

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,  
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

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

B.Boujoudi, E. Kheddioui, N. Rabbah, N. Belbounaguia, N. Machkour



**ISSN : 2428-8500**

**DOI : 10.18145/jitipee.v1i1.68.g54**

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

B.Boujoudi, E.Kheddioui, N.Rabbah, N.Belbounaguia, N. Machkour

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. En effet, ces creux de tension affectent négativement la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux et représentent un handicap majeur pour l'industrie consommatrice d'électricité. En effet, ils peuvent causer l'interruption de chaînes de production et de processus industriels menant à des pertes économiques et une dégradation des produits manufacturés [1]. L'objectif de cette étude est le traitement des données et la détection des creux de tension en temps réel. Les résultats de ce travail sont validés par une simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.*

**Mots-clés:** *Creux de tension, détection, classification, monitoring, algorithme.*

**DOI :** *10.18145/jitipee.v1i1.68.g54*

### **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]. Un creux de tension peut s'expliquer par plusieurs raisons : un court-circuit dans le réseau, une déconnexion partielle de l'alimentation, des appels de courants importants dus au démarrage de moteurs, des courants importants dus aux arcs électriques ou à la saturation des transformateurs.

Quant aux turbines éoliennes, un creux de tension peut entraîner la déconnexion brutale de l'ensemble des génératrices éoliennes, entraînant ainsi un déficit de la production et une perte de la stabilité du réseau électrique. En effet, avec une éolienne à base de MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation), le stator est directement relié au réseau, par conséquent, un creux de tension cause une augmentation du courant statorique. A cause du couplage magnétique entre le stator et le rotor, le courant de défaut traverse le rotor et son convertisseur de puissance. Cela entraîne une surintensité de courant dans le rotor [3, 4, 5, 6, 7], imposant ainsi aux systèmes de protection de déconnecter la génératrice éolienne et par la suite une instabilité dans la production de l'énergie électrique. Afin d'éviter ce problème, un maintien de la production de l'éolienne 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 électriques du réseau.

L'objectif de nos travaux 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 [8,10], et l'élaboration de stratégies de commande avancées pour protéger et maintenir l'éolienne connectée lors d'un creux de tension [3]. C'est dans ce sens, que durant la dernière décennie, plusieurs travaux présentant des méthodes d'identification de creux de tension ont été développés [8, 9,11]. Ces travaux s'inscrivent dans le domaine du monitoring de la qualité de l'énergie électrique, ils se basent sur le stockage, l'analyse du signal électrique et l'élaboration d'un classificateur des différents types de creux de tension. Parmi ces travaux, nous pouvons citer :

- La méthode du vecteur d'espace [8] qui permet d'analyser de manière automatique les différentes perturbations pouvant affecter la qualité de l'énergie électrique notamment les creux de tension. Elle utilise un minimum de variables, mais elle n'analyse les perturbations qu'au niveau de l'amplitude, et sans nécessiter le stockage d'un grand nombre d'échantillons.
- La méthode des six tensions [9] qui consiste à comparer l'amplitude des trois tensions normalisées, simples et composées. La tension, dont l'amplitude est la plus faible indique la phase ou les phases dont la chute de tension est la plus importante. Elle est simple et efficace, mais elle nécessite six variables pour la classification des creux de tension et en plus, ne permet pas la distinction entre les différents types de creux de tension des différentes phases.
- D'autres travaux, se sont basés sur la méthode dite « la méthode des composantes symétriques » [9] qui détermine uniquement trois types de creux de tension par une étude dans le plan complexe des tensions directe et inverse. Les impédances directe et inverse sont supposées égales et la tension homopolaire nulle.

