

17/621.831

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 - Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Electrique  
Spécialité : Protection et Contrôle des  
Réseaux électriques



Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

---

## IMPACT DU COURT-CIRCUIT SUR LES TENSIONS NODALES

---

Présenté par : DJENAH KARIM

FRIHI FOUAD

Sous la direction de : Mr. k.BOUNAYA. Pr

JUIN 2014

## Remerciement

*Nous remercions Dieu de nous avoir aidés à réaliser ce mémoire que nous souhaitons de consistance à nous faire atteindre le Diplôme de Master Académique.*

*Nous tenons à remercier vivement Mr le Pr. k.BOUNAYA de nous avoir passionnément encadré, pour ses conseils judicieux, très bénéfiques pendant tout le parcours de réalisation de ce travail.*

*Nous ne pouvons finir, sans adresser nos très vifs remerciements à tous ceux qui ont concourus de près ou de loin à enrichir notre formation et à nous conduire à l'obtention du Diplôme de Master Académique.*

14/3078



# Table de matières

## Chapitre 1 : Définitions et caractérisation des courts-circuits.

1.1.	Définition.....	1
1.2.	Différentes type des courts-circuits.....	1
1.3.	L'effet et conséquences de courts-circuits.....	2
1.4.	Notions de puissances de courts-circuits.....	3
1.5.	Les causes les plus courantes.....	5
1.6.	Importances des calculs de court-circuit.....	5
1.7.	Impact sur les tensions nodales.....	5
1.8.	Notions des unités relatives.....	6

## Chapitre 2 : Analyse les différents types de courts-circuits.

2.1	Représentations complexes du système triphasé asymétriques.....	11
2.1.1	système triphasés.....	13
2.1.2	Composantes symétriques.....	13
2.1.3	Représentation matricielle des composantes.....	14
2.1.4	La matrice d'impédance /admittance .....	15
2.2	Les différents types de courts-circuits .....	16
2.2.1	Schémas équivalents .....	16
a.	Court-circuit symétrique (triphase).....	16
b.	Courts-circuits asymétrique.....	17
2.2.2	application .....	20
a.	Court-circuit symétrique (triphase).....	20
b.	Courts-circuits asymétrique.....	21

## Chapitre 3 : Traitement d'un modèle de réseau.

3.1	Données du réseau à calculer.....	27
3.2	Schémas équivalente.....	29
3.3	Calcul des paramètres de réseau .....	30
3.4	Procédure de calcul .....	37
3.4.1	Transformation du schéma de calcul.....	37

3.4.2	Coefficient de distribution des courants.....	39
3.4.3	Analyse de court-c en régime transitoire.....	40
3.5	calcul des courants de court-circuit .....	43
3.5.1	calcul de courant de c-c point K1 .....	43
a.	transformation du schéma équivalent.....	43
b.	courant périodique .....	47
c.	courant de crête (choc).....	48
3.5.2	calcul de courant des c-circuits ( $K_2 \dots K_6$ ) .....	50

#### Chapitre 4 : analyse les tensions nodales

4.1	Introduction.....	51
4.2	Expression analytique.....	52
4.3	Application .....	56
	Exemple : court-circuit au point $K_2$ .....	56
a.	Les courants de lignes .....	58
b.	Les tensions Nodales.....	59
c.	Graphique(Histogramme) du potentiel.....	60

## INTRODUCTION.

Les réseaux électriques sont, depuis longtemps, l'objet d'études et de développement continus, dont le but essentiel de maintenir leur bon usage, pour les processus énergétiques engagés. Le fournisseur d'énergie à tous les niveaux (production, transport et distribution) doit satisfaire les clients (utilisateurs de l'électricité) selon des engagements contractuels. Pour assurer la continuité de service (alimentation en énergie électrique) il doit installer de système de protection contre les court-circuits.

Les court-circuits sont des régimes de fonctionnement anormaux, inadmissibles, dépendant principalement du type du défaut, de la structure du réseau affecté et du **régime du neutre**. On distingue, deux groupes :

- Les court-circuits symétriques (triphases).
- Les court-circuits asymétriques (biphasé et monophasé).

Les courts-circuits sont des incidents dus à diverses causes ; humaines (erreur de manœuvre, agression...), condition atmosphérique (les coups de foudre, bouclage des conducteurs suite aux vents violents), matériels (vieillessement des équipements d'isolation,...).

Les courts-circuits engendrent des régimes dynamiques et très forts courants, et des changements d'état partiels de la structure des éléments en défaut et de leur fonction, rendant, l'étude et l'analyse de ces régimes complexe. Pendant le calcul du courant de court-circuit, on admet des simplifications citées au (Parag.3.3).

La chute de tension considérable dans le point du court-circuit entraîne la **réduction du potentiel**, des nœuds dans tout le voisinage du lieu de l'incident et affecte, par conséquent, le fonctionnement normal des récepteurs qui leurs sont connectés (les moteurs se freinent et se transforment en génératrice,  $F_{em} < F_{cem}$ ) ; particulièrement ceux qui sont proches du point de défaut. De même, la circulation des courants de grande intensité compromet la durabilité des équipements électriques par les effets impliqués ; tel que électrodynamiques entre conducteurs et thermiques.

Dans notre travail on a analysé la réponse, du système électrique à l'apparition d'un court-circuit triphasé symétrique, en régime permanent. Pendant l'analyse du court-circuit, on utilise des procédures de transformation des schémas et traitement en unités relatives.

# Chapitre I

1.1 Définition :

Le courant de court-circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur une impédance nulle ou de faible valeur. C'est le cas d'une mise à la terre accidentelle d'une ou plusieurs phases d'un réseau, de contact direct entre deux ou trois phases, les courants de court-circuit sont caractérisés par des intensités très élevées, en cas d'une faible impédance globale vue du point de défaut. Les courants de court-circuit dépendent en règle générale des impédances des circuits de circulation. Pour les courts-circuits fronts, les intensités de courant sont considérablement plus élevées que celles nominales. Les impédances du circuit de circulation dépendent du type de court-circuit et de l'éloignement de lieu de défaut par rapport aux sources. De ce fait, l'intensité de courant peut être plus ou moins élevée pour des impédances, respectivement, moins ou plus grandes.

1.2 Différents type des courts-circuits :

Les courts-circuits peuvent être subdivisés en deux groupes, symétriques et dissymétriques. Pour tous les types de court-circuits les défauts peuvent être **fronts**, c.-à-d. impédance de défaut nulle ou **impédants** ayant une impédance non nulle.

- **Les courts-circuits symétriques (fig.1.1.a)** : Il s'agit des court-circuits triphasés (entre les trois phases) isolés ou à terre, par exemple coups de foudre direct qui frappent les trois conducteurs : ils représentent (5%).

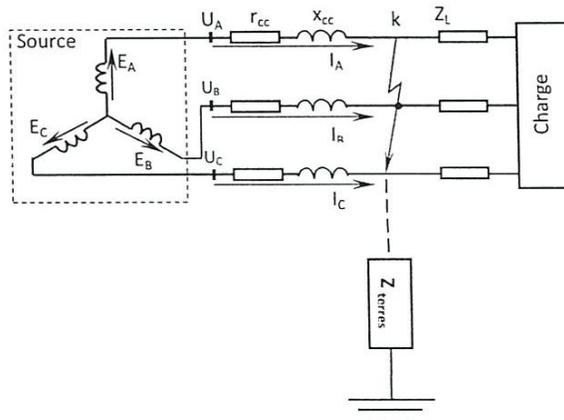


Fig1.1.a : Schémas du principe du court-circuit triphasé symétrique.

➤ Les courts-circuits dissymétriques (fig1.1.b) : Il d'agit des courts-circuits suivants :

- *Courts-circuits monophasés*: contact accidentel entre une phase et la terre, ils représentent (80%).
- *Courts-circuits biphasés* : contact accidentel entre deux phases isolé ou à la terre, ils représentent (15%).

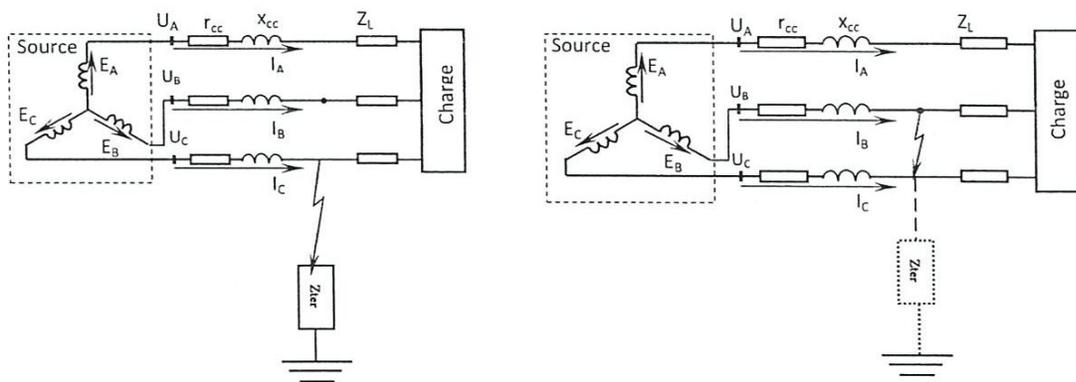


Fig1.1.b : Schémas de principe des court-circuits dissymétriques (monophasé et biphasé).

### 1.3 Effets et conséquences des courts-circuits :

Les effets et conséquences des courts-circuits sont extrêmement néfastes pour le matériel et les équipements des réseaux électriques. En effet, le matériel électrique installé sur les réseaux électriques ne sont pas dimensionnés pour supporter des valeurs de courant très élevées en cas de court circuit ces courants vont donc faire subir au matériel des contraintes thermiques (détérioration des isolants) et électrodynamiques excessives pouvant entraîner leur destruction (déformation du jeu de barres, arrachement des conducteurs...). Des dysfonctionnements divers, notamment au niveau du matériel de mesure ou des transformateurs de courant ainsi que de télécommunication, peuvent aussi être observés.

Il est donc indispensable de protéger ce matériel des effets des courts-circuits. Cette fonction est assurée généralement par un appareillage pouvant couper des courants très élevés ; par exemple le système de disjonction (disjoncteurs). Cependant, ces appareils sont liés aux protections. Ces dernières sont munies d'algorithmes pour la détection de défauts et la coordination au sein d'un réseau, notamment avec les autres protections (sélectivité) ; interrupteur à creux de tension (IACT), fusible HTB-HTA-BT ....

### 1.4 Notions de puissances de court circuit :

La notion de puissance de court-circuit est souvent utilisée pour illustrer la robustesse d'un réseau en un point donné. Plus cette puissance est élevée plus le réseau, vu du point en question, est robuste. Cela s'illustre notamment par de faibles variations de tension lorsque se produit un défaut dans ce réseau. Cette notion est fictive dans la mesure où elle combine l'expression du courant de court-circuit avec celle de la tension nominale.

L'expression générale de la puissance de court-circuit est :

$$S_{CC} = \sqrt{3}U_0 I_{CC} \cong \sqrt{3}U_N \cdot I_{CC}$$

$U_0$  : tension entre phase avant défaut.

$U_N$  : tension entre phase nominale

La puissance de court-circuit permet de se faire une idée sur la sévérité d'un court-circuit en un point du réseau.

La valeur de la puissance de court circuit dans un nœud quelconque renseigne, en fait, sur la grandeur de la puissance installée dans le nœud ; puisque la valeur de la puissance disponible dans un nœud est une donnée importante quand il est nécessaire d'installer d'autres consommateurs ou de réaliser une éventuelle extension du réseau. Les procédures de calcul et d'évaluation de la puissance de court circuit son développées un plus loin dans ce travail.

### 1.5 Les causes les plus courantes :

Les causes d'un court-circuit peuvent être diverses :

➤ *conduction atmosphérique :*

Coup de foudre, vent violent, glissement de terrain, tempête...etc. Dans ces conditions climatiques, les claquages diélectriques causés par les surtensions temporaires dues à la foudre, par exemple, ou la destruction partielle du matériel peuvent engendrer des court circuits.

➤ *Vieillessement de matériel :*

Ce phénomène engendre des ruptures ou des défaillances locales pouvant engendrer des courts-circuits.

➤ *Défaut d'isolement :*

Ce défaut est souvent à l'origine de certains courts-circuits ou l'isolant n'est plus en mesure d'assurer sa fonction d'isolation. Ce défaut conduit alors à un contact entre phases ou entre spires d'un transformateur par exemple.

Le contact entre une ligne aérienne et un arbre est considéré comme un défaut d'isolation. Dans ce cas, on considère que la distance réglementaire entre la ligne et la terre est compromise pour raison de manque d'entretien.

➤ *Défaut de manœuvre et erreurs humaines :*

Les erreurs de manœuvre ou d'erreur sont souvent à l'origine de courts-circuits graves. Cela va depuis l'oubli d'une mise à terre lors d'un entretien quelconque jusqu'au défaut de manœuvre engendrant des surtensions temporaires susceptibles de provoquer des claquages diélectriques.

### ➤ *Agression :*

Le jet « intentionnel » d'une barre de fer sur une ligne aérienne provoque un court-circuit.

### ➤ *Animaux :*

Les oiseaux sont souvent à l'origine de courts-circuits. Le cas de la cigogne par exemple. Les ailes de la cigogne se coincent entre deux phases d'une ligne aérienne est provoquent un court-circuit. Par exemple dans la région NORD EST de Guelma (DJEBALAH-BOUMAHRA ... etc.), les courts-circuits dus au nid de cigogne englobent environ les 60% de pannes électriques.

## 1.6 Importances de calculs de court-circuit :

La connaissance des valeurs des courants de courts circuits est indispensable pour le dimensionnement du matériel de protection (ensemble protection disjoncteur) et pour la vérification des divers équipements aux tenus (contrainte), respectivement, thermique et électrodynamique. Pour les disjoncteurs ces valeurs sont requises pour leur dimensionnements au regard du pouvoir de couper les courants de court-circuit les plus élevés.

Le calcul des courants de court-circuit n'implique pas seulement la connaissance des ces courants au point de défaut, mais également la répartition de ces courants sur les autres lings et phases du réseau ainsi que leurs conséquences sur les **tensions**. Ces valeurs permettent ensuite de choisir les protections les plus adaptées pour chaque type de réseau.

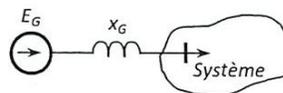
## 1.7 Impact sur les tensions nodales :

L'apparition des courts circuits et leur présence soumettent le fonctionnement les réseaux électriques à des contraintes anormales. Ces perturbations engendrent des changements d'état partiels de la structure des éléments en défaut et de leur fonction, dont les effets se répercutent négativement sur la stabilité des paramètres du régime. Les effets immédiats et directs de ces perturbations s'expriment, dans grand nombre de cas, par une augmentation et une diminution respectivement considérables du courant et de la tension. **La chute de tension** considérable dans le point du court-circuit entraîne la **réduction du potentiel des nœuds** dans tout le voisinage du lieu de l'incident et affecte, par conséquent, le fonctionnement normal des récepteurs qui leurs sont connectés ; particulièrement ceux qui sont proches du point de défaut.

### 1.8 Notion des unités relatives :

Dans grand nombre d'études et d'analyses, le traitement des systèmes électriques est réalisé dans des dimensions sans unités. Ces procédures rendent le traitement numérique plus anonyme, les quantités manipulées plus réduites donc plus simple à traiter et permettent ainsi d'avoir un aperçu plus direct sur les estimations comparatives éventuelles. En règle générale, les paramètres caractéristiques descriptifs des éléments du système sont donnés réduits à leur propre niveau et par unités (p.u) de valeur nominale respective.

Par exemple, en fonction de l'état du régime à étudier, un générateur peut être donné par quelques modèles, (**Fig.1.2**) ; c.-à-d., par une F.e.m ( $E_G$ ) et une réactance ( $x_G$ ) qui peuvent être, respectivement, transitoire ( $E^*$ ,  $x^*$ ), subtransitoire ( $E^{**}$ ,  $x^{**}$ ) ou autres grandeurs équivalentes.



**Figure.1.2.** Modèle de générateur.

Sous forme générale ces grandeurs sont définies comme suit,

$$E_{(N)}^* = \frac{E_{(N)}}{U_N}, \quad x_{(N)}^* = \frac{x_{(N)}}{x_N}, \quad (1.1)$$

Avec ,

$$x_N = \frac{U_N^2}{S_N}$$

où,  $E_{(N)}$ ,  $x_{(N)}$  – Valeurs réelles en unités naturelles des grandeurs respectives correspondantes à leur propre niveau.

