

# **Elaboration d'un identificateur de creux de tension pour contrôler une génératrice éolienne connectée à un réseau électrique perturbé.**

Basma BOUJOU DI, Nadia MACHKOUR, Nabila Rabbah, Elm'kadem KHEDDIOUI.  
Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et Modélisation, Faculté des Sciences et  
Techniques, Université Hassan II de Casablanca, Maroc.  
Basma.boujoudi@gmail.com

**Résumé** - *Ce travail s'inscrit dans le domaine du monitoring de la qualité de l'énergie électrique. Il a pour objectif d'introduire de nouvelles techniques dans l'analyse et le traitement des creux de tension électrique, qui peut être défini comme le plus important problème qui affecte la qualité des réseaux électriques et représentent la principale priorité pour l'industrie, en effet elles peuvent causer l'interruption de processus industriels et peuvent mener à des pertes économiques et une dégradation des produits manufacturés [1]. Cette étude concerne la détection et la classification des creux de tension afin d'élaborer une stratégie de commande d'une éolienne imposant la continuité de son service malgré la présence des creux de tensions. Les résultats de ce travail sont fournis par une simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.*

**Mots-clés:** *Creux de tension-Détection-Classification-Monitoring-Algorithm.*

## **Introduction**

Un creux de tension est une réduction soudaine qui varie entre 10% et 90% de la tension électrique à un point du réseau, et qui dure de 10 ms à 1 minute [2]. Il peut y avoir de nombreuses raisons à un creux de tension : un court-circuit dans le réseau, une déconnection partielle de l'alimentation, des courants importants dus au démarrage de moteurs, des courants importants dus aux arcs électriques ou à la saturation de transformateurs.

Quant aux turbines éoliennes, un creux de tension peut entraîner la déconnexion brutale de l'ensemble de génératrices éoliennes, entraînant ainsi un déficit de la production et une perte de la stabilité du réseau électrique; en effet, une éolienne à base de MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) son stator est directement relié au réseau, par conséquent, un creux de tension va causer une augmentation du courant statorique. A cause du couplage magnétique entre le stator et le rotor, le courant de défaut va traverser le rotor et son convertisseur de puissance. Cela entraîne un sur-courant dans le rotor [3,7], imposant, ainsi aux systèmes de protection de déconnecter la génératrice éolienne et une instabilité dans la production de l'énergie électrique.

Afin d'éviter ce problème, un maintien de la production de l'éolien même en régime perturbé, doit être assuré, ceci est possible par la conception et le dimensionnement de contrôleurs capables de maintenir la connexion au réseau et cela en présence de défauts de réseaux.

L'objectif de nos travaux de recherche est l'amélioration des performances de systèmes éoliens dans le cas d'un réseau perturbé. L'accent est mis sur la détection, l'identification des creux de tension [8,11], et l'élaboration de stratégies de commande avancées avec des systèmes de protection de la chaîne de conversion éolienne, afin de satisfaire la contrainte de rester connectée lors d'un creux de tension [3].

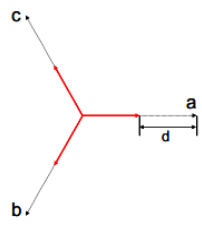
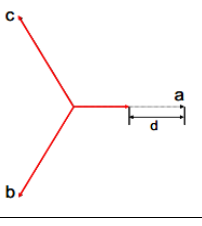
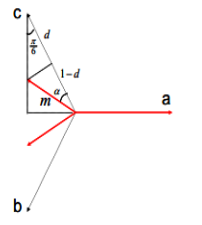
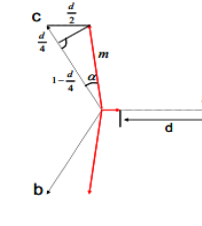
Plusieurs méthodes d'identification de creux de tension ont été élaborées, [8-9] [12] cependant certaines méthodes ne permettent que classier quelques creux de

tension[9] et d'autres ne permettent pas d'estimer les paramètres caractérisant le creux de tension[12]. Ces paramètres sont d'une utilité importante surtout pour une éventuelle correction en temps réel.