Notre méthode classifie les sept types de creux de tension en donnant avec précision la phase ou les phases affectées ainsi que la valeur de la chute, de plus la génération du mot binaire nous permet d'élaborer (lors d'une étude future) une loi de commande pour compenser le creux de tension aux bornes de l'éolienne. Ces paramètres sont d'une utilité importante surtout pour une éventuelle correction en temps réel faisant l'objet final de nos travaux. Pour mener à bien nos travaux, le choix d'une approche judicieuse s'impose. Ainsi, notre approche consiste à scinder le travail en deux étapes. Durant la première étape (qui fait l'objet de cette étude) nous nous intéressons uniquement à la mise au point d'un identificateur et d'un classificateur de différents types de creux de tension tout en se référant aux travaux de M. Bollen [12]. L'originalité de notre méthode basée sur le calcul et l'analyse du gabarit de la tension électrique du réseau réside dans sa simplicité que ce soit d'un point de vue algorithmique ou logiciel. 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. Lors de cette étape, la préoccupation de la notion du traitement en temps réel n'est pas prise en compte. En effet, une fois la procédure de classification et d'identification du creux de tension validée, nous faisons appel à la deuxième étape où la dimension temps réel sera considérée. Cette dernière étape fera l'objet d'un futur travail qui

tiendra compte entre autre du temps d'exécution de toute la procédure, permettant le traitement et l'intervention en temps réel possible.

### 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, 14, 15]. Ainsi, ils peuvent être représentés par des vecteurs dits phraseurs. La relation 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 [12,14].

Type	Signature	Équation	Origine
A		$V_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{(1-d)V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right)$ $V_c = \frac{(1-d)V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3})} \right)$	Défaut triphasé
B		$V_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right)$ $V_c = \frac{V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3})} \right)$	Défaut monophasé
C		$V_a = \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{mV}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} - \alpha)} \right)$ $V_c = \frac{mV}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} + \alpha)} \right)$ $\cos(\alpha) = \frac{1-d}{m}$	Défaut biphasé
D		$V_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{mV}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} \right)$ $V_c = \frac{mV}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} \right)$ $\cos(\alpha) = \frac{4-d}{4m}$	Propagation du creux type C
E		$V_a = \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{(1-d)V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right)$ $V_c = \frac{(1-d)V}{2} \left( e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3})} \right)$	Défaut entre deux phases et la terre

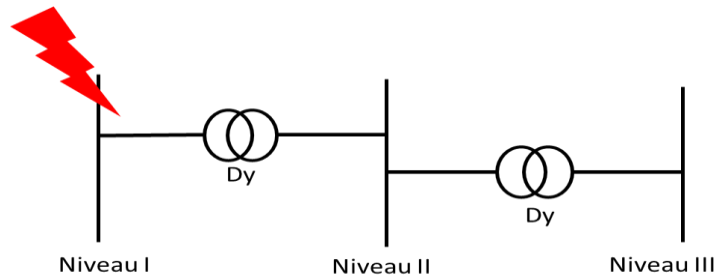
F		$V_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{mV}{2} (e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)})$ $V_c = \frac{mV}{2} (e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)})$ $\cos(\alpha) = \frac{1-d}{2m}$	Propagation du creux type G
G		$V_a = \frac{(1-2d/3)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $V_b = \frac{mV}{2} (e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)})$ $V_c = \frac{mV}{2} (e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)})$ $\cos(\alpha) = \frac{1-d}{m}$	Propagation du creux type E

**Tableau 1.** Classification des différents types de creux de tension, avec

- V : la valeur maximale 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.

$V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les trois composantes de chaque signature. Comme le montre ces différents cas de figure, les creux de tension 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 tension 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 [13], la figure et le tableau suivants représentent les différents creux qui se propagent en aval du réseau, via les transformateurs les plus utilisés  $Dy$  [12, 13, 14] :