Le choix des grandeurs de base ( $U_b, S_b$ ) indépendantes permet de définir celles dépendantes ( $Z_b, I_b$ ) comme,

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}, \quad I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b}.$$

On définit, donc, pour tout paramètre, par rapport à une base choisie et sous forme générale,

$$\Pi_{e(b)}^* = \frac{\Pi_{e(b)}}{\Pi_b}, \quad (1.2)$$

Où :

$\Pi_{e(b)}$  – Paramètre de l'élément « e » réduit (rapporté) à la base.

$\Pi_b$  – Paramètre de base.

« e » : peut être Générateur (G), ou Transformateur (T) ou lignes ( $L_k$ )....

Pendant le traitement du régime en unités relatives, les relations fondamentales entre les paramètres du régime et du système restent strictement les mêmes que pendant les analyses en unités naturelles, à la différence près du facteur  $\sqrt{3}$ .

En effet, on peut facilement définir,

$$\begin{aligned} S^* &= \frac{S}{S_N} = \frac{\sqrt{3}UI}{\sqrt{3}U_N I_N} = U^* I^* \\ U^* &= \frac{U}{U_N} = \frac{\sqrt{3}ZI}{\sqrt{3}Z_N I_N} = Z^* I^* . \quad (1.3) \\ U_S^* &= \frac{U_S}{U_{N,S}} = \frac{U_C}{U_N} = U_C^* \end{aligned}$$

**Cas général.** Le principe de réduction appliqué au cas simple considéré, peut être élargi aux paramètres de tous les éléments du réseau situés aussi bien en amont qu'en aval du lieu de réduction. En choisissant la base de réduction située, par exemple, au palier secondaire de T2 (**Fig.1.3**), les valeurs réduites des paramètres des éléments peuvent être déterminées moyennant un coefficient de réduction défini.

En effet, en négligeant les circuits transversaux des éléments, on peut définir,

$$\begin{aligned} E_{(b)} &= \frac{1}{k_r} E_{(N)} \\ Z_{e(b)} &= \frac{1}{k_r^2} Z_{e(N)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Où :

$Z_e$  – Impédance de l'élément « e ».

« e » : peut être Générateur (G), ou Transformateur (T) ou lignes (L<sub>k</sub>)....

$k_r$  – Coefficient de réduction, défini par la position de l'élément considéré par rapport à la base et tient compte, de ce fait, du nombre des transformateurs insérés entre les deux niveaux respectifs.

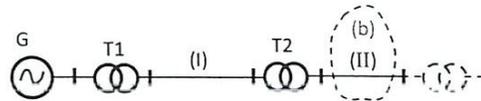


Figure.1.3. Réduction des paramètres dans un cas général.

Les expressions (1.1) et (1.4) permettent de ré écrire,

$$\begin{aligned} E_{(b)} &= \frac{1}{k_r} E_{(N)} = \frac{1}{k_r} E_{(N)}^* U_N \\ Z_{e(b)} &= \frac{1}{k_r^2} Z_{e(N)} = \frac{1}{k_r^2} Z_{e(N)}^* \frac{U_N^2}{U_b^2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Pour des grandeurs ( $S_b$ ,  $U_b$ ) de base choisies, on écrit (p.u),

$$\begin{aligned} E_{(b)}^* &= \frac{E_{(b)}}{U_b} = E_{(N)}^* \frac{1}{k_r} \frac{U_N}{U_b} \\ Z_{e(b)}^* &= \frac{Z_{e(b)}}{Z_b} = Z_{e(N)}^* \frac{S_b}{S_N} \frac{1}{k_r^2} \left( \frac{U_N}{U_b} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.6)$$

Les deux expressions (1.6) représentent la réduction des paramètres sous forme générale. Dans la pratique des calculs et des analyses, le coefficient de réduction  $k_r$  est déterminé ou bien par les rapports effectifs des transformateurs ou bien par les valeurs moyennes des tensions correspondantes aux différents paliers de transformation.

Ainsi, si on utilise les coefficients effectifs des transformateurs, on doit, alors, substituer dans les dernières expressions,

$$k_r = k_T \quad (1.7)$$

Ou bien, si la portée de réduction comporte « n » transformateurs (**Figure.1.3.**),

$$k_r = k_{T1} k_{T2} \dots k_{Tn}. \quad (1.8)$$

De même, s'il est plus commode d'utiliser les grandeurs moyennes, on doit, dans ce cas, substituer, dans les mêmes expressions,

$$k_r = \frac{U_{moy}}{U_{moy.b}} \quad \text{et} \quad U_b = U_{moy.b}, \quad (1.9)$$

ou :

$U_{moy}$  – Valeur moyenne de la tension au niveau où se trouve installé l'élément considéré.

$U_{moy.b}$  – Valeur moyenne de la tension du niveau choisi comme base à laquelle on doit réduire les paramètres.

En tenant compte, donc, de (1.9) les expressions (1.8) et (1.6) se ré écrivent,

$$\begin{aligned} E_{(b)} &= E_{(N)}^* U_N \frac{U_{moy.b}}{U_{moy.}} \quad \text{et} \quad Z_{e(b)} = Z_{e(N)}^* \frac{U_N^2}{S_N} \left( \frac{U_{moy.b}}{U_{moy.}} \right)^2 \\ E_{(b)}^* &= E_{(N)}^* \frac{U_N}{U_{moy.}} \quad \text{et} \quad Z_{e(b)}^* = Z_{e(N)}^* \frac{S_b}{S_N} \left( \frac{U_N}{U_{moy.}} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Pour des utilités diverses de contrôle et de protection, on est souvent tenu de déterminer les angles de déphasage en passant d'un niveau de transformation à l'autre. Dans ce cas, la différence de phase éventuelle entre grandeurs vectorielles peut être définie à partir du groupe de couplage des TR. Pour en tenir compte, le coefficient de transformation doit être introduit par sa valeur complexe ;

$$\dot{K}_T = k_T e^{j\varphi_T} ,$$

où,  $\varphi_T$  – Déphasage défini par le groupe de couplage.

# Chapitre II

## 2.1 Représentation complexes du système triphasé asymétrique.

### 2.1.1 Systèmes triphasés :

Le système asymétrique est remplacé par trois systèmes triphasés symétriques. Ce sont les systèmes dits, respectivement, direct, inverse et homopolaire. On les représente comme suit : (figure 2.1).

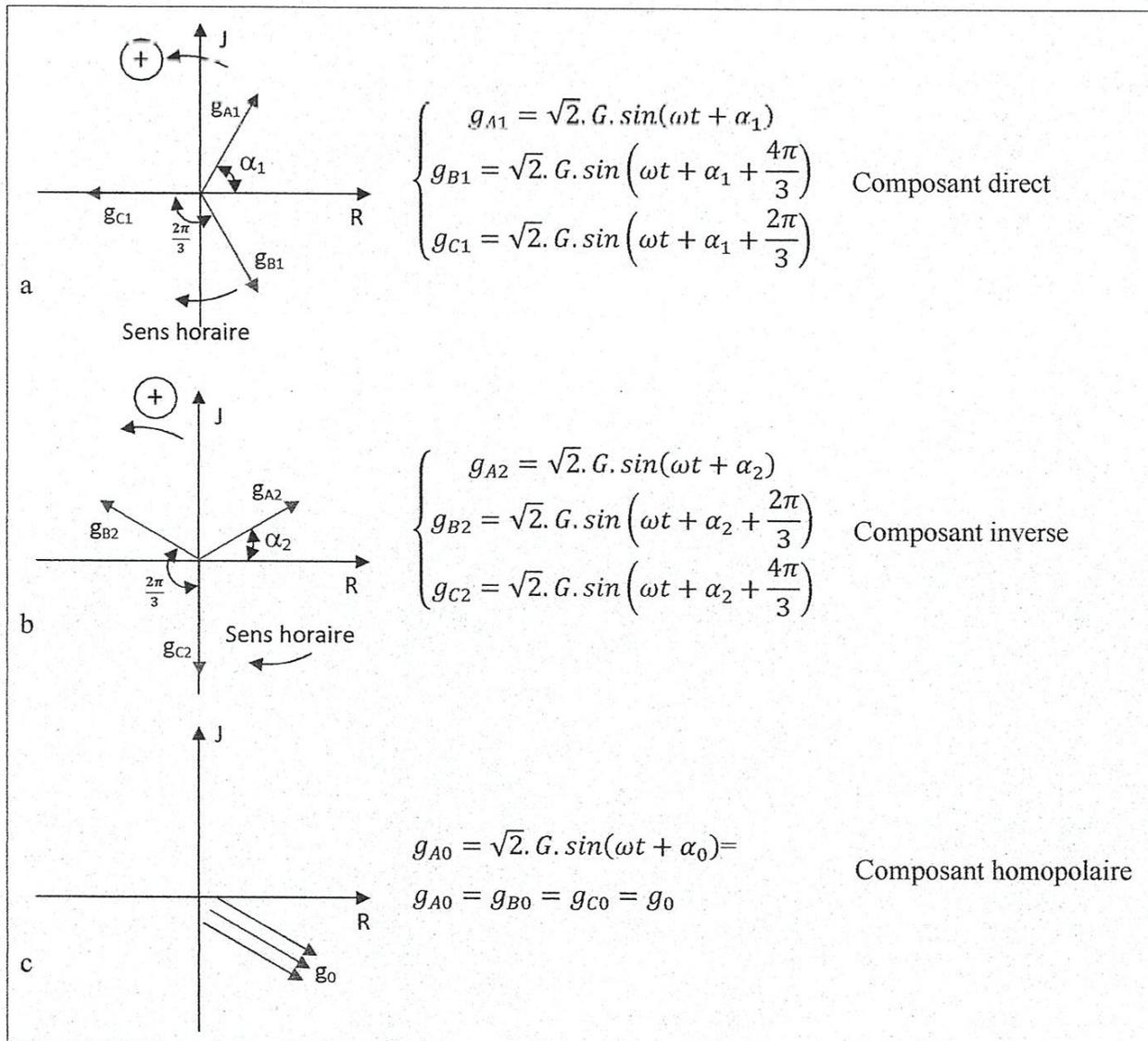


Figure 2.1. Représentation vectorielle des composants symétriques.

a-Direct, b-inverse, c-homopolaire.

Dans les équations de ces systèmes :

$\omega$  : Représente la pulsation  $2\pi f$ .

$\alpha$  : Le déphasage initial.

$g$  : La variable vectorielle représentant la grandeur électrique (tension, courant ou FEM).

$G$  : Valeur efficace.

Les grandeurs représentant les systèmes symétriques de la figure.2.1 peuvent aussi être représentées sous forme complexe en utilisant l'opérateur complexe « a » ;

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Qui vérifie l'équilibre et la symétrie par l'égalité,

$$a + a^2 + 1 = 0.$$

On peut écrire :

Composante directe	{	$g_{A1} = G e^{j\alpha_1}$	(2.1)
		$g_{B2} = G e^{j\alpha_1} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a^2 \cdot G e^{j\alpha_1} = a^2 \cdot g_{A1}$	
		$g_{C3} = G e^{j\alpha_1} \cdot e^{+j\frac{2\pi}{3}} = a \cdot G e^{j\alpha_1} = a \cdot g_{A1}$	
Composante inverse	{	$g_{A2} = G \cdot e^{j\alpha_2} =$	(2.1)
		$g_{B2} = a \cdot G \cdot e^{j\alpha_2} = a \cdot g_{A2}$	
		$g_{C2} = a^2 \cdot G \cdot e^{j\alpha_2} = a^2 \cdot g_{A2}$	
Composante homopolaire	{	$g_{A0} = G \cdot e^{j\alpha_0}$	(2.1)
		$g_{B0} = G \cdot e^{j\alpha_0} = g_{A0}$	
		$g_{C0} = G \cdot e^{j\alpha_0} = g_{A0}$	

2.1.2. Composantes symétriques :

D'après le schéma de la figure 2.2 on constate que, Le point de court circuit « k » est une source des composantes directe, inverse et homopolaire.

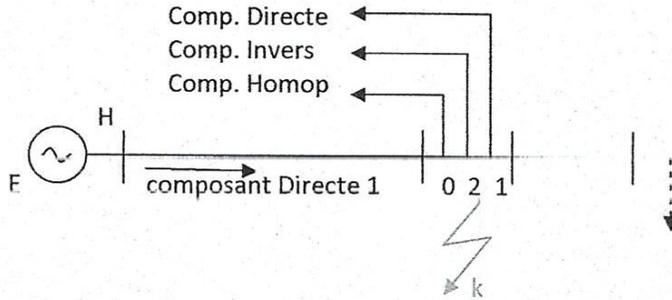


Figure .2.2. Le point de défaut de comme source d'asymétrie.

La source ne produit que des les composantes directes (1), chaque phase (A,B,C) peut être représentée par les trois composantes.

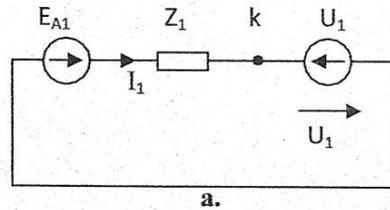
➤ Composante directe :

Le courant « I<sub>1</sub> » directe est la résultante de l'action des deux sources directes (figure.2.3.a). On peut écrire :

$$I_1 = \frac{E_{A1}}{Z_1} - \frac{U_1}{Z_1} = \frac{E_{A1} - U_1}{Z_1}$$

Ou bien :

$$E_A - Z_1 \cdot I_1 = U_1 \quad (2.2. a)$$



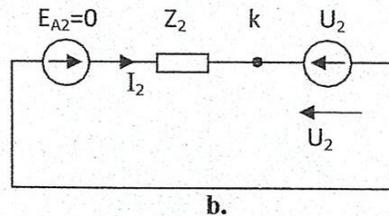
➤ Composante inverse :

La source ne produit que la composante dite directe (figure.2.3.b) on peut donc écrire :

$$E_{A2} = 0 ;$$

$$I_2 = \frac{0 - U_2}{Z_2}$$

$$U_2 = -I_2 \cdot Z_2 \quad (2.2. b)$$



➤ Composante homopolaire : (figure.2.3.c), Comme précédemment :

$$U_0 = -I_0 \cdot Z_0 \quad (2.2. c)$$

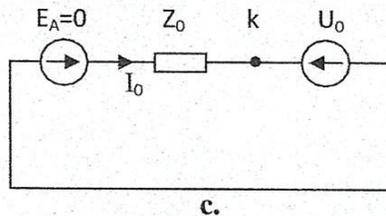


Figure.2.3 Schéma équivalents des composante symétrique

### 2.1.2 Représentation matricielle des composantes :

La méthode des composantes symétriques, est largement utilisée pendant le traitement et l'analyse des régimes asymétriques. Elle consiste à remplacer le système triphasé des grandeurs descriptive d'un régime asymétrique par trois systèmes (composantes) symétriques dont la superposition doit être telle que pour le vecteur descriptif ( $g_i$ ) on peut écrire, pour les phase respectivement, A, B et C ;

$$\begin{cases} g_A = g_{A1} + g_{A2} + g_{A0} \\ g_B = g_{B1} + g_{B2} + g_{B0} \\ g_C = g_{C1} + g_{C2} + g_{C0} \end{cases}$$

Puisque les groupe de grandeurs «  $g_{A1}, g_{B1}, g_{C1}$  » ; «  $g_{A2}, g_{B2}, g_{C2}$  » et «  $g_{A0}, g_{B0}, g_{C0}$  » forment, respectivement, chacun un système symétrique et en considérant la phase A comme référence, soit  $g_A = g_1 + g_2 + g_0$ , on écrit,

$$\begin{aligned} g_{B1} &= a^2 \cdot g_1 ; g_{C1} = a \cdot g_1 \\ g_{B2} &= a \cdot g_1 ; g_{C2} = a^2 \cdot g_1 \\ g_{B0} &= g_{C0} = g_0 \end{aligned}$$

Ce qui donne,

$$\begin{aligned} g_A &= g_1 + g_2 + g_0 \\ g_B &= a^2 \cdot g_1 + a \cdot g_2 + g_0 \\ g_C &= a \cdot g_1 + a^2 \cdot g_2 + g_0 \end{aligned}$$

Ou sous la forme matricielle,

$$\begin{bmatrix} g_A \\ g_B \\ g_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ce qui peut s'écrire aussi sous la forme.

$$G_p = M \cdot G_s \quad (2.4)$$

Avec :

M : la matrice de transformation dont les coefficients sont constants (complexes ou réel) et indépendants du temps.