Nous présentons dans cet article une nouvelle méthode qui permet de détecter, classifier et caractériser les différents types de creux de tension telle définie par M. BOLLEN [13]. Cette méthode est basée sur le calcul et l'analyse instantané, du gabarit de la tension de réseau. La forme du gabarit est utilisée d'une part pour signaler la présence ou non d'un creux de tension, et d'autre part, pour déterminer la valeur de la profondeur du creux de la tension et les phases affectées.

## 1. Définition et classification des différents types de creux de tension.

Les creux de tension électrique se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase [8][18-19]. Ainsi, ils peuvent être représentés par des vecteurs dits phaseurs. La relations entre ces derniers est appelée signature ou type du creux. Le tableau suivant regroupe les sept principaux types de creux de tension dénotés par les lettres de A à G [13][15].

| Type | Signature   | Équation  | Origine                              |
|------|---|---|--------------------------------------|
| A    |   | $\begin{cases} Va = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3})}) \\ Vc = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3})}) \end{cases}$  | Défaut triphasé                      |
| B    |  | $\begin{cases} Va = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{V}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3})}) \\ Vc = \frac{V}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3})}) \end{cases}$  | Défaut monophasé                     |
| C    |  | $\begin{cases} Va = \frac{V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)}) \\ Vc = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)}) \end{cases}$ $\cos(\alpha) = \frac{1-pc}{m}$        | avec<br>Défaut biphasé               |
| D    |  | $\begin{cases} Va = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)}) \\ Vc = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)}) \end{cases}$ $\cos(\alpha) = \frac{4-pc}{4m}$ | avec<br>Propagation du creux type C. |

|   |  |  |                                       |
|---|--|--|---------------------------------------|
| E |  | $\begin{cases} Va = \frac{V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3})}) \\ Vc = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3})}) \end{cases}$   | Défaut entre deux phases et la terre. |
| F |  | $\begin{cases} Va = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)}) \\ Vc = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)}) \end{cases}$ $\cos(\alpha) = \frac{1-pc/2}{m}$ | avec Propagation du creux type G.     |
| G |  | $\begin{cases} Va = \frac{(1-pc)V}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \\ Vb = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)}) \\ Vc = \frac{mV}{2}(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)}) \end{cases}$ $\cos(\alpha) = \frac{1-pc}{m}$   | avec Propagation du creux type E.     |

Tab.1 : classification des différents types de creux de tension.

Avec:

- **V**: la valeur max de l'amplitude de la tension électrique.
- **d**: la profondeur du creux de tension.
- **m**: la valeur de la baisse de tension (type C,D,F et G).
- **α**: Le déphasage supplémentaire de la tension que peut causer le creux de tension.

Les expressions mathématiques  $V_k \in (a, b, c)$  concernent les trois composantes de chaque signature. Comme le montre ces différents cas de figure, les creux de tensions sont engendrés soit par un déséquilibre affectant l'amplitude ou la phase. Ainsi on peut élaborer une nouvelle classification à partir de ce tableau, en définissant d'une part les creux de tension sans déphasage (A, B, E), et d'autre part les creux de tensions qui s'accompagnent d'un déphasage touchant une ou plusieurs phases (C, D, F, G).

Notons que la signature des creux de tension peut être modifiée par les transformateurs situés au sein du réseau [14], la figure et le tableau suivants représentent les différents creux qui se propagent en aval du réseau, via les transformateurs les plus utilisés Dy [13,15] :