**Figure 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

**Tableau 2.** Propagation des creux de tension

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

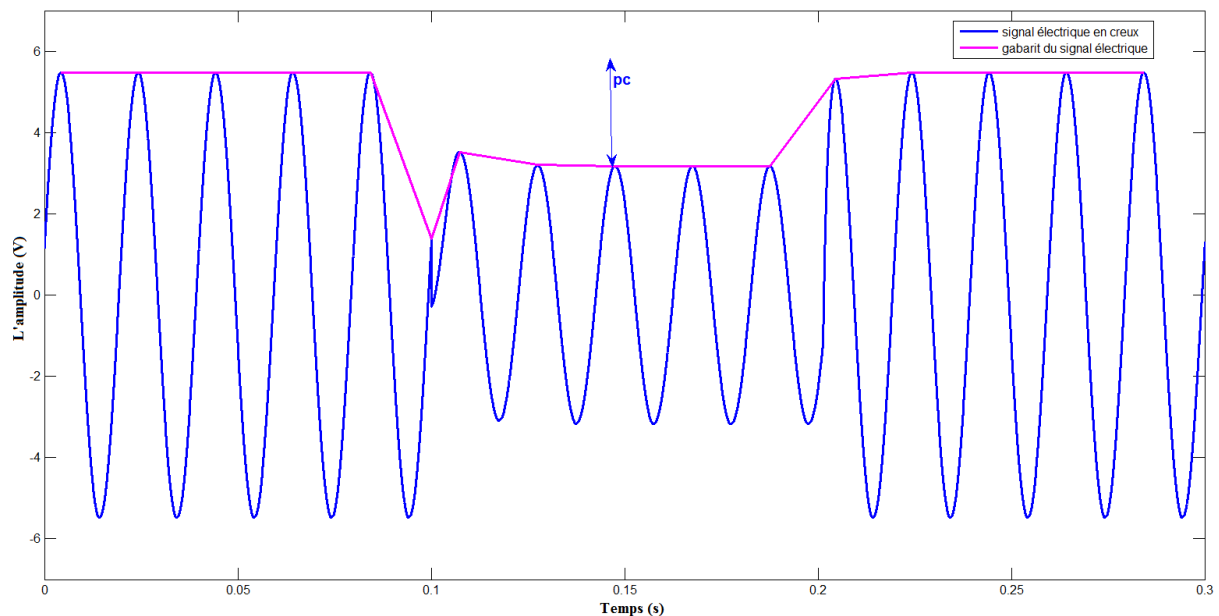
La méthode permet, dans un premier temps, de détecter et classifier les différents types de creux de tension électrique. Puis dans un deuxième temps, elle permet de déterminer la valeur

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, 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 de creux de tension.

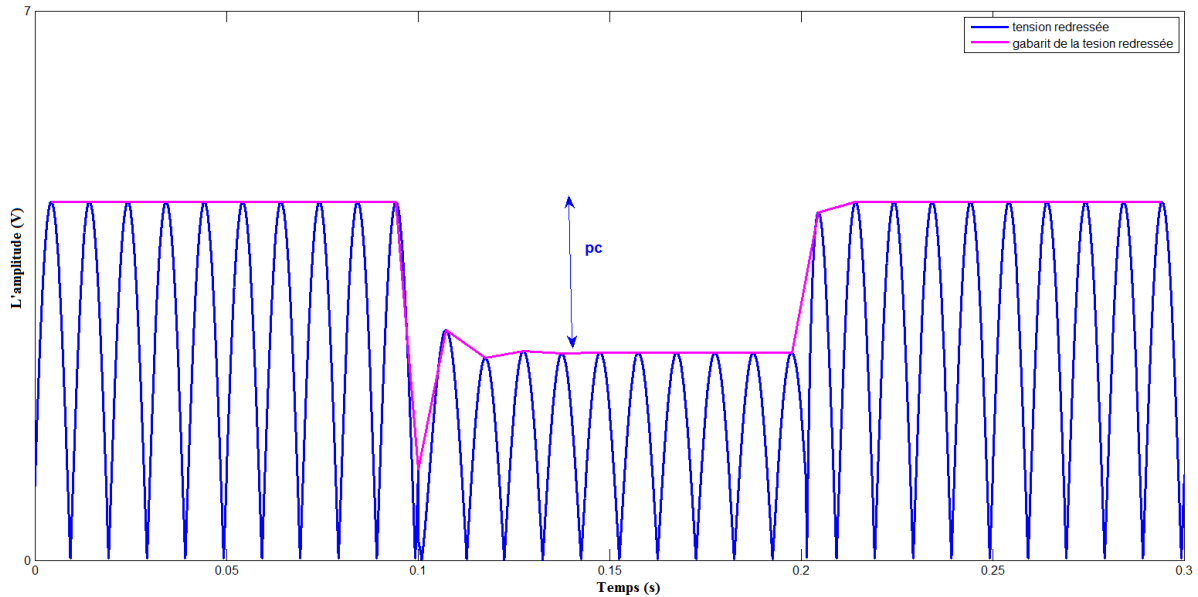
## 2.1. Détection des creux de tension électrique