$G_p$  : représentant les grandeurs de phase (courant ou tension) asymétriques.

$G_s$  : représentant les grandeurs symétriques.

Les relations de passage sont générales et peuvent donc s'exprimer dans les deux sens. Ce qui permettra d'exprimer les grandeurs systématique en fonction des composantes asymétriques de phase.

$$M^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de  $M$  ( $M \cdot M^{-1} = 1$ )

Donc d'après le système [2. 3], on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} g_{(1)} \\ g_{(2)} \\ g_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_a \\ g_b \\ g_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Appliquant la relation (2. 4) pour les courants, on obtient :

$$\begin{cases} I_{(1)} = \frac{1}{3} [I_a + aI_b + a^2I_c] \\ I_{(2)} = \frac{1}{3} [I_a + a^2I_b + aI_c] \\ I_{(0)} = \frac{1}{3} [I_a + I_b + I_c] \end{cases} \quad (2.6)$$

Ou pour les tensions,

$$\begin{cases} V_{(1)} = \frac{1}{3} [V_a + aV_b + a^2V_c] \\ V_{(2)} = \frac{1}{3} [V_a + a^2V_b + aV_c] \\ V_{(0)} = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c] \end{cases} \quad (2.7)$$

#### 2.1.4 La matrice d'impédance / admittance :

Supposant les relations de tension et de courant de phase sont liés par une matrice d'impédance / admittance de tel sorte que :

$$V_p = [Z] \cdot I_p \quad (2.8)$$

$$\text{Telle que } \begin{cases} I_P = \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \text{ les courants asymétrique de phase} \\ V_P = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \text{ les Tensions asymétrique de phase} \end{cases}$$

En utilisant les relations de transformation (2. 4) on obtient :

$$[M]V_S = [Z]. [M]I_S \text{ et } I_S[M] = \frac{1}{[Z]} [M]V_S$$

$$V_S = I_S[M]. [Z]. [M]^{-1}, \text{ et } I_S = M^{-1}. [Y]. [M]. V_S$$

$$\Rightarrow \begin{cases} Z_S = [M]. [Z]. [M]^{-1} & (2.8. a) \\ Y_S = [M]^{-1}. [Y]. [M] & (2.8. b) \end{cases}$$

$[Z]_S, [Y]_S$  : sont les transformations respectivement des matrices impédance et admittance en composantes symétriques, ce qui permettra de simplifier les calculs liés a l'asymétrie en général et aux court circuits dissymétriques en particulier.

## 2.2 Les différents types des courts circuits :

### 2.2.1 Schémas équivalents des impédances

#### a. court circuit symétrique (triphase) :

Comme on à dit dans ce chapitre, il y à deux types de court circuit, symétrique et asymétrique. Le schéma équivalent pour les premiers est simple (figure 2.4), du fait que le court circuit est symétrique les courants des trois phases sont symétrique, par conséquent le régime ne comporte pas des composantes inverse et homopolaire.

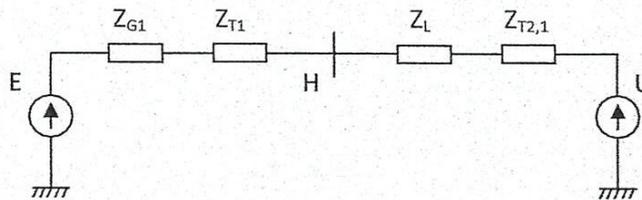


Figure 2.4.Schéma équivalent du CC triphasé symétrique.

On remarque que les composantes homopolaire ne peuvent exister qu'en présence du neutre relié à la terre. Elle dépend des couplages de transformateurs et des modes de mise à la terre des neutres quand ils existent (figure 2.5).

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$\begin{aligned} &= (I_1 + I_2 + I_0) + (a^2 I_1 + a I_2 + I_0) + (a I_1 + a^2 I_2 + I_0) \\ &= 3I_0 + I_1(1 + a^2 + a) + I_2(1 + a + a^2) \\ &1 + a^2 + a = 0 \end{aligned}$$

$$I_n = 3I_0$$

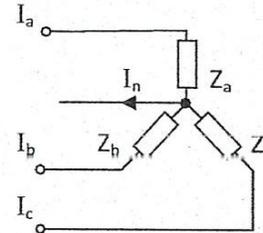


Figure 2.5. courant de neutre et courant homopolaire.

**b. court circuit asymétrique :**

L'apparition des courts circuits asymétriques dans le réseau entraîne la circulation dans les branches de ce dernier les courants homopolaire – inverse – direct.

On peut considérer quelques exemples de couplage des transformateurs, les plus significatifs pour illustrer l'étendu des valeurs que peut prendre cette impédance.

Primaire / secondaire	L'impédance équivalente	Interprétation (commentaire)
<p>Y<sub>n</sub>/Y<sub>n</sub></p>	<p><math>Z_{CC} = Z_1 = Z_2 = Z_0</math></p>	La mise à la terre des deux neutres garantit le libre circulation du courant $I_0$ dans les deux côtés à travers une impédance de court circuit
<p>Y<sub>n</sub>/Y</p>	<p><math>Z_0 \gg Z_{CC}</math> donc <math>I_0 = \frac{E}{Z_0} \cong 0</math></p>	par l'absence de mise à la terre du neutre au secondaire il n'y a pas de chemin pour la circulation des courants $I_0$ , l'impédance du secondaire est très grand (infini), l'impédance $Z_0$ est l'impédance magnétisante très élevé par rapport aux impédances de court circuit.
<p>Y<sub>n</sub>/Δ</p>	<p><math>Z_{CC} = Z_{fuit}</math></p>	Dans ce cas le courant $I_0$ pouvant circuler côté primaire (neutre mis à la terre). Au secondaire le courant $I_0$ circule à l'intérieur du triangle, ce qui implique que le courant $I_0$ circule librement et ne sera limité que par l'impédance de court circuit du transformateur (impédance de fuit) L'impédance équivalente côté secondaire est donc infinie.

➤ **Courts circuits monophasé :**

On suppose un système de la (figure 2.6)

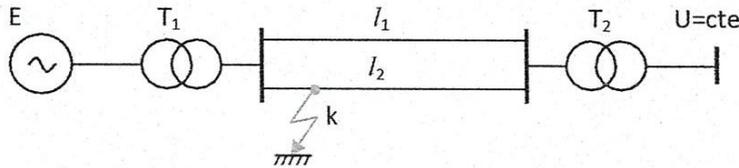


Figure 2.6.Exemple de réseau avec un défaut monophasé

ou sous forme équivalente (figure 2.7)

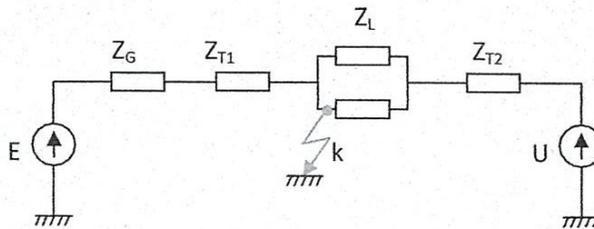


Figure 2.7.Schéma équivalent direct de la phase A (référence)

Pendant le court circuit monophasé le schéma équivalent de calcul aura la forme de la figure 2.7.a, dont lequel sont mis en évidence les circuits des trois composante du courant pour ce schéma,

$$Z_2 = \frac{(Z_{G2} + Z_{T1,2})(Z_{L2} + Z_{T2,2})}{Z_{G2} + Z_{T1,2} + Z_{L2} + Z_{T2,2}} \quad (2.9. a)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{T1,0}(Z_L + Z_{T2,0})}{Z_{T1,0} + Z_{L,0} + Z_{T2,0}} \quad (2.9. b)$$

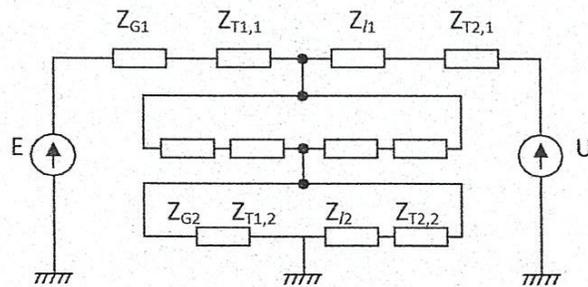


figure 2.7.a. Schéma équivalent complexe de la phase A

Après transformation, on obtient un schéma plus simple (figure 2.7.b)

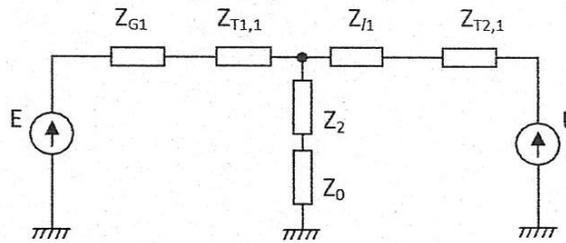


Figure 2.7.b. Schéma équivalent Réduit.

➤ **Court circuit biphase isolé :**

Dans le cas d'un court circuit biphase isolé, la composante homopolaire,  $Z_0 = \infty$ , (figure 2.8.a)

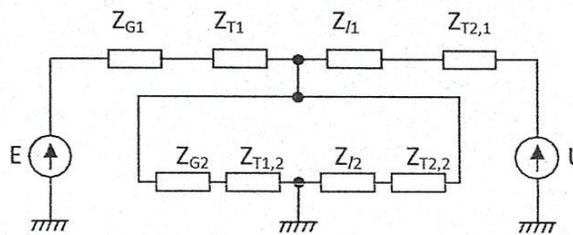


Figure 2.8.a. Schéma équivalent des impédances Directes inverses et Homopolaire

Pour défaut biphase isolé

Après transformation on obtient le schéma de la figure (figure 2.8.b), avec :

$$Z_2 = \frac{(Z_{G2} + Z_{T1,2})(Z_{l1} + Z_{T2,1})}{\Sigma Z}$$

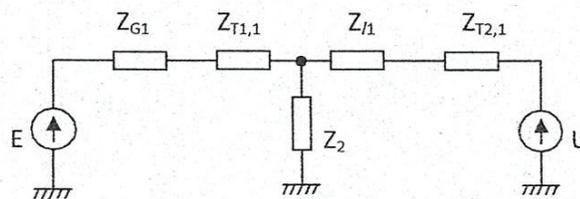


Figure 2.8.b. Schéma équivalent des impédances réduit.

➤ **Court circuit biphase a la terre :**

Comme les deux cas précédents, en obtient, pour un court circuit biphase à la terre les deux schémas (figure 2.9.a) et (figure 2.9.b) avec :

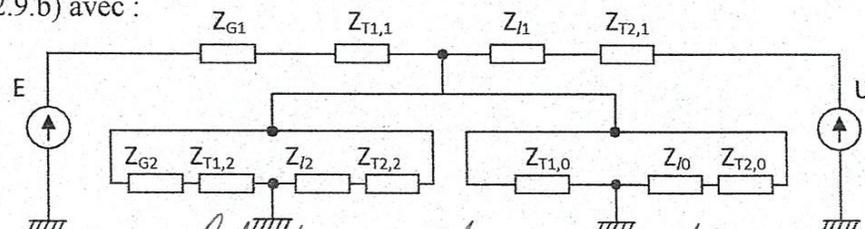


Fig. 2.9. a. s schémas équivalent des impédances Direct, Inverse et Homopolaire pour défaut Biphase à la terre

$$Z_2 = \frac{(Z_{G2} + Z_{T1,2})(Z_{L2} + Z_{T2,2})}{Z_{G2} + Z_{T1,2} + Z_{L2} + Z_{T2,2}} \quad (2.9. a)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{T1,0}(Z_L + Z_{T2,0})}{Z_{T1,0} + Z_{L,0} + Z_{T2,0}} \quad (2.9. b)$$

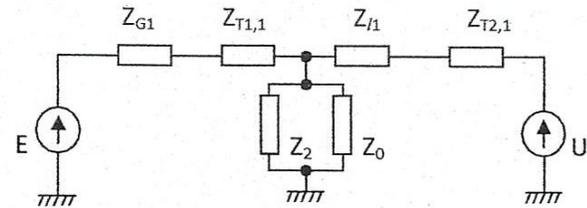


Figure 2.9.b. Schéma équivalent Réduit de défaut biphasé à terre.

### 2.2.2 Application :

#### a. Court circuit symétrique (triphasé) :

On considère le système de la figure 2.10.

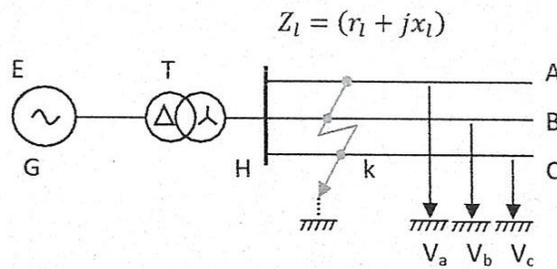


Figure 2.10. Exemple de réseau avec un défaut triphasé.

Le schéma unifilaire est représenté sur la figure (2.11).

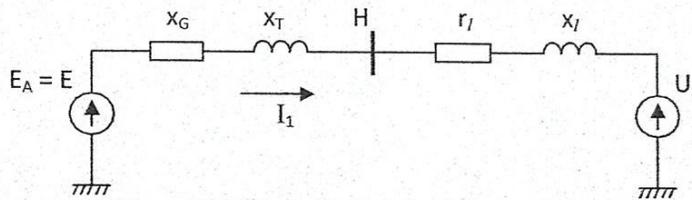


Figure 2.11. Impédance de défaut triphasé.

L'impédance total du circuit est,  $Z_{CC} = r_l + j(x_G + x_T + x_l)$

Au point « k » ( $V_a = 0$ ), et  $V_b = 0$ , et  $V_c = 0$ .

$$V_a = E - Z_{CC} \cdot I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{E}{Z_{CC}} \quad (2.10)$$

On peut écrire le système 
$$\begin{cases} I = \frac{E}{Z_{CC}} \\ I_2 = 0 \\ I_0 = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Pour les courants de phase et d'après l'équation (2. 1), 
$$\begin{cases} I_a = \frac{E}{Z_{CC}} \\ I_b = a^2 \frac{E}{Z_{CC}} \\ I_c = a \frac{E}{Z_{CC}} \end{cases} \quad (2.12)$$

Remarque :

On remarque qu'en cas de court circuit triphasé symétrique à la terre, on peut prendre le même schéma de la Figure 2.8, en ajoutant seulement dans le circuit la résistance de terre  $R_T$  et dans toutes parties actives des expressions par exemple  $Z_{CC} = (R_T + R_l) + j(X_G + X_T + X_l)$ .

**b. court circuit asymétrique :**

On considère le réseau électrique représenté à la figure 2-12, le point de court circuit est « k », sans l'influence de la charge (marche a vide).

