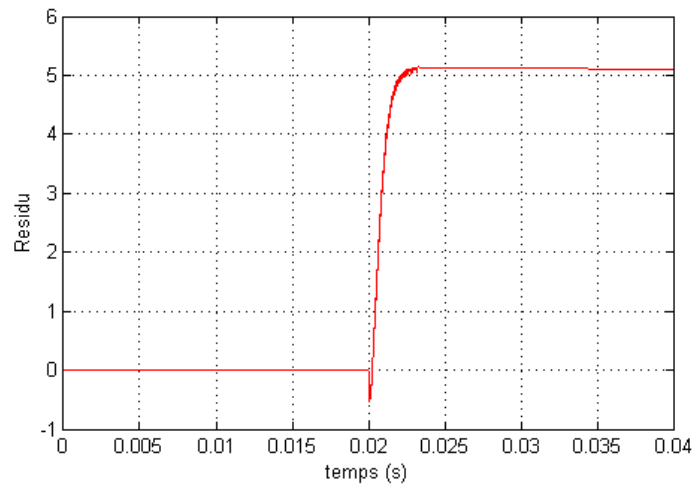


Figure I.35 : la réponse du résidu en présence de défaut

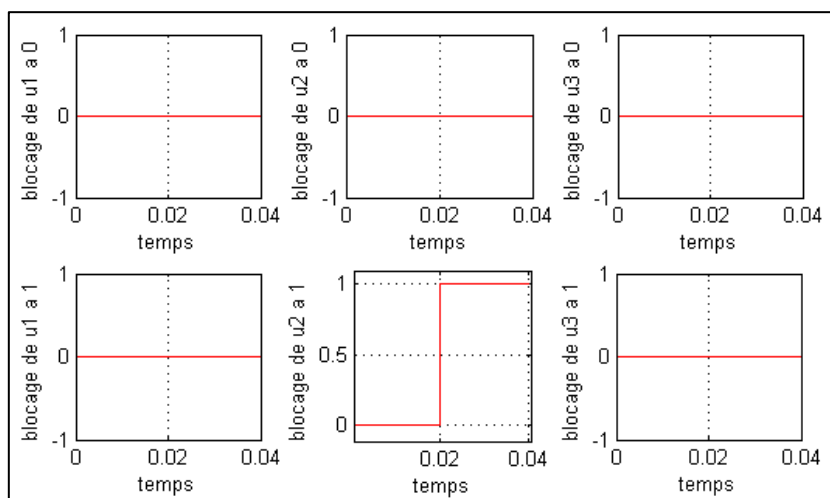


Figure I.36 : localisation du défaut

- Pour un blocage de  $u_3 = 1$  à  $t=0.02s$

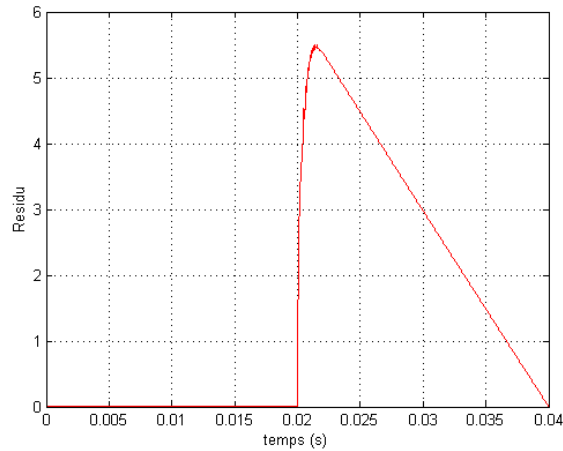


Figure I.37 : la réponse du résidu en présence de défaut

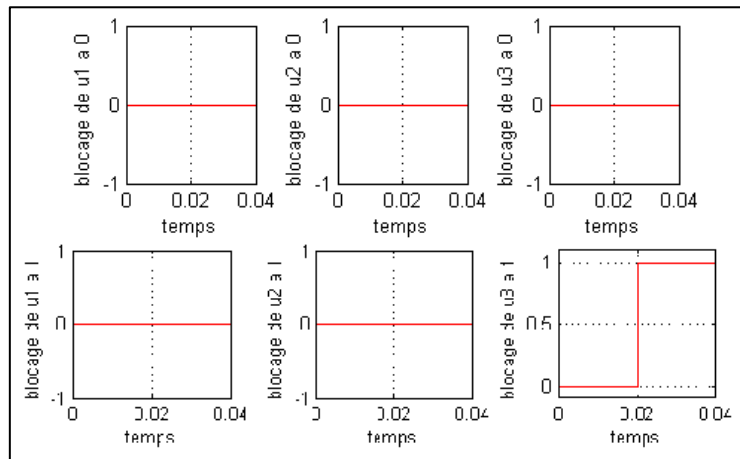


Figure I.38 : localisation du défaut

Nous constatons que l’algorithme adapté pour la détection et la localisation du défaut a bien fonctionné.

## I.2.2. Diagnostic du vieillissement des capacités des convertisseurs multicellulaires

Les condensateurs représentent un des éléments constituant les convertisseurs électriques, ayant pour rôle le filtrage et le stockage d’énergie ce qui rend leur tâche soumise à différentes contraintes et par conséquent une durée de vie relativement faible par rapport aux autres composants des convertisseurs d’énergie. Parmi les causes de défaillances de ces éléments de stockage on trouve leur vieillissement.

### I.2.2.1. Les cause de défaillance

Les condensateurs utilisés en électronique de puissance, surtout les électrolytiques, sont les éléments les plus fragiles dans un convertisseur.

Ainsi, dans des conditions de fonctionnement normales, les défaillances dites immédiates ne se produisent pas à moins que n'apparaissent des surtensions ou des surintensités accidentelles, ou que la qualité de ces condensateurs ne soit pas surveillée. En fonctionnement normal, d'autres phénomènes sont susceptibles d'intervenir et d'altérer les propriétés du condensateur au cours du temps et parmi ces phénomènes on trouve :

- L'altération chimique.
- La rupture des connexions.
- La perte d'électrolyte.

Et parmi les causes d'apparition de ses phénomènes on trouve :

- L'apparition de surtensions répétitives.
- La dégradation par tension inverse.
- La dégradation par température ou courant élevé.

### I.2.2.2. Etude du vieillissement des capacités du convertisseur 3 cellules [20]

Afin d'étudier le vieillissement des condensateurs dans le convertisseur 3 cellules on place en parallèle avec chaque condensateur une résistance  $R_i$  pour le  $n^{i\text{ème}}$  condensateur.

Cette résistance dont la valeur varie de  $0$  à  $+\infty$  caractérisera en fait un vieillissement progressif qui dépend en fait du temps et de la température car plus la température augmente plus les pertes sont considérables.

La figure nous donne le circuit du convertisseur à 3 cellules étudiées :

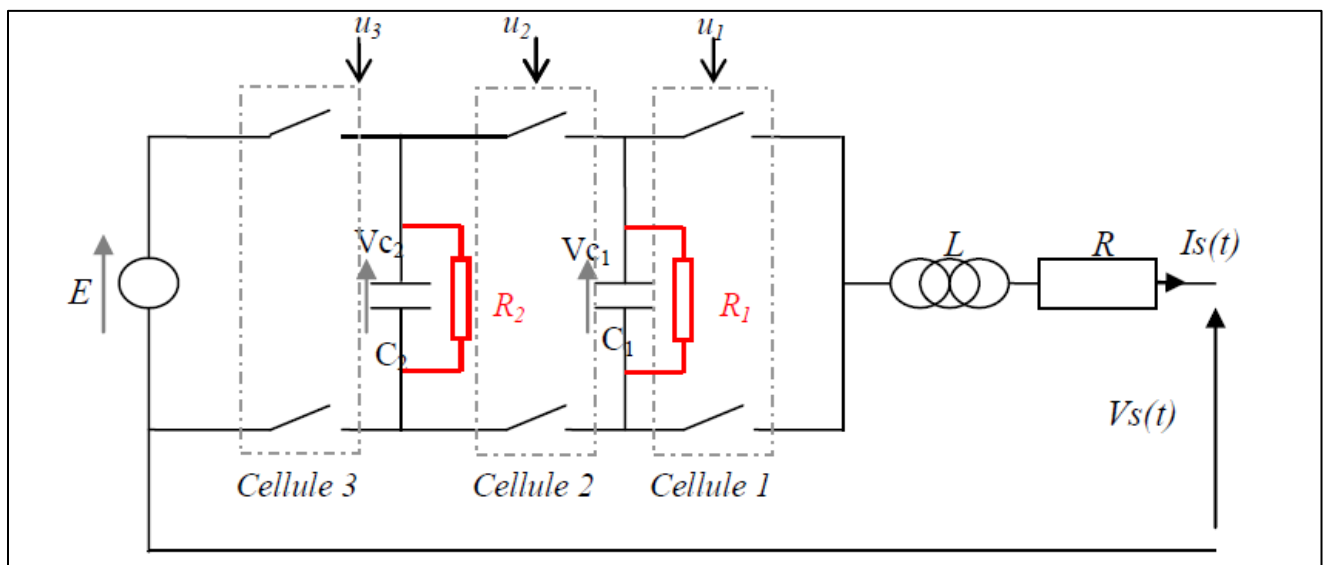


Figure I.39: Schéma de convertisseur à 3 cellules

Le modèle mathématique :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{c1} \\ \dot{V}_{c2} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{R}{L} \cdot I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \cdot (u_2 - u_1) \cdot I \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_2} & \frac{1}{C_2} \cdot (u_3 - u_2) \cdot I \\ -\frac{1}{L} \cdot (u_2 - u_1) \cdot V_{c1} & -\frac{1}{L} \cdot (u_3 - u_2) \cdot V_{c2} & \frac{E}{L} \cdot u_3 \end{bmatrix}$$

$$R_i = \begin{cases} +\infty & \text{Condensateur parfait} \\ 0 & \text{Défaillance totale du condensateur} \end{cases}$$

Il a été démontré dans plusieurs travaux que les conséquences d'une telle défaillance touchent toutes les variables d'état c'est-à-dire que le vieillissement d'un des deux condensateurs touche toutes les variables d'état du système. L'utilisation des observateurs étudiés précédemment s'avérera alors fautive pour ce cas de figure car la structure du système change ainsi les observations calculées ne refléteront ni un fonctionnement sain ni un fonctionnement en défaut mais un fonctionnement inexploitable.

