

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : Génie Electrique
Spécialité : Réseau électrique et technique de la haute tension
Thème

Etude par la méthode de Bewly de l'effet d'une liaison ligne aérienne câble dans
la protection des équipements d'un poste électrique contre les surtensions
transitoires

Présenté Par :
SILEM Youcef

Devant les jurys composés de :

Mr Aissou Massinissa	Grade MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr Fatmi Moulay	Grade MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr Berrached Djelloul	Grade MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2015/2016

Dédicace

Je dédie ce mémoire Aux êtres les plus chers à mon cœur,
Mon Père, Ma mère, qui ont toujours cru en moi et encouragées.

A ma sœur : Imane et son mari Sofiane

A la petit Manwela que j'adore

A ma fiancé Sonia

A mes amis surtout Madjid, Achraf et Ayman

A ma cousine Manal Allah Yarhamha

A mes collègues de travail surtout Kadda et Tayab

A toute ma famille

A tous mes professeurs

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir

Ce modeste travail,

A mes parents pour m'avoir encouragé. Sans eux, je n'en serais

Pas là.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr.FATMI Moulay, pour ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon acheminement de cette formation.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner mon mémoire

De l'enrichir par leurs recommandations.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE 1 LES POSTES HTA

I. 1.Introduction	02
I. 2.Généralités.....	02
I. 3.Les niveaux de tensions	02
I. 4.Structure générale d'un réseau électrique	03
I. 5.Constitution d'un réseau de distribution HTA.....	03
I. 5.1.Réseau HTA aérien.....	04
I. 5.2.Réseau HTA souterrain.....	04
I. 6.Structure des réseaux HTA.....	04
I. 7.Les types des postes HTA	04
I. 7.1.Les postes de distribution publique (DP).....	04
I. 7.2.Les postes mixtes (DP/L).....	05
I. 7.3.Postes de livraison (L) ou client.....	05
I. 7.4.Les postes HT/HTA.....	05
I. 7.5.Les postes HTA/HTA (ou MT/MT).....	06
I. 7.6.Les postes HTA/BT.....	06
I. 8.Composition d'un départ HTA.....	08
I. 8.1. Cellule départ.....	08
I. 9. Les appareils de protection.....	09
I. 9.1. Les relais.....	09
I. 9.1.1. Les types de relais.....	09
I. 9.2.Transformateur de protection (TC).....	09
I.9.3. Disjoncteur.....	09
I. 10. Les appareils de coupure.....	10
I. 10.1. Le disjoncteur a réencenchement automatique (recloser).....	10
I. 10.2. Interrupteur HTA.....	10
I. 10.3. Sectionneurs.....	10
I. 10.3.1. Sectionneurs de mise a la terre.....	10

CHAPITRE 2 LIASON LIGNE CABLE

II.1. Introduction.....	12
II.2.Modélisation des lignes.....	12
II.3.Résolution numérique.....	14
II.4.Méthode des ondes mobiles.....	15
II.4.1.Principe de la méthode.....	15
II.4.2.Diagramme de Bewley.....	15
II.4.2.1.lois physique exploité pour la détection et la localisation de défaut....	15
II.4.2.2.constitution du diagramme.....	16
II.4.3.Etude de la propagation d'onde mobile par la méthode de Bergeron.....	19
II.4.4. Principe d'onde mobile par la méthode de la transformer de Laplace.....	20

CHAPITRE 3 LIASON LIGNE CABLE

III.1. Exemple 1.....	22
III.2. Exemple 2.....	25
III.3. Exemple 3.....	28

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

Introduction Générale

L'électricité est une énergie non stockable, elle doit être produite, transportée et distribuée pour être consommée. « L'énergie électrique consommée correspond toujours à l'énergie produite »

L'énergie électrique est produite dans des usines génératrices appelées 'Centrales électriques'. Une Centrale comporte un ou plusieurs groupes constitués chacun d'un alternateur entraîné par une machine motrice (moteur Diesel, turbine à vapeur, turbine à gaz, turbine hydraulique ...)

Les centrales de la production de l'énergie électrique se trouvent généralement dans des endroits éloignés par rapport aux différents points de consommation, pour cela, ils viennent les postes de transformation et les lignes de transport qui assurent l'évacuation de l'énergie produite vers les clients finaux. On trouve des postes de transformation de l'énergie aux bords des villes, ces postes sont construits pour baisser la tension (Haute tension) et la rendre moyenne tension MT (HTA). Après, on trouve des lignes électriques (HTA) qui sortent de ces postes et qui se dispersent dans les villes, les villages, les zones rurales, et les zones industrielles. Ces lignes doivent être commandées et contrôlées, pour cela, on trouve des protections installées au niveau de la cellule de chaque départ (Ligne sortante du poste de transformation), ces protections assurent l'élimination de l'effet des défauts et protègent les clients en cas de la présence d'anomalies dans le fonctionnement du départ qui les alimente. Les valeurs de réglages de ces protections doivent être calculées et affichées sur ces protections d'une manière correcte et rigoureuse afin d'éviter toute anomalie dans le fonctionnement des lignes électriques.

Notre contribution consiste à vérifier l'effet du changement d'impédance du à une connexion ligne-câble dans la protection des équipements d'un poste HTA

Pour répondre à cette problématique, nous avons organisé notre mémoire comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les réseaux électriques et les différents types des postes HTA.