On prend la phase « A » comme référence

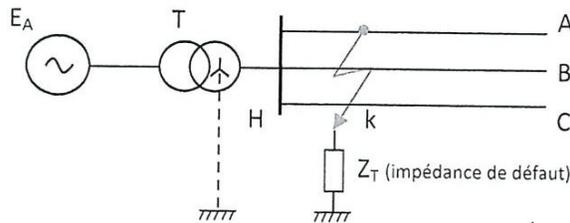


Figure 2-12. *exemple de Réseau avec un défaut monophasé*

➤ **Court circuit monophasé impédant :**

Dans ce cas le courant circulant au niveau de la phase « A » les courants de phase seront :

$$I_P = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Puisque  $I_S = M^{-1} \cdot I_P$ , d'après la relation (2.4), on aura alors :

$$I_S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a/3 \\ I_a/3 \\ I_a/3 \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc : } I_1 = I_0 = I_2 = \frac{I_a}{3} \quad (2.15)$$

$$\text{On a : } V_A = V_1 + V_2 + V_0 = E_a - (Z_1 + Z_2 + Z_0) \frac{I_a}{3} = Z_T I_a$$

$$\Rightarrow I_a = \frac{E_a}{Z_T + \frac{1}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (2.16)$$

D'après (2-2-a, b et c) relations :

$$\begin{cases} V_1 = E_a - Z_1 \cdot I_1 \\ V_2 = -I_2 \cdot Z_2 \\ V_0 = -I_0 \cdot Z_0 \end{cases}, \text{ avec } I_1 = I_2 = I_0 = \frac{I_a}{3} = \frac{E_a}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)}$$

$$\begin{cases} V_1 = E_a - Z_1 \cdot \left( \frac{E_a}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \right) = \frac{E_a(3Z_T + Z_2 + Z_0)}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ V_2 = -Z_2 \frac{E_a}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ V_0 = -Z_0 \frac{E_a}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \end{cases}$$

Pour trouver les tensions de phase on utilise la relation :

$$V_P = M V_S \Rightarrow \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix}$$

On obtient

$$\begin{cases} V_a = Z_T \left( \frac{E_a}{Z_T + \frac{1}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \right) \\ V_b = E_a \frac{3a^2 Z_T + Z_2(a^2 - a) + Z_0(a^2 - 1)}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \\ V_c = E_a \frac{3a^2 Z_T + Z_2(a - a^2) + Z_0(a - 1)}{3Z_T + (Z_1 + Z_2 + Z_0)} \end{cases}$$

➤ **Court circuit monophasé franc ( $Z_T = 0$ ).**

On obtient donc :

$$I_P = \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I_S = \begin{bmatrix} I_a/3 \\ I_a/3 \\ I_a/3 \end{bmatrix}$$

$$V_S = \begin{bmatrix} \frac{E_a(Z_2 + Z_0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ -\frac{Z_2 E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ -\frac{E_a Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \end{bmatrix}$$

$$V_P = \begin{bmatrix} V_a = 0 \\ V_b = E_a \frac{[Z_2(a^2 - a) + Z_0(a^2 - 1)]}{V_1 + V_2 + V_0} \\ V_c = E_a \frac{[Z_2(a - a^2) + Z_0(a - 1)]}{V_1 + V_2 + V_0} \end{bmatrix}$$

➤ **Court circuit biphasé a la terre :**

Considérons le court circuit entre la phase A et B et à la terre (figure 2.13). On suppose qu'il n'y a pas d'influence de la charge et que  $R_T \approx 0$ , pour simplifier le calcul.

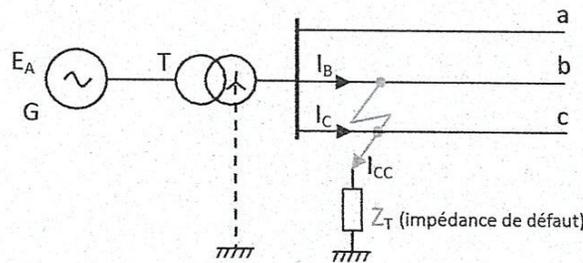


Figure 2.13. Exemple de Réseau avec un défaut Biphasé.

Dans ce cas le court circuit est caractérisé par :

$$\begin{cases} I_a = 0 \Rightarrow I_1 + I_2 + I_0 = 0 \\ U_b = U_c = 0 \quad (U_a \neq 0) \\ I_a + I_c = I_{CC} \end{cases}$$

Donc il s'agit de calculer  $I_{CC}$ , et  $U_a$ :

$I_a + I_b + I_c = 3I_0$  (d'après la figure 2-4) et comme  $I_a = 0$  et  $I_b + I_c = I_{CC}$  on déduit que :

$$I_{CC} = 3I_0 \rightarrow (2.17)$$

Et on a  $I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 0$

En calculant  $I_1$  et  $I_2$  et en les remplaçant dans (2.17), on aura.

$$\begin{cases} V_1 = E_a - Z_1 I_1 \rightarrow \text{d'après (2.2.a)} \\ V_2 = -Z_2 I_2 \rightarrow \text{d'après (2.2.b)} \\ V_0 = -Z_0 I_0 \rightarrow \text{d'après (2.2.c)} \end{cases}$$

$$\text{et } \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 V_a \\ 1/3 V_a \\ 1/3 V_a \end{bmatrix} \Rightarrow V_1 = V_2 = V_0 = \frac{1}{3} V_a$$

$$\text{Donc : } V_2 = V_0 \Rightarrow -Z_2 I_2 = -Z_0 I_0 = -Z_0 \frac{1}{3} I_{CC} \Rightarrow$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{Z_0}{Z_2} I_{CC} \quad (2.18)$$

$$\text{et } V_1 = V_0 \Rightarrow E_a - Z_1 I_1 = -Z_0 \frac{1}{3} I_{CC} \Rightarrow$$

$$I_1 = \frac{E_a}{Z_1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{Z_0}{Z_1} I_{CC} \quad (2.19)$$

D'après les équations : (2.17), (2.18) et (2.19) en déduit :

$$\frac{E_a}{Z_1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{Z_0}{Z_1} I_{CC} + \frac{1}{3} \cdot \frac{Z_0}{Z_2} I_{CC} + \frac{1}{3} \cdot I_{CC} = 0$$

Finalement on obtient le courant  $I_{CC}$

$$I_{CC} = -\frac{3E_a}{\left(Z_1 + Z_0 + \frac{Z_0 Z_1}{Z_2}\right)} \rightarrow (2.20)$$

$$\text{et } \frac{1}{3}V_a = -Z_0 \left( \frac{1}{3}I_{CC} \right) \Rightarrow V_a = -Z_0 I_{CC} = Z_0 \frac{3E_a}{Z_1 + Z_0 + \frac{Z_0 Z_1}{Z_2}}$$

$$V_a = \frac{3E_a}{1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z_2}} \rightarrow (2.21)$$

Pour déduire les courant  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_0$  en utilise les transformations suivantes :

$$\begin{cases} \text{On remplace } I_1(2.20) \text{ dans (2.18)} \\ \text{On remplace } I_2(2.20) \text{ dans (2.18)} \\ \text{On remplace } I_0(2.20) \text{ dans (2.17)} \end{cases}$$

De même pour les tensions :

$$V_1 = V_2 = V_0 = \frac{1}{3}V_a \quad (2.22)$$

En remplace la tension  $V_a$  (2.22) par la relation (2.21)

$$V_1 = V_2 = V_0 = \frac{E_a}{1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z_2}}$$

➤ **Court circuit biphasé isolé :**

On prend le même schéma (2.11) mais isolé de la terre ; ce cas est caractérisé par :

$$\begin{cases} I_a = 0 & \Rightarrow E_a = U_a \\ I_b + I_c = 0 & \Rightarrow I_b = -I_c \\ V_b - V_c = 0 & \Rightarrow V_b = V_c \end{cases}$$

On déduit :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} a^2 - a = j\sqrt{3} \\ a^2 + a = 1 \end{cases}$$

$$\text{On a : } \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \Rightarrow I_1 = -I_2$$

## Impact du court-circuit sur les tensions nodales

Analyse les différents types de court-circuit

Chapitre II

Donc

$$E_a - Z_1 I_1 = -Z_2 I_2 = +Z_2 I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \\ -\frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Aussi :

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = a I_1 + a^2 I_2 = (-a + a^2) I_2 \Rightarrow I_b = -j\sqrt{3} \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \\ I_c = +j \frac{\sqrt{3} E_a}{Z_1 + Z_2} \end{cases}$$

$$a^2 - a = j\sqrt{3}$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -j \frac{\sqrt{3} E_a}{Z_1 + Z_2} \\ +j \frac{\sqrt{3} E_a}{Z_1 + Z_2} \end{bmatrix}$$

De même pour les tensions on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_2 E_a}{Z_1 + Z_2} \\ \frac{Z_2 E_a}{Z_1 + Z_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ -\frac{Z_2 E_a}{Z_1 + Z_2} \\ -\frac{Z_2 E_a}{Z_1 + Z_2} \end{bmatrix}$$

# Chapitre III

3.1 donnée du réseau à calculer :

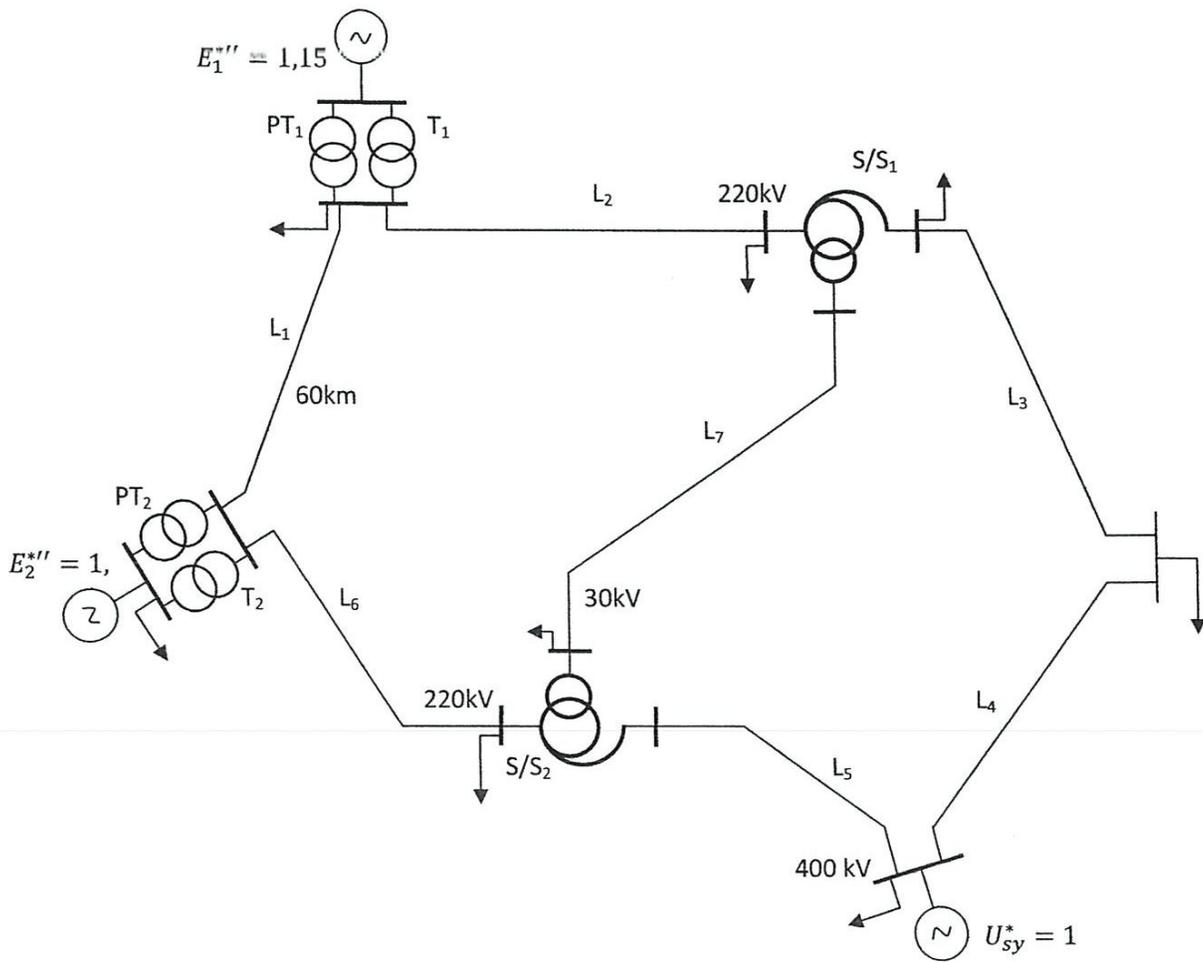


Figure 3.1. Schéma du réseau à calculer

Les données du réseau à étudier sont regroupées dans les tableaux suivants.

	Longueur (km)	$r_0 + jx_0$ ( $\Omega/km$ )	$U_N(kV)$	$S_N$ (MVA)	$x_{(N)}^{*''}$	$U_N(kV)$	$E_1^*$
L <sub>1</sub>	60	0.15 + j0.4	220	/	/	/	/
L <sub>2</sub>	40	0.15 + j0.4	220	/	/	/	/
L <sub>3</sub>	100	0.03 + j0.3	400	/	/	/	/
L <sub>4</sub>	80	0.03 + j0.3	400	/	/	/	/
L <sub>5</sub>	70	0.03 + j0.3	400	/	/	/	/
L <sub>6</sub>	50	0.15 + j0.4	220	/	/	/	/
L <sub>7</sub>	30	0.2 + j0.4	30	/	/	/	/
G <sub>1</sub>	/	/	/	300	0.2	13	1.15
G <sub>2</sub>	/	/	/	400	0.15	13	1.1

Tableau 3.1. Données du Réseau à étudier.

	$S_N$ (MVA)	$\Delta U_{cc}\%$	$U_{1N}$ (kv)	$U_{2N}$ (Kv)	$U_1$ (kv)	$U_2$ (kv)	$U_3$ (kv)	$\Delta U_{1-2}\%$	$\Delta U_{1-3}\%$	$\Delta U_{2-3}\%$
T <sub>1</sub>	250	11	13.8	242	/	/	/	/	/	/
T <sub>2</sub>	160	12	11	230	/	/	/	/	/	/
S <sub>1</sub> /S	133	/	/	/	400	230	38.5	9	60	48
S <sub>2</sub> /S	150	/	/	/	400	230	38.5	10	33	22

Tableau 3.2. Données Des transformateurs.



### 3.3 Calcul des paramètres de réseau

Les courts circuits électriques dans les réseaux engendrent des régimes dynamiques et de très forts courants (puissances), dont les calculs sont très complexes.

Pendant le calcul du courant de court circuit, on admet les simplifications suivantes :

- Les déphasages entre F.E.M des générateurs et du système ne variant pas.
- On ne tient pas compte de la saturation éventuelle des circuits magnétiques.
- Les courants magnétisants ( $I_0$ ) des transformateurs sont négligés.
- Les susceptance des lignes sont négligeables ( $b_0 \cong 0$ ).
- Les courants triphasés sont symétriques.
- Les résistances actives sont souvent négligée (si  $x_\Sigma \geq 3 \cdot r_\Sigma$ ) sauf pour la détermination de la constante de temps.

En plus, on utilise, pendant le calcul des courts-circuits, les unités relatives au lieu des unités naturelles pour la commodité de calcul et l'analyse seront faciles et très pratique.

#### a. Les Générateurs :

Pendant le court circuit les moteurs, a cause de la chute de tension dans les nœuds, se transforment en générateur et augmentent la valeur du courant, pour cette raison les éléments sont définis par leur caractéristiques subtransitoires ( $E_{(N)}^{*''}, x_{d(N)}^{*''}$ ) en unité relative par rapport aux valeurs nominales.

$$G_1 \begin{cases} E_1^{*''} = 1,15 \\ x_{(N)}^{*''} = 0,2 \end{cases}, \quad G_2 \begin{cases} E_2^{*''} = 1,1 \\ x_{(N)}^{*''} = 0,15 \end{cases}$$

Pour rapporter les valeurs au niveau de base, on utilisé :

$$k_T = \frac{U_N}{U_b}$$

L'expression en unités relatives par rapport à la valeur de base :

$$x_{d(b)}^{*''} = \frac{x_{d(N)}^{*''}}{x_b} = x_{d(N)}^{*''} \cdot \frac{S_b}{S_N}$$

$$x_1 = x_{d(b)(G_1)}^{*''} = 0,2 \cdot \frac{1000}{300} = 0,666$$

$$x_{16} = x_{d(b)(G_2)}^{*''} = 0,15 \cdot \frac{1000}{400} = 0,375$$

Le schéma étudié comporte plusieurs sources d'énergie. Celles qui sont éloignées du point de défaut peuvent être représentées par une source équivalente, mais celles qui sont proches de ce point doivent être (chaque une) représentées par leurs paramètres.

### b. Système électrique :

Dans un nœud quelconque, où le courant de court circuit (ou la puissance correspondante) est connu, la réactance du système s'exprime.

$$x_{S(m)} = \frac{U_m}{\sqrt{3} \cdot I_{CC}} = \frac{U_m^2}{S_{CC}}$$

Où ;  $U_m$  : La tension moyenne du nœud (ou le courant  $I_{CC}$ ).

$I_{CC}$  : Le courant de court circuit établi après l'étape transitoire du nœud.

Dans le cas où le courant  $I_{CC}$  ou la puissance  $S_{CC}$  ne sont pas connus la réactance  $x_S$  peut être déterminée par le courant de débranchement du disjoncteur installé dans le nœud.

$$x_{S(m)} = \frac{U_m}{\sqrt{3} \cdot I_{deb(N)}}$$

Où ;  $I_{deb(N)}$  : est le courant de débranchement du disjoncteur.