Et pour remédier à ce problème plusieurs travaux ont proposés une adaptation du concept d'inversion du système à gauche mais non pas au calcul des variables d'état ou de la commande appliquée mais plutôt au calcul d'un vecteur résidu sensible à la variation de la résistance parallèle. Pour utiliser cette méthode ils ont supposé uniquement que les variables du système sont mesurables. Le résidu proposé aura la forme suivante

$$r = \begin{bmatrix} e^{-\left| \frac{1}{\left( (V_{c1} \frac{1}{C_1} (u_2 - u_1) \cdot I) \cdot C_1 \right)} \right| \cdot V_{c1}} \\ e^{-\left| \frac{1}{\left( (V_{c2} \frac{1}{C_2} (u_3 - u_2) \cdot I) \cdot C_2 \right)} \right| \cdot V_{c2}} \end{bmatrix}$$

Ce vecteur dont les éléments  $r(1)$  et  $r(2)$  seront sensibles respectivement à un vieillissement des condensateurs  $C1$  et  $C2$  et prendront les valeurs  $r(i) = 0$  pour un condensateur sain et  $r(i) = 1$  pour une défaillance totale.

Cette méthode pourrait aussi permettre d'estimer le taux de défaillance du vieillissement du condensateur en faisant l'étalonnage de la variation du résidu par rapport au taux de vieillissement du condensateur.

### I.2.3. Etude du cas du blocage d'interrupteur.

Nous introduisons une série de blocage interrupteurs pour voir le comportement des erreurs d'observations et des variable états du système et cela pour établir la table de signature, notre travaille se résumera à un blocage court-circuit

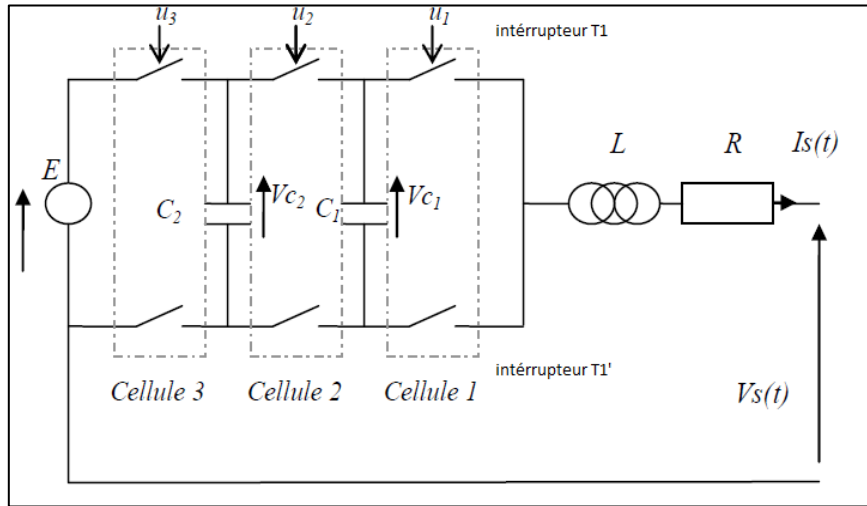


Figure I.40: Schéma de convertisseur à 3 cellules

- Cas du blocage de l'interrupteur T1

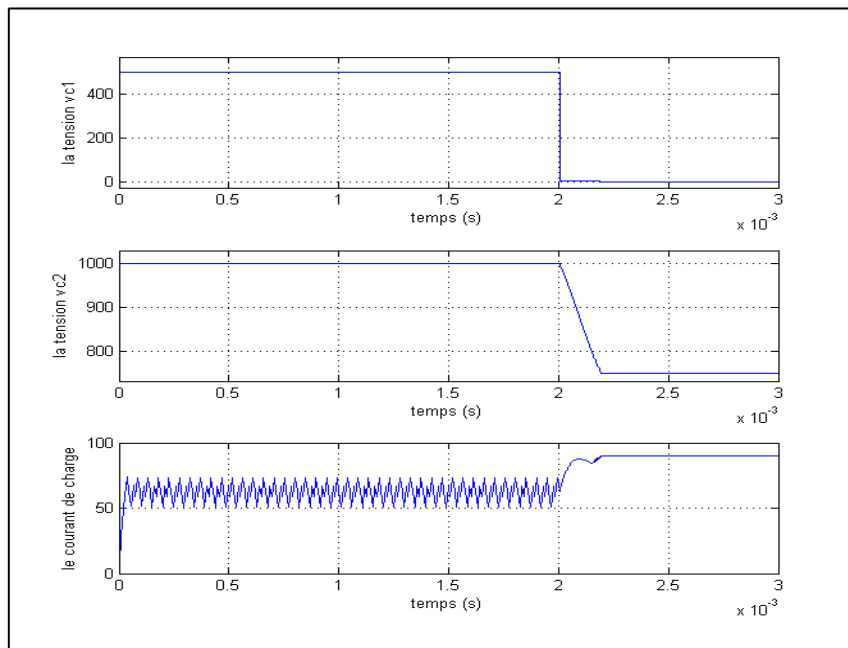
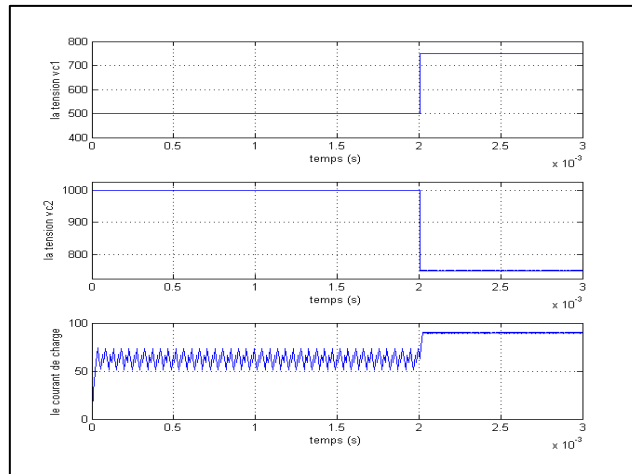


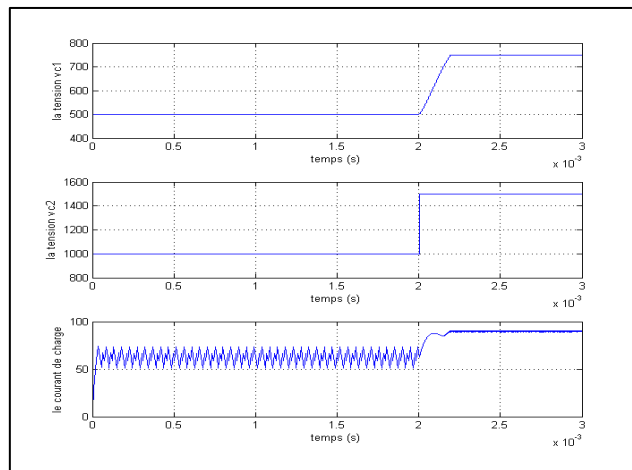
Figure I.41 : Signaux de sortie pour un blocage de T1

- Cas du blocage de l'interrupteur T2



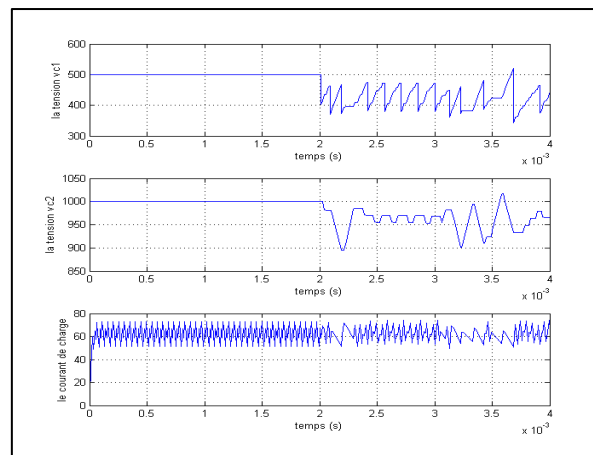
**Figure I.42 :** Signaux de sortie pour un blocage de T2

- Cas du blocage de l'interrupteur T3



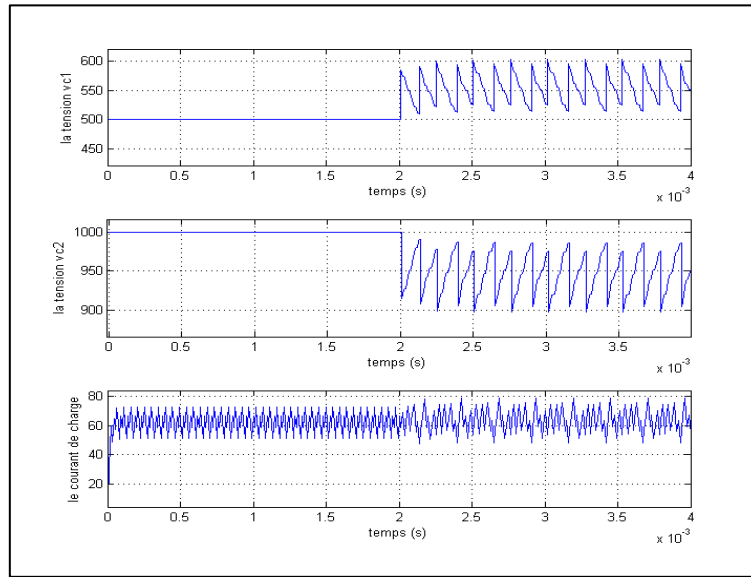
**Figure I.43:** Signaux de sortie pour un blocage de T3