Dans le deuxième chapitre, nous allons définir les ondes mobiles et les trois méthodes d'études actuellement en vigueur.

Dans le troisième chapitre, nous allons effectuer un calcul sur un exemple pour montrer d'une façon théorique l'impacte de cette théorie sur l'atténuation du premier pic d'onde.

Chapitre 1

Les postes

HTA

I. 1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre des notions générales sur les réseaux électriques, ainsi que les différents types des postes HTA, les catégories des réseaux, et les différentes structures des réseaux.

I. 2. Généralités

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de génération jusqu'aux clients finaux. Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final.

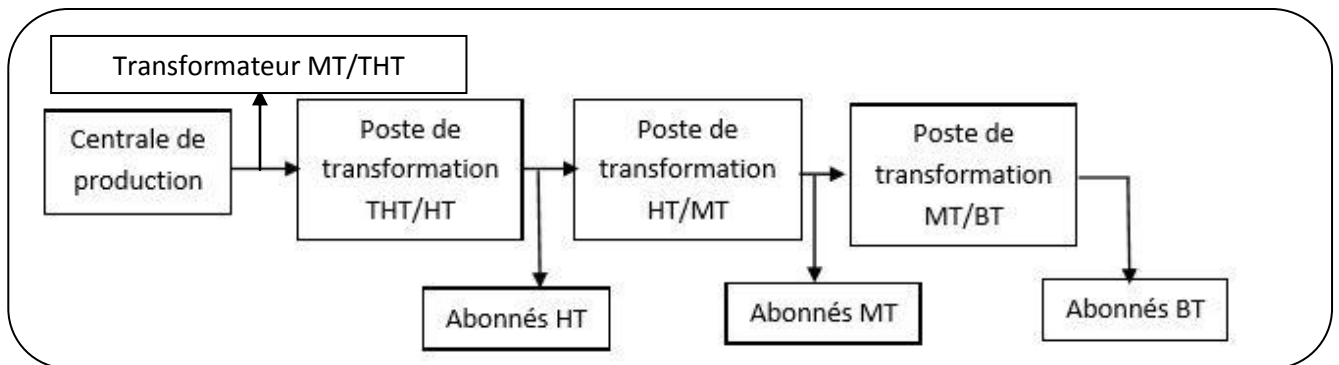
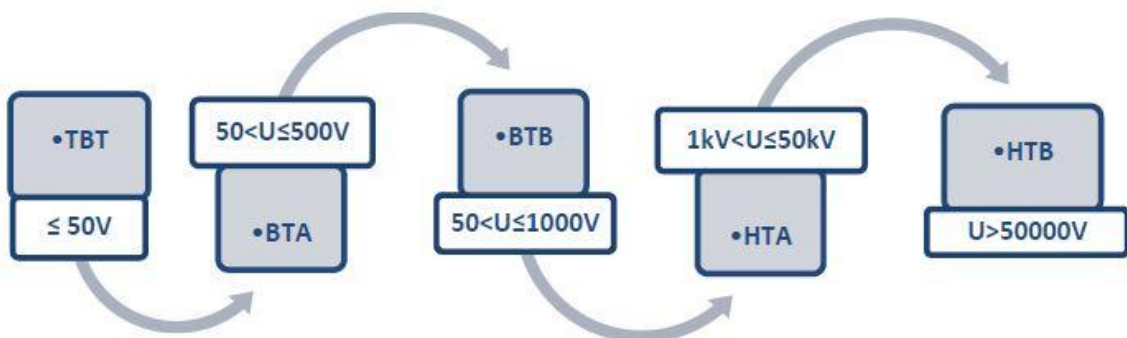


Figure I-1 : Schéma simplifié d'un réseau électrique [1]

I.3. Les niveaux de tension [2]

Les niveaux de tension son représerver comme suite :



I. 4. Structure générale d'un réseau électrique

Le schéma d'un réseau électrique se présente comme suit :