L'obtention du gabarit, qui permet 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 de 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.



**Figure 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.



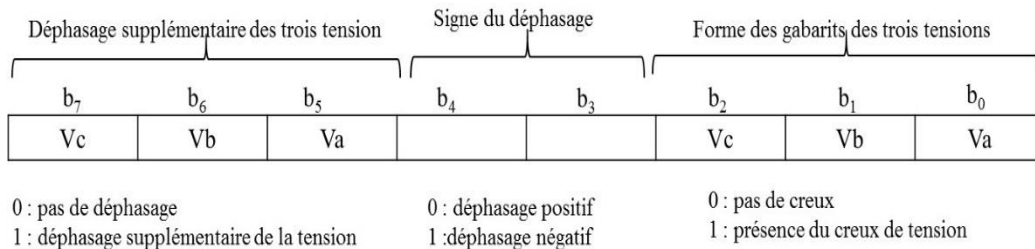
**Figure 3.** Gabarit d’une tension sinusoïdale redressée.

Le redresseur reçoit la tension électrique à partir d’un transformateur triphasé abaisseur de type YNyn pour ne pas modifier la signature et l’allure d’un creux de tension [14].

**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.



**Figure 4.** Mot binaire représentant l’état des trois phases.

A chaque mot binaire correspond un type de creux de tension comme illustré dans le tableau suivant qui présente le principe de ce codage :

Type du creux de tension		Mot binaire							
		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>
Pas de creux de tension		0	0	0	0	0	0	0	0
Type B	A	0	0	0	0	0	0	0	1
	B	0	0	0	0	0	0	1	0
	C	0	0	0	0	0	1	0	0
Type E	A-B	0	0	0	0	0	0	1	1
	A-C	0	0	0	0	0	1	0	1
	B-C	0	0	0	0	0	1	1	0
Type C	A-B	0	1	1	0	0	0	1	1
	A-C	1	0	1	0	0	1	0	1
	B-C	1	1	0	0	0	1	1	0
Type A	A-B-C	0	0	0	0	0	1	1	1
Type G	A-B-C	0	1	1	0	0	1	1	1
		1	0	1	0	0	1	1	1
		1	1	0	0	0	1	1	1
Type F	A-B-C	0	1	1	0	1	1	1	1
		1	0	1	0	1	1	1	1
		1	1	0	0	1	1	1	1
Type D	A-B-C	0	1	1	1	1	1	1	1
		1	0	1	1	1	1	1	1
		1	1	0	1	1	1	1	1

**Tableau 3.** Codage des sept types du creux.

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

### 3. Simulation

Pour simuler une distribution électrique, nous avons d'abord généré les trois tensions électriques triphasées, 230/380V - 50 Hz, 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 «fault-breaker», 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 le Tableau 1. La Figure 5 présente la plateforme de simulation, elle est composée d'un réseau basse tension, d'un générateur de défauts et de l'identificateur du creux de tension.