- Cas du blocage de l'interrupteur T1'



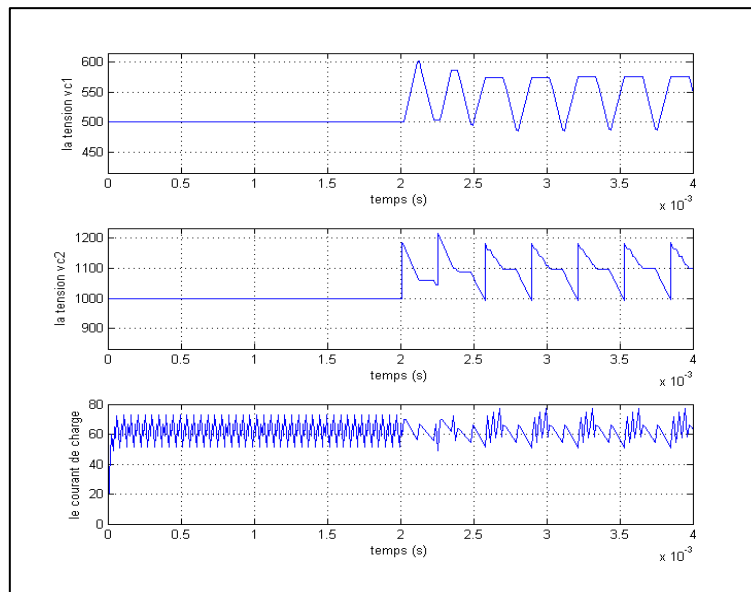
**Figure I.44 :** Signaux de sortie pour un blocage de T1'

- Cas du blocage de l'interrupteur T2'



**Figure I. 45:** Signaux de sortie pour un blocage de T2'

- Cas du blocage de l'interrupteur T3'



**Figure I.46 :** Signaux de sortie pour un blocage de T3'

Le tableau I.8 résume le blocage de chaque interrupteur et son effet sur les tensions Vc1 Vc2 et le courant I.

Nous remarquons que pour un blocage des interrupteur T1, T2 et T3 le courant de sortie augmente alors que pour un blocage des interrupteur T1', T2' et T3' le courant poursuit toujours la référence.



Interrupteurs	Vc1	Vc2	I
T1	Diminue (s'annule)	Diminue (750v)	Augmente (90A)
T1'	Diminue monx 350V	Diminue Min 900v	Oscille autour de la valeur de référence
T2	Augmente (750V)	Diminue (750V)	Augmente
T2'	Augmente Max 600V	Diminue Min 900	Oscille autour de la valeur de référence
T3	Augmente (750V)	Augmente (1500V)	Augmente
T3'	Augmente Max 600	Augmente Max 1200	Oscille autour de la valeur de référence

**Tableau I.8 :** Le blocage de chaque interrupteur et son effet sur les tensions et le courant.

Le tableau suivant résume l'influence des blocages interrupteurs sur les erreurs d'observations

Interrupteurs	e1	e2	e3
T1	Diminue	Diminue	Augmente
T1'	Diminue	Diminue	Oscille autour de 0
T2	Augmente	Diminue	Augmente
T2'	Augmente	Diminue	Oscille autour de 0
T3	Augmente	Augmente	Augmente
T3'	Augmente	Augmente	Oscille autour de 0

**Tableau I.9 :** Le blocage de chaque interrupteur et son effet sur les erreurs d'observation.

Nous proposons dans ce cas un seul résidu qui nous servira uniquement à la détection d'un éventuel blocage d'interrupteur et il prendra la même forme que celui utilisé pour la détection du défaut cellule à base d'un observateur adaptative:

$$R = \frac{e_1}{V_{c1ref}} + \frac{e_2}{V_{c2ref}} + \frac{e_3}{I_{ref}}$$

Pour la localisation du défaut, nous proposons deux indicateurs  $r_1$  et  $r_2$  sensibles aux variations des erreurs d'observation, tels que  $r_1$  égale à 1 pour une diminution de  $e_1$  et  $e_2$  et égale à -1 dans le cas contraire,  $r_2$  égale à 1 pour  $e_1$  augmente et  $e_2$  diminue, et pour distinguer entre un blocage de l'interrupteur  $T_i$  ou  $T_i'$ , nous avons utilisé l'erreur d'observation  $e_3$ .

Nous avons testé les résidus pour chaque cas de blocage interrupteur, voici quelques résultats représentatifs des tests :

- Cas du blocage de l'interrupteur  $T_1$

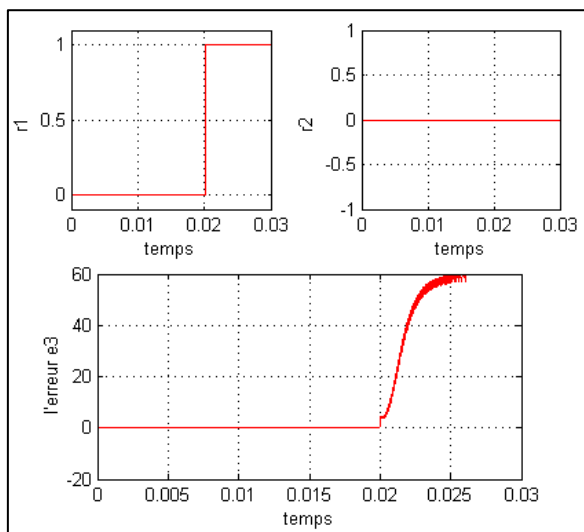


Figure I. 47: blocage de  $T_1$

- Cas du blocage de l'interrupteur  $T_2'$

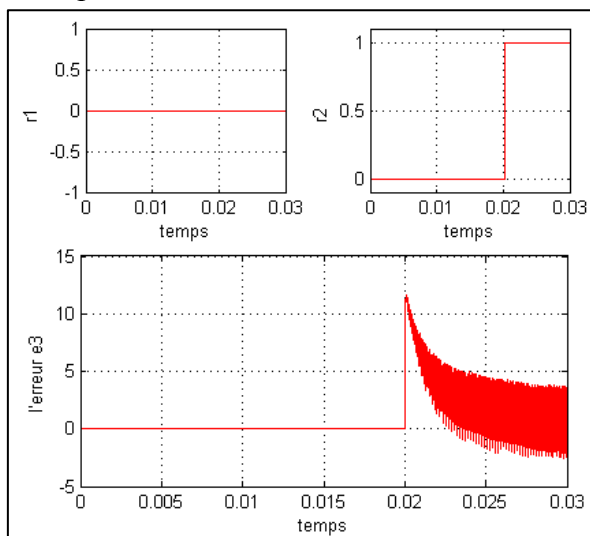
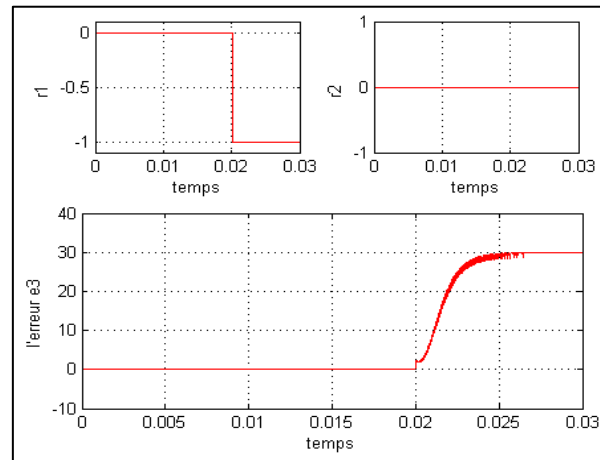


Figure I. 48: Signaux de sortie pour un blocage de  $T_2'$

- Cas du blocage de l'interrupteur T3



**Figure I. 49:** blocage de T3

Nous remarquons que l'approche utilisée nous permet de détecter et localiser le défaut.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au diagnostic de trois types de défauts dans le convertisseur multicellulaire à savoir le blocage cellule et le vieillissement des condensateurs flottants et le blocage d'interrupteur en court-circuit.

Pour établir ces diagnostic nous avons appliqué la technique du diagnostic à base d'observateur, sur la structure de conversion multicellulaire et cela on utilisant les trois observateur synthétisé dans le chapitre II. Le principe était de générer des résidus qui ont la fonction de donner une information sur la localité de défaut produit et de sa nature (s'il représente un blocage en fermeture ou en ouverture de la commande). Un fonctionnement normal (sans défaut) est caractérisé par la concordance des variables états du convertisseur avec celles de l'observateur. La présence d'un défaut est-elle traduite par la déviance de ces variables de celles de l'observateur. Nous avons alors utilisé cette information de changement de la dynamique des erreurs d'observation pour détecter le défaut puis le localiser.

## Chapitre II

# Etude Expérimentale

Après validation par simulation, nous procédons, dans ce chapitre, à la présentation de la maquette expérimentale que nous avons utilisé pour valider nos constatations sur le comportement de CMC en cas d'un blocage cellule. Nous avons ainsi dans un premier temps diagnostiqué le comportement du convertisseur alimenté par une source continue puis par une source photovoltaïque.

