

Qualité de l'énergie électrique : propagation, transformation et identification des creux de tension dans les réseaux électriques

Charles Hubert KOM*, Lucien Duclos NDOUMBE, Serge Raoul DZONDE NAOUSSI
et Jean MBIHI

*Laboratoire d'Electronique, Electrotechnique, Automatique et Télécommunication, Unité de Formation
Doctorale des Sciences de l'Ingénieur, Université de Douala, BP 8698 Douala, Cameroun*

* Correspondance, courriel : charles_kom@yahoo.fr

Résumé

Le présent article est une contribution à l'analyse des problèmes de qualité d'énergie électrique et particulièrement des creux de tension. La méthodologie utilisée pour l'analyse et l'identification des creux de tension, tient en compte des mutations de ce type de difformités au cours de leur propagation. Par ailleurs, contrairement aux travaux scientifiques publiés au sujet de ce domaine de recherche émergent, cet article récapitule les résultats clés suffisants, requis pour la construction d'un outil intelligent d'identification de phénomènes de creux de tension dans les réseaux électriques. Les simulations numériques des creux de tension monophasés et polyphasés (biphasés et triphasés), effectuées dans l'environnement MATLAB/Simulink, ont permis d'analyser les transformations des différentes signatures de creux de tension à travers des portions d'un prototype de réseau. De plus un recensement des données et stratégies suffisantes, a été effectuée, en vue d'un développement futur d'un système expert, dédié à la gestion globale en temps réel, des phénomènes de creux de tension dans les réseaux électriques.

Mots-clés : *qualité de l'énergie électrique, perturbations électriques, creux de tension, propagation.*

Abstract

Quality of electrical energy : propagation, transformation and identification of voltage drops in electrical networks

This paper is a contribution for solving electrical energy quality problems, with the emphasis on voltage drops. The methodology used for the analysis and identification of voltage drops, takes into account the changings of these types of disturbances during their propagation. In addition, unlike existing scientific works published about that emerging research area, this paper recapitulates sufficient key results, required for building an intelligent identification tool of voltage drops phenomena in electrical networks. Numerical simulations of single phase and multiphase (two phase and three phase) voltage drops, conducted within MATLAB/Simulink framework, have permitted to analyze the transformations of different voltage drop signatures, through target zones of a prototyping network. Then, sufficient data and strategies, required for a future development of an expert system, dedicated to a global real time management of voltage drop phenomena in electrical networks, have been provided.

Keywords : *quality of electrical energy, electrical disturbances, voltage drops, propagation.*

1. Introduction

L'industrialisation et la croissance de la population ont fortement favorisé l'émergence et le développement des systèmes électriques de ces vingt dernières années ; avec l'élaboration d'architectures de plus en plus complexes intégrant de nombreux équipements de différentes natures notamment de microélectronique, télécommunications et informatique, électronique de puissance et d'énormes charges fluctuantes et surtout l'intégration des systèmes de production décentralisée [1]. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter entre autres le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation du coût de production et une dégradation du milieu naturel [2] soulevant le problème de stabilité, de flexibilité et d'efficacité des réseaux électriques, surtout quand on s'attarde sur leur caractère polluant et l'environnement électromagnétique auquel ils sont soumis. Dans ces conditions, la prévention des pannes dues aux aléas naturels, la cohabitation des équipements et des charges de plus en plus polluantes, l'anticipation des accidents et erreurs de manœuvre, la satisfaction des clients, bref l'amélioration des critères de performance deviennent des enjeux majeurs ayant des conséquences graves sur le rendement (destruction des équipements/arrêts de production). Posant la problématique de la fourniture électrique de qualité dans une économie de marché de plus en plus libérale et en pleine mutation.

Plusieurs approches (méthode de six tensions, méthode des composantes symétriques, vecteur d'espace, analyse spectrale par Transformée de Fourier Rapide, etc.) ont fait l'objet des travaux de recherche conséquents sur les problèmes de creux de tension dans les réseaux électriques, notamment [3 - 5]. Mais ces travaux présentent des insuffisances techniques dues au nombre réduit de variables clés d'analyse, et surtout à la non prise en compte des facteurs cinétiques de propagation. Nous présenterons dans le cadre de ce travail, le comportement des différents éléments des réseaux électriques sujets au phénomène de propagation des creux de tension. Des simulations nous ont permis d'évaluer et de vérifier différentes signatures issues de la propagation des creux de tension à travers des portions du réseau (sous différentes configurations). Ce qui nous a permis d'établir clairement une identification exhaustive et surtout leurs conditions de transformation. Le contenu de cet article à partir de cette section 1 est organisé comme suit : la section 2 porte sur un rappel des notions techniques importantes permettant de mieux appréhender le phénomène de creux de tension, puis la propagation et la transformation desdits creux de tension en régime permanent. La section 3 présente la méthodologie de l'étude dynamique. Ensuite, la section 4 porte sur la simulation et les résultats. Et enfin la section 5 ressort la conclusion de ce travail.

2. Aspects fondamentaux

2-1. Définition et causes des creux de tension

Un creux de tension est une baisse brutale (diminution subite) de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique à une valeur comprise entre 90 et 10 % de la tension de référence (contractuelle), suivie d'un rétablissement de la tension après une période allant de 10 ms à 1 minute [3, 6]. Les *Figures 1a et 1b* illustrent la forme d'onde d'un creux de tension et ainsi que sa caractérisation.

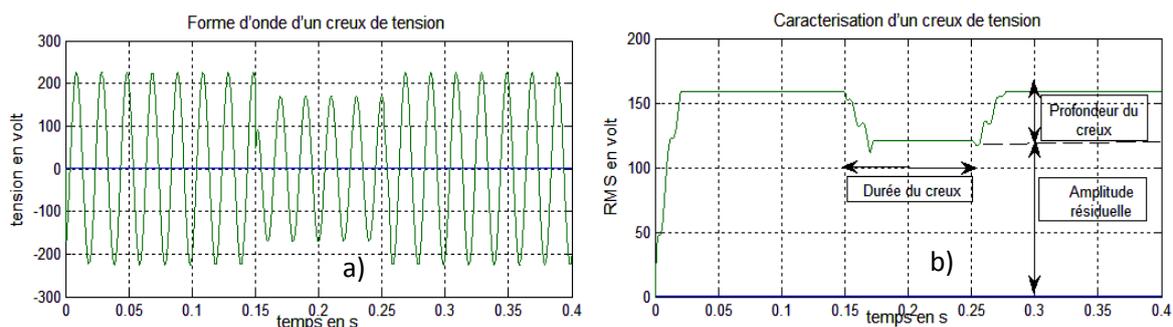


Figure 1 : Un creux de tension : a) forme d'onde ; b) caractérisation

Les creux de tension proviennent généralement de la prolifération de charges fluctuantes, de la mise en service d'équipements faisant appel à un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs, four à arc, etc.) ou des phénomènes aléatoires tels que la foudre ainsi que les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution. Les différents types de défauts générateurs de creux de tensions, sont présentés dans la **Figure 2**.

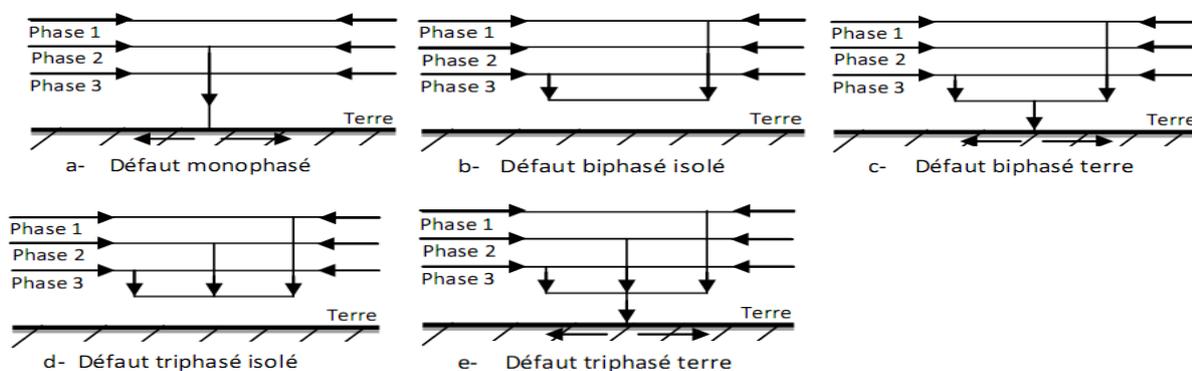


Figure 2 : Différents types de défauts (courts-circuits) générateurs de creux de tension

2-2. Caractéristiques d'un creux de tension

Les principales caractéristiques d'un creux de tension sont son amplitude (profondeur), sa durée et dans une certaine mesure sa typologie et son mode de propagation. L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et par la distance entre le point de défaut et le point où est situé le client sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont est élevée plus l'amplitude du creux de tension est faible. La durée du creux de tension est conditionnée par le temps de maintien du défaut. Cette durée dépend du temps de détection et de localisation du défaut, des temporisations éventuelles mises en œuvre avant l'envoi de l'ordre d'ouverture des disjoncteurs et du temps de réaction des disjoncteurs. Les creux de tension monophasés se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase. En plus de la durée et de l'amplitude, les creux de tension triphasés se caractérisent par le déphasage entre les tensions de phase qui dépend de la nature et de l'endroit du défaut [4, 7].