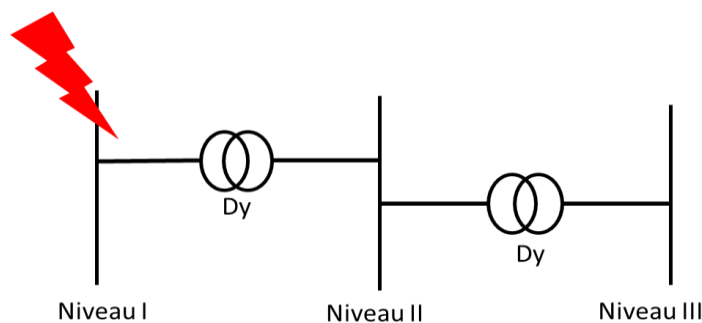


Fig.1 : Transformation des types de creux de tension

| Niveau de tension        | I | II | III |
|--------------------------|---|----|-----|
| Type de creux de tension | A | A  | A   |
|                          | B | C  | D   |
|                          | C | D  | C   |
|                          | E | F  | G   |

Tab. 2: Propagation des creux de tension.

## 2. Principe de la nouvelle méthode de la détection des creux de tension électrique.

La méthode permet, dans un premier temps, de détecter et classer les différents types de creux de tension électrique. Puis dans un deuxième temps, elle permet de déterminer la valeur de sa profondeur, ainsi que les phases affectées. Ces paramètres peuvent être d'une grande utilité pour une éventuelle correction en temps réel. Elle est basée sur le calcul et l'analyse du gabarit de la tension de réseau, d'une part, et d'autre part sur le calcul du déphasage de chaque phase pour détecter s'il y a d'éventuels défauts de déphasage. Le calcul de déphasage peut être réalisé en décomposant les signaux en série de Fourier [16], ainsi le déphasage calculé des tensions  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  est comparé, respectivement aux valeurs  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $120^\circ$ .

La procédure de la méthode est scindée en deux parties, la première concerne la détection et la deuxième concerne la classification et la caractérisation des types.

### 2.1. Détection des creux de tension électrique.

L'obtention du gabarit, permettant la détection des creux, se fait en repérant les maximums locaux du signal. Ces maximums locaux sont délivrés par un algorithme basé sur l'exploitation du changement du signe de la différence entre deux échantillons consécutifs du signal. En effet le maximum est obtenu si le signe de cette différence passe du positif vers le négatif. Une interpolation permet de tracer le gabarit signal.

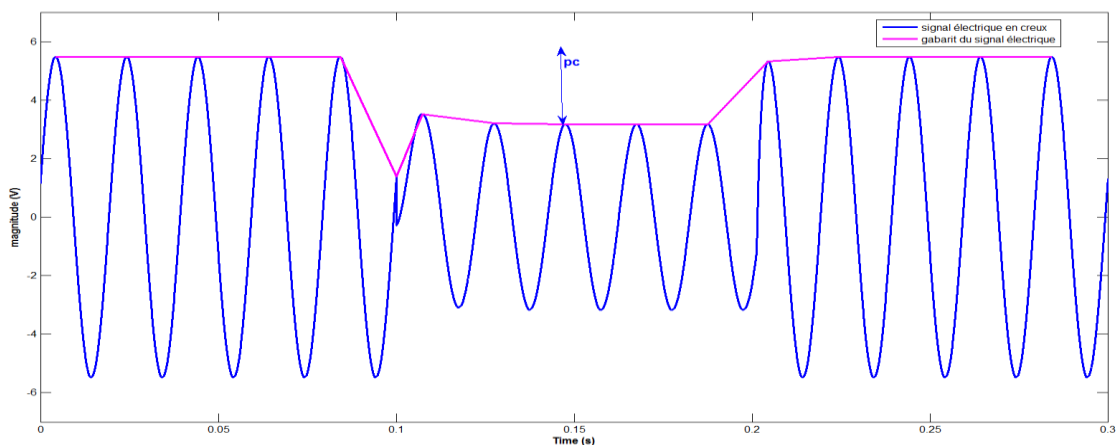


Fig. 2: Gabarit d'une tension sinusoïdale non redressée.

Seulement si on traite le signal électrique dans son état, nous risquons de ne pas détecter le creux de tension, s'il démarre ou se termine pendant une alternance négative, par conséquent et afin de remédier à ce problème, nous avons opté pour le

redressement de la tension, une opération qui met à notre disposition les alternances positives et négatives.