Dans notre étude le système est donné par  $S_N$  et  $x_{S(N)}^*$  dans ce cas on utilise l'expression :

$$x_{S(b)}^* = \frac{x_{S(b)}}{x_b} = x_{S(N)}^* \cdot \frac{S_b}{S_N}$$

Application numérique :

$$x_{18} = x_{S(b)}^* = 0,5 \cdot \frac{1000}{1000} = 0,5$$

### c. Les transformateurs :

La réactance des transformateurs (figure 3.3) est définie par les paramètres nominaux comme suit :

$$x_{T(N)} = \frac{\Delta U_{CC} \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$$

Tel que :

$$\frac{U_N^2}{S_N} = x_N$$

On unité relative on peut écrire :

$$x_{T(N)}^* = \frac{x_{T(N)}}{x_N} = \frac{\Delta U_{CC}\%}{100} = \Delta U_{CC}^*$$

En négligent  $r_T$  devant  $x_T$ , on peut également écrire que  $Z_{CC}\% \cong \Delta U_{CC}\%$  de la même manière on peut définir

$$x_{T(b)}^* = \frac{x_{T(b)}}{x_b} = \Delta U_{CC}^* \cdot \frac{S_b}{S_N}$$

$$k_T = \frac{U_N}{U_b}$$

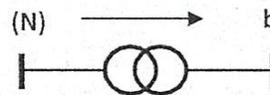


Figure 3.3.Principe de réduction des paramètres

$$k_T^2 = \frac{x_N}{x_b}$$

On utilisant cette expression pour calculer  $x_2, x_3$  du transformateur « n°1 »

$$x_2 = x_3 = x_{T_1(b)}^* = \Delta U_{CC1}^* \cdot \frac{S_b}{S_{T1(N)}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,44$$

De la même manière on calcule  $x_{14}$  et  $x_{15}$  du transformateur n°2

$$x_{14} = x_{15} = x_{T_2(b)}^* = \Delta U_{CC2}^* \cdot \frac{S_b}{S_{T2(N)}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{1000}{160} = 0,75$$

**d. Ligne aérienne :**

Les lignes aérienne sont données par leur réactance linéique ( $x_0$ ) et leur longueur ( $l$ )

On a :

$$x_{l(m)} = x_0 \cdot l$$

$$x_{l(b)} = x_{l(m)} \cdot \frac{U_b^2}{U_m^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_b^2}{U_m^2}$$

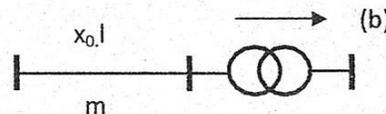


Figure 3.4.Modèle de la ligne.

$$x_{l(b)}^* = \frac{x_0 \cdot l \cdot \frac{U_b^2}{U_m^2}}{x_{(b)}} = x_0 l \frac{S_b}{U_m^2} \Rightarrow$$

$$x_{l(b)}^* = x_{l(m)} \frac{S_b}{U_m^2}$$

Application numérique :

$$x_4 = 0,4.60. \frac{1000}{(220)^2} = 0,495$$

$$x_5 = 0,4.40. \frac{1000}{(220)^2} = 0,330$$

$$x_{20} = 0,3.100. \frac{1000}{(400)^2} = 0,187$$

$$x_{19} = 0,3.80. \frac{1000}{(400)^2} = 0,15$$

$$x_{17} = 0,3.70. \frac{1000}{(400)^2} = 0,131$$

$$x_{13} = 0,4.50. \frac{1000}{(220)^2} = 0,413$$

$$x_9 = 0,4.30. \frac{1000}{(30)^2} = 13,33$$

#### e. Les Sous stations (Autotransformateur) :

A l'aide d'un autotransformateur (figure 3.3) on peut transmettre au consommateur une puissance supérieure à celles pour un transformateur à trois enroulements de même dimensionnement, ceci constitue un avantage technico-économique. Cet avantage est indiqué par le coefficient «  $\alpha$  »

Tel que

$$x = \frac{S_c}{S_N} = \frac{U_{N1} - U_{N2}}{U_{N1}}$$

$$S_c = \sqrt{3} \cdot I_{N1} (U_{N1} - U_{N2})$$

$S_c$  puissance typique ou caractéristique pour la quel en calcule la bobine I, plus  $U_{N1}$  est proche de  $U_{N2}$  plus la puissance qui est transmise magnétiquement diminue et plus l'avantage technico-économique et amélioré.

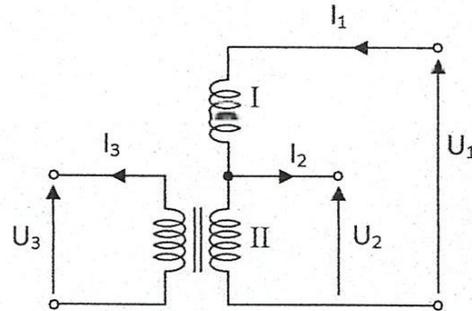
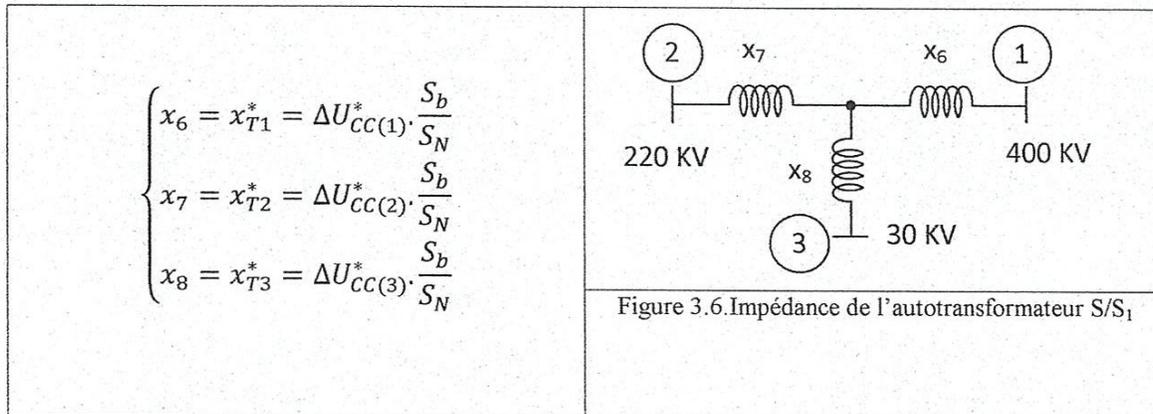


Figure 3.5 : Schéma de l'autotransformateur.

Les paramètres de l'autotransformateur sont déterminés comme celle d'un transformateur à trois enroulements à la différence que les tensions et les puissances de l'essai en court circuit entre les enroulements (1 - 3) et (2 - 3) sont données par rapport à la puissance critique  $S_c$ .

$$\begin{cases} \Delta P_{CC(i-j)} = \frac{\Delta P'_{CC(i-j)}}{\alpha^2} \\ \Delta U_{CC(i-j)} = \frac{\Delta U'_{CC(i-j)}}{\alpha} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} \Delta P'_{CC(1,2)} ; \Delta P'_{CC(1,3)} ; \Delta P'_{CC(2,3)} \\ \Delta U'_{CC(1,2)} ; \Delta U'_{CC(1,3)} ; \Delta U'_{CC(2,3)} \end{cases}$$

On applique pour notre étude (figure 3.6) :



On a

$$\begin{cases} \Delta U_{cc,1}^* = \frac{1}{2} [\Delta U_{cc(1,2)}^* + \Delta U_{cc(1,3)}^{*'} - \Delta U_{cc(2,3)}^{*'}] \\ \Delta U_{cc,2}^* = \frac{1}{2} [\Delta U_{cc(1,2)}^* + \Delta U_{cc(2,3)}^{*'} - \Delta U_{cc(1,3)}^{*'}] \\ \Delta U_{cc,3}^* = \frac{1}{2} [\Delta U_{cc(1,3)}^* + \Delta U_{cc(2,3)}^{*'} - \Delta U_{cc(1,2)}^{*'}] \end{cases}$$

Application numérique :

$$\alpha = 1 - \frac{U_{N2}}{U_{N1}} = 1 - \frac{220}{400} = 0,45 ;$$

$$\Delta U_{cc(i-j)}^{*'} = \alpha \cdot \Delta U_{cc(i-j)}^*$$

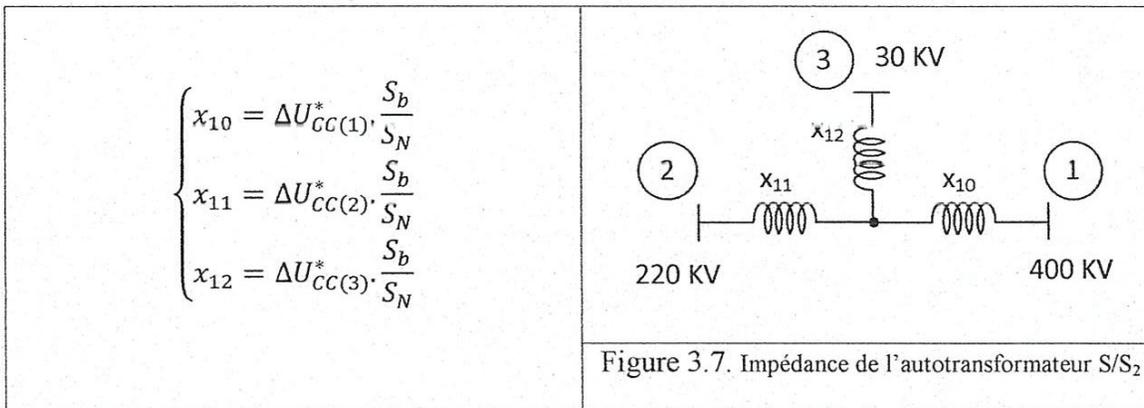
➤ **Autotransformateur n°1 (S/S<sub>1</sub>):**

$$\begin{cases} \Delta U_{cc(1-2)} = 9\% \\ \Delta U_{cc(1-3)} = 60\% \\ \Delta U_{cc(2-3)} = 48\% \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta U_{cc(1-2)}^* = \frac{9}{100} = 0,09 \\ \Delta U_{cc(1-3)}^{*'} = \frac{60}{100} \cdot 0,45 = 0,27 \\ \Delta U_{cc(2-3)}^{*'} = \frac{48}{100} \cdot 0,45 = 0,216 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_{cc,1}^* = \frac{1}{2} [0,09 + 0,27 - 0,216] = 0,072 \\ \Delta U_{cc,2}^* = \frac{1}{2} [0,09 + 0,216 - 0,27] = 0,018 \\ \Delta U_{cc,3}^* = \frac{1}{2} [0,27 + 0,216 - 0,09] = 0,198 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_6 = 0,072 \cdot \frac{1000}{133} = 0,541 \\ x_7 = 0,018 \cdot \frac{1000}{133} = 0,135 \\ x_8 = 0,198 \cdot \frac{1000}{133} = 1,488 \end{cases}$$

➤ Autotransformateur n°2 (S/S<sub>2</sub>).



$$\begin{cases} \Delta U_{cc(1)}^* = \frac{1}{2} \left[ \frac{10}{100} + 0,45 \left( \frac{33}{100} - \frac{22}{100} \right) \right] = 0,0748 \\ \Delta U_{cc(2)}^* = \frac{1}{2} \left[ \frac{10}{100} + 0,45 \left( \frac{22}{100} - \frac{33}{100} \right) \right] = 0,0253 \\ \Delta U_{cc(3)}^* = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{33}{100} + \frac{22}{100} \right) 0,45 - \frac{10}{100} \right] = 0,0738 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{10} = 0,0740 \cdot \frac{1000}{150} = 0,498 \\ x_{11} = 0,0252 \cdot \frac{1000}{150} = 0,168 \\ x_{12} = 0,0737 \cdot \frac{1000}{150} = 0,491 \end{cases}$$

Les résultats des calculs sont représentés sur le schéma équivalent de la figure 3.8.

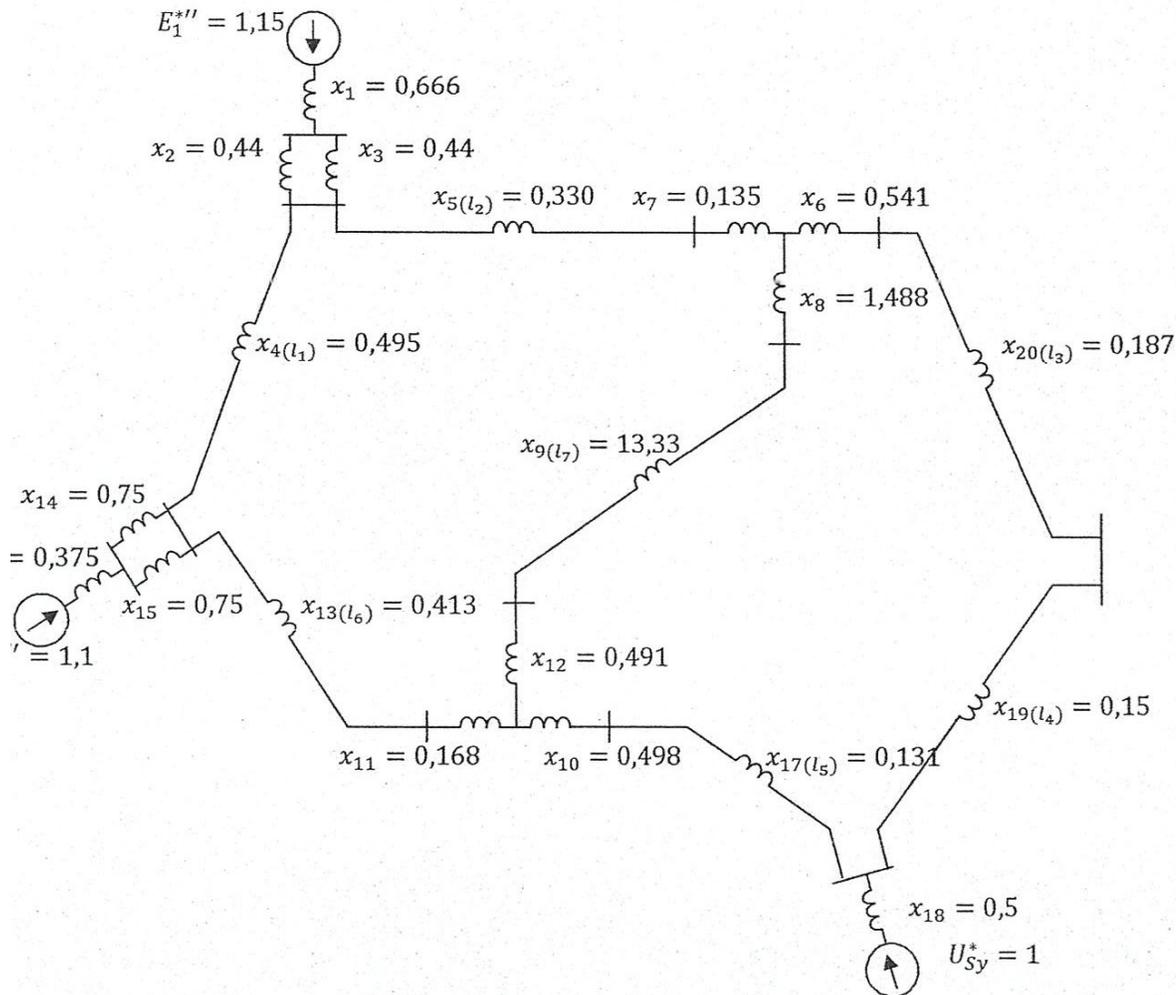


Figure 3.8. Schéma équivalent de calcul

### 3.4 Procédure de calcul.

#### 3.4.1 Transformation du schéma de calcul.

Les calculs de court circuit se basent sur la transformation du schéma du système (figure 3.8) jusqu'à sa forme la plus simple, composée d'une F.é.m équivalente, et d'une réactance jusqu'au point de court circuit « k » (figure 3.9)

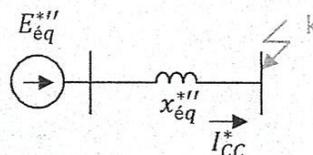
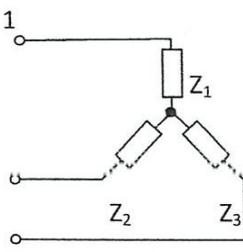
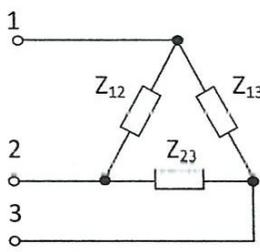
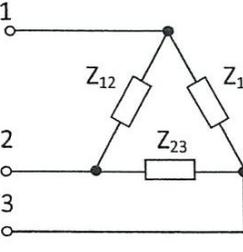
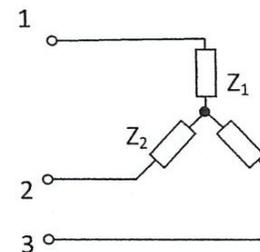
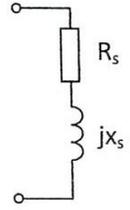
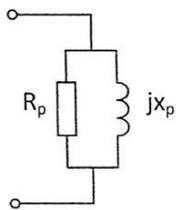
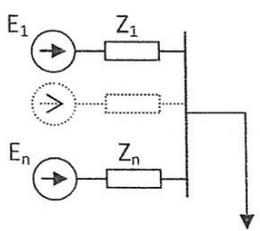
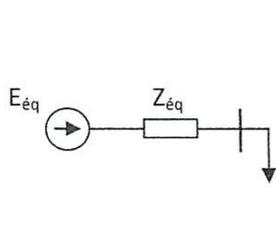


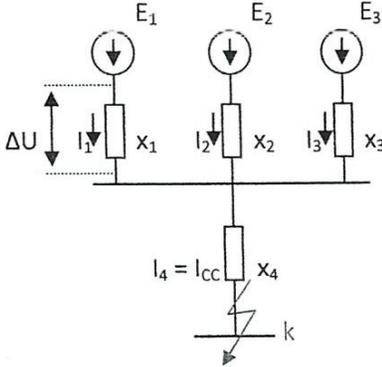
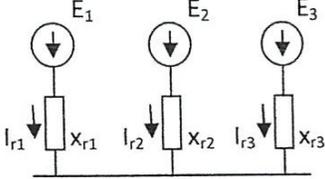
Figure 3.9. formes réduites et simplifiées des Schémas équivalents de calcul de courant de court-circuit.