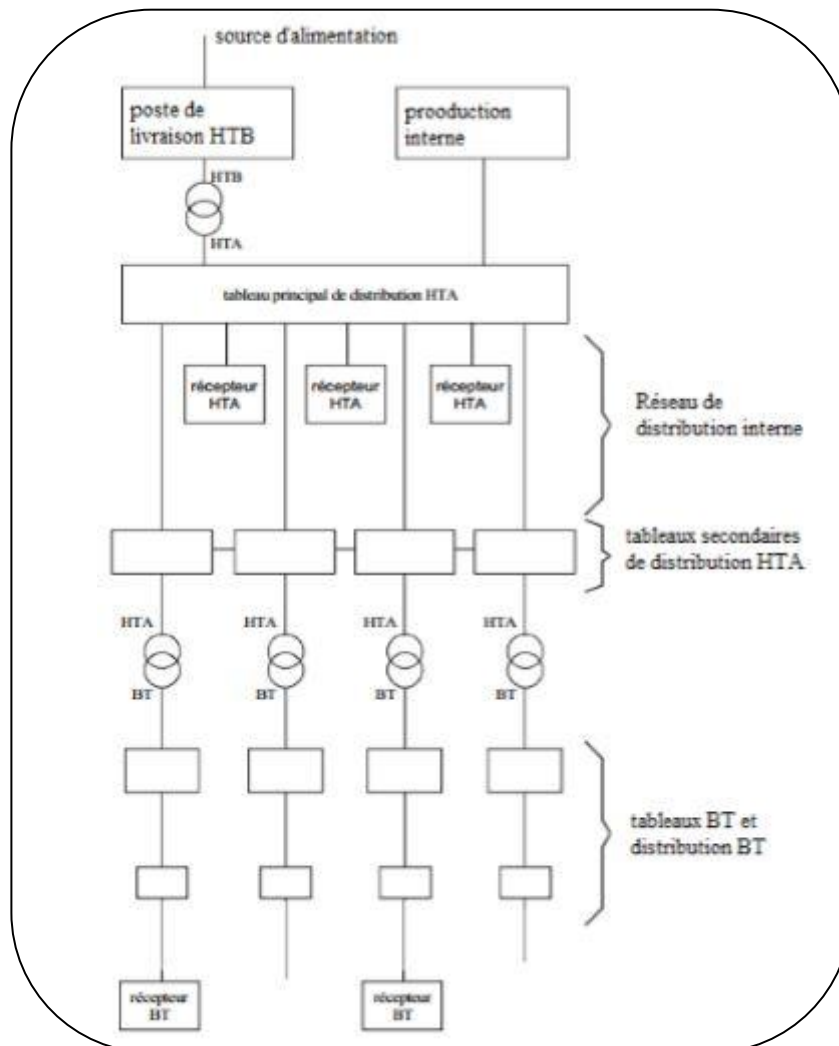


Figure I- 2 Structure générale d'un réseau électrique [3]

I. 5. Constitution des réseaux de distribution HTA

Nous pouvons distinguer deux principaux types de réseaux HTA, selon la pose des conducteurs :

I. 5.1. Réseaux HTA aériens :

La structure des réseaux est arborescente à deux ordres de lignes : dorsales et dérivations. Des sous dérivations peuvent être utilisés pour alimenter des charges isolées ou pour grouper sous un même interrupteur à commande manuelle un ensemble de postes HTA/BT. Des

interrupteurs automatiques seront installés à l'endroit de dérivation pour permettre l'élimination de la dérivation en défaut. Leur installation se fera suivant l'importance et la probabilité d'incidents sur la dérivation. Les sous-dérivations doivent être équipées, au point de raccordement à la dérivation, d'interrupteurs manuels [4].

I. 5.2. Réseaux HTA souterrains:

La structure des réseaux souterrains est à un seul type de lignes: les dorsales. Ces réseaux, de par leur construction (faible longueur et forte section des conducteurs) sont le siège de chutes de tension réduites. De ce fait, et tenant compte de l'importance des incidents, il sera prévu une réalimentation soit par les réseaux voisins soit par un câble de secours [4].

I. 6. Structure des réseaux HTA

On distingue trois structures [4] :

- Maillée
- Radiale
- Bouclée.

I. 7. Les types des postes HTA

On peut classer les postes suivant les fonctions qu'ils assurent selon :

Leur fonction :

I. 7.1. Les postes de distribution publique (DP):

Il est au service de plusieurs clients, dont l'énergie est délivrée en basse tension. Il est placé soit dans un bâtiment soit sur un support [1].

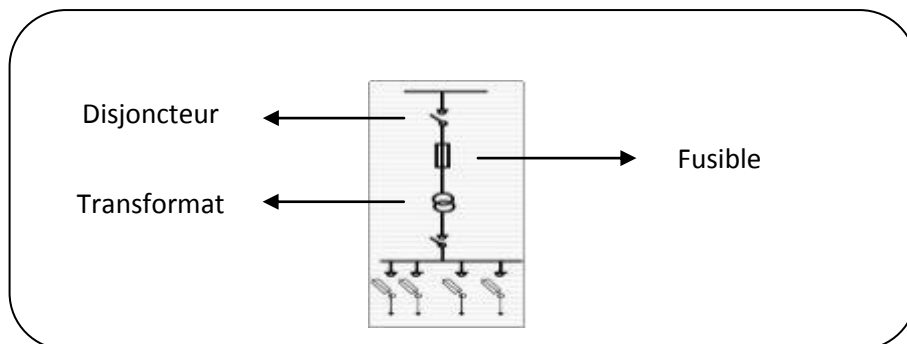


Figure I-3 : poste de distribution publique [1]

I. 7.2. Les postes mixtes (DP/L) :

Dans ces postes on trouve deux parties une installation DP et une autre pour le client. Ces postes sont classés selon la puissance transmise

I. 7.3. Poste de livraison (L) ou client :

Ce sont des postes de transformation alimentant des clients dont leurs puissances installées dépassent 25 KVA.

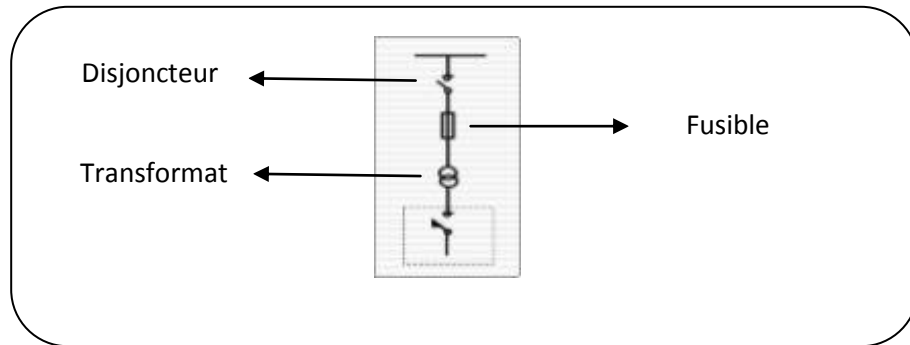


Figure I-4 : poste livraison [1]

Leur puissance :

I. 7.4. Les postes HT/HTA:

Ces postes de transformations comprennent les parties suivantes :

Etage HT: se trouvant à l'extérieur il comprend des arrivées HT ; Jeux de barres ; Transformateurs et Protections (parafoudre, sectionneurs.....).