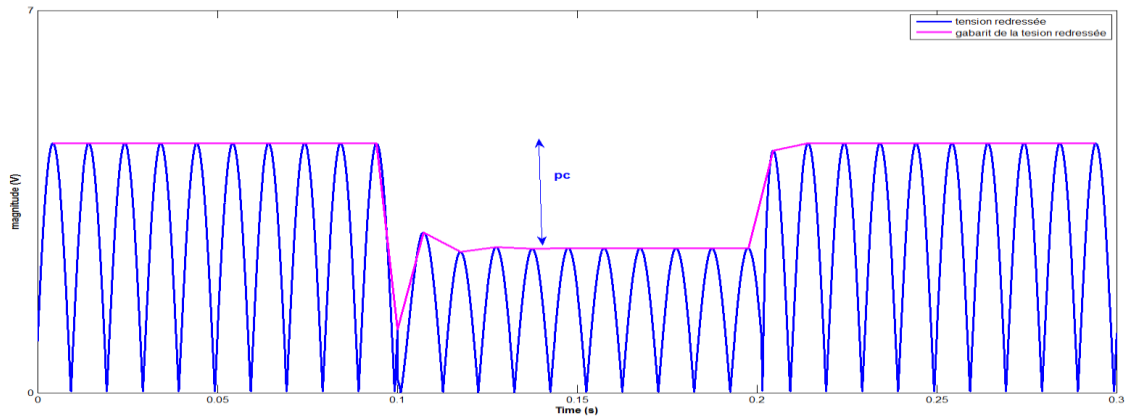


Fig. 3: Gabarit d'une tension sinusoïdale redressée.

Le redresseur reçoit la tension électrique à partir d'un transformateur triphasé abaisseur de type  $Y_n Y_n$  pour ne pas modifier la signature et l'allure d'un creux de tension [15].

## 2.2. Classification du creux de tension :

La différence entre le maximum et le minimum du signal gabarit renseigne sur la présence ou l'absence du creux de tension, cette différence peut, d'une part, être traduite par un signal booléen, qui sera égale à zéro en absence du creux et égale à un dans le cas contraire, et d'autre part être utilisée pour estimer la profondeur du creux.

Le signal booléen, par la suite, peut être utilisé pour déterminer la typologie du creux de tension selon un codage dont le principe est basé sur le stockage de l'état des trois phases dans un mot binaire sur un octet. Les trois bits de poids faible,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  renseignent, respectivement, sur l'absence ou la présence du creux dans les signaux  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$ , quant aux trois bits de poids fort  $b_5$ ,  $b_6$ ,  $b_7$  informent, respectivement, sur la présence ou non d'un défaut de déphasage dans les tensions  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$ . Les deux bits  $b_4$  et  $b_3$  sont réservés au signe du déphasage, cette information est utile pour classer les creux type G. La figure ci-dessous illustre le principe de ce mot binaire.

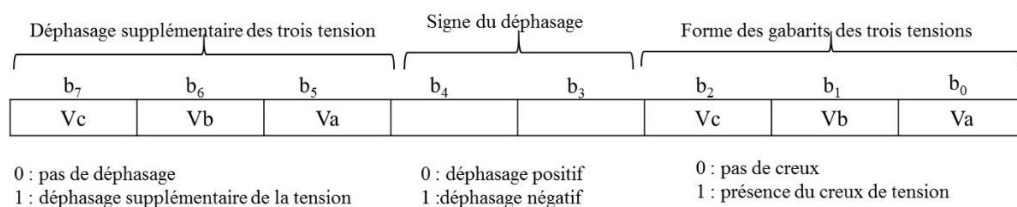


Fig. 4 : mot binaire représentant l'état des trois phases.