2-3. Typologie de classification des creux de tension

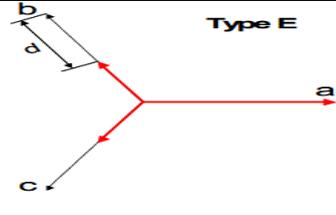
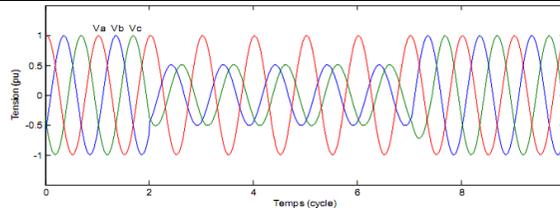
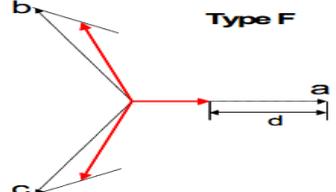
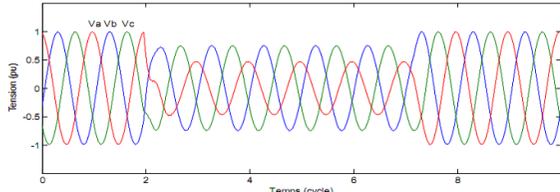
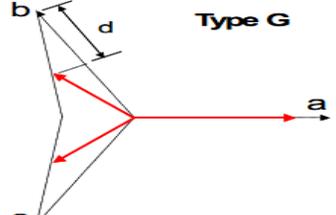
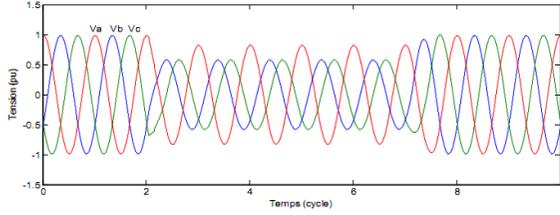
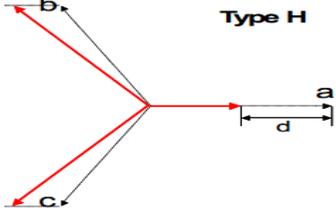
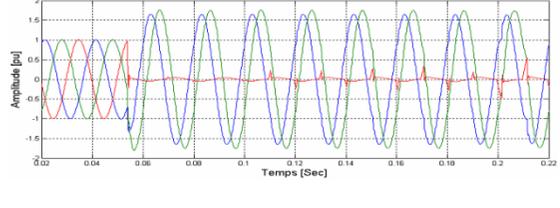
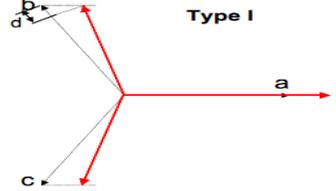
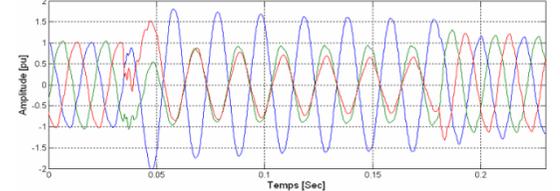
Les creux de tension sont classifiés dans la littérature en différents types présentés dans le **Tableau 1** [3 - 6].

Tableau 1 : Identification, classification et caractérisation des creux de tension

(Les tensions avant la défaillance sont indiquées en noire - Les tensions dans les phases en défaut ou entre les phases sont indiquées en rouge, et on a :

$$\vartheta = \omega t - \text{défauts monophasés, défauts biphasés, défauts triphasés}$$

Type	Signature Vectorielle	Formes d'ondes	Equations Cartésiennes	Causes et Caractéristiques
A	<p>Type A</p>		$v_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{(1-d)V}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right)$ $v_c = \frac{(1-d)V}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3})} \right)$	Causés par des défauts triphasés, les chutes de tension présentent la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires ; et se propagent en aval du réseau sans modifier sa signature.
B	<p>Type B</p>		$v_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{V}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right)$ $v_c = \frac{V}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3})} \right)$	Causés par des défauts monophasés. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des phases, les phases non affectées par le défaut n'étant pas modifiées. Ils se propagent en aval du réseau en modifiant sa signature en type C.
C	<p>Type C</p>		$v_a = \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} - \alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} + \alpha)} \right)$	Causés par des défauts biphasés entre deux phases, soit par la propagation des creux de tension de type B ou D via les transformateurs. Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée. En se propageant en aval du réseau, ces creux de tension se transforment en type D.
D	<p>Type D</p>		$v_a = \frac{(1-d)V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{2\pi}{3} + \alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} + e^{-j(\theta - \frac{4\pi}{3} - \alpha)} \right)$	Causés par la propagation des creux de tension de type C via les transformateurs. Ils se caractérisent par une chute principale sur une des phases et de faibles chutes de tension et déphasages supplémentaires pour les deux autres phases. En se propageant en aval du réseau, ces creux de tension se transforment en type C.

E	 <p>Type E</p>		$v_a = \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{(1-d)V}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3})} \right)$ $v_c = \frac{(1-d)V}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3})} \right)$	<p>Causés par de défauts entre deux phases et la terre, et présentent des chutes de tension sans déphasage sur deux des phases. Ils se propagent en aval du réseau en générant des creux de tension de type F.</p>
F	 <p>Type F</p>		$v_a = \frac{(1-d)}{2} V (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} \right)$	<p>Causés par la propagation des creux de type E via les transformateurs. 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. En se propageant en aval du réseau, ces creux se transforment en type G.</p>
G	 <p>Type G</p>		$v_a = \left(1 - \frac{2d}{5}\right) \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)} \right)$	<p>Ils présentent des chutes de tension avec déphasages supplémentaires pour deux des phases et une faible baisse de tension pour la troisième phase. Ils sont assez rare, car ils proviennent de la double transformation des creux de tension de type E.</p>
H	 <p>Type H</p>		$v_a = \frac{(1-d)}{2} V (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}-\alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}+\alpha)} \right)$	<p>Ils présentent une chute de tension sur une des phases et des surtensions sur les deux autres phases.</p>
I	 <p>Type I</p>		$v_a = (1+2d) \frac{V}{2} (e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ $v_b = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{2\pi}{3}+\alpha)} \right)$ $v_c = \frac{mV}{2} \left(e^{j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} + e^{-j(\theta-\frac{4\pi}{3}-\alpha)} \right)$	<p>Ils se caractérisent par des chutes de tension sur deux des phases et une surtension sur la troisième phase.</p>

Le type de creux de tension est une caractéristique importante, car elle permet l'identification et la localisation du défaut produit. D'après la classification universellement reconnue des creux de tension [7 - 8], on distingue 7 principaux types de creux de tension dénotés par les lettres de A à G. Les creux de tension avec surtension dus aux défauts dans les systèmes à neutre isolé ne se propagent pas, et d'autre part ils ne sont pas subis par les charges généralement connectées en triangle dans les systèmes à neutre isolé. Ils sont dénotés par les lettres H et I.

2-4. Propagation et transformation des creux de tension

La propagation du primaire au secondaire des défauts monophasés et biphasés dépend du couplage du transformateur. La transmission se fait sans atténuation pour les défauts triphasés. Par contre les creux de tension subissent une forte atténuation lors de leur passage du secondaire au primaire [4, 7]. Les creux de tension de types A, B, C et E sont mesurés au niveau où se produit le défaut. Ils se propagent en aval du réseau en modifiant leur signature selon le type de couplage des transformateurs, donnant naissance à d'autres types de creux de tension qui peuvent être de types : C, D, F et G. Les creux de type H et I ne se propagent pas. **La Figure 3** et le **Tableau 2** présentent la mutation des creux de tension de types A, B, C, E, H, et I lorsqu'ils se propagent en aval du réseau, via les transformateurs Dy, les plus utilisés [5, 8, 9].