## II.1. Description de la maquette expérimentale

Nous avons utilisé une maquette au Laboratoire de Commande des Processus qui consiste en un prototype de chaîne photovoltaïque destiné pour des applications pédagogiques ou de recherche. Le banc expérimental comporte une carte dSPACE1104, un convertisseur multicellulaire à trois cellules, une charge RL et un panneau photovoltaïque de 55Wp. Les interrupteurs du bras multicellulaire sont constitués des transistors MOSFET montés en antiparallèles avec des diodes. Les MOSFETs sont associés à des modules de commande gérant les temps morts et la protection contre les courts circuits. Les signaux de commande des MOSFET sont issus de la carte DS1104 de chez dSPACE, à base d'un processeur dédié au traitement du signal, le TMS320C31 de Texas Instrument et de plusieurs convertisseurs analogiques-numériques et numériques-analogiques. La photo de ce banc expérimental est donnée sur la figure suivant :



FigureII.1 : Photo du banc d'essais expérimental

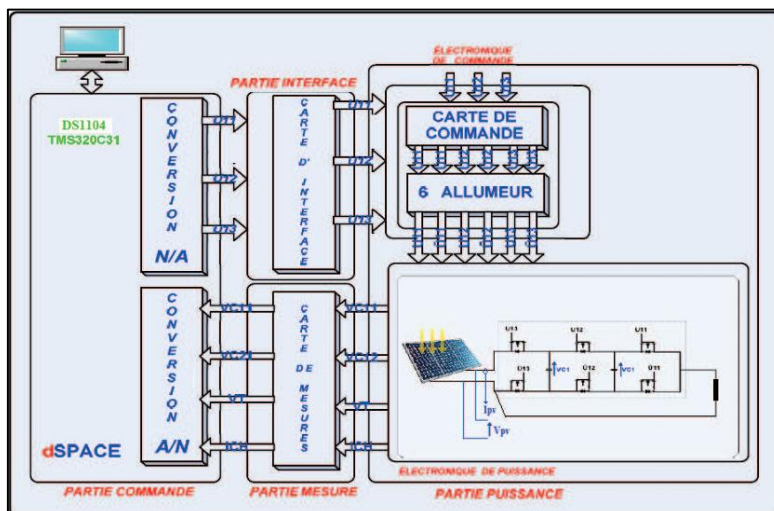


Figure II.2 : Synoptique du banc d'essais expérimental

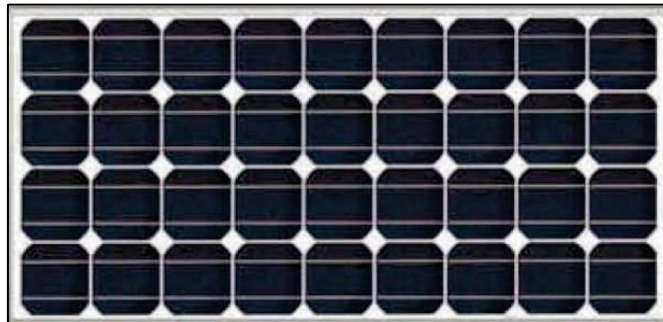
Ce schéma met en évidence quatre différentes parties :

- a) La partie puissance qui regroupe :
  - L'alimentation



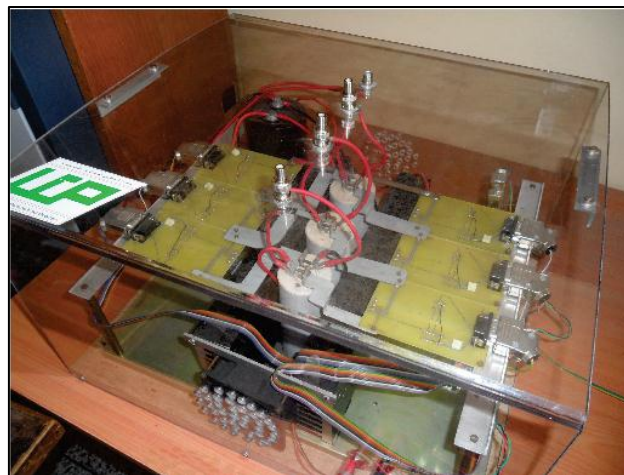
**Figure II.3** : Photo de l'Alimentation

- Le panneau photovoltaïque



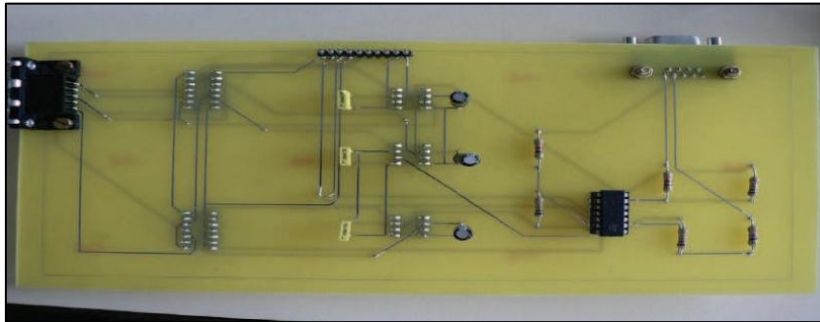
**Figure II.4** : Photo d'un panneau photovoltaïque

- Le convertisseur multicellulaire



**Figure II.5** : Photo du convertisseur multicellulaire

- Les cartes de commande d'allumage



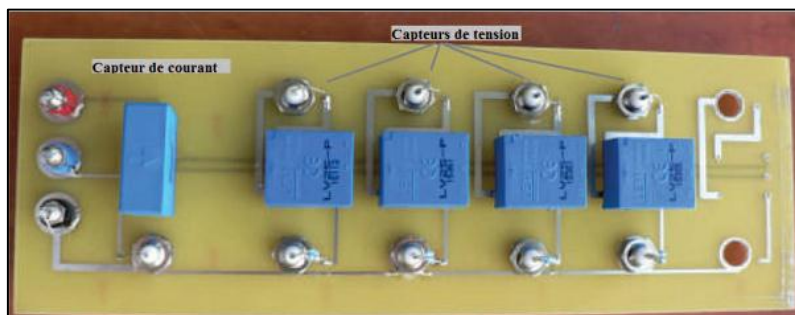
**Figure II.6 :** Photo de la carte de commande

- La charge R



**Figure II.7:** Photo de la charge R

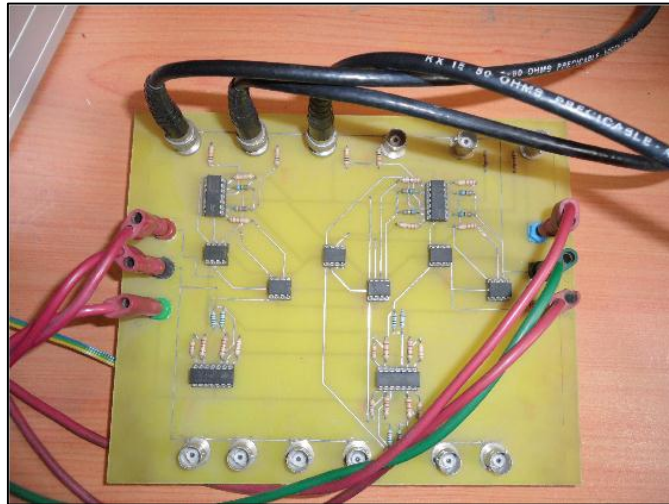
- b) La partie mesure, constituée des capteurs de tension ( pour mesurée les tension condensateur flottants )



**Figure II.8:** Photo de la carte de mesure

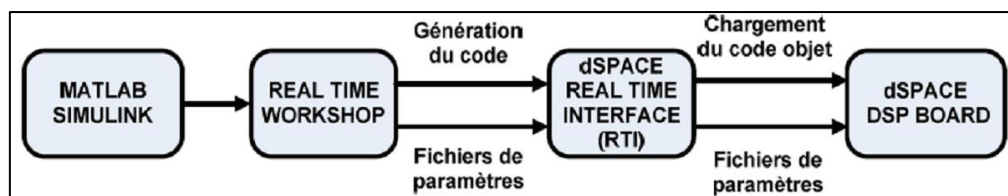
- c) La partie interface qui est l'étage d'isolation optique et de protection des sorties de la carte dSPACE.





**Figure II.9** : Photo de la carte de protection

- d) La partie commande constituée d'une carte de contrôle DS1104 (basé sur un DSP TMS320C31) et pilotée par ordinateur. Ce dernier permet de générer le code objet défini à partir de l'algorithme de commande. En effet, il permet d'écrire l'essentiel de l'algorithme de commande par schéma blocs sous le logiciel Matlab-Simulink et de modifier les paramètres de la commande en cours de fonctionnement. La conversion du programme en langage C se fait au moyen de l'outil Real Time Work shop de Simulink qui procure une façon rapide et efficace pour traduire les modèles de simulation en code C en fournissant une procédure automatique pour le codage, la compilation, l'édition Des liens et le téléchargement des exécutables sur le processeur DSP. La figure V.10 présente les différentes étapes de l'implantation de la commande.



**Figure V.10** : Procédure d'implantation en temps réel

De même la supervision du déroulement des programmes peut être faite en utilisant le logiciel ControlDesk.