Etage HTA: Cellules arrivées : elles assurent la liaison entre le transformateur de puissance HT/HTA qui se trouve à l'extérieur et le jeu de barres HTA 30 qui se trouve à l'intérieur du bâtiment « moyenne tension », la liaison se fait en souterrain. Cellules départs : elles assurent la liaison entre le jeu de barres HTA et le réseau de distribution aérien ou souterrain.

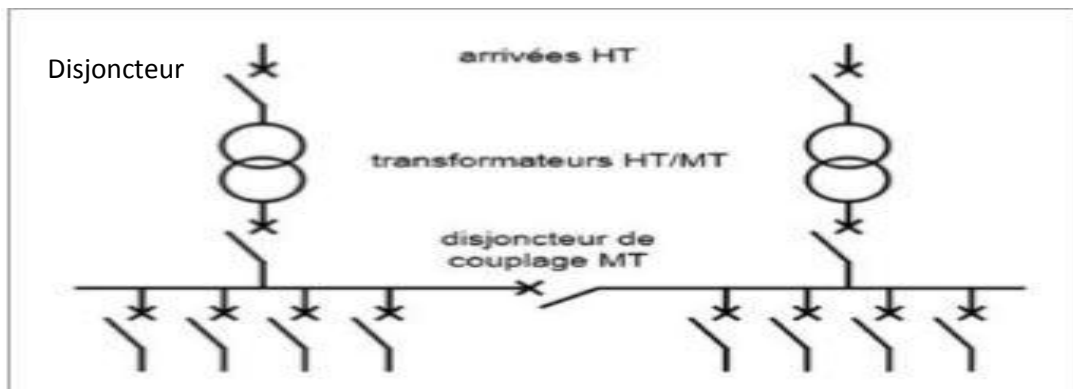


Figure I-5: Poste HT/HTA [3]

Les postes HTB/HTA en distribution publique :

Cet ouvrage est présent dans toute structure électrique d'un pays ; il est situé entre le réseau de répartition et le réseau de distribution HTA (ou MT). Sa fonction est d'assurer le passage de la HTB à la HTA. Son schéma type comporte deux arrivées HT, deux transformateurs

HT/HTA, et de 10 à 20 départs HTA. Ces départs alimentent des lignes en aérien et/ ou des câbles en souterrain.

I. 7.5. Les postes HTA/HTA (ou MT/MT):

Cet ouvrage peut réaliser deux fonctions :

- assurer la démultiplication des départs HTA en aval des postes HT/HTA. Dans ce cas, le poste ne comporte aucun transformateur. Il est constitué de deux arrivées HTA et de 8 à 12 départs HTA.
- assurer le passage entre deux niveaux HTA. De tels postes HTA/HTA intègrent des transformateurs. Ils sont nécessaires dans certains pays qui utilisent deux niveaux successifs de tension sur leur réseau HTA (On trouve à Constantine deux tensions HTA : 10KV et 30KV) [2].

I. 7.6. Les postes HTA/BT :

Le poste HTA/BT en distribution publique est localisé entre le réseau de distribution HTA et le réseau de distribution BT, cet ouvrage est pour: Assurer le passage de la HTA à la BT. Le schéma type de ce poste est évidemment beaucoup plus simple. Comparativement au poste HTA/HTA, en particulier, l'appareil de base HTA utilisé est l'interrupteur et non plus le disjoncteur. Ces postes sont constitués de quatre parties :

- L'équipement HTA pour le raccordement au réseau amont
- Le transformateur de distribution HTA/BT
- Le tableau des départs BT comme points de raccordement du réseau aval de distribution (en BT) [2].
- Et de plus en plus souvent une enveloppe extérieure préfabriquée (métallique ou de plus en plus souvent en béton) qui contient les éléments précédents [2].