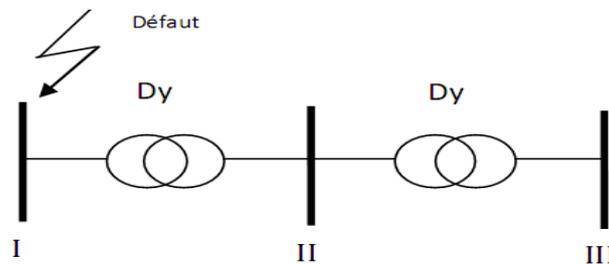


Figure 3 : Transformation des types de creux de tension

Tableau 2 : Propagation des creux de tension

Niveau de tension	I	II	III
Types de creux de tension	A	A	A
	B	C	D
	C	D	C
	E	F	G
	-	H/I	-

Les réseaux industriels étant de type radial ou arborescent, le motif de base servant de brique élémentaire pour une mise en équation de la propagation des creux de tension pour un système triphasé équilibré direct est représenté à la **Figure 4**. L'assemblage des structures de base constitue le réseau électrique global. La représentation équivalente de la structure de base monophasée est la suivante [4, 7] :

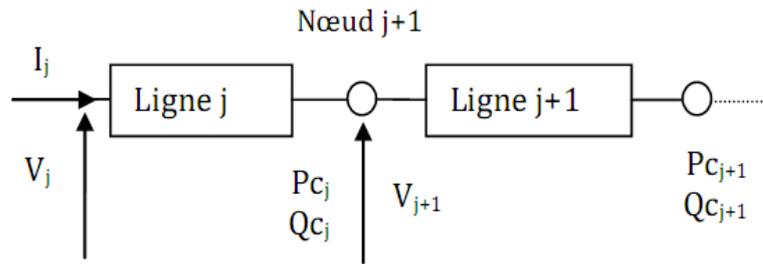


Figure 4 : Motif de base d'un réseau électrique équilibré

Les V_i , inconnues à déterminer, sont les valeurs de la tension simple aux différents nœuds. Pour $j = 1$, la tension U_1 connue représente la valeur efficace de la tension d'alimentation du réseau. La ligne entre les nœuds j et $j+1$ est la ligne j . Elle est représentée par la résistance de ligne R_j modélisant les pertes joules et l'inductance de ligne L_j modélisant les pertes réactives. La première ligne représente non seulement l'impédance de ligne Z_j mais aussi l'impédance image de la puissance de court-circuit au nœud source. Les charges sont modélisées par leur puissance active P_c et réactive Q_c absorbées. Au nœud $j+1$, se trouve la $j^{\text{ème}}$ charge qui présente une puissance apparente :

$$S_{c_j} = \sqrt{P_{c_j}^2 + Q_{c_j}^2} \tag{1}$$

Le diagramme de Fresnel du schéma de la structure de base est donné par la **Figure 5** suivante :

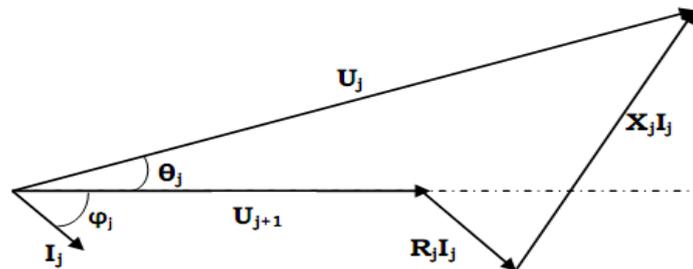


Figure 5 : Diagramme de Fresnel correspondant au motif de base

Il nous renseigne que la récurrence entre les modules de deux tensions consécutives s'exprime par la relation de **l'Equation (2)**.

$$U_{j+1} = \sqrt{\frac{A_j + \sqrt{B_j}}{2}} \tag{2}$$

Avec $A_j = U_j^2 - 2(R_j P_j + X_j Q_j)$ et $B_j = (U_j^2 - 2(R_j P_j + X_j Q_j))^2 - 4(Z_j S_j)^2$

Les **Relations** donnant les puissances totales respectivement actives et réactives absorbées au nœud $(j+1)$ sont les suivantes :

$$P_j = \sum_{k=j+1}^{N-1} P_{ck} \tag{3}$$

$$Q_j = \sum_{k=j+1}^{N-1} Q_{ck} \quad (4)$$

où N est le nombre total de nœuds.

En ce qui concerne les déphasages, ils sont donnés par **l'Equation (5)**:

$$\cos(\theta_{j+1}) = \frac{U_j^2 + R_j P_j + X_j Q_j}{U_j U_{j+1}} \quad (5)$$

Avec θ_i l'angle de déphasage entre les tensions V_i et V_{i+1} , $P_j = V_j I_j \cos(\varphi_j)$, $Q_j = V_j I_j \sin(\varphi_j)$, $S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$ et $Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$

L'Equation (2) montre que pour une tension réseau :

- Les impédances de ligne données, la tension en un nœud du réseau évolue en inverse des puissances consommées.
- La puissance consommée donnée, la tension évolue en inverse des impédances de ligne.
- Par la récurrence, elle montre également que la propagation d'un creux sur la tension source se fait d'amont vers l'aval.

En considérant que le terme, $4Z_j S_j$ soit négligeable devant U_j^2 (dans l'expression de B_j), **l'Equation (2)** se transforme en **(6)**:

$$\frac{U_i - U_{i+1}}{U_i} = \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} = \frac{\Delta U_{i+1}}{U_i} \quad (6)$$

L'Equation (6) est une expression couramment rencontrée dans la littérature. Son équivalent en monophasé s'écrit **(7)**:

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{(R \Delta P + X \Delta Q)}{V^2} \quad (7)$$

Elle traduit la variation de la puissance et la variation de la tension lorsque les phénomènes transitoires sont éliminés. En triphasé équilibré, cette **Relation** s'écrit **(8)**:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{(R \Delta P + X \Delta Q)}{U_n^2} \quad (8)$$

La **Relation (8)** est applicable dans la quasi-totalité des chutes de tension dans les réseaux électriques. La **Relation (7)** permet d'affirmer que l'augmentation de la puissance de court-circuit au niveau du point de mesure (diminution de R et X , diminution ΔP et ΔQ) permet la réduction du rapport $\frac{\Delta V}{V}$.

Le terme $\frac{X}{R}$ étant grand dans un réseau de bonne qualité, la variation de la puissance réactive est atténuée et (7) devient :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta Q}{S_{cc}} \tag{9}$$

où S_{cc} est la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation.

Nous pouvons formuler une récurrence entre les tensions des différents nœuds U_j et la tension du nœud source U_1 qui est la tension $U_{réseau}$. En utilisant l'hypothèse simplificatrice de l'expression de B_j énoncée plus haut, nous avons :

$$U_{j+1}^2 = A_j \tag{10}$$

où :

$$A_1 = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1)$$

$$A_2 = U_2^2 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = A_1 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1) - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2)$$

En généralisant, nous obtenons :

$$U_{n+1}^2 = A_n = U_1^2 - 2 \left[\sum_{j=1}^n (R_j P_j + X_j Q_j) \right] \tag{11}$$

P_j et Q_j sont définies par les **Equations (3) et (4)**. Le terme entre crochet dépend uniquement des puissances des charges et des impédances des lignes. Il contribue à la chute de tension. La puissance de

court-circuit au nœud j est définie par l'expression : $P_{cc(j)} = \frac{U_r^2}{\sum_{k=1}^{j-1} Z_k}$ où les Z_j sont les impédances de la

branche reliant le nœud considéré au nœud source. Les perturbations dues aux grandes variations des puissances appelées au sein du réseau, se traduisent par une génération du creux de tension. La puissance de court-circuit en chaque nœud du réseau détermine les niveaux des perturbations tout au long de l'installation. Une charge située en un nœud de grande puissance de court-circuit est immunisée vis-à-vis des perturbations provenant de grandes variations de puissances qui peuvent affecter l'amplitude de sa tension. Nous observons que les creux de tension se propagent dans le réseau, et leur sévérité dépend de l'endroit de mesure du creux de tension par rapport à l'événement qui l'a engendré (la distance entre l'endroit de défaut et l'endroit de mesure), de la puissance de court-circuit, de la configuration des éléments du réseau considéré (longueur des lignes). La démarche menée plus haut constitue une étude statique du comportement de l'ensemble charge - réseau. Elle ne permet d'avoir qu'une idée générale du comportement de ce dernier. Dans la suite, une étude dynamique sera prise en compte plus spécialement, notamment dans la modélisation de cet ensemble dans MATLAB/Simulink.

3. Méthodologie de l'étude dynamique

3-1. Mode opératoire

L'étude que nous proposons présente la propagation des creux de tension à travers les éléments d'un réseau électrique. Nous choisissons des portions du réseau qui partent d'un poste source d'alimentation HTB vers les zones de consommation, puis à chaque fois nous changeons les types de défauts (court-circuit d'une durée de 0.15 s à 0.25 s), les éléments du réseau et leurs caractéristiques, les points d'observation, les configurations des transformateurs, pour identifier les transformations ou les nouvelles signatures des creux de tension lors de leur propagation.