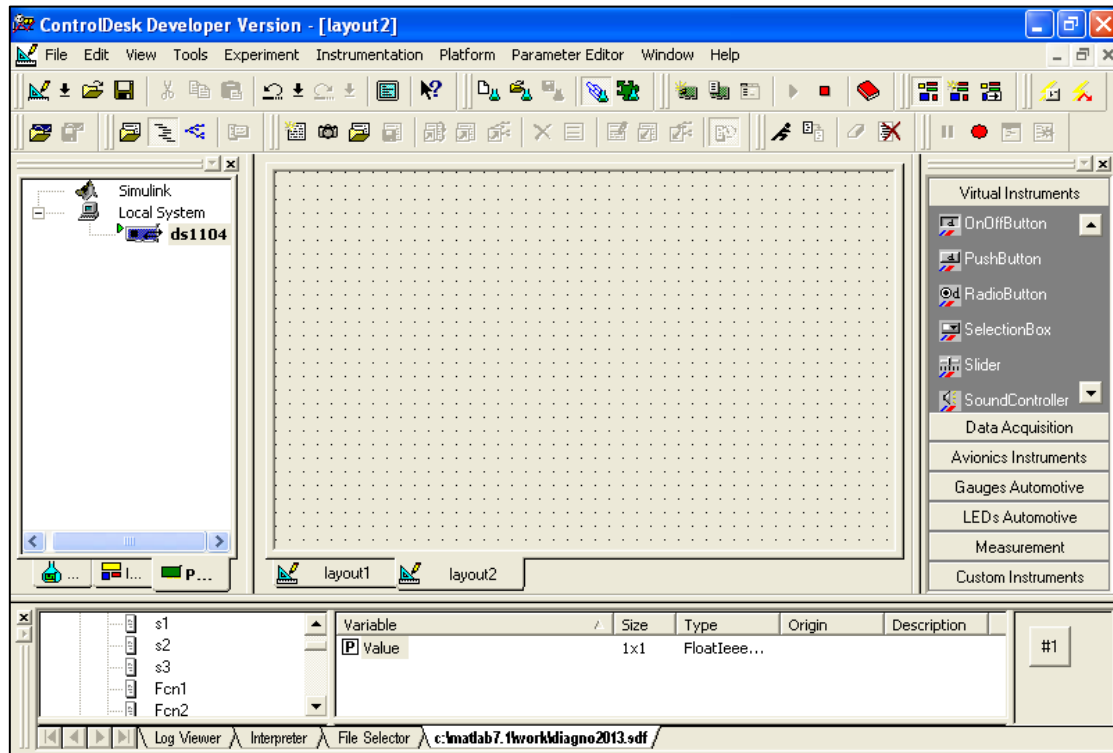


Figure II.11 : Fenêtre du logiciel ControlDesk

## II.2. Quelques résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous allons présenter quelques résultats expérimentaux obtenus sur la maquette du laboratoire où le convertisseur est commandé en MLI boucle ouverte, en utilisant une source d'alimentation continue puis une source photovoltaïque. Nous avons supervisé les tests sur un oscilloscope.

### a) Source continue :

Pour une tension d'entrée de 4v nous avons obtenus les tensions de sortie suivantes :

Les bases Tension, temps utilisé dans ce cas : 1v/ division et 100 us/division

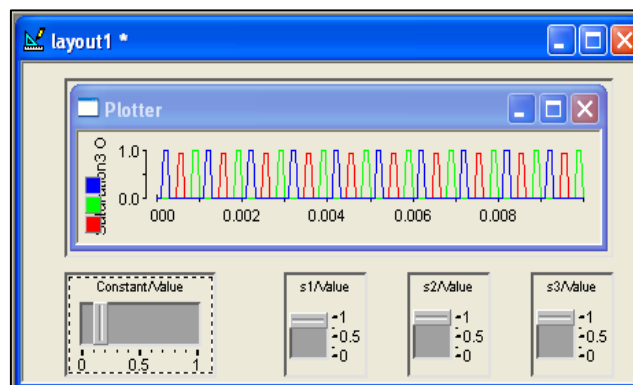


Figure II.12: Signaux de commande pour un rapport cyclique 0.2



Figure II.13 : Tension de sortie pour alpha 0.2

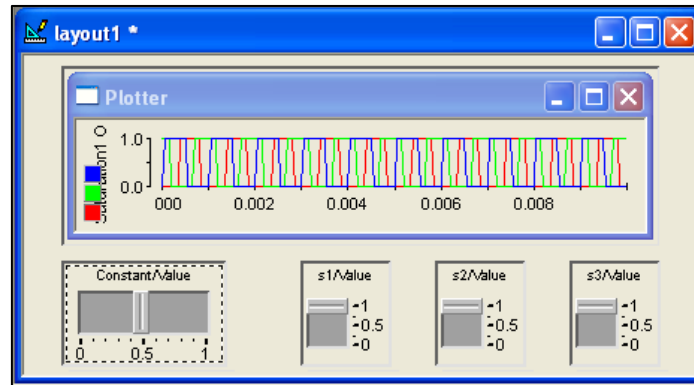


Figure II.14: Signaux de commande pour un rapport cyclique 0.5

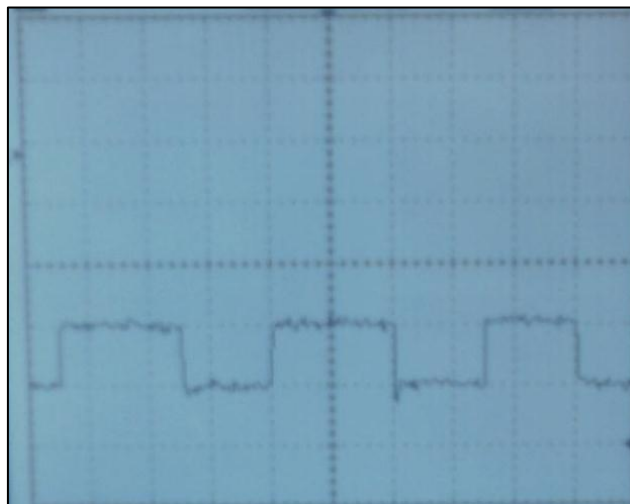


Figure II.15: Tension de sortie pour alpha 0.5



**Figure II.16:** Signaux de commande pour un rapport cyclique 0.8



**Figure II.17 :** Tension de sortie pour alpha 0.8

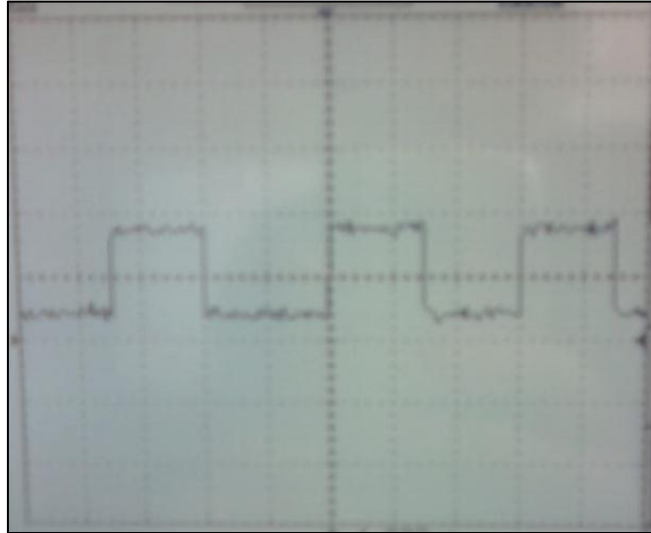
Nous constatons l'existence de trois niveaux de tension et cela en fonction de la valeur du rapport cyclique, pour un  $\alpha=0.2$  nous remarquons que la tension de sortie bascule entre [0v et 1.8v] pour une période de 0.35 ms, pour  $\alpha=0.5$  nous remarquons qu'elle bascule entre [1.8v et 2v] pour une période de 0.35ms, alors que pour un  $\alpha=0.8$  la tension de sortie de sortie bascule entre [2v et 3v] pour une période de 0.35 ms.

Ces résultats confirment l'étude théorique du chapitre II.

#### **b) Source photovoltaïque :**

Pour une tension d'entrée de 10 v et les mêmes signaux de commande appliquée pour une source continue les signaux de sortie cette fois sont :

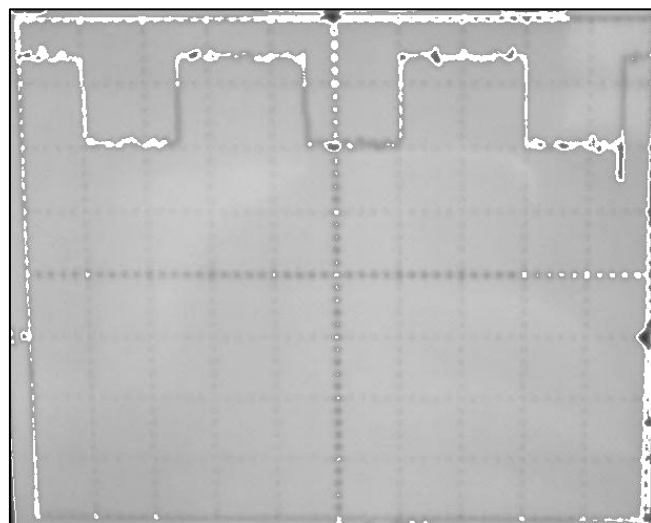
Les bases Tension et temps utilisé dans ce cas : 2v/ division et 100 us/division



**Figure II.18** : Tension de sortie pour alpha 0.2



**Figure II.19** : Tension de sortie pour alpha 0.5



**Figure II.20** : Tension de sortie pour alpha 0.8

Nous constatons ici aussi l'existence de trois niveaux de tension et cela en fonction de la valeur du rapport cyclique, pour un  $\alpha=0.2$  nous remarquons que la tension de sortie bascule entre [0v et 3.6v] avec une période de 0.35ms, pour  $\alpha=0.5$  nous remarquons que la tension de sortie bascule entre [3.6v et 6v] avec une période de 0.35ms, alors que pour une  $\alpha=0.8$  la tension de sortie de sortie bascule entre [6v et 9v] avec une période de 0.35 ms .