Les transformations à réaliser pour trouver la réactance équivalente sont résumé au tableau suivant :

Schéma initial	Schéma équivalent	Formule
		$Z_{12} = Z_1 \parallel Z_2 \parallel \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}$
		$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$
		$R_p = \frac{r_s^2 + x_s^2}{r_s}$ $X_p = \frac{r_s^2 + x_s^2}{x_s}$
		$Y_{eq} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$ $Z_{eq} = \frac{1}{Y_{eq}}$ $E_{eq} = \frac{E_1 Y_1 + \dots + E_n Y_n}{Y_1 + \dots + Y_n}$

3.4.2 Coefficient de distribution des courants.

Pour certaines formes de transformation obtenues (figure.3.11), il est nécessaire d'utiliser les coefficients de distribution du courant sur les branches parallèles. Pour déterminer les courants impliqués séparément par les sources.

$= I_1 + I_2 + I_3 = I_{CC}$ $\frac{\Delta U}{x_1} + \frac{\Delta U}{x_2} + \frac{\Delta U}{x_3} = I_{CC}$ <p>Avec :</p> $\Delta U = I_{CC} \cdot x_{\acute{e}q}$	 <p style="text-align: center;">(figure 3.10)</p>
<p>On déduit donc :</p> $\left[ \frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} + \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} + \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} \right] = 1$ <p>On pose</p> $I_1 = I_{CC} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} = I_{CC} \cdot k_1; \quad \left( k_1 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} \right)$ $I_2 = I_{CC} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} = I_{CC} \cdot k_2; \quad \left( k_2 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} \right)$ $I_3 = I_{CC} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} = I_{CC} \cdot k_3; \quad \left( k_3 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} \right)$	 <p style="text-align: center;">(figure 3.11)</p>

On obtient

$$I_1^* + I_2^* + I_3^* \text{ par rapport au courant } I_{CC}$$

$$I_1^* + I_2^* + I_3^* = k_1 + k_2 + k_3 = 1$$

( $k_1, k_2, k_3$  ; coefficient diviseur de courant)

Ces coefficients permettent de déterminer la réactance résultante de chaque branche entre la F.é.m correspondante et le point de court circuit.

Finalement on déduit le schéma le plus simple utilisé pour le calcul du courant de court circuit  $I_{CC}$  (figure 3.12)

Avec :

$$x_r = x_{\text{éq}} + x_y$$

Et

$$x_r = k_1 \cdot x_{r_1} = k_2 \cdot x_{r_2} = k_3 \cdot x_{r_3}$$

$$x_{r_1} = \frac{x_r}{k_1} ; x_{r_2} = \frac{x_r}{k_2} ; x_{r_3} = \frac{x_r}{k_3}$$

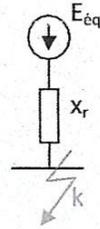


Figure 3.12. formes réduites de schéma équivalent de calcul d'un C-C

### 3.4.3 Analyse de court-circuit en régime transitoire.

On suppose le schéma de la figure 3.13

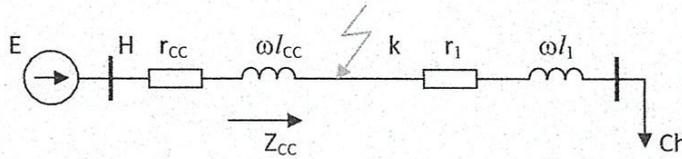


Figure 3.13. schéma équivalent unifilaire d'un C-C triphasé.

D'une manière générale les régimes de court circuit sont caractérisés par deux temps :

le régime transitoire et le régime permanent.

Le régime transitoire est le temps du changement d'état du système d'un régime permanent initial à un régime permanent de court circuit.

La tension est donnée par l'équation différentielle :

$$U_{(t)} = r_{cc} \cdot i_{(t)} + L_{cc} \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} \rightarrow (3.1)$$

La solution de l'équation (3.1) comporte deux composantes,

$$i_{(t)} = i_f + i_l \rightarrow (3.2)$$

Ou :

$$U_{(t)} = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\alpha = \text{Artg} \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}$$

$Z_{CC} = r_{CC} + j\omega L_{CC}$ , Impédance de court circuit (fig.3.14)

$x_{\Sigma}, r_{\Sigma}$ : l'inductance et la résistance sommaire d'une phase de la source jusqu'à la charge

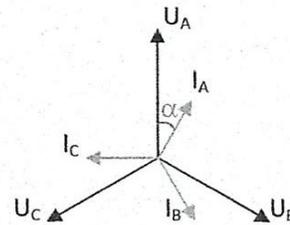


figure 3.14. diagramme vectoriel, système triphasé des tensions

$i_f, i_p$ : Courant instantané forcé par la tension  $U(t)$  dans le circuit de défaut indépendamment du régime transitoire (périodique)

$i_l$ : Courant libre débité par l'inductance « L » pendant le changement d'état.

On déduit :

$$i_p = i_f = \frac{U(t)}{Z_{CC}} = \frac{U_m}{Z_{CC}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{CC}) \rightarrow (3.3)$$

Pendant le court circuit,  $U(t) = 0$ , donc d'après la l'équation (3.1) on peut écrire

$$r_{CC} \cdot i(t) + L_{CC} \frac{di(t)}{dt} = 0 \rightarrow (3.4)$$

La solution de l'équation (3.4) est :

$$i_l(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \rightarrow (3.5)$$

Avec  $T_a$  constante de tempes

$$T_a = \frac{L_{CC}}{r_{CC}} = \frac{x_{CC}}{\omega \cdot r_{CC}}$$

D'après la relation (3.3) et (3.5) on déduit :

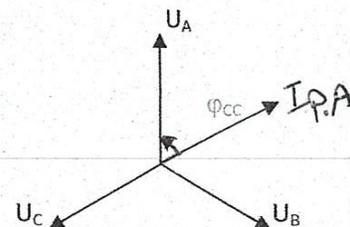


Diagramme vectoriel

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{CC}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{CC}) + I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \rightarrow (3.6)$$

Pour  $t = 0$  :

$$i(0) = \frac{U_m}{Z_{CC}} \sin(\alpha - \varphi_{CC}) + I_0 \Rightarrow I_0 = i(0) - \frac{U_m}{Z_{CC}} \sin(\alpha - \varphi_{CC}) \rightarrow (3.7)$$

$i(0)$ : Peut être déterminé par la relation [3 - 3] avant le court circuit ce qui donne :

$$i(0) = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \rightarrow (3.8)$$

Avec  $\varphi$  : déphasage en régime normal avant la perturbation.

En remplaçant l'équation [3 - 8] dans [3 - 7] et [3 - 6] on déduit finalement l'équation :

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{CC}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{CC}) + \left[ \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z_{CC}} \sin(\alpha - \varphi_{CC}) \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} \rightarrow (3.9)$$

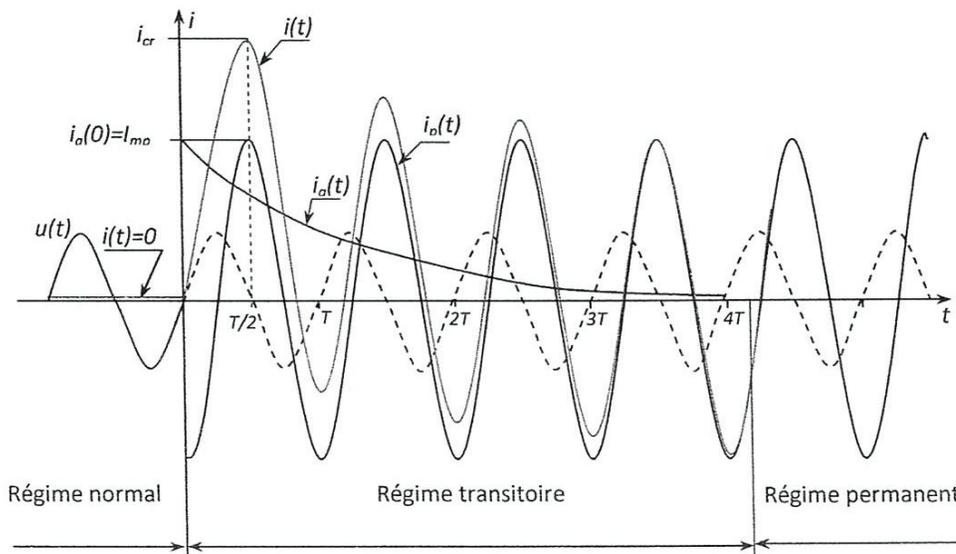


Figure 3.15. Cas extrême d'un court circuit triphasé symétrique.

### 3.5 Calcul des courants de court-circuit.

#### 3.5.1 Calcul des courants du court-circuit au point $k_1$ .

##### a. Transformation du schéma équivalent.

Les résultats de calcul des paramètres réduits du schéma initial, sont données dans le tableau.3.3, conformément à la puissance de base choisie,  $S_b = S_{N,S} = 1000$  (MVA).

Élément	Désignation	Numérotation	Valeur
Générateurs	G1	X1	0,666
	G2	X16	0,375
Transformateurs	T1,PT1	X2 = X3	0,44
	T1,PT1	X14 = X15	0,75
Lignes	L1	X4	0,495
	L2	X5	0,330
	L3	X20	0,187
	L4	X19	0,15
	L5	X17	0,131
	L6	X13	0,413
	L7	X9	13,33
Système	Sys	X18	0,5
Autotransformateurs	S/S1	X6	0,541
		X7	0,135
		X8	1,488
	S/S2	X10	0,498
		X11	0,168
		X12	0,491

Tableau 3.3

Le schéma 3.8 peut être encore transformée et conduit à la forme réduit d'un schéma simple, commun aux six cas de court circuit (fig. 3.15), tel qu'on peut obtenir :

$$x_{21} = x_1 + (x_2 // x_3) = x_1 \frac{x_2}{2} = 0,666 + \frac{0,44}{2} = 0,886 \text{ pu}$$

$$x_{22} = x_{16} \frac{x_{15}}{2} = 0,375 + \frac{0,75}{2} = 0,75 pu$$

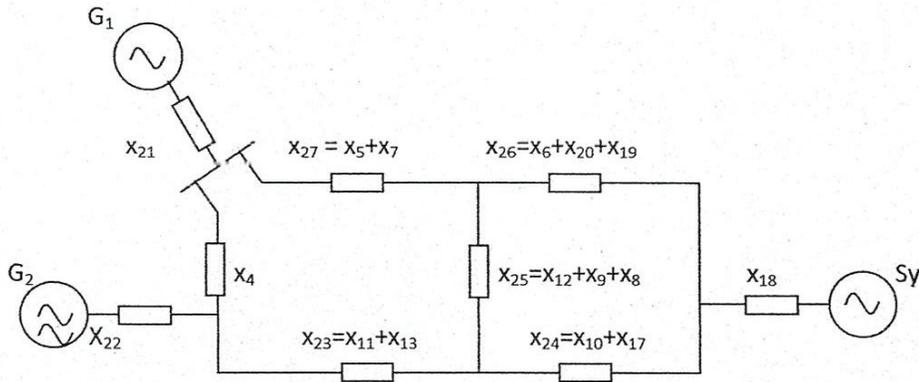


Figure 3.15.\*.schémas initial aux paramètre rapportés(P.U).

$$x_{23} = x_{11} + x_{13} = 0,168 + 0,413 = 0,581$$

$$x_{24} = x_{10} + x_{17} = 0,498 + 0,131 = 0,629$$

$$x_{25} = x_8 + x_9 + x_{12} = 1,488 + 13,33 + 0,492 = 15,310$$

$$x_{26} = x_6 + x_{19} + x_{20} = 0,541 + 0,15 + 0,187 = 0,878$$

$$x_{27} = x_5 + x_7 = 0,330 + 0,135 = 0,465$$

Après la transformation du schéma de la figure 3.15.\* , on obtient le schéma suivant :

Tel que :

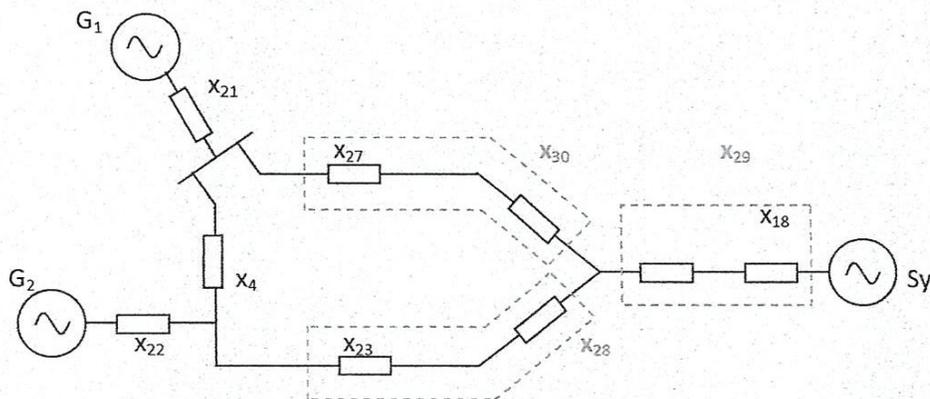


Figure 3.16

$$x_{28} = x_{23} + \frac{x_{24} \cdot x_{25}}{x_{24} + x_{25} + x_{26}} = 0,581 + \frac{0,629 \cdot 15,310}{0,629 + 15,310 + 0,878} = 1,154$$

$$x_{29} = x_{18} + \frac{x_{24} \cdot x_{26}}{x_{24} + x_{25} + x_{26}} = 0,5 + \frac{0,629 \cdot 0,878}{16,817} = 0,533$$

$$x_{30} = x_{27} + \frac{x_{24} \cdot x_{25}}{x_{24} + x_{25} + x_{26}} = 0,465 + \frac{0,629 \cdot 15,310}{16,817} = 1,264$$