Pour chaque mot binaire, nous correspondons un type de creux comme illustré dans le tableau suivant qui présente le principe de ce codage :

| Type of the voltage dip | Binary word    |                |                |                |                |                |                |                |  |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
|                         | b <sub>7</sub> | b <sub>6</sub> | b <sub>5</sub> | b <sub>4</sub> | b <sub>3</sub> | b <sub>2</sub> | b <sub>1</sub> | b <sub>0</sub> |  |
| No voltage dip          | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |  |
| Type B                  | A              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              |  |
|                         | B              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              |  |
|                         | C              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              |  |
| Type E                  | A,B            | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
|                         | A,C            | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 1              |  |
|                         | B,C            | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              |  |
| Type C                  | A,B            | 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
|                         | A,C            | 1              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
|                         | B,C            | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              |  |
| Type A                  | A,B,C          | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
| Type G                  | A,B,C          | 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              |  |
| Type F                  | A,B,C          | 0              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 0              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              | 1              |  |
| Type D                  | A,B,C          | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |  |
|                         | A,B,C          | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              |  |

Tab.3 : codage des sept types du creux.

Notre méthode est appliquée sur des exemples simulés sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

### 3. Simulation

Pour notre simulation, nous avons d'abord généré un système triphasé 380/230 V de 50 Hz, pour simuler un réseau basse tension, puis nous avons provoqué les différents types de creux de tension :

Le creux de tension est créé à l'aide d'un bloc programmé sous Simulink appelé « faultbreaker », ce dernier peut introduire des défauts monophasés, biphasés et triphasés, qui mènent à des creux type A, B, C et E.

Pour simuler les autres types de creux, notamment, D, G et F, nous avons utilisé des transformateurs Dy, qui modifient la signature des creux de tension selon Tab.1.

Fig.5 présente la plateforme de simulation, elle est composée d'un réseau basse tension, de générateur de défaut et de l'identificateur de creux de tension.

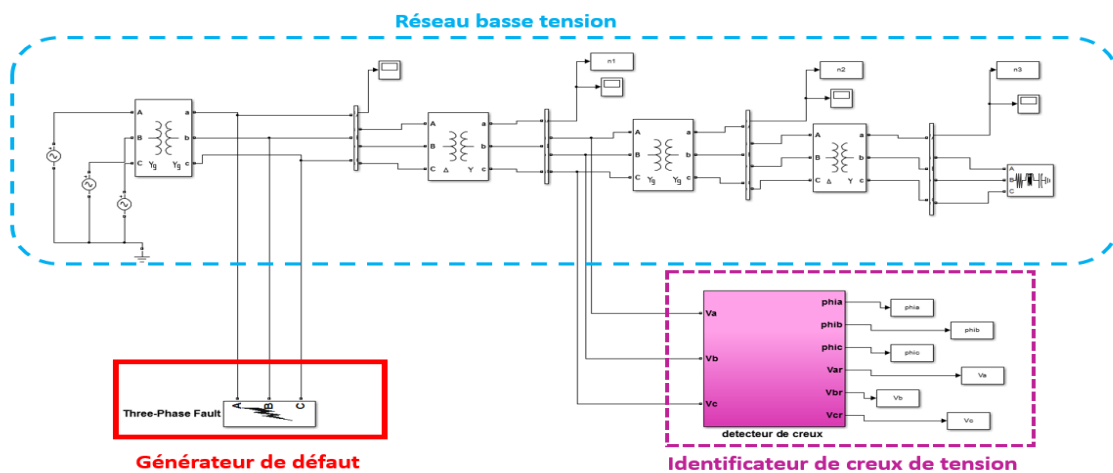


Fig. 5 : plateforme de simulation.

Ainsi cette plateforme nous permet de tester notre méthode de détection sur les différents types de creux de tension.

L'algorithme que nous avons élaboré, permet non seulement la détection de tous les types de creux de tension, mais aussi il délivre la profondeur du creux, le déphasage des tensions ainsi que les phases affectées.