### II.3. Diagnostic du convertisseur alimenté par une source continue

Après avoir effectué des tests pour différentes valeurs du rapport cyclique en conditions normales avec une source de tension continue et photovoltaïque pour voir le comportement de la tension de sortie, nous avons ensuite effectué quelques tests de blocage pour revoir son comportement, cette fois, pour différentes valeurs du rapport cyclique, nous avons obtenu les résultats suivants :

#### a) Pour alpha= 0.2

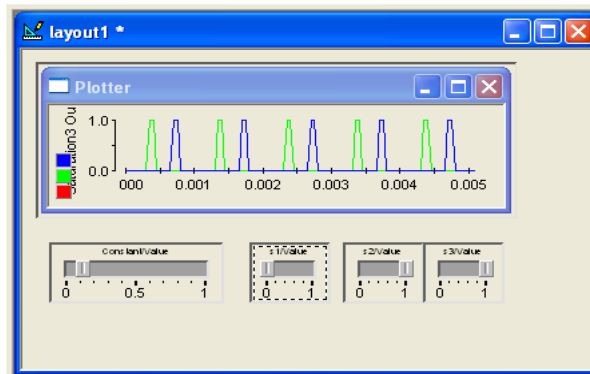


Figure II.21 : signaux de commande pour un blocage de U1

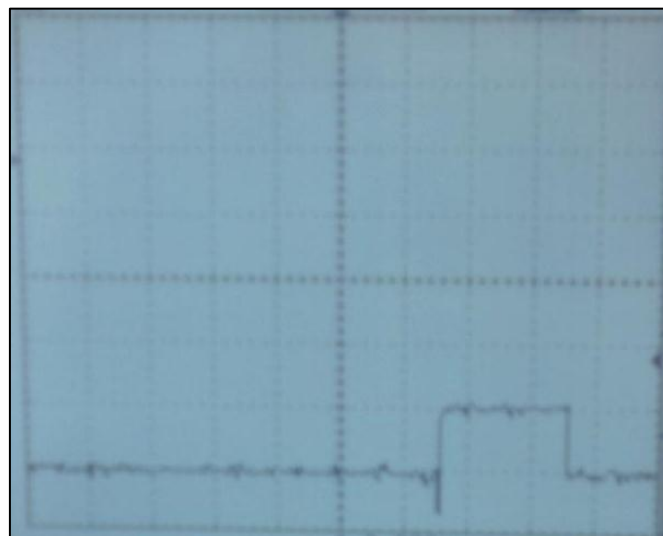
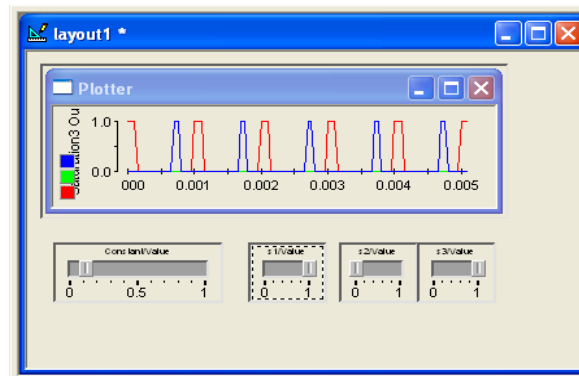
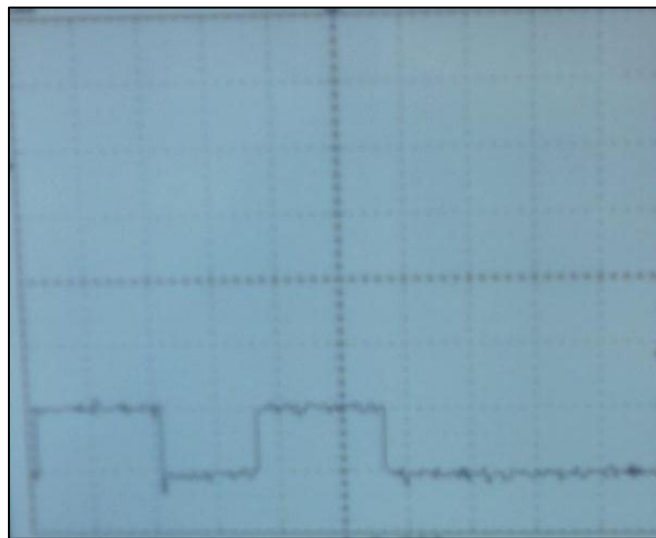


Figure II.22 : Tension de sortie pour un blocage de U1

Nous constatons que la forme du signal a changé avec une période de 1.3ms le signale de sortie égale a 1v pour une durée de 0.2 ms, puis 0 pour une durée 1.1ms.

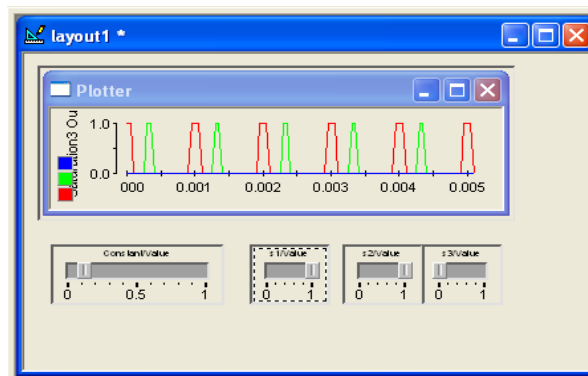


**Figure II. 23:** Signaux de commande pour un blocage de U2

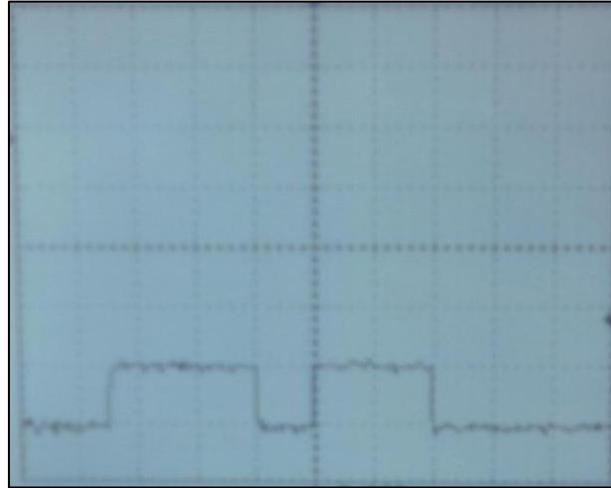


**Figure II.24 :** Tension de sortie pour un blocage de U2

Nous constatons que le forme de signal a changé, pour une période de 1.3ms le signale de sortie à deux pique d’amplitude 1v pour une durée de 0.2 ms chaque un et puis 0 pour le reste de la période.



**Figure II.25:** Signaux de commande pour un blocage de U3



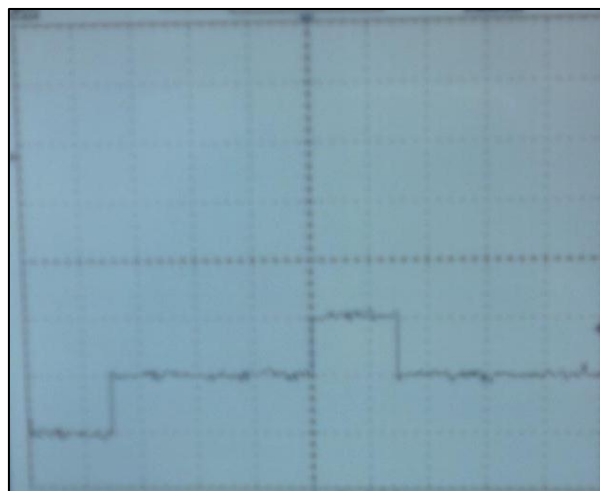
**Figure II.26** : Tension de sortie pour un blocage de U3

Nous constatons que la forme du signal a changé, pour une période de 1.3ms le signal de sortie égale à 1v, le 1<sup>er</sup> pour une durée de 0.25 ms et le 2<sup>ème</sup> pour une durée de 0.2ms pour le reste de la période la tension de sortie égale à 0.

a) **Pour alpha = 0.5**

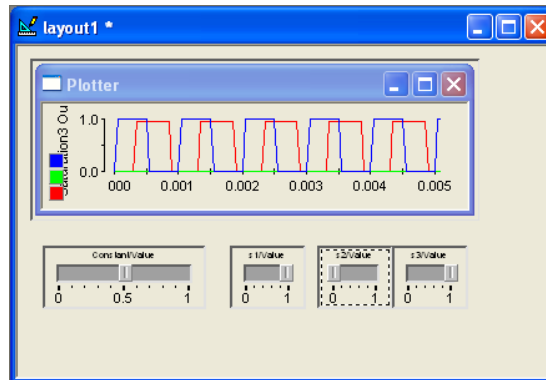


**Figure II.27** : signaux de commande pour un blocage U1



**Figure II.28** : Tension de sortie pour un blocage de U1

Nous constatons que la forme du signal a changé avec une période de 1.3ms le signale de sortie égale à 1v, avec un pique de 2v d'une durée de 0.15ms chaque et une annulation de la tension pour une durée de 0.2ms.



**Figure II.29** : signaux de commande pour un blocage U2



**Figure II.30** : Tension de sortie pour un blocage de U2

Nous constatons que la forme du signal a changé avec une période de 1.3ms le signale de sortie égale à 1v, avec un pique de 2v d'une durée de 0.2ms chaque et une annulation de la tension pour une durée de 0.15ms.



**Figure II.31** : signaux de commande pour un blocage U3





**Figure II.32** : Tension de sortie pour un blocage de U3

Nous constatons que la forme du signal a changé avec une période de 1.3ms le signal de sortie égale à 1v, avec un pic de 2v d'une durée de 0.2 ms et une annulation de la tension pour une durée de 0.2ms.

Nous remarquons aussi que les tensions basculent toujours entre [1.8v et 2v]. Les fréquences de la tension ont aussi sensiblement baissé.

**b) Pour alpha = 0.8**



**Figure II.33** : Tension de sortie pour un blocage de U1

Nous constatons que la forme du signal a changé, initialement au 3<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 2<sup>ème</sup> niveau avec une période de 0.7us le signal de sortie égale à 2v, d'une durée de 0.55ms.