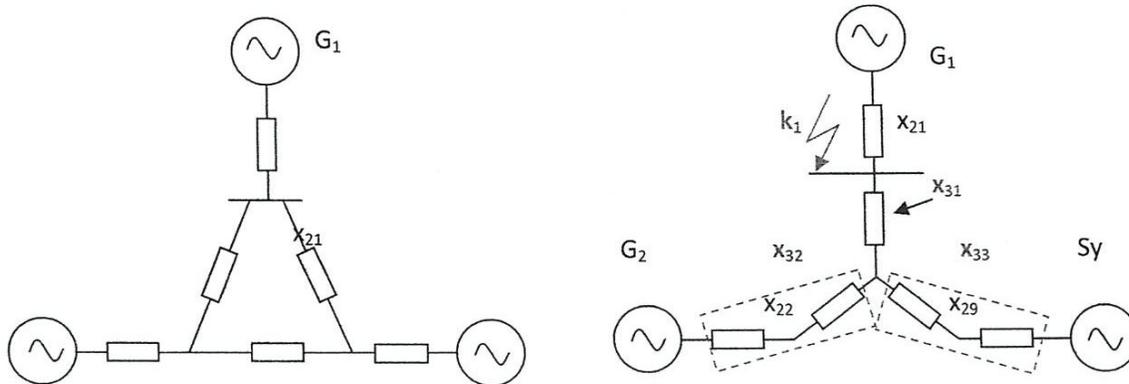


Figure 3.17

$$x_{31} = \frac{x_4 \cdot x_{30}}{x_4 + x_{28} + x_{30}} = \frac{0,495 \cdot 1,264}{0,495 + 1,154 + 1,264} = 0,604$$

$$x_{32} = x_{22} + \frac{x_4 \cdot x_{28}}{x_4 + x_{28} + x_{30}} = 0,750 + \frac{0,495 \cdot 1,154}{2,913} = 0,946$$

$$x_{33} = x_{29} + \frac{x_{28} \cdot x_{30}}{x_4 + x_{28} + x_{30}} = 0,533 + \frac{1,154 \cdot 1,264}{2,913} = 1,363$$

On calcule  $x_{34}$  et  $x_{35}$  :

$$x_{34} = \frac{x_{\acute{e}q(1)} + x_{31}}{C_{32(1)}}$$

$$x_{35} = \frac{x_{\acute{e}q(1)} + x_{31}}{C_{33(1)}}$$

Tel que :

$$x_{\acute{e}q(1)} = \frac{x_{32} \cdot x_{33}}{x_{32} + x_{33}} = \frac{0,946 \cdot 1,363}{0,946 + 1,363} = 0,558$$

Et :

$$C_{32(1)} = \frac{x_{\acute{e}q(1)}}{x_{32}} = \frac{0,558}{0,946} = 0,590$$

$$C_{33(1)} = \frac{x_{\acute{e}q(1)}}{x_{33}} = \frac{0,558}{1,363} = 0,410$$

$$x_{34} = \frac{0,558 + 0,604}{0,588} = 1,969$$

$$x_{35} = \frac{0,558 + 0,604}{0,410} = 2,837$$

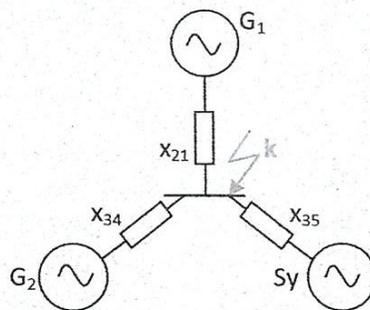


Figure 3.18. paramère réduits à la base et exprimes « PU »

**b. Courant périodique initial.**

On peut à partir du schéma (figure 3.19) calculer le courant périodique initial débité par les trois sources :

$$I_{P,0(G_1)}^* = \frac{E_1^{**}}{x_{21}} = \frac{1,15}{0,886} = 1,298$$

$$I_{P,0(G_2)}^* = \frac{E_2^{**}}{x_{34}} = \frac{1,1}{1,969} = 0,559$$

$$I_{P,0(sy)}^* = \frac{U_S^*}{x_{35}} = \frac{1}{2,837} = 0,352$$

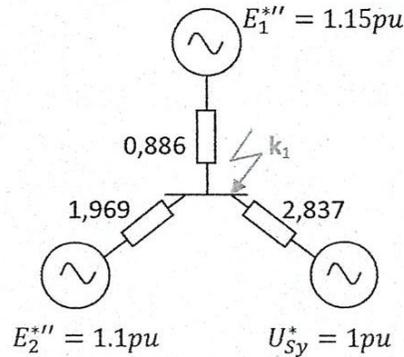


Figure 3.19. schémas de calcul, débit propre de chaque source

Sachent que :

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,44 \text{ kA}$$

Ce qui donne, on unité naturelles (propres).

$$I_{P,0(G_1)} = 1,298 \cdot 1,44 = 1,869 \text{ kA}$$

$$I_{P,0(G_2)} = 0,804 \text{ kA}$$

$$I_{P,0(sy)} = 0,508 \text{ kA}$$

La valeur initiale du courant périodique sommaire au point  $k_1$  sera :

$$I_{P,0} = I_{P,0(G_1)} + I_{P,0(G_2)} + I_{P,0(sy)} = 3,181 \text{ kA}$$

La puissance de court circuit correspondante aura pour valeur :

$$S_{CC} = \sqrt{3} \cdot I_{P,0} \cdot U_m = \sqrt{3} \cdot 3,181 \cdot 400 = 2203,883 \text{ MVA}$$

Dans cette valeur, les puissances de court circuit correspondant aux courants débités séparément sont :

$$S_{CC(G_1)} = \sqrt{3} \cdot I_{P,0(G_1)} \cdot U_m = \sqrt{3} \cdot 1,869 \cdot 400 = 1294,933 \text{ MVA}$$

$$S_{CC(G_2)} = \sqrt{3} \cdot I_{P0(G_2)} \cdot U_m = 557,287 \text{ MVA}$$

$$S_{CC(Sy)} = \sqrt{3} \cdot I_{P(Sy)} \cdot U_m = 351,664 \text{ MVA}$$

### c. Courant de crête (choc).

Les sources débitant les courants séparément, il est nécessaire de déterminer les courants de crête (de choc) également pour chaque branche, pour se faire, on peut utiliser la formule :

$$i_{cr,i} = \sqrt{2} \cdot I_{P0i} \cdot k_{ck,i}$$

$i$  : indique la branche considéré.

$k_{cr}$  : le facteur de crête (choc) peut être calculé à partir de la constante de temps  $T_a$

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{w_{r\Sigma}}$$

Pour des raisons de simplification des procédures analytiques éventuellement complexes, tout en se conformant aux limites objectivement admissibles, la valeur des constantes de temps des différentes branches du réseau et, par conséquent celle de  $k_{cr}$ , est prédéterminée et donnée par sa valeur moyenne typique normalisée (Tb.3.4).

A partir de ce tableau, on peut déterminer le facteur de choc ; ensuite le courant de choc. Le tableau (Tb.3.5) résume les résultats. Le G2 débite dans le point de court circuit un courant qui travers le transformateur et une ligne aérienne, il peut être assimilé un à système ; pour le G1 le court circuit à lieu pratiquement aux bornes :

$$i_{kr(G_1)} = \sqrt{2} \cdot 2,438 \cdot 1,869 = 5,220 \text{ kA}$$

$$i_{kr(G_2)} = \sqrt{2} \cdot 0,804 \cdot 1,717 = 1,953 \text{ kA}$$

$$i_{kr(G_{Sy})} = \sqrt{2} \cdot 0,508 \cdot 1,717 = 1,233 \text{ kA}$$

Elément et bloc d'éléments		$P_N$ , MW	$U_N$ , Kv	$T_a$ , s	$k_{cr}$
Turbo générateur		10÷16		0,16÷0,25	1,94÷1,955
Turbo générateur		100÷1000		0,4÷0,54	1,975÷1,98
Blocs : Turbo générateur Transformateur		60	6,3	0,2	1,95
		100÷200		0,26	1,965
		300	10,5	0,32	1,977
		500		0,35	1,983
		800		0,3	1,967
Système	liaison aérienne directe avec la sous-station		35	0,02	1,6
			110-150	0,02÷0,03	1,6÷1,717
			220-330	0,03÷0,04	1,717÷1,78
		500-750	0,06÷0,08	1,85÷1,895	
	Liaison à une sous-station à travers transformateur à $S_N$ , MVA	$\geq 80$	6÷10	0,06÷0,15	1,85÷1,935
32÷63	0,05÷0,1	1,82÷1,90			
Réseau de distribution			6÷10	0,01	1,37
Inductance limitatrice de courant à					
$I_N \geq 1000$ A				0,23	1,956
$I_N \leq 630$				0,1	1,904

Tableau.3.4. les valeurs moyenne typique normalisée.

Eléments	Paramètres					
	$T_{a(s)(i)}$	$k_{cr(i)}$	$I_{cr(i)}(kA)$	$I_{kr} = \sum I_{kr(i)}$	$I_{P0(i)}(kA)$	$I_{P0}(kA)$
G1	0,04	1,975	5,220	8.406	1,869	3,181
G2	0,03	1,717	1,953		0,804	
GSy	0,03	1,717	1,233		0,508	

Tableau.3.5. résumé du calcul pour c-c  $K_1$

Pour le calcul des courts circuits « k2, ..., k6 » on procède de la même manière que dans le cas du défaut « k1 » le schéma initial (figure 3.8) doit être réduit, respectivement, par rapport à chaque cas de défaut .les résultat du calcul résume au tableau (Tb.3.6).

Pour le calcul des courants de crête, la constante de temps de la branche du système ainsi que celle de l'ensemble des générateurs parallèles est prise approximativement égale à 0,03s ( $k_{cr}=1,717$ ).

Point de court circuit	Paramètres						
	Eléments	$T_{a(s)(i)}$	$k_{cr(i)}$	$I_{cr(i)}(kA)$	$I_{kr} = \sum I_{kr(i)}$	$I_{P0(i)}(kA)$	$I_{P0}(kA)$
K <sub>2</sub>	$G_1$	0.03	1.717	1,855	7,134	0,764	2,938
	$G_2$			3,562		1,467	
	$G_{sy}$			1,717		0,707	
K <sub>3</sub>	$G_1$	0.03	1.717	1,821	8.190	0,75	3,373
	$G_2$			2,020		0,832	
	$G_{sy}$			4.349		1,791	
K <sub>4</sub>	$G_1$	0.03	1.717	1.704	8.870	0.701	3.653
	$G_2$			3,671		1,512	
	$G_{sy}$			3,497		1,44	
K <sub>5</sub>	$G_1$	0.03	1.717	2.416	9.137	0,995	3.763
	$G_2$			2.55		1,05	
	$G_{sy}$			4.172		1.718	
K <sub>6</sub>	$G_1$	0.03	1.717	1,872	5.959	0,771	2.454
	$G_2$			1,998		0,823	
	$G_{sy}$			2.088		0,86	

Tableau.3.6. Résumé du calcul pour les courts-circuits  $K_{2,3,4,5,6}$ .

# Chapitre VI

### 4.1 Introduction :

La gestion des systèmes électriques et leur exploitation retiennent que les défauts de courts-circuits les plus fréquents sont les monophasés (chapitre I), les défauts triphasés sont les moins fréquents. Mais du point de vue impact sur les régimes et sur les divers équipements ils sont plus intensifs.

L'apparition d'un court-circuit triphasé a pour effet de réduire considérablement l'impédance du circuit correspondant. Cette dernière, étant opposée aux forces électromotrices, favorisera, dans ces conditions, un écoulement de courant de valeur considérable et, par conséquent, **une chute de potentiel très importante.**

#### ➤ Présentation d'un exemple.

Un exemple d'impact d'un défaut triphasé sur la distribution du potentiel, dans un réseau simple est donné sur la **figure (4.1)**, composé d'une source (S), et des sous stations A, B, C, D et E.

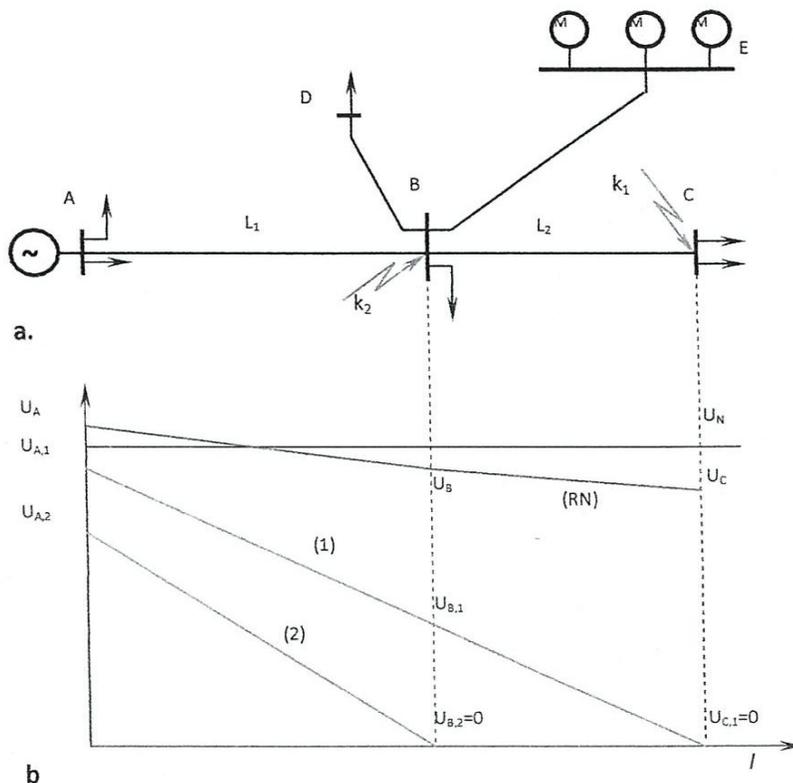


Fig.4.1. – a. Réseau. b-Impact du court-circuit

➤ Analyse de l'exemple.

En régime normal (RN), les chutes de tension dans les tronçons de lignes du réseau sont admissibles. Les tensions des sous stations A, B, C, D et E sont ainsi également admissibles.

Si un court-circuit triphasé dans le nœud C ( $k1$ ) fera chuter les tensions  $U_C$ ,  $U_B$  et  $U_A$  jusqu'à respectivement  $U_{C,l} = 0$ ,  $U_{B,l} \ll U_B$  et  $U_{A,l} \ll U_A$ . La chute de tension  $\Delta U_B = U_B - U_{B,l}$  est transmise aux nœuds D et E, lesquels verront leur tension également chuter. Tous les récepteurs branchés alors à ces nœuds éprouveront, ainsi, une insuffisance de potentiel qui se traduira par divers dysfonctionnements, tels que, instabilité des régimes des machines, freinage des moteurs,...

De même, l'état du réseau électrique sera encore plus affecté en cas de court-circuit dans le nœud B ( $k2$ ), plus proche de la source.

D'après cet exemple on peut constater que, plus lieu d'apparition de défaut est proche de la source plus l'effet du courant sur les paramètres du générateur est important. Inversement, pour les courts-circuits se situant plus en aval de la source, la tension à ses bornes est moins affectée par la circulation du courant et peut être considérée pratiquement invariable à mesure que le défaut s'éloigne.

4.2 Expression analytique.

Pour saisir un cas général, on considère le court-circuit «  $k$  » au niveau d'une ligne reliant une source de grande puissance à un nœud de charge.

On considère que  $U = cte$  (Figure 4.2.a), peut être mis sous la forme équivalente triphasée (Figure 2.2,b).

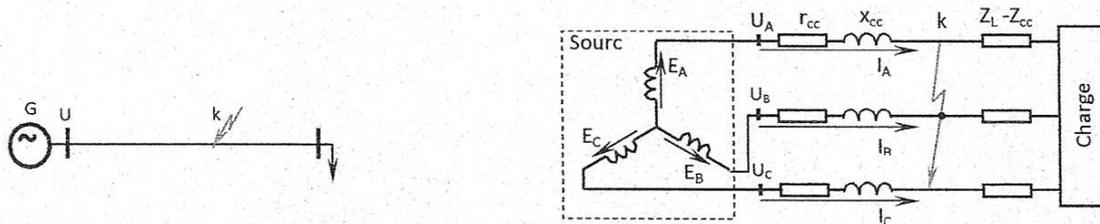


Figure 4.2.a. C-C triphasé: a. schéma de principe, schéma équivalent triphasé.