#### 4. Résultats de simulation

Notons que notre méthode peut détecter et caractériser les 7 types de creux de tension[17], Dans ce papier, nous nous limitons à présenter les résultats de simulation des creux de tension qui peuvent affecter les éolien, à savoir :

- Les creux dus à un défaut biphasé (creux type C), qui proviennent des défauts phase-phase, ce qui provoque le déplacement de deux phases, alors que la troisième reste inchangée.
- Les creux de tension dus à des défauts triphasés (creux type A), présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires.
- Les creux de tension dus à la propagation des creux de type E via les transformateurs (Fig. 1) (creux type F). Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des phases et de faibles chutes de tension avec déphasage pour les deux autres phases.

Les résultats présentés par la suite sont affichés à l'aide de l'interface graphique de Matlab.

##### 4.1. Creux type C

Les trois tensions du réseau, en présence d'un défaut sur la phase A et la phase B, sont traités par l'analyseur de creux, développé ci-dessus, la figure 6 présente le résultat de l'analyseur, grâce à l'interface graphique conçu en utilisant Matlab, nous affichons automatiquement l'allure des trois tensions, avec le mot binaire qui codifié le type de creux correspondant et les paramètres caractérisant le creux de tension.

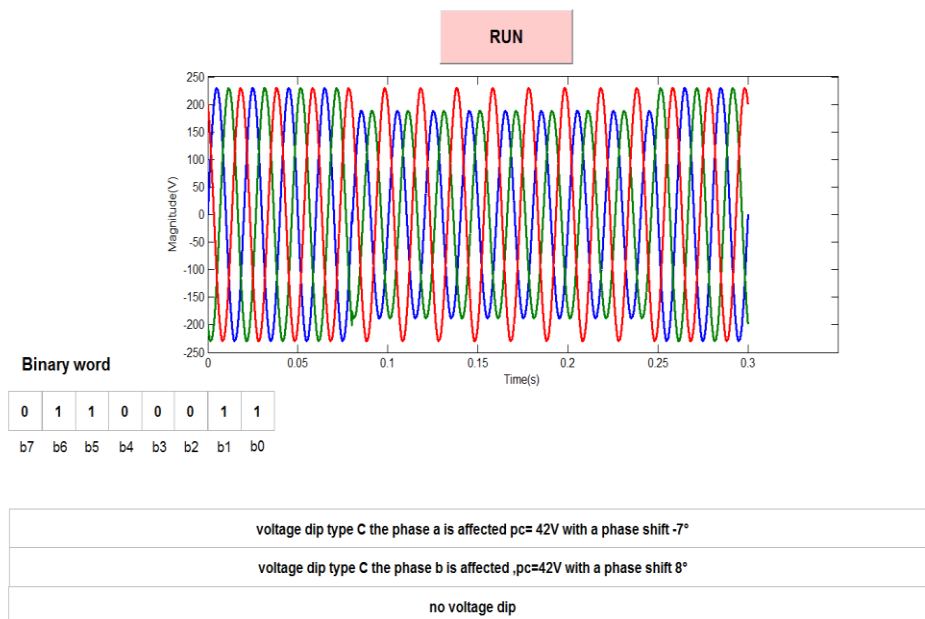


Fig. 6: creux de tension type C

Fig.6 montre le résultat obtenu avec notre approche pour un creux de tension type C.

Notre algorithme donne avec précision la valeur de la chute de tension dans les deux phases, le défaut de déphasage et le mot binaire que nous envisageons d'utiliser pour élaborer une loi de commande.

### 4.2. Creux type A

De la même manière, nous avons testé notre approche sur un réseau avec défaut triphasé. La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus.