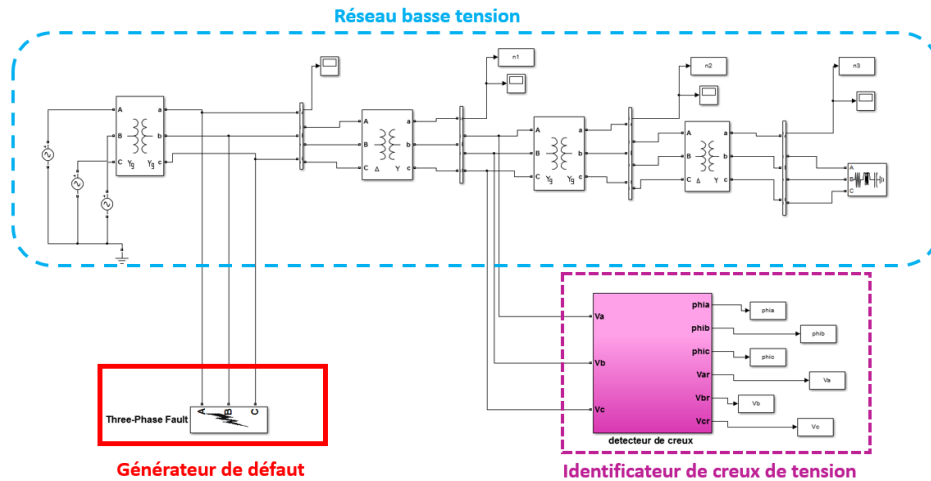


Figure 5. Plateforme de simulation.

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 il délivre aussi la profondeur du creux, le déphasage des tensions ainsi que les phases affectées.

#### 4. Résultats de la simulation

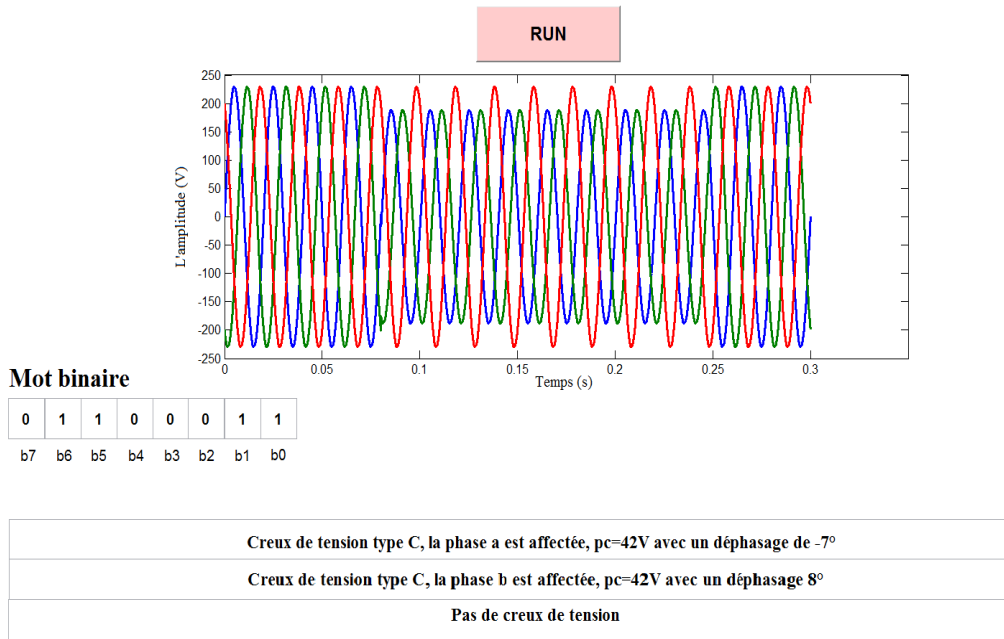
Notons que notre méthode peut détecter et caractériser les 7 types de creux de tension [15]. Dans ce papier, nous nous limitons à présenter les résultats de simulation des creux de tension qui peuvent affecter les éoliennes, à savoir:

- 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 déphasage supplémentaire.
- Les creux de tension dus à la propagation des creux de type E via les transformateurs (Figure 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 traitées par l'analyseur de creux, développé ci-dessus, les figures suivantes présentent les résultats de l'analyseur, grâce à l'interface graphique conçue en utilisant MATLAB, nous affichons automatiquement l'allure des trois tensions, avec le mot binaire qui représente le type de creux correspondant et les paramètres caractérisant le creux de tension.