La source (générateur, système) est caractérisée par son système de tension triphasé, supposé symétrique et équilibré (Figure 4.3)

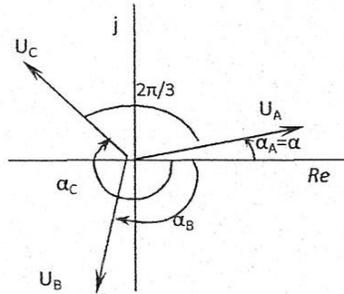


Figure 4.3. diagramme vectoriel du système triphasé des tensions de la source.

Pour un instant donné, soit initial, les tensions triphasées aux bornes de la source peuvent être écrites sous forme complexe comme suit ;

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U_A e^{j\alpha_A} = U e^{j\alpha} \\ \dot{U}_B &= U_B e^{j\alpha_B} = U e^{j\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)} = U e^{j\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)} = \dot{U}_A e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ \dot{U}_C &= U_C e^{j\alpha_C} = U e^{j\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right)} = U e^{j\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)} = \dot{U}_A e^{j\frac{2\pi}{3}}\end{aligned}\quad (4.1)$$

En posant

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}},$$

On exprime, tout aussi bien, les tensions de phase de la manière suivante ;

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U e^{j\alpha} = 1 \cdot \dot{U} \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_A = a^2 \dot{U} \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_A = a \dot{U}\end{aligned}$$

Où ;  $\dot{U}$  - Tension de la phase A sans indice pour simplifier l'écriture.

On peut constater de ces dernières expressions que les trois vecteurs complexes, opérateurs de phase, forment un système triphasé unitaire symétrique et équilibré (déjà expliqué dans le chapitre II).

$$\begin{aligned} 1 &= e^{j0} \\ a &= e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ a^2 &= e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned}$$

Ce système est très utile dans diverses analyses quand on traite avec les représentations vectorielles complexes.

Pour une étude plus complète des régimes transitoires dus à diverses perturbations, il est nécessaire de disposer de grandeurs instantanées. Le passage de la forme complexe des expressions à celle complexe instantanée peut être réalisé en introduisant l'opérateur instantané complexe

$$\dot{O}(t) = e^{j\omega t}. \quad (4.2)$$

La multiplication d'un vecteur quelconque par cet opérateur équivaut à le représenter sous la forme d'un vecteur tournant à la vitesse angulaire  $\omega$ .

Ainsi, en multipliant les deux membres de chaque expression (4.1) par (4.2) on peut obtenir

$$\begin{aligned} \dot{U}_A(t) &= \dot{U}_A \dot{O}(t) = \dot{U}(t) = U e^{j(\omega t + \alpha)} \\ \dot{U}_B(t) &= \dot{U}_B \dot{O}(t) = a^2 \dot{U}(t) \\ \dot{U}_C(t) &= \dot{U}_C \dot{O}(t) = a \dot{U}(t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pour la tension de la phase A, on écrit donc,

$$\dot{U}(t) = U [\cos(\omega t + \alpha) + j \sin(\omega t + \alpha)].$$

La tension instantanée complexe de la phase A est définie par ses projections sur les deux axes du repère orthonormé de référence. En règle générale, une des projections est prise comme valeur instantanée ; soit, pour la grandeur considérée.

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.4)$$

Où,  $U_m = \sqrt{2}U$  - Amplitude de la tension.

### 4.3 Application.

#### Exemple. Court-circuit au point $k_2$ .

Dans notre étude on a choisit un point de calcul  $k_2$  (par exemple), pour montrer l'impact de court-circuit sur les tensions ; au niveau source  $G_2$ .

La circulation des courants de court-circuit dans les systèmes électriques implique des régimes de surcharge des différents éléments qui les constituent. Le calcul des courants de circulation est particulièrement important pour raison que les divers équipements électriques du système sont caractérisés par des limites de tenues thermique et électrodynamique déterminées.

Ces régimes engendrent, en plus, des pertes de puissance considérables, ainsi que des pertes de potentiel dans tout le voisinage du défaut ; ce qui est, de plusieurs point de vue, inadmissible. Les données sur les courants de circulations permettent, également, d'organiser et de mieux gérer les systèmes de protection et de contrôle par le choix adéquat des seuils de fonctionnement des relais et d'autres caractéristiques dépendantes des régimes ; telles, la sélectivité, la rapidité de réponse, les temporisations... etc.

Dans l'application traitée, les courants de circulation peuvent être déterminés progressivement du schéma donné originel (Figure.4.4) jusqu'à schéma réduit, (Figure.4.5).

La réduction de schéma originel ce fait comme le cas de court-circuit  $K_1$ , site au chapitre (3.5.1).



## a. Les courants de lignes.

Les courants périodiques dans les branches du système (Sys.), des générateurs (G1) et (G2) sont,

$$I_{P.0(G_1)}^* = I_{21}^* = \frac{E_1''^*}{x_{34}} = \frac{1,15}{1,506} = 0,764$$

$$I_{P.0(G_2)}^* = I_{22}^* = \frac{E_2''^*}{x_{22}} = \frac{1,1}{0,75} = 1,467$$

$$I_{P.0(Sy)}^* = I_{18}^* = \frac{U_S^*}{x_{35}} = \frac{1}{1,414} = 0,707$$

De même, on détermine, les autres courants.

$$I_4^* = \frac{U_1^* - U_2^*}{x_4} \quad (U_2^* = 0)$$

$$U_1^* = E_1^* - I_{21}^* \cdot x_{21}$$

$$U_1^* = 1,15 - 0,764 \cdot 0,886 = 0,473$$

$$I_4^* = \frac{0,473}{0,495} = 0,956$$

$$I_{P0(G_1)}^* + I_{P0(G_2)}^* + I_{P0(Sy)}^* = I_4^* + I_{27}^* + I_{22}^* = 2,938$$

$$I_{27}^* = 2,938 - (1,467 + 0,956) = 0,515$$

$$I_{26}^* = I_4^* - I_{21}^* = 0,96 - 0,761 = 0,199$$

$$I_{25}^* = \frac{U_{01}^* - U_{02}^*}{x_{25}}$$

$$U_{01}^* = U_1^* + I_{26}^* (x_5 + x_7) = 0,563$$

$$U_{01}^* = 0,563$$

$$U_{02}^* = U_2^* + I_{27}^* (x_{12} + x_{13}) = 0,466$$

$$U_{02}^* = 0,466$$

$$I_{25}^* = \frac{0,563 - 0,466}{15,311} = 0,006$$

$$I_{24}^* = I_{26}^* + I_{25}^* = 0,199$$

$$I_{23}^* = I_{18}^* - I_{24}^* = 0,509$$

**b. Les Tensions nodales.**

Il est important de déterminer les potentiels en régime de défaut dans les différents nœuds du réseau. En effet, suite à l'apparition du court-circuit, le système électrique verra son potentiel chuter dans tout le voisinage du nœud en défaut et essentiellement dans ce dernier

Dans les nœuds considérés, soit 1, 2...et 10 (Figure 4.4), l'impact du défaut «  $k_2$  » sur les potentiels correspondants est tel que ;

$$U_2^* = 0$$

$$U_1^* = 0,473$$

$$U_3^* = U_5^* - I_{18}^* \cdot x_{18} = 1 - 0,707 \cdot 0,5 = 0,646$$

$$U_3^* = 0,646$$

$$U_4^* = I_{27}^* \cdot x_{13} = 0,213$$

$$U_4^* = 0,213$$

$$U_5^* = U_{02}^* + I_{23}^* \cdot x_{11} = 0,551$$

$$U_5^* = 0,551$$

$$U_6^* = U_{02}^* + I_{25}^* \cdot x_{10} = 0,469$$

$$U_6^* = 0,469$$

$$U_7^* = U_6^* + I_{25}^* \cdot x_9 = 0,553$$

$$U_7^* = 0,553$$

$$U_8^* = U_1^* + I_{26}^* \cdot x_5 = 0,537$$

$$U_8^* = 0,537$$

$$U_9^* = U_{01}^* + I_{24}^* \cdot x_6 = 0,670$$

$$U_9^* = 0,670$$

$$U_{10}^* = U_9^* + I_{24}^* \cdot x_{20} = 0,707$$

$$U_{10}^* = 0,707$$

CC	Potentiel des nœuds									
	$U_1^*$	$U_2^*$	$U_3^*$	$U_4^*$	$U_5^*$	$U_6^*$	$U_7^*$	$U_8^*$	$U_9^*$	$U_{10}^*$
K2	0,473	0	0,646	0,213	0,551	0,469	0,553	0,537	0,670	0,707

Tableau.4.1. les potentiels des nœuds pour K2.

## c. Représentation graphique (histogramme)

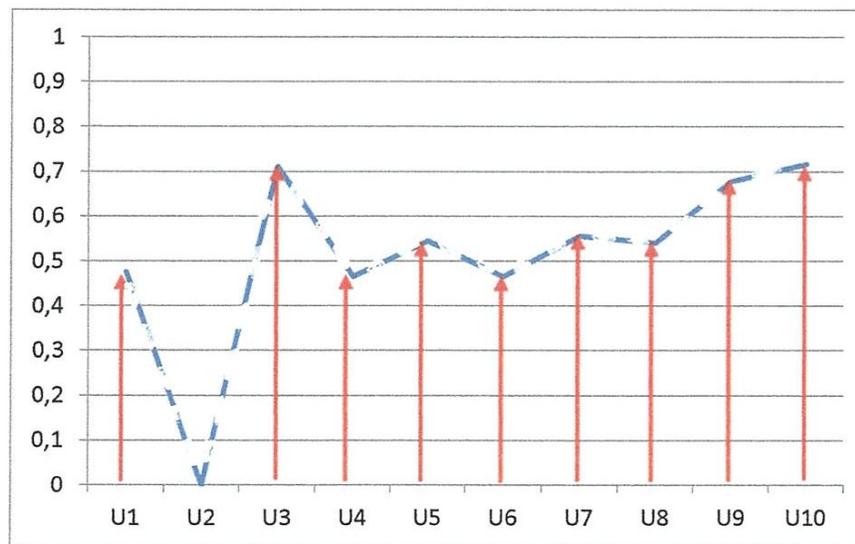


Figure 4.6 Graphique (histogramme) du potentiel nodal pour le court circuit au point k2.

L'apparition d'un court-circuit dans le nœud « K2 », fait chuter la tension U2 jusqu'à la valeur «  $U2=0$  », cette dernière est transmise aux nœuds « 1, 2,3... 10 », lesquels verront leur tension également chuter. L'influence de la chute de potentiel est importante au voisinage de défaut « U4 », plus on s'éloigne du point de défaut plus la tension augmente jusqu'à un niveau nominal.

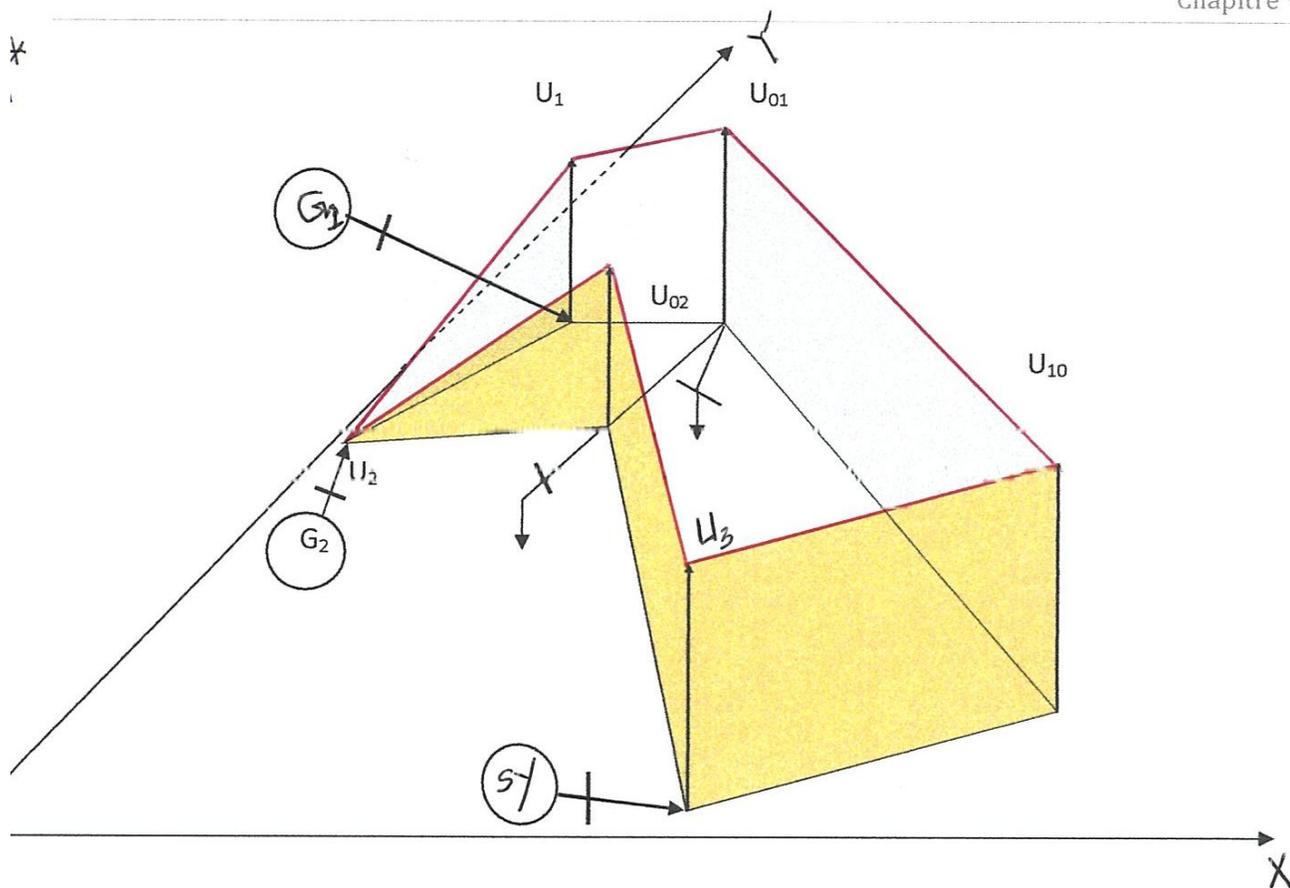


Figure 4.7 Graphique en 3D (histogramme) du potentiel nodal pour le court-circuit au point k2.

La représentation graphique en trois dimensions montre la variation du potentiel (tracée en rouge) le long de la trace du réseau, ce qui donne le plan de potentiel.

A partir de ce plan de tension on peut éventuellement définir les zones de faibles potentiels et les zones de potentiel admissible est ceci pour divers point de court-circuit.

## Conclusion.

A l'issue de ce travail on retient que. Les courts-circuits sont de divers types, la structure du réseau affecté et du régime du neutre. On distingue, dans l'ensemble de ces défauts, essentiellement les courts-circuits triphasés symétriques et asymétriques, biphasés simples et doubles et monophasés.

Les défauts de courts circuits les plus fréquents sont les monophasés, les défauts triphasés sont les moins fréquents, mais du point de vue impact sur les régimes et sur les divers équipements, plus intenses que ceux monophasés.

Ces régimes engendrent, en plus, des pertes de puissance considérables, ainsi que des **pertes de potentiel dans tout le voisinage du défaut, inadmissible**. Les données sur les courants de circulations permettent, également, **d'organiser** et de mieux gérer les systèmes de protection et de contrôle par le choix adéquat des seuils de fonctionnement des relais et d'autres caractéristiques dépendantes des régimes ; telles, la sélectivité, la rapidité de réponse, les temporisations...

Le domaine de court-circuit est très vaste. Nous souhaitant que ce travail puisse trouver utilité conséquente dans le traitement et les études des systèmes électriques. Ce travail peut être développé et élargi à la prise en charge d'autres questions un peu plus complexes, telles que les asymétries diverses les ruptures de phases ....

# *Bibliographie*

[1]. **Jean-Claude et Nouredine Hadjsaid.** Lignes et réseaux électrique 1.Ed. LAVOISIER.

Paris, 2008.

[2]. **Bounaya K.** Réseaux électriques. Eléments de description et d'analyse de base. D.P.U.Guelma, 2010.

[3]. **Bounaya K.** brochure de cours analyse des régimes transitoires, 2014.

[4]. **Zitoune L. et Kardoussi B.** Élaboration d'un réseau électrique et calcul des courants de court- circuit. Mémoire de fin d'étude, 2010.