**Figure II.34** : Tension de sortie pour un blocage de U2



**Figure II.35** : Tension de sortie pour un blocage de U3

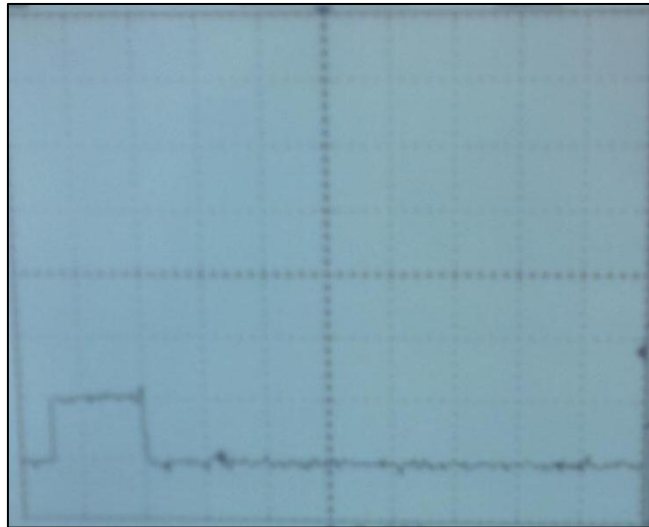
Nous constatons que la forme du signal a changé, initialement au 3<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 2<sup>ème</sup> niveau avec une période de 1.4ms le signal de sortie égale à 2v d'une durée de 0.2ms et 1v pour le reste de la période.

#### **II.4. diagnostic du convertisseur alimenté par une source photovoltaïque**

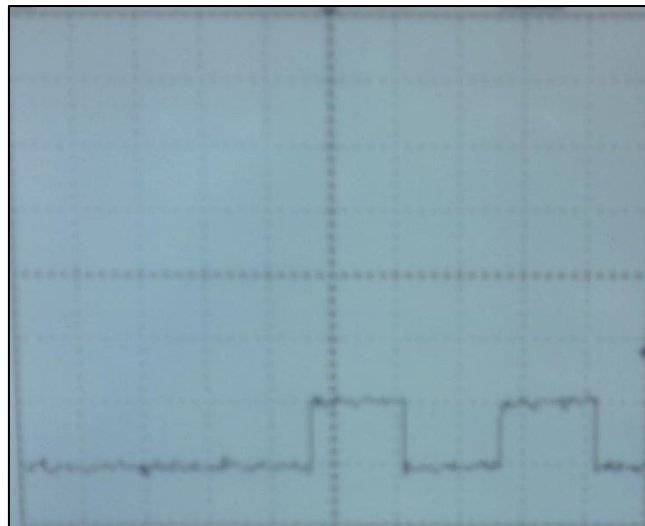
Dans cette partie nous allons introduire une série de blocage de commande et cela on bloquant deux commande à la fois sur le convertisseur en utilisant une source de tension photovoltaïque.

Les bases Tension et temps utilisé dans ce cas : 2v/ division et 100 us/division

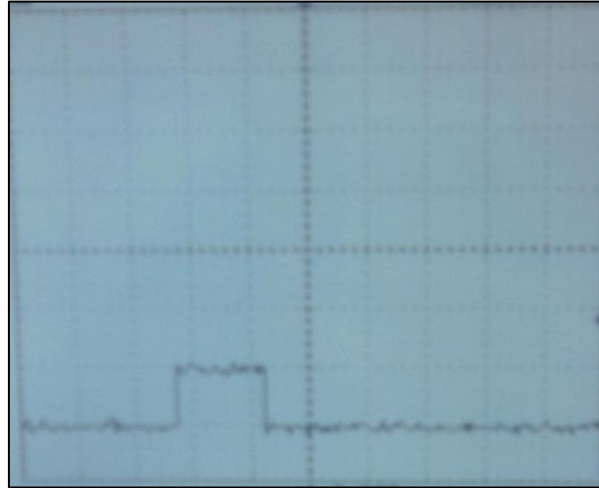
## a) Pour alpha 0.2

**Figure II.36** : Tension de sortie pour un blocage de U1 et U2

Nous constatons que la forme du signal a changé, initialement au 1<sup>ème</sup> niveau de tension, la période du signal a augmenté 1.5ms, le signale de sortie égale à 2v pour une durée de 0.15ms et 0 pour le reste de la période.

**Figure II.37** : Tension de sortie pour blocage de U1 et U3

Nous obtenons un signale période de période 1.5ms la tension de sortie égale a 2v pour une durée de 0.13ms et égale à 0 pour le reste de la période .



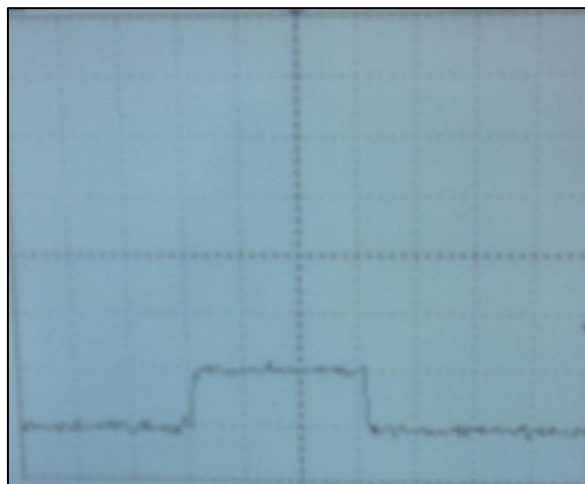
**Figure II.38** : Tension de sortie pour un blocage de U2 et U3

Nous obtenons une signal période de période 1.5ms la tension de sortie égale a 2v pour une durée de 0.13ms et égale à 0 pour le reste de la période.

**b) Pour alpha 0.5**



**Figure II.39** : signaux de commande pour blocage de U2 et U3

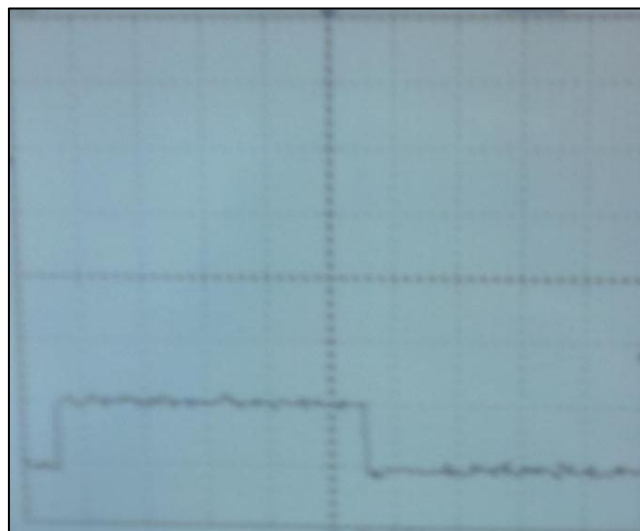


**Figure II.40** : Tension de sortie pour blocage de U1 et U2

Initialement au 2<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau, pour une période de 1ms le signale de sortie égale à 1v pour d'une durée de 0.3ms et égale 1v pour le reste de la période.

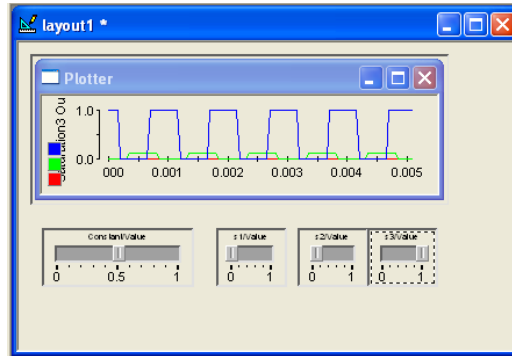


**Figure II.41 :** signaux de commande pour blocage de U2 et U3

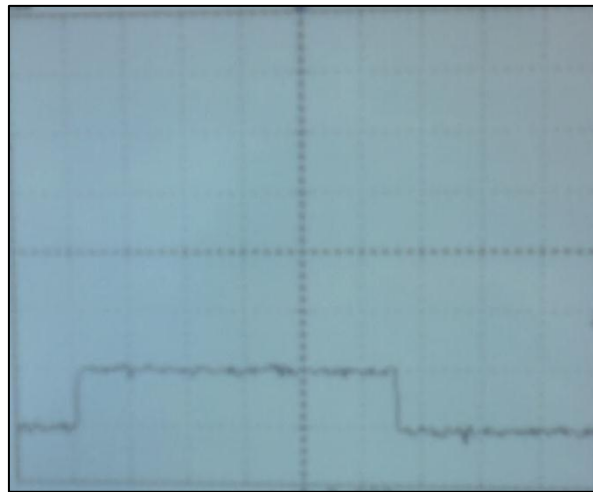


**Figure II.42 :** Tension de sortie pour blocage de U1 et U2

Initialement au 2<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau avec une période de 1.4ms le signale de sortie égale à 0v pour d'une durée de 0.15ms et égale 2v pour le reste de la période.