3-2. Plate-forme d'étude

Le réseau étudié (*Figure 6*) est constitué d'une source HTB, des transformateurs HTB/HTA et HTA/BT, des lignes électriques et des jeux de barre dont les caractéristiques sont données dans le *Tableau 3*.

Tableau 3 : Composition du réseau électrique

Eléments	Caractéristiques
Source	Source triphasée S: 90 KV-100 MVA, 50 Hz
Transformations	01 Transformateur T_1 : 90 KV/15 KV- 5 MVA, 50 Hz, Couplage : D-y 02 Transformateurs T_2, T_3 : 15 KV/400 V-160 KVA, 50 Hz, Couplage : D-y
Lignes	Ligne de Transport triphasée en π : L_1 Lignes de Distribution triphasées en π : L_2, L_3

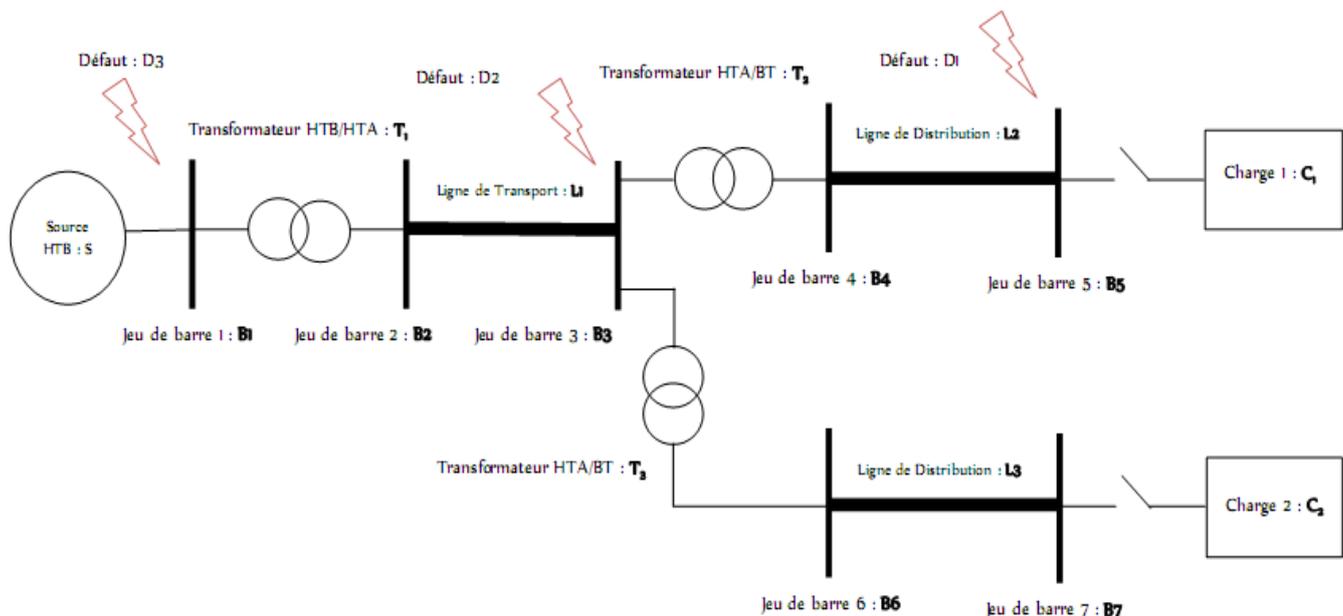


Figure 6 : Schéma unifilaire du montage

4. Résultats et discussion

Nous présentons dans cette partie les résultats de la simulation et la discussion inhérente.

4-1. Cas de la propagation des creux de tension sur les lignes électriques

Nous observons les formes d'onde et les caractéristiques (tensions et valeurs efficaces) au niveau du jeu de barre B₄. De plus, nous les comparons à celles obtenus au niveau du jeu de barre B₅ pendant la propagation le long d'une ligne électrique L₂ des creux de tension de diverses natures après la manifestation du défaut D₁.

4-1-1. Cas d'un défaut triphasé

Nous observons les tensions au niveau des différents jeux de barre comme l'indique la **Figure 7**.

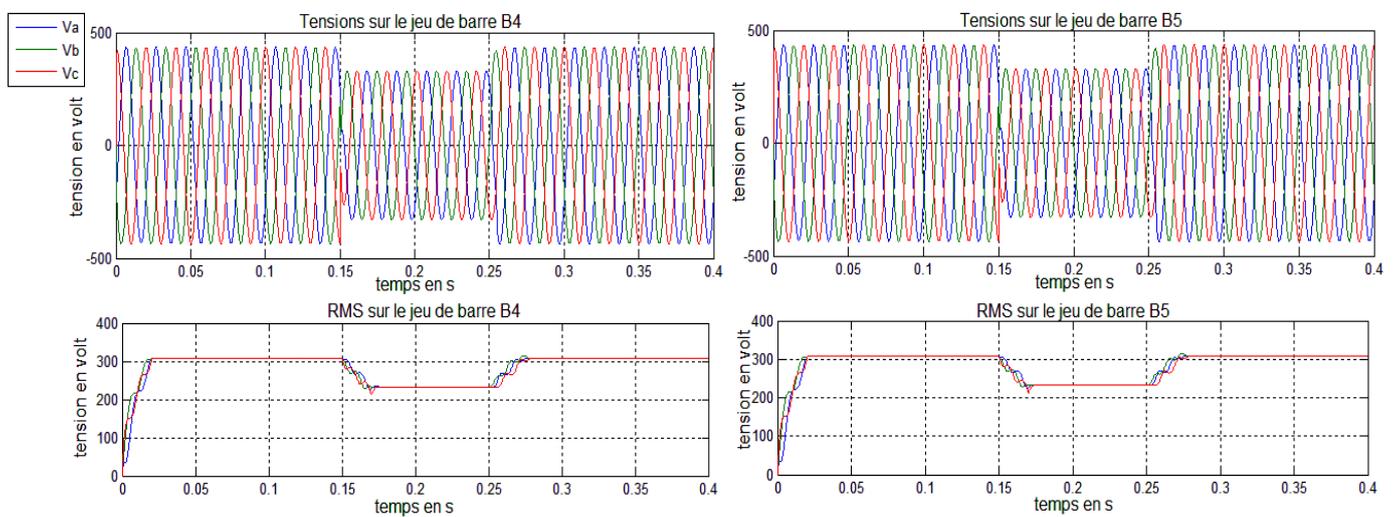


Figure 7 : Propagation des creux de tension sur les lignes-Cas du défaut triphasé

4-1-2. Cas du défaut monophasé

Nous observons les tensions au niveau des différents jeux de barre comme l'indique la **Figure 8**.

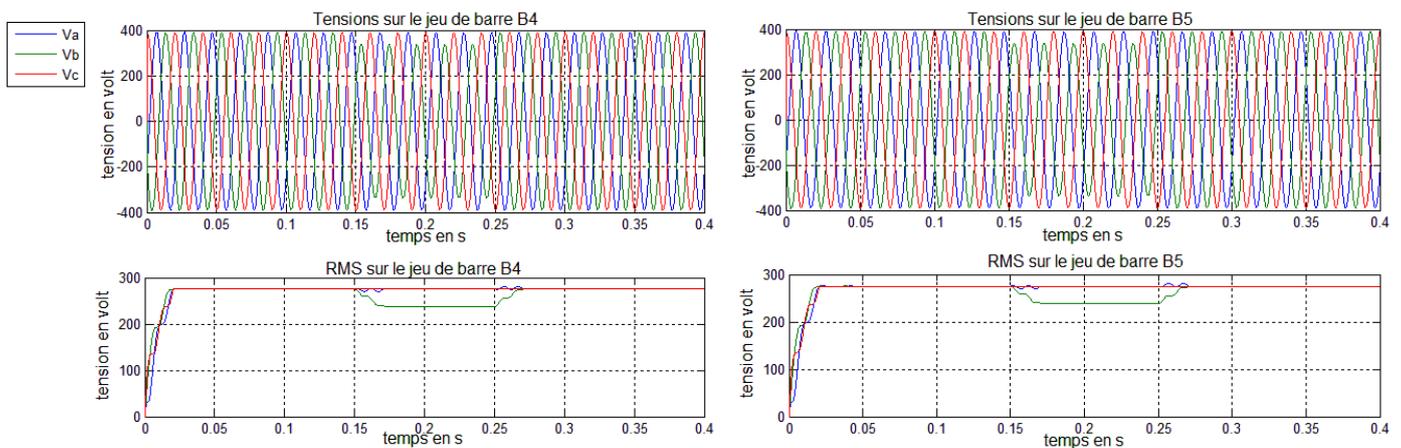


Figure 8 : Propagation des creux de tension sur les lignes-Cas du défaut monophasé

4-1-3. Cas du défaut biphasé

Les tensions au niveau des différents jeux de barre sont présentées à la **Figure 9**.