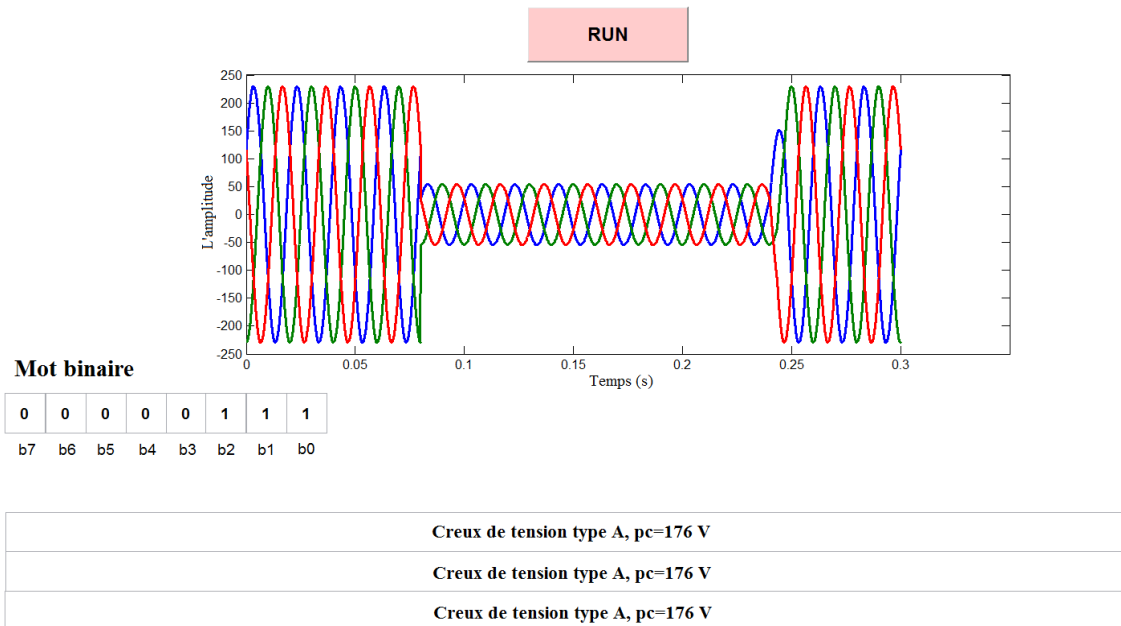


**Figure 6.** Creux de tension type C

La Figure 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

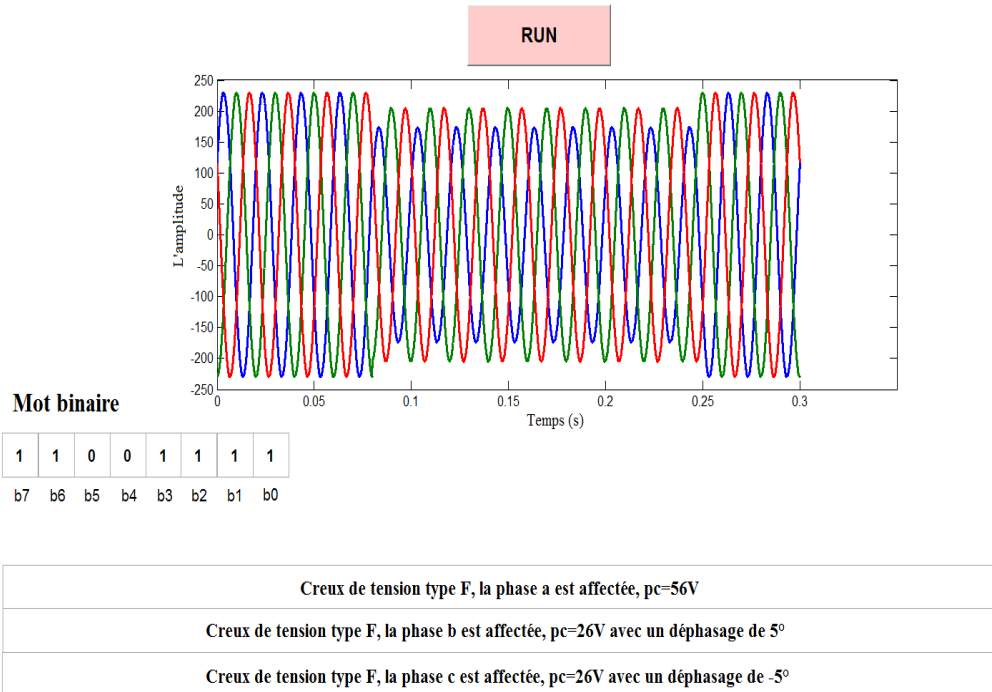
De la même manière, nous avons testé notre approche sur un réseau avec défaut triphasé. La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus.



**Figure 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.



**Figure 8.** Creux de tension type F.

### Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans cet article propose une nouvelle approche d'identification et d'analyse des 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.

L'étape suivante consiste, d'une part, à améliorer notre algorithme pour une identification et classification des creux de tension en temps réel, et d'autre part à élaborer une stratégie de commande, en se basant sur les données de cet identificateur, pour assurer une continuité de service de l'éolienne même en présence de creux de tension.

### Références

- [1] Kinces F., (2004) *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.
- [2] Pham C. D. (2005) *Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [3] Peng L., (2010) *Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension*, Thèse de l'école centrale de Lille, Laboratoire L2EP à l'Ecole Centrale de Lille et au département Génie Electrique, Université de Tsinghua

- [4] El-Sattar A, Saad N, Shams El-Dein M. (2008) *Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault*, Electric Power Systems Research, vol. 78, pp 1240-1246. Doi : 10.106/j.epr.2007.10.005
- [5] Gomis-Bellmunt O, Junyent-Ferre A, Sumper A, Bergas-Jan J. (2008) *Ride-Through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags*, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 23, n°4 pp. 1036-1045. Doi: 10.1109/TEC.2008.2001440