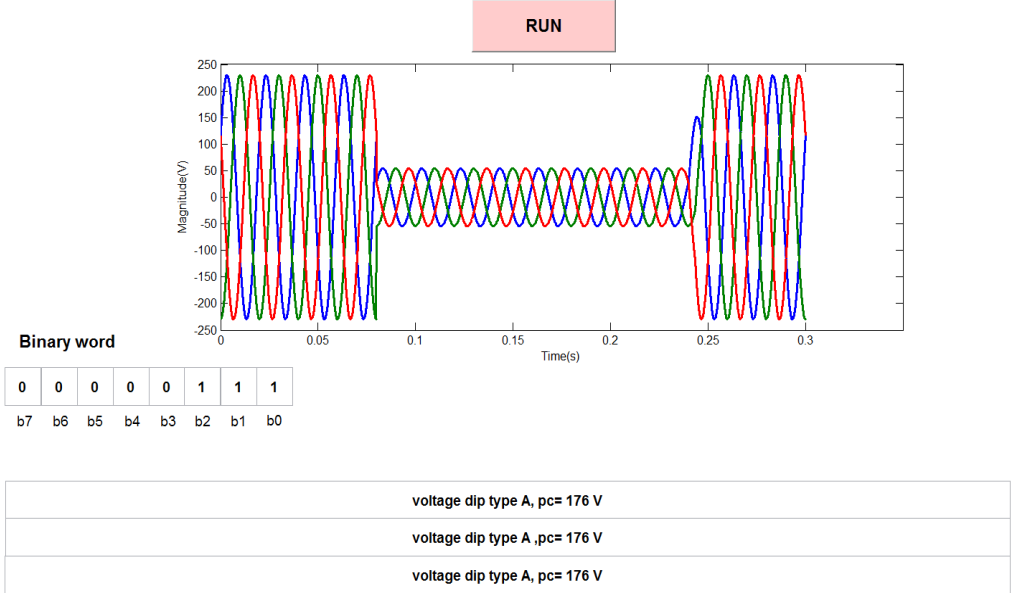


Fig. 7 : creux de tension type A.

### 4.3. Creux type F

Pour générer ce type de creux, nous avons utilisé la propagation d'un défaut biphasé à travers un transformateur Dy, ce qui est traduit par une chute de tension sur les trois phases, avec un défaut de déphasage dans deux phases B et C.



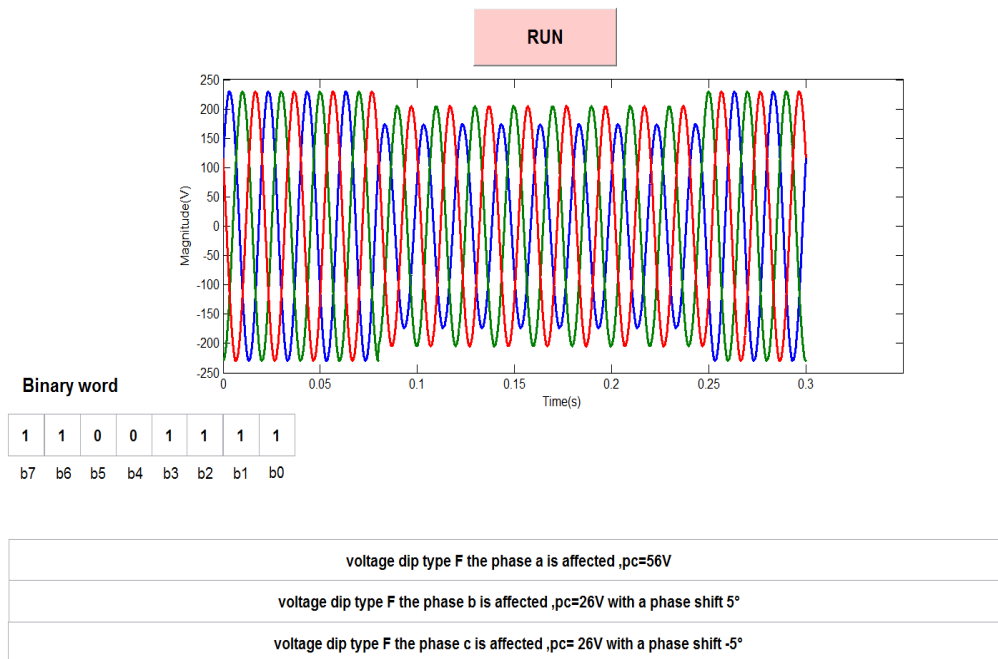


Fig. 8 : creux de tension type F.