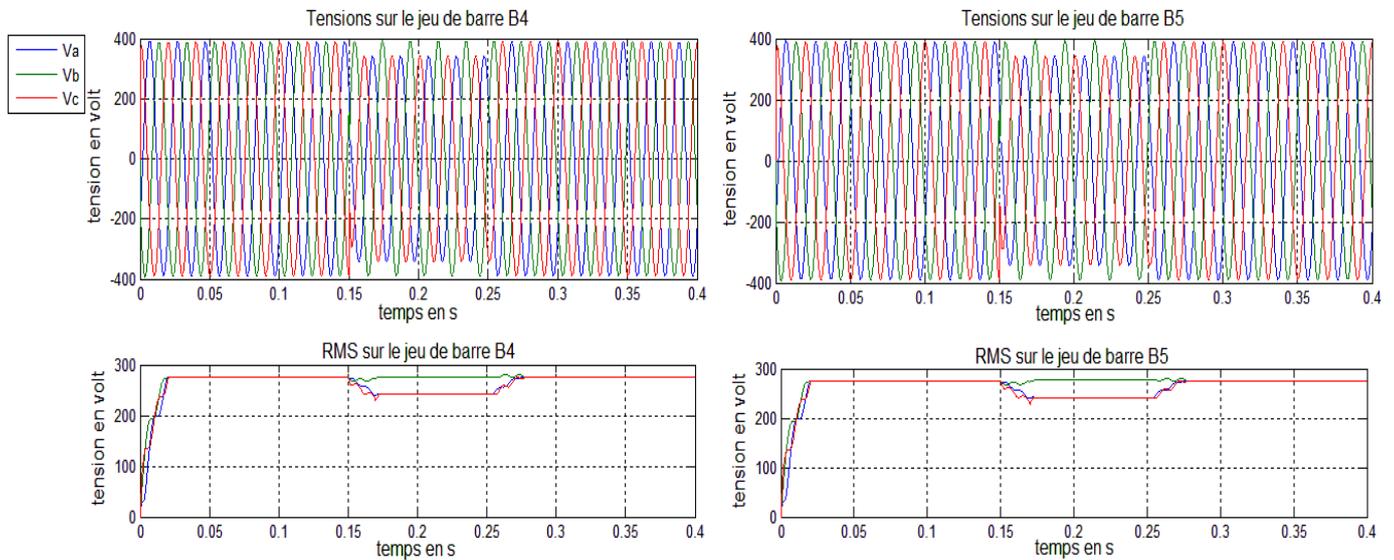


Figure 9 : Propagation des creux de tension sur les lignes - Cas du défaut biphasé

4-2. Cas de la propagation des creux de tension en amont et en aval du point de défaut à travers les points de raccordement

Nous réalisons le défaut D_2 dans la portion du réseau L_1 (notamment entre les jeux de barre B_2 et B_3), et nous observons les modifications des signatures en amont et en aval du point de défaut D_2 sur les jeux de barre B_1 , B_4 afin de conclure sur le mode de propagation :

4-2-1. Cas du défaut triphasé

Nous observons les tensions au niveau des différents jeux de barre comme l'indique la **Figure 10**.

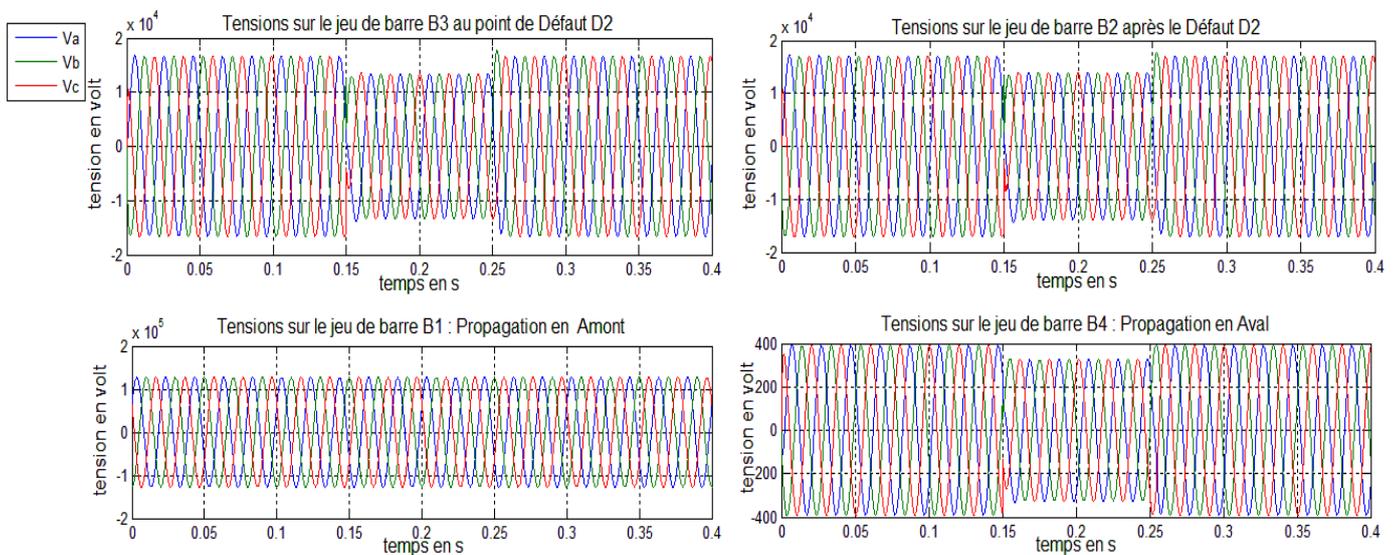


Figure 10 : Propagation des creux de tension en amont et en aval du réseau - Cas du défaut triphasé

4-2-2. Cas du défaut monophasé

Nous observons les tensions au niveau des différents jeux de barre comme l'indique la **Figure 11**.

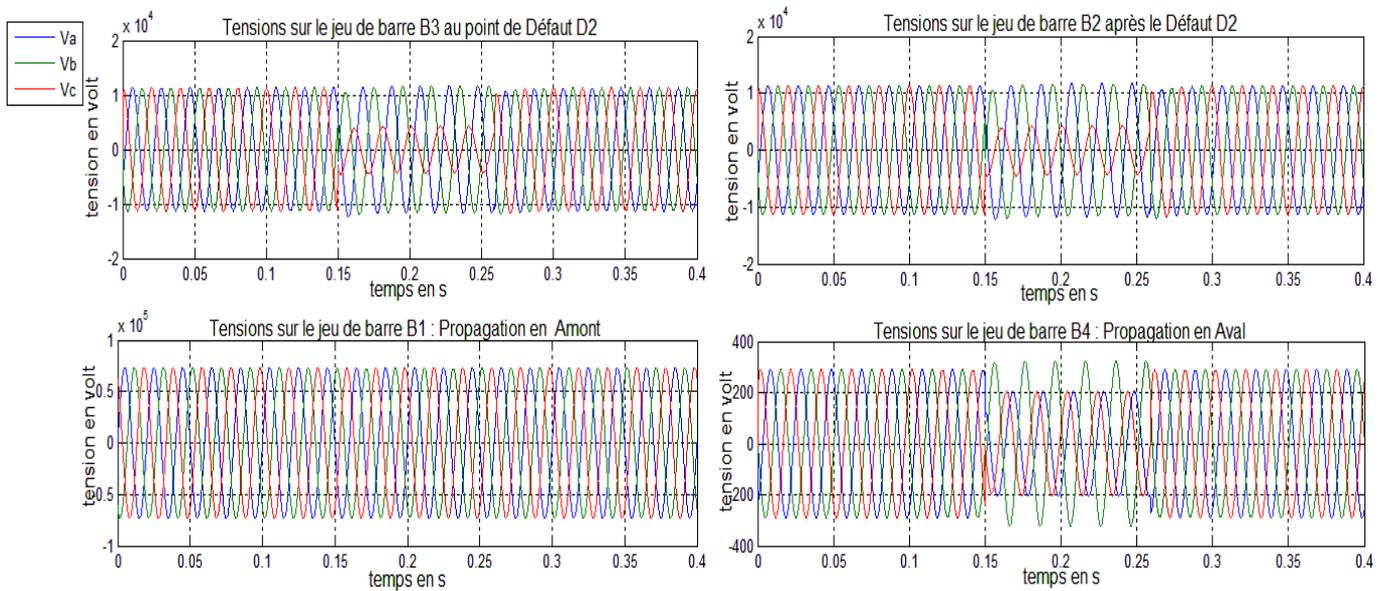


Figure 11 : Propagation des creux de tension en amont et en aval du réseau - Cas d'un défaut monophasé

4-2-3. Cas d'un défaut biphasé

Nous observons les tensions au niveau des différents jeux de barre comme l'indique la **Figure 12**.