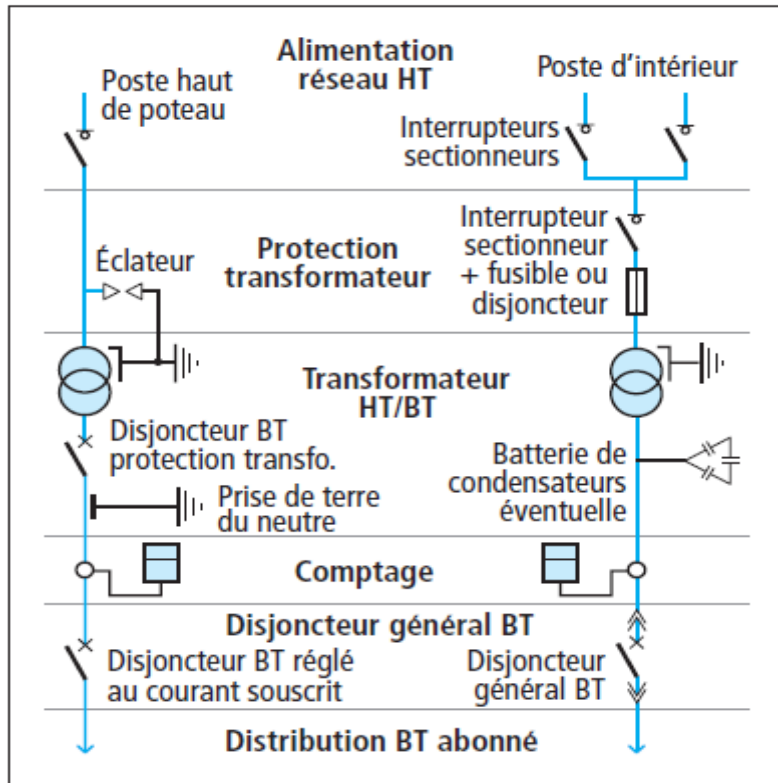


Figure I-6: Poste HTA/BT

- Les postes de livraison HTA/ BT :

On peut classer les postes HTA/BT en deux catégories.

- Les postes d'extérieur :
- Poste sur poteau:

Puissances 25 – 50 – 100 kVA. Poste économiques, de faible puissance ($\leq 160\text{kVA}$), Comprend un transformateur, un disjoncteur, éclateurs ou parafoudre, sectionneur. Ils sont raccordés en groupe et en aval. Ces postes peuvent être de type distribution publique, de livraison mais rarement mixte [4].

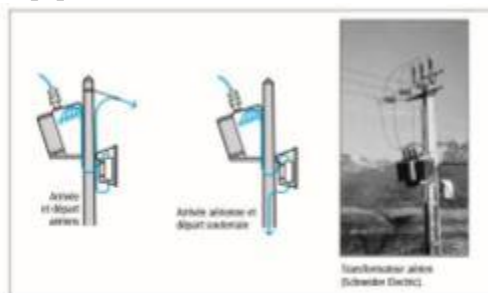


Figure I-7: Exemple de raccordement d'un poste sur poteau [4]

- Les postes d'intérieur :
- Postes ouverts maçonnés ou préfabriqués ;

- Postes en cellules préfabriquées métalliques. Les puissances sont comprises entre 100 et 1 250 kVA. Le comptage BT doit être remplacé par un comptage HT dès que l'installation dépasse 2000 A, ou s'il existe plusieurs transformateurs.
- Postes de livraison HTA à comptage BT ;
- Poste de livraison HTA à comptage HTA et sous stations éventuelles HTA/BT ;
- Répartition HTA et sous stations HTA/BT ou HTA/HTA ;
- Les puissances sont comprises entre 100 et 1 250 kVA.

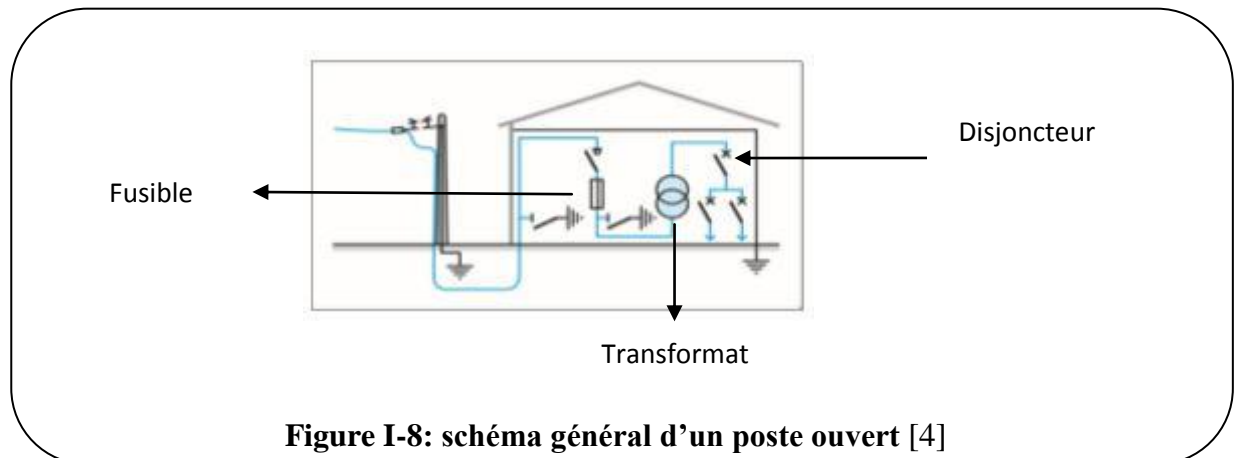


Figure I-8: schéma général d'un poste ouvert [4]

I. 8. Composition d'un départ HTA

Un départ HTA est issu d'une rame alimentée par un transformateur HT/HTA. Il est composé de ce qui suit :

I. 8.1. Cellule départ :

La cellule du départ HTA comprend une partie du jeu de barres alimentées par le transformateur HT, le disjoncteur qui est le moyen de coupure et de manœuvres, les TC, la protection qui est composée par des relais destinés à recevoir les réglages à afficher qui vont par la suite commander le fonctionnement du disjoncteur (ouverture et fermeture), donc fournir ou couper l'alimentation en énergie électrique. On trouve aussi des sectionneurs qui servent à isoler le disjoncteur (en hors tension) pour des éventuelles actions d'entretien.