## Conclusion.

Le travail présenté dans cet article propose une nouvelle approche d'identification et d'analyse du creux de tension, implémentée sous l'environnement Matlab/SIMULINK comme illustré dans la plateforme de simulation. Une classification précise et rigoureuse a été entamée pour déterminer toutes les caractéristiques du creux de tension.

Nous prévoyons, d'une part, exploiter ces résultats dans l'élaboration d'un capteur d'identification en temps réel appliqué sur le réseau électrique, et d'autre part, nous envisageons utiliser le mot binaire généré par notre identificateur dans le but d'élaborer une loi de commande de la génératrice éolienne.

## Bibliographie

- [1] Frantisek Kinces, Voltage Sag Indices and Statistics. Thesis for the Degree of Master of Science. Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology 412 96 Goteborg, Sweden. December 2004.
- [2] C.D. Pham, '*Détection et Localisation de Défauts dans les Réseaux de Distribution HTA en Présence de Génération d'Energie Dispersée*', Thèse de Doctorat, INPG, 2005.
- [3] L.PENG, Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension, thèse, l'école centrale de Lille, le Laboratoire L2EP à l'Ecole Centrale de Lille et au département Génie Electrique de Tsinghua University, 2010.
- [4] El-Sattar A, Saad N, Shams El-Dein M. Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault. Electric Power Systems Research, 2008, 78:1240-1246.

- [5] Gomis-Bellmunt O, Junyent-Ferre A, Sumper A, et al. Ride-Through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(4):1036-1045.
- [6] Peng L, Li Y, Francois B. Modeling and control of the DFIG wind turbine system by Using Causal Ordering Graph during voltage dips. ICEMS 2008: 2412-2417.
- [7] Peng L, Li Y, Francois B. Dynamic behavior of doubly fed induction generator based wind turbines under three-phase voltage dips. IPEMC 2009: 620-626.
- [8] V.IGNATOVA, Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique, Thèse, Université Joseph Fourier 2006.
- [9] Zhang, M. BOLLEN, «A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components», IEEE Power Engineering Letters, July 1998.
- [10] L. Zhang, Three-phase unbalance of voltage dips, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Dept. Electric Power Engineering, Gothenburg, Sweden, and November 1999.
- [11] H. JOËLNANGA NDJANA, SYSTÈME AUXILIAIRE DE COMPENSATION DE CREUX DE TENSION, Thèse, Université du Québec à Trois - Rivières 2005.
- [12] S.EKE, A.MOUKENGUE IMANO, Algorithme de classification exhaustive des creux de tension : Association des méthodes des six tensions et des composantes symétriques, Laboratoire EEAT, Université de Douala, SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, 8-10 JUILLET 2014, ENS CACHAN, France.
- [13] M. Bollen, E. Styvaktakis , Characterization of three-phase unbalanced dips (as easy as one-two-three?) , IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol.2, Seattle, WA, USA, 16-20 July, 2000, pp.899-904.
- [14] B. Gatta, K. Chikhi et C. Fetha. Amélioration de la qualité de l'énergie électrique: Identification des creux de tension. Département Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°4 (décembre 2014).
- [15] M. Bollen, Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [16] Gabriel Cormier, PhD. Université de Moncton, GELE2511 Chapitre 3, série de Fourier.
- [17] B.BOUJOURDI, N.MACHKOUR, Elm.KHEDDIQUI, A NEW METHOD FOR DETECTION AND CHARACTERIZATION OF VOLTAGE DIPS, Proceeding ICFPAM 2015, Marakech.
- [18] C.D. Pham, '*Détection et Localisation de Défauts dans les Réseaux de Distribution HTA en Présence de Génération d'Energie Dispersée*', Thèse de Doctorat, INPG, 2005.
- [19] Frantisek Kinces, Voltage Sag Indices and Statistics. Thesis for the Degree of Master of Science. Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology 412 96 Goteborg, Sweden. December 2004.