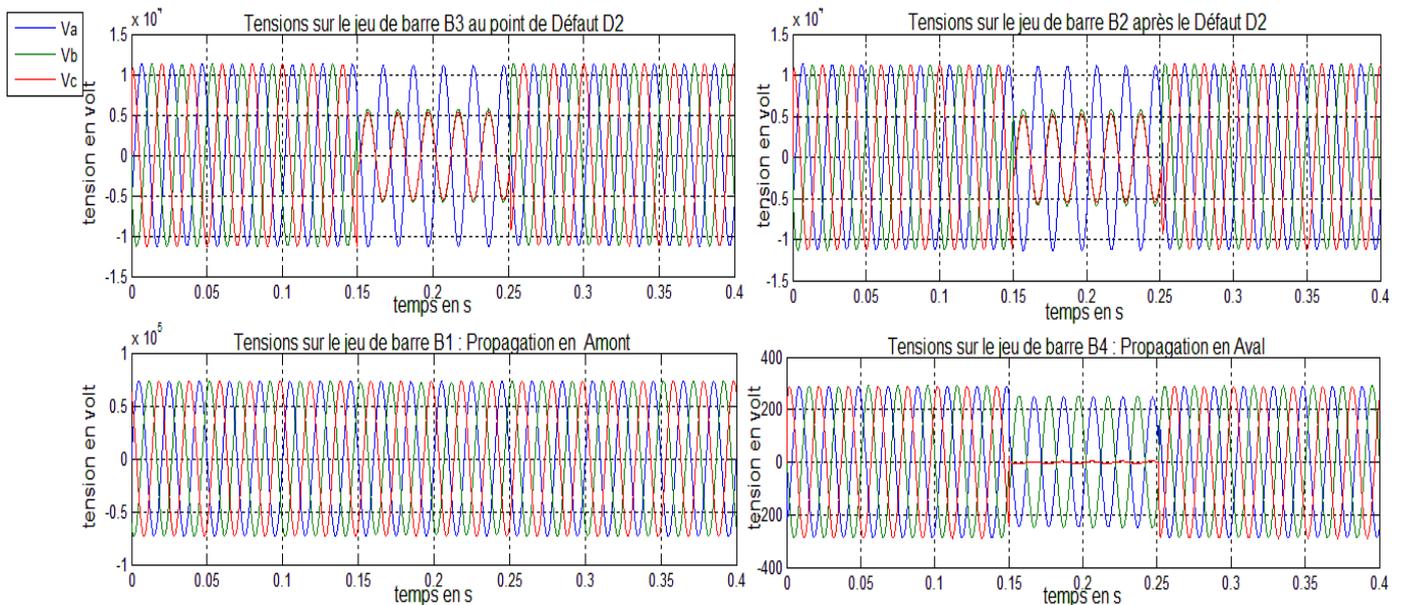


Figure 12 : Propagation des creux en amont et en aval du réseau - Cas d'un défaut biphasé

4-3. Cas de la propagation et de l'identification des signatures lors de la traversée des transformateurs dans un réseau

Nous réalisons un certain nombre de défauts triphasés, monophasés et biphasés afin d'obtenir les principaux types de creux de tension. Ensuite nous observons la transformation des signatures de ces différentes typologies de creux de tension au niveau des jeux de barre B₁, B₃ et B₅ à la traversée des transformateurs T₁ et T₂.

4-3-1. Propagation des creux de tension de type A

La réalisation d'un défaut symétrique sur les trois phases génère une perturbation triphasée (creux de tension triphasé) sur le réseau tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 13**.

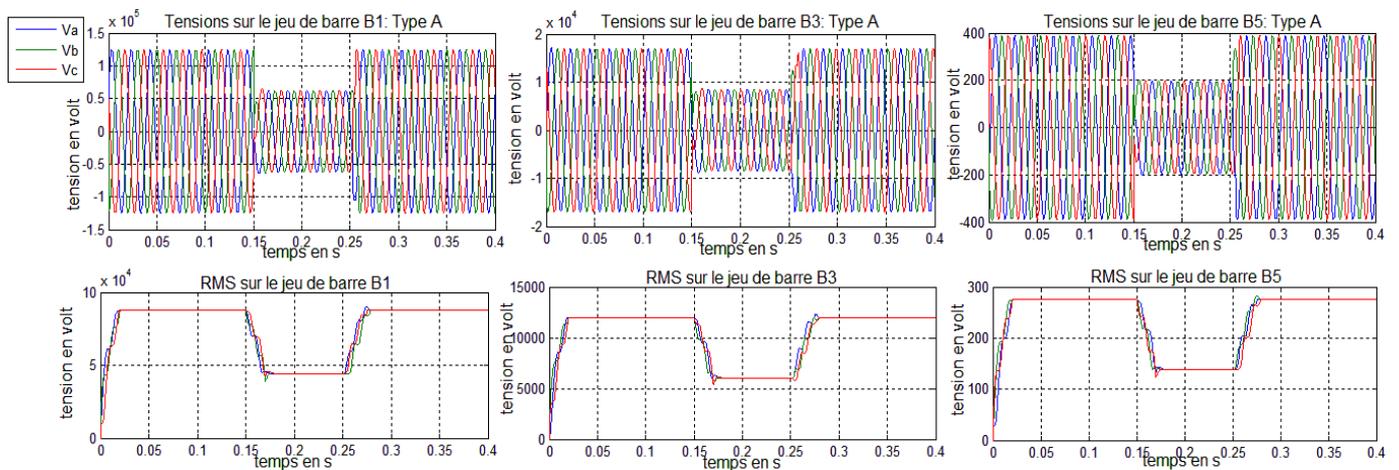


Figure 13 : Propagation des creux de tension de type A

4-3-2. Propagation des creux de tension de type B

La réalisation d'un défaut monophasé génère un creux de tension sur le jeu de barre B₁ qui se propage tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 14**.

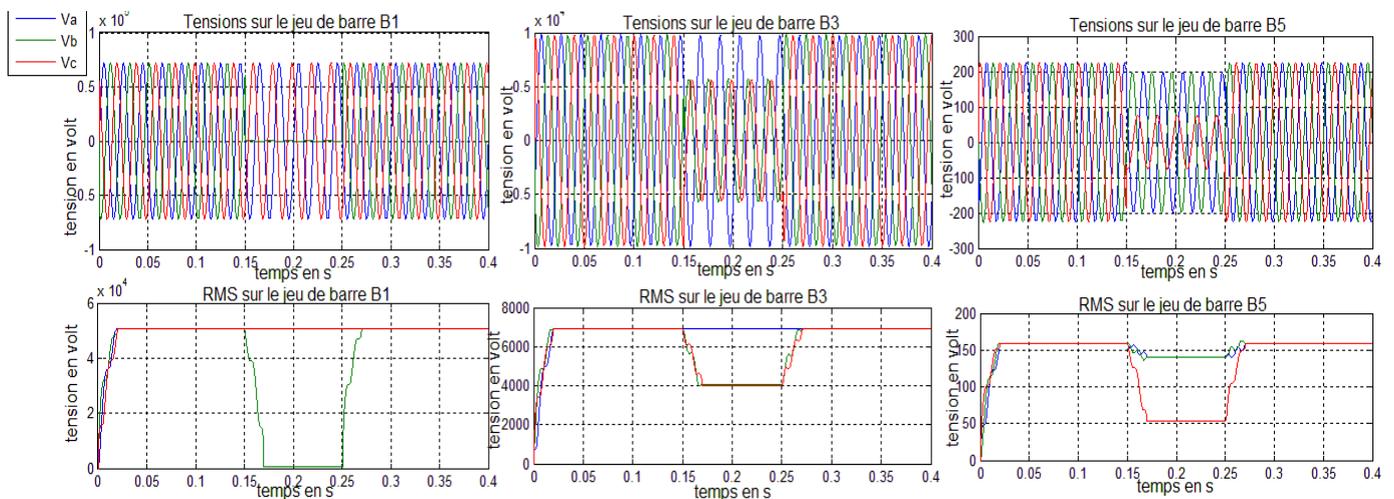


Figure 14 : Propagation des creux de tension de type B

4-3-3. Propagation des creux de tension de type C

La réalisation d'un défaut biphasé entre deux phases génère un creux de tension sur le jeu de barre B₁ qui se propage tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 15**.