I. 9. Les appareils de protection

I. 9.1. Les relais :

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent un ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température,...etc.) et les transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l'avance. Donc le rôle des relais de protection est de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que le court-circuit,

variation de tension. ...etc. Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, et détermine quels disjoncteurs à ouvrir et alimente les circuits de déclenchement. [4]

I. 9.1.1. Les types de relais : Les relais de protection électrique sont classés en 4 types :

- Les relais électromécaniques
- Les relais statique
- Les relais thermique
- Les relais numériques.

I. 9.2. Transformateur de Protection (TC) :

Il nécessite une bonne précision pour des courants importants et aura une limite de précision (zone de linéarité) plus élevée afin que les relais de protection détectent les seuils de protection qu'ils sont censés surveiller.

I. 9.3. Disjoncteurs :

L'auxiliaire basse tension et l'unité de contrôle sont dans un compartiment séparé de la partie HTA. Le disjoncteur, dont la fonction principale est la protection, assure également la fonction commande, et suivant son type d'installation le sectionnement (débrochable). Les disjoncteurs HTA sont presque toujours montés dans une cellule HTA, et selon la définition de la Commission électrotechnique internationale (C.E.I), un disjoncteur à HTA est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois [4] :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique,
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit.



Figure I-9: Compartiment disjoncteur

I. 10. Les appareils de coupure

I. 10.1. Le disjoncteur à réenclenchement automatique (recloser) :

Ce dispositif ouvre le circuit lors de l'apparition d'un défaut et le referme après un délai compris entre une fraction de seconde et quelques secondes, deux ou trois fois selon l'ajustement des dispositifs de commande interne. Si le défaut ne disparaît pas après ces tentatives, le disjoncteur ouvre le circuit en permanence et une équipe de réparation doit aller sur les lieux pour le réarmer [4].

I. 10.2. Interrupteur HTA:

Appareils qui peuvent couper les faibles courants capacitifs des lignes de transport ou les courants d'excitation des transformateurs, mais qui ne peuvent pas interrompre les courants de charges normaux.

I. 10.3. Sectionneurs:

Appareils qui n'ont aucun pouvoir de coupure, ils ne permettent d'ouvrir un circuit qu'en l'absence de tout courant. Ils sont utilisés pour isoler un ensemble de circuit, un appareil, une machine, une section de ligne aérienne ou de câble, afin de permettre au personnel d'exploitation d'y accéder sans danger.

I. 10.3.1. Sectionneurs de mise à la terre :

Interrupteurs de sécurité qui isolent un circuit et qui, grâce à leur mise à la terre, empêche l'apparition de toute tension sur une ligne pendant les réparations.

Chapitre 2

Liaison

ligne-câble

II.1. Introduction :

La protection de l'environnement se traduit depuis plusieurs années par l'augmentation du nombre de réseaux électriques enterrés.

Dans les villes modernes les câbles souterrains ont supplanté les lignes aériennes de transport d'énergie électrique. La détection et la localisation de défauts dans ces câbles revête un intérêt majeur pour la maintenance et la continuité de service. Diverses méthodes ont été développées dans ce but, parmi celles-ci on trouve la méthode des ondes mobiles qui exploite un principe de la physique basé sur la loi de propagation des ondes mobiles. Sur ce type de réseau, lorsqu'un dysfonctionnement survient en phase d'exploitation, procéder au remplacement complet de la liaison électrique endommagée peut s'avérer très long et coûteux. La méthode des ondes mobile trouve son intérêt et rend la détection et la localisation d'éventuel défaut aisé. Dans ce chapitre nous allons exploiter une des méthodes des ondes mobiles celle de Bewley.

II.2. Modélisation des lignes:

Les phénomènes transitoires doivent être analysés dans les étapes de conception des réseaux pour assurer leur optimisation et garantir leur robustesse. Optimisation implique opération proche des limites techniques et réduction des coûts. Robustesse sous-entend continuité de service, fiabilité, sécurité et qualité. Par ailleurs, la compréhension des phénomènes transitoires est essentielle dans les analyses menées quand surviennent des défaillances d'équipement ou des fonctionnements anormaux.

La méthode de diagnostic des lignes repose sur la théorie des lignes, qui permet de modéliser le comportement électrique des lignes de transmission.

Afin de mieux appréhender leur principe, nous commençons par exposer les bases de cette théorie pour un cas simple de ligne de transmission de longueur l .

Une ligne de transmission peut être modélisée par une succession de tronçons élémentaires (modèle dit à constantes réparties), chacun représenté par le schéma de la Figure (II.01), Où

L représente l'inductance linéique [$H.m^{-1}$], C la capacité linéique ($\mu F.m^{-1}$), R la résistance linéique [$\Omega.m^{-1}$] et G la conductance linéique [$S.m^{-1}$].

Les éléments R, L, C, G sont appelés paramètres primaires de la ligne. L'application des lois de Kirchhoff aboutit aux équations 2.1 et 2.2 qui conduisent aux équations des télégraphistes (cf.eq.2.3 et 2.4).

L'équation différentielle qui régit une ligne de transmission dont les paramètres ne varient pas en fonction de la fréquence, est obtenue en analysant une section infinitésimale de ligne Δx (figure II.01). La ligne est connectée aux deux nœuds k et m [9].