- [6] Peng. L, Li. Y, and Francois. B (2008) *Modeling and control of doubly fed induction generator wind turbines by using causal ordering graph during voltage dips*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 2412–2417, ISBN: 978-1-4244-3826-6.
- [7] Peng. L, Li. Y, and Francois. B (2009) *Dynamic behavior of doubly fed induction generator based wind turbines under three-phase voltage dips* Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference pp. 620-626. Doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157460.
- [8] Ignatova. V (2006) *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*, Thèse, Université Joseph Fourier.
- [9] Zhang. L, Bollen. M. (1998) *A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components*, IEEE Power Engineering Letters. Vol 18, n°7, pp 50-52, Doi: 10.1109/MPER.1998.686958
- [10] NdjanaH J (2005) *Système auxiliaire de compensation de creux de tension*, Thèse, Université du Québec à Trois-Rivières.
- [11] Eke S., MoukengueImano A. (2014) *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 génie électrique (SGE'14), ENS CACHAN, France.
- [12] Bollen M., StyvaktakisE. (2000) *Characterization of three-phase unbalanced dips (as easy as one-two-three?)* IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, Seattle, WA, USA, pp.899-904. Doi: 10.1109/PSS.2000.867481
- [13] Gatta B., Chikhi K., Fetha C. (2014) *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, 651 – 661.
- [14] Bollen M. (1999) *Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*, Wiley-IEEE Press.
- [15] Boujoudi B., Machkour N., Kheddioui E. (2015) *A new method for detection and characterization of voltage dips*, Proceeding ICFPAM, Marrakech.