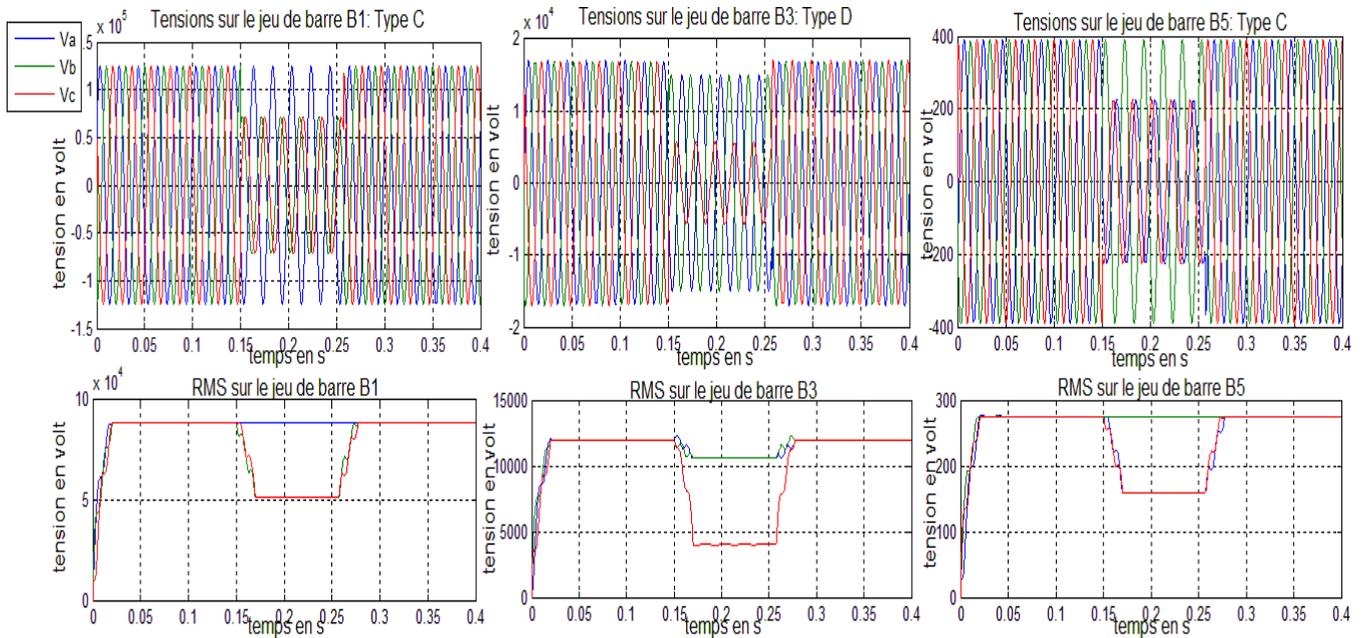


Figure 15 : Propagation des creux de tension de type C

4-3-4. Propagation des creux de tension de type E

La réalisation d'un défaut biphasé entre deux phases et le neutre génère un creux de tension sur le jeu de barre B₁ qui se propage tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 16**.

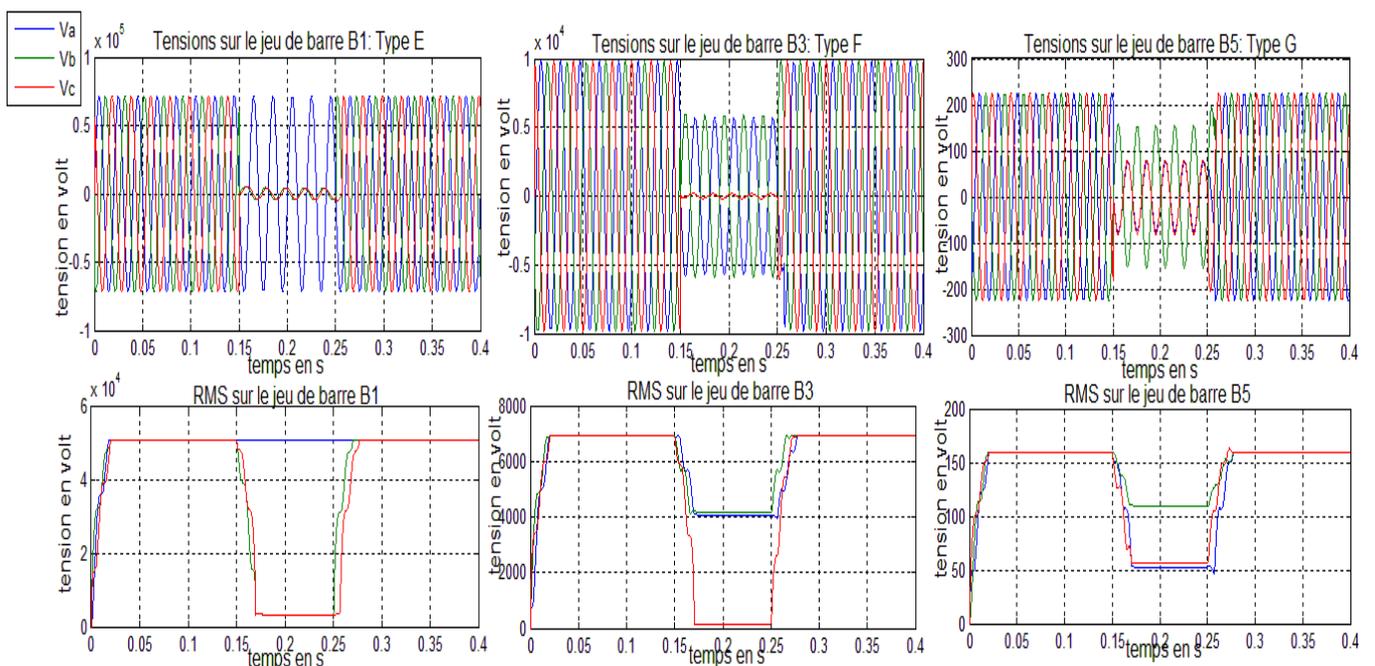


Figure 16 : Propagation des creux de tension de type E

4-3-5. Propagation des creux de tension de type H

La manifestation d'un creux de type H sur le réseau se propage tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 17**.

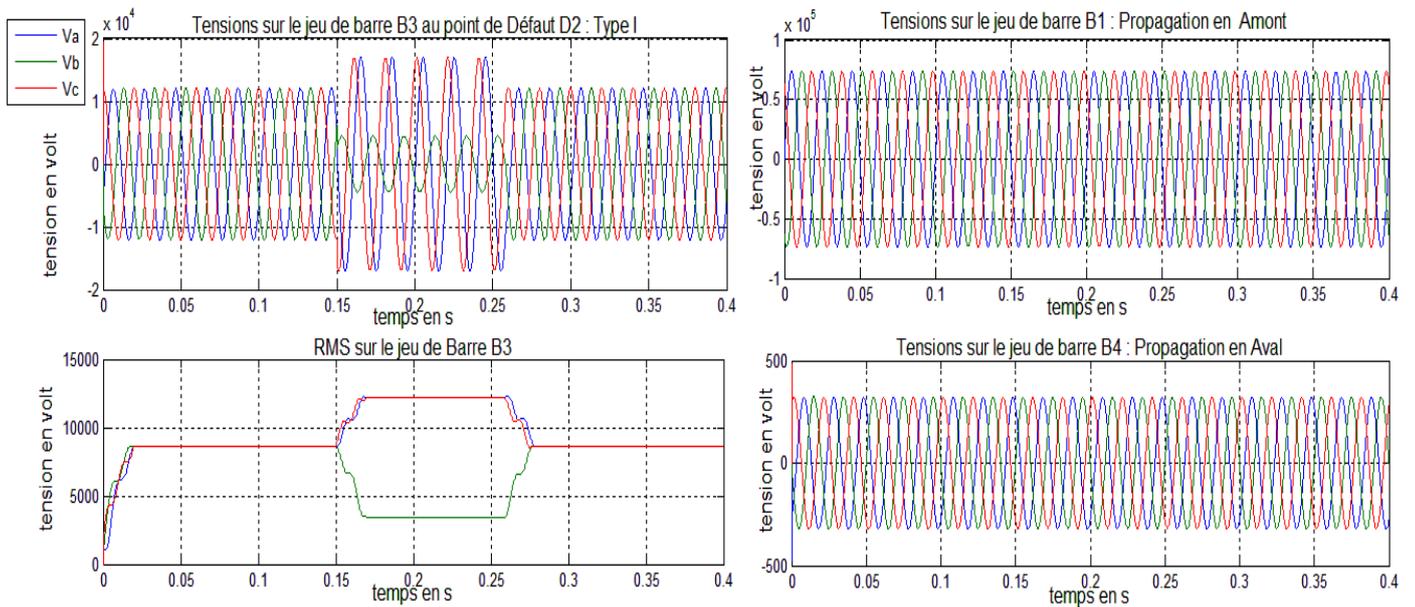


Figure 17 : Propagation des creux de tension de type H

4-3-6. Propagation des creux de tension de type I

La manifestation d'un creux de type I sur le réseau se propage tel qu'on peut l'observer sur la **Figure 18**.