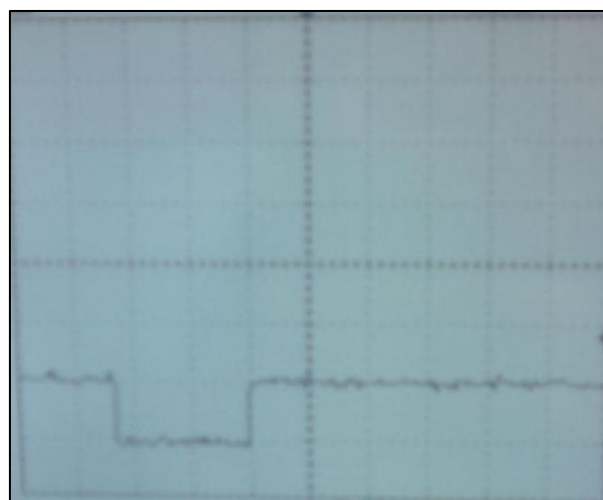
**Figure II.43 :** signaux de commande pour blocage de U1 et U2



**Figure II.44 :** Tension de sortie pour un blocage de U2 et U3

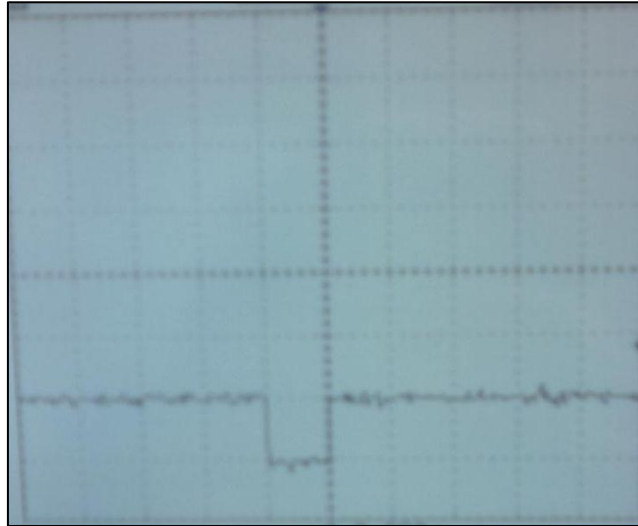
Initialement au 2<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau avec une période de 1.5ms le signal de sortie égale à 2v, pour une durée de 0.55ms et égale 0v pour le reste de la période.

**c) Pour alpha 0.8**



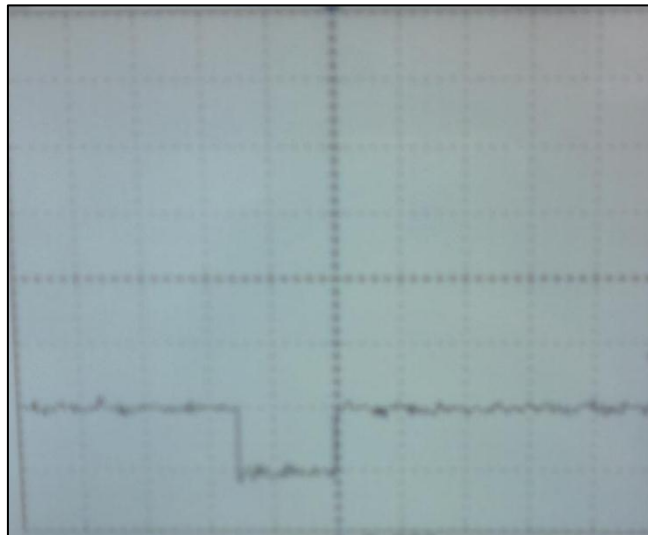
**Figure II.45 :** Tension de sortie pour un blocage de U1 et U2

Initialement au 3<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau, pour une période de 1ms le signal de sortie égale à 0v pour une durée de 0.15ms et égale 2v pour le reste de la période.



**Figure II.46** : Tension de sortie pour un blocage de U1 et U2.

Initialement au 3<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau avec une période de 1.5ms le signal de sortie égale à 0v pour une durée de de 0.1ms et égale 2v pour le reste de la période.



**Figure II.47** : Tension de sortie pour un blocage de U2 et U3.

Initialement au 3<sup>ème</sup> niveau la tension a passé au 1<sup>ème</sup> niveau avec une période de 1.5ms le signal de sortie égale à 0v, pour d'une durée de 0.15ms et égale 2v pour le reste de la période.

Nous remarquons que dans le cas du blocage de deux commandes la tension de sortie évolue dans le 1<sup>er</sup> niveau de tension quel que soit la tension initiale avec des différentes périodes et que la période du signal a sensiblement augmenté.

## **Conclusion**

Cette étude expérimentale nous a permis de valider nos constatations théoriques sur le comportement du convertisseur multicellulaire en cas de blocage cellule et ceci en utilisant une source de tension continue et même photovoltaïque sur une commande MLI en boucle ouverte. Par faute de temps et de moyens, nous n'avons pu observer que le développement de la tension de sortie  $V_s$  dans le cas du blocage cellule.



# Conclusion Générale

Le travail que nous avons effectué sur les convertisseurs multicellulaire s'inscrit dans un domaine qui se situe entre l'Electronique de puissance et l'Automatique dans lequel beaucoup de travaux restent à faire, lors de ce travail nous avons développé quelques méthodes de diagnostic des différents défauts qui peuvent apparaître dans le fonctionnement du convertisseur.

Notre travail consistant a développé un bloc de diagnostic et d'identification des défauts (FDD), une bonne connaissance des defaults qui peuvent apparaître et leurs répercussions sur le système s'avère très importante, le premier default traité est le défauts cellules: le diagnostic commence par la génération de résidus en utilisant la méthode à base d'observateurs et appliquée dans le cas 3 cellules.

Lors du diagnostic on a aussi abordé le cas du vieillissement des condensateurs qui influe sur toutes les variables d'état, on note que ce type de default nécessite un autre type de résidu calculé à l'aide du concept d'inversion du système et que chaque condensateur a son propre résidu qui nous donne un résultat exprimé en pourcentage qui pourrait être étalonné afin de connaître la résistance parallèle équivalente au vieillissement et l'exploiter par la suite pour développer une commande tolérante au defaults.

Nous avons étudié un autre type de défaut qui n'est pas loin des défauts cellule : le blocage des interrupteurs. Nous avons vu que la logique décisionnel était différente pour chacun de ces défauts.

Nous avons fini notre travail par une étude expérimentale ou nous avons appliqué une commande MLI sur le convertisseur en utilisant une source d'alimentation continue et une source photovoltaïque sa nous a permis de bien comprendre le fonctionnement du convertisseur multicellulaire et nous avons terminé notre travail par une étude des différent cas de blocage commande.

Les perspectives attendues dans le futur, c'est faire l'expérimentation des résultats obtenus dans ce travail tels que, les différent commande et observateurs synthétisé pour le convertisseur ainsi que le diagnostic et développé une commande tolérante aux défauts on se basant sur le diagnostic fait dans ce mémoire; ainsi élargir la zone d'étude en s'intéressant aux convertisseurs multicellulaires triphasés.

---

---

# Références

- [1] T. Meynard and H.Foch. Multi-level choppers for high voltage applications. EPE Journal, page 45–50, 1992.
- [2] Régis RUELLAND. Apport De La Co-Simulation Dans La Conception De L'architecture Des Dispositifs De Commande Numérique Pour Les Systèmes Electriques. Thèse de doctorat, NP Toulouse, 2002.
- [3] CARRERE P. Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires séries à IGBT : Equilibrage des tensions flottantes. PhD thesis, INP Toulouse, 1996.
- [4] Geoffrey R.Walker B.E.Hons. Modulation and Control of Multilevel converters. PhD thesis, University of Queensland, 1999.
- [5] R.H. Wilkinson T.A. Meynard and H. du T. Mouton. Natural balance of multicell converters. IEEE, mar 2003.
- [6] A. DJEMAI M. de LEON J. BENMANSOUR, K. BENALIA. Hybrid control of a multicellular converter, nonlinear analysis. Hybrid Systems 1 No.1, pages 16–19, mar 2007.
- [7] F. BENBOUZID M.E.H. BOUCHERIT M.S. TADJINE M. BENZINEB, O. TAIBI. Multicell converters hybrid sliding mode control. International Review of Modeling and Simulation 4 No.3, 2011.
- [8] BEJARANO F., GHANES M. , BARBOT J.P. Observability and Observer Design for Hybrid Multicell Choppers. International Journal of Control, to appear, 2010.
- [9] W.LI J.J SLOTINE. Applied nonlinear control. Prentice-Hall International, 1989.
- [10] BENSALD R. Observateurs des tensions aux bornes des capacités flottantes pour les Convertisseurs multicellulaires séries. Thèse de doctorat. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2001.
- [11] J. Y. Hung, W. Gao and J. C. Hung. “Variable Structure Control: a Survey”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, issue 1, pp. 2-22, February 1993.
- [12] M. GHANES M., BARBOT J.B., DE LEON J., GLUMINEAU A. A robust output feedback controller of the induction motor drives: new design and experimental validation. International Journal of Control, à paraître, 2010.
-

- [14] BENMANSOUR K. Réalisation d'un banc d'essai pour la commande et l'observation des convertisseurs multicellulaires série : approche hybride. Thèse de doctorat, Cergy-Pontoise, Université de Cergy-Pontoise, 2009, 155p.
- [15] KANG W., BARBOT J.P., XU L. On the Observability of Nonlinear and Switched Systems. Springer issue on 'Emergent Problems in Nonlinear Systems and Control', 2009, vol.393, 286p.
- [16] TRABELSI Med Abdellah, Modélisation et commande des systèmes physiques à topologie variable : Application aux convertisseurs multicellulaires. Thèse de doctorat, 2009, EEA. Lyon.
- [18] ISE, Model-based fault-detection and diagnosis – Status and applications, in Control Engineering Practice, Volume 5, Issue 5. 1997.
- [19] D. FRAGKOULIS. « Détection et localisation des défauts provenant des actionneurs et des capteurs : application sur un système non linéaire ». Thèse de doctorat à l'université de Toulouse, 2008.
- [20] HERZI Karima, synthèse d'un observateur hybride dédiés à la commande tolérante aux défauts. Thèse de magister, 2009,ENP
- [21] M.L. Leuschen, I.D. Walker et J.R. Cavallaro. « Nonlinear Analytical Redundancy for Fault Detection ». IEEE Transactions on Automatic Control, 2002.
- [22] Hamid BAIKECHE, diagnostic des systèmes linéaires en boucle fermée. Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de lorraine,2007.
- [23] A. BAYSSE, contribution à identification paramétrique de modèle à temps continue, Thèse de doctora, Toulouse, 2010.
- [24] R. TOSCANO. « Commande et diagnostic des systèmes dynamiques ». Thèse de doctora Ellipses, Paris, 2005.
-