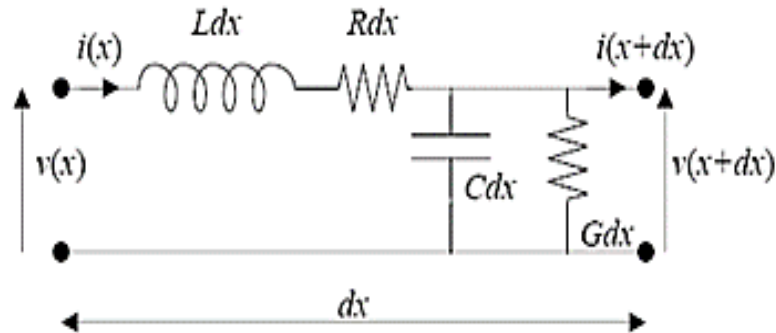


Figure II.1 : modèle à constante réparties

Les solutions de ces équations résultent de la combinaison d'une onde incidente (v^+ et i^+) et d'une onde réfléchie (v^- et i^-) se propageant à la vitesse V_g dans le câble.

$$\frac{dv(x,t)}{dx} = -R \cdot i(x,t) - L \frac{di(x,t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$\frac{di(x,t)}{dx} = -G \cdot v(x,t) - C \frac{dv(x,t)}{dt} \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2v(x,t)}{dx^2} = L \cdot C \frac{d^2v(x,t)}{dx^2} + (L \cdot C + R \cdot C) \frac{dv(x,t)}{dt} + R \cdot G \cdot v(x,t) \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2i(x,t)}{dx^2} = L \cdot C \frac{d^2i(x,t)}{dx^2} + (L \cdot C + R \cdot C) \frac{di(x,t)}{dt} + R \cdot G \cdot i(x,t) \quad (2.4)$$

Le courant et la tension, le long du câble peuvent être exprimés en régime harmonique sous cette forme :

$$V(x, w, t) = V(x, w) \cdot e^{j\omega t}$$

$$I(x, w, t) = i(x, w) \cdot e^{j\omega t}$$

w Étant la pulsation (rad/sec)

$$V(x, w) = V_{0+} e^{-\gamma x} + V_{0-} e^{\gamma x} = Z_c(w). I(x, w).$$

$$\gamma = \sqrt{(G + jCw).(R + jLw)} = \alpha + j\beta \text{ et } Z_c = \sqrt{\frac{R+jLw}{C+jCw}} \quad (2.5)$$

γ Représente la constante de propagation et Z_c l'impédance caractéristique de la ligne. Elle devient un imaginaire pure dans le cas d'une ligne sans pertes ($r = 0 \Omega/m$; $g = 0 S/m$) et la vitesse de propagation V_g devient égale à :

$$v_g = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

II.3 Résolution numérique

La solution à ces équations peut être obtenue par simulation numérique :

L'équation du télégraphiste régit l'évolution des impulsions électriques (phénomènes transitoires) dans les lignes de transmission :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = L.C \frac{d^2v}{dx^2} + (RC + LG) \frac{dv}{dt} + R.G.V \quad (3.1)$$

où :

$V =$ tension en x au temps t

$L =$ inductance en par unité de longueur

$C =$ capacité

$R =$ résistance

$G =$ admittance (inverse de la résistance d'isolement par unité de longueur), responsable de l'atténuation.

Si l'on néglige les pertes :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = L.C \frac{d^2v}{dt^2} + R.C \frac{dv}{dt} \quad (3.2)$$

L'ajout d'un terme comportant la dérivée première compliquera le traitement par les différences finies.

II.4 Méthode des ondes mobiles

II.4.1 Principe de la méthode

Pour étudier les problèmes dans les câbles souterrains par la méthode des ondes mobiles, on représente le câble par une certaine inductance L , et d'une certaine capacitance C .

La distribution graduelle de la tension peut être assimilée à une onde de tension se déplaçant d'une extrémité à l'autre avec un certain retard.

Ainsi ces ondes de tension appliquées au tronçon du câble et les ondes de courants qui leur sont associées se propagent le long du câble.

Ces ondes sont appelées « les ondes mobiles » [9].

II.4.2 Diagramme de Bewley

C'est la méthode classique pour déterminer la tension $u(x,t)$ à des points discrets le long d'une ligne ou d'un câble. Elle permet de donner la position et la direction de toute onde incidente, transmise ou réfléchi. Elle consiste à additionner toutes les tensions (incidentes et réfléchies) arrivées au point x durant l'intervalle $[0, t]$.

II.4.2.1 Lois physiques exploitées pour la détection et la localisation de défaut

La propagation d'une onde le long d'un milieu homogène ne donne lieu à une réflexion que si l'onde rencontre une discontinuité du milieu suite à un changement de sa caractéristique propre. Donc si on injecte une onde le long d'un câble ou d'une ligne, chaque changement de son impédance caractéristique donne lieu à une réflexion. Cette propriété a été exploitée par Bewley pour élaborer sa théorie sur les ondes mobiles.

Considérons une ligne de longueur L , avec les constantes réparties : r ; l ; g ; c

γ est la constante de propagation de la ligne de transmission,

E est l'amplitude de l'onde de tension au niveau de l'extrémité émettrice.

Alors l'amplitude et la phase de l'onde qu'il atteint une section distance x de l'extrémité d'envoi est E_x donné par :

$$E_x = E e^{-\gamma x} = E e^{-(\alpha + j\beta)x} = E e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x} \quad (4.1)$$

$e^{-\alpha x}$: Atténuation sur x (α coefficient d'atténuation [neper/km])

$e^{-j\beta x}$ Changement de phase sur x (β angle de phase [rad/ km])

K facteur d'atténuation de la ligne $k = e^{-\alpha L}$

Soit τ est le temps nécessaire à une onde de transiter d'une extrémité la ligne à l'autre et k le facteur d'atténuation correspondant.

Quand une onde incidente franchie une jonction entre deux ligne d'impédance $Z1$ et $Z2$ une partie α sera transmise le reste β , sera réfléchi.

en traversant la 2^{ème} ligne de coefficient d'atténuation k sa valeur sera réduite à $(k - \alpha)$

II.4.2.2 Construction du diagramme

- Position des extrémités de lignes proportionnelle au temps de transit de chaque ligne
- Les ondes ne peuvent que diminuer avec le temps
- L'historique des ondes est lisible sur le graphe
- La tension de l'onde à l'arrivée est celle de l'entrée multipliée par le coefficient d'atténuation.

Soient : une ligne de A vers B ouverte en B

- un échelon de tension unitaire 1
- τ temps de transit de la ligne et α le coefficient d'atténuation avec $k = e^{-\alpha}$
- à $t = \tau$ l'onde en B atténuée devient k
- à $t = 2\tau$ l'onde est en A atténuée devient k^2
- Le générateur tend à maintenir l'échelon envoi dans le réseau une tension $(-k^2)$
- à $t = 3\tau$ l'onde est sur B réfléchi sans changement de signe d'amplitude $-k^3$
- à $t = 4\tau$ en A $-k^4$ réfléchi avec changement de signe $+k^4$ est ainsi de suite

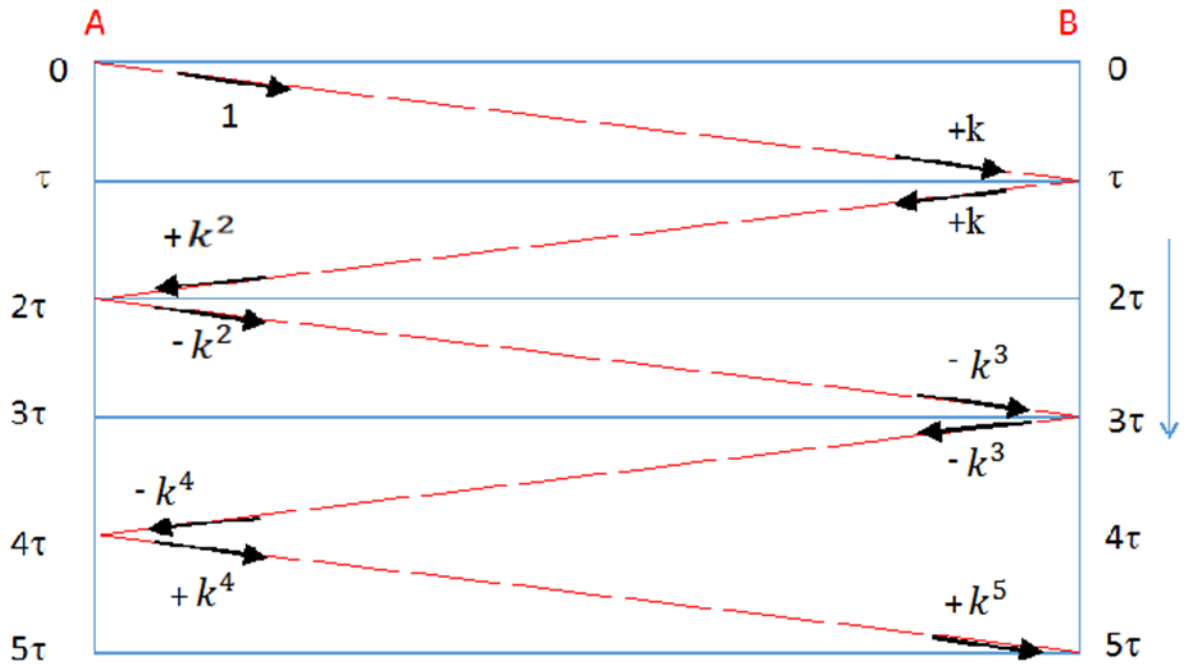


Figure II.2 : Diagramme de Bewley

A l'extrémité de ligne la tension est double de celle de l'entrée (réflexion totale sans changement de signe) ceci peut aussi être obtenu avec le coefficient d'atténuation ou par la somme des ondes incidente et réfléchie

- A tout instant la tension V_r en B est la somme de toutes les tensions arrivées en B, donc après n réflexion

$$V_r = 2(k - k^3 + k^5 - k^7 + \dots + k^{2n-1})$$

$$V_r = 2k \frac{1 - (-k^2)^n}{1 - (-k^2)} \quad (4.2)$$

Quand $t \rightarrow \infty$, $n \rightarrow \infty$ $V_r = \frac{2k}{1+k^2}$

$(1-k^2) > 0$ et $(1+k^2) > 2k$ donc $\frac{2k}{1+k^2} < 1$

Donc la tension reçue est plus faible que celle émise (à cause de la chute de tension en ligne