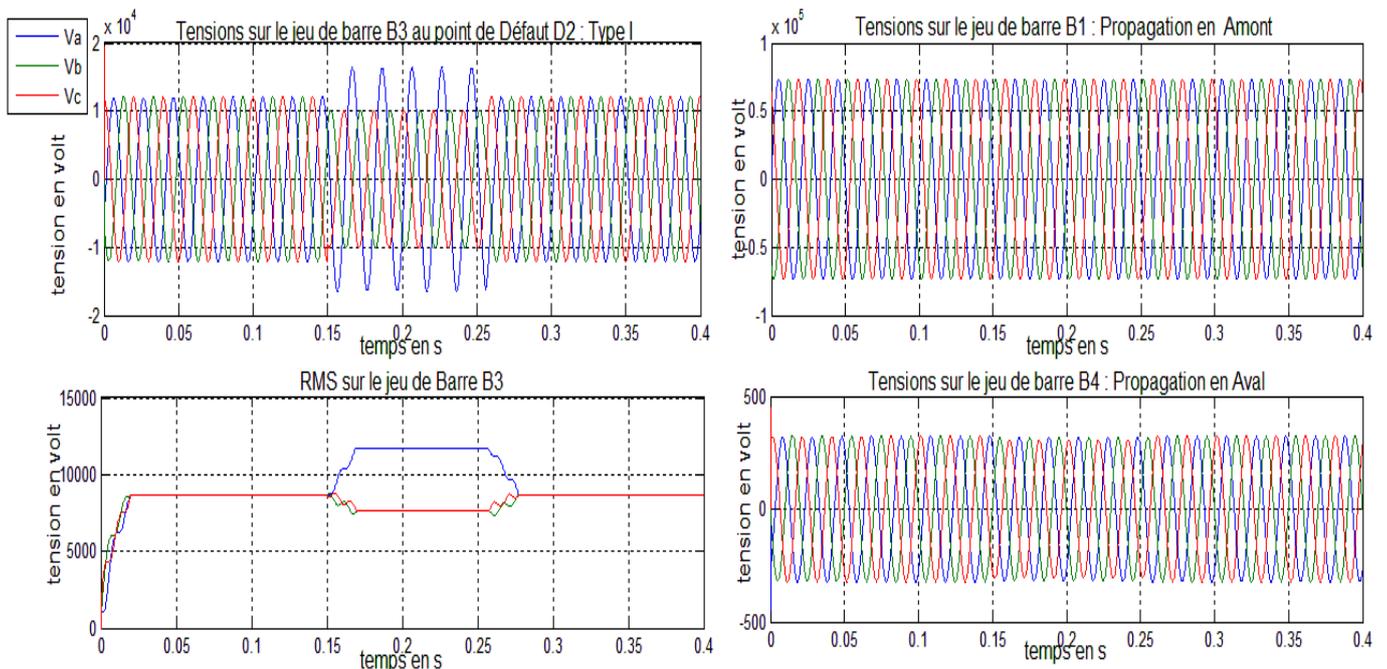


Figure 18 : Propagation des creux de tension de type I

4-4. Synthèse de l'analyse des résultats de simulation

4-4-1. Cas de la propagation des creux de tension sur les lignes électriques

On constate que les formes d'onde des tensions au niveau du jeu de barre B_4 (en amont de la ligne L_2) sont les mêmes que celles des tensions au niveau du jeu de barre B_5 (en aval de la ligne L_2). Il peut se produire une légère atténuation des amplitudes des tensions en bout de ligne pour des grandes distances liée au caractère résistif de cette dernière (Effet Joule). On conclut alors que : Les creux de tension qui se propagent, traversent les lignes électriques sans transformation de leur signature.

4-4-2. Cas de la propagation des creux de tension en amont et en aval du point de défaut à travers les points de raccordement

On observe que les signatures des creux de tension en amont et en aval des transformateurs (T_1 et T_2) du point de défaut sont différentes . On note une atténuation du creux de tension en amont. Cela s'explique par la loi des ponts diviseurs de tension qui voudrait que les creux de tension soit atténués lorsqu'ils se propagent en amont du réseau. Les creux de tension subissent donc, une forte atténuation lors du passage du secondaire au primaire des transformateurs. La puissance de court-circuit est plus élevée en amont qu'en aval. De ce fait, la sévérité des tensions mesurées dépend de l'endroit de mesure du creux de tension par rapport à l'événement qui l'a engendré. On conclut alors que les creux de tension sont atténués lorsqu'ils se propagent en amont dans le réseau. En revanche, ils se propagent en aval sans s'atténuer, mais en transformant les signatures au niveau des points de raccordement (transformateurs).

4-4-3. Cas de propagation et de l'identification des signatures lors de la traversée des transformateurs dans un réseau

Les différentes typologies des creux de tension se propagent et se transforment suivant les indications contenues dans les **Tableaux 1** et **2**. Les signatures de types A, B, C et E se transforment en types A, C, D et F respectivement ; qui à leur tour se transforment en types A, D, C et G. En conclusion, la propagation des creux de tension de types A, B, C et E se transforment en des nouvelles signatures de types C, D, F et G. En revanche les creux de tension de types H et I ne se transforment pas.

4-4-4. Grandeurs d'entrées-sorties d'un système d'identification de creux de tension

Les résultats de simulation obtenus et représentés graphiquement dans la section 4, montrent la complexité d'une étude rigoureuse des phénomènes de propagation et de transformation des creux de tension dans les réseaux électriques. L'intérêt scientifique de ces résultats est qu'ils constituent une base de connaissances, des facteurs clés de signatures statiques et cinétiques suffisantes, pour un système d'identification rigoureuse des creux de tension, en vue du développement des stratégies de compensation plus efficace en temps réel. Ainsi, il ressort de l'interprétation des résultats présentés, que les données d'entrées d'un système rigoureux de reconnaissance et d'identification de creux de tension dans un réseau électrique, sont les suivantes :

- Nombre de phases affectés par le creux de tension
- Profondeur du creux
- Amplitude du vecteur d'espace
- Déphasage entre les tensions de phases

- Durée de propagation de l'enveloppe du creux
- Etat de transformation du creux
- Amplitude de la composante homopolaire
- Constantes de temps d'équipements du réseau et de chaînes de mesure des tensions à analyser

5. Conclusion

Ce travail a permis de proposer une approche d'analyse des creux de tension, basée sur les développements analytiques et les simulations numériques. La nouveauté de l'approche proposée est fondée d'abord sur la prise en compte des caractéristiques et conditions de propagation et de transformation des creux. Le facteur d'impact de cette approche proposée, a été ensuite justifié par la production d'une base de connaissances suffisantes de facteurs clés à considérer pour le développement d'algorithmes d'identification rigoureuse desdits creux, en vue de leur compensation en temps réel. Nos futurs travaux de recherche porteront donc sur l'exploitation des données clés ainsi récapitulées dans ce travail, dans un contexte de développement en technologie FPGA (Field Programmable Gate Array) d'un système d'identification rapprochée avec monitoring, des creux de tension susceptibles de se propager dans un prototype de réseau électrique local simple. Dans le cas d'un réseau électrique d'architecture plus complexe, la solution complète reposera sur la création d'un système expert dédié à une gestion globale de creux de tension distribués, assistée par des contrôleurs parallèles de type FPGAs.

Références

- [1] - I. ETXEBERRIA-OTADUI, '*Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble*', France (2003), 240 pages.
- [2] - H. PERSOZ, G. SANTUCCI, J.-C. LEMOINE, P. SAPET, '*Editions Eyrolles*', (1984).
- [3] - V. IGNATOVA, '*Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble*', France (2006), 169 pages.
- [4] - S. EKE, A. MOUKENGUE IMANO, '*Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE*' ENS Cachan, France (2014) 1 - 5.
- [5] - B. GATTAL, K. CHIKHI, C. FETHA, '*Revue des Energies Renouvelables*' Vol. 17 N°4 (2014) 651 - 661.
- [6] - R. C. DUGAN, M. F. Mc GRANAGHAN, H. W. BEATY, McGraw-Hill (1996).
- [7] - I. EL BAAKLINI, '*Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble*', France (2001), 197 pages.
- [8] - M. H. J. BOLLEN, '*IEEE Press Series on Power Engineering*' (2000).
- [9] - B. GATTAL, '*Mémoire de Magister en Electrotechnique, Faculté de Technologie, Université de Batna*', Algérie (2012), 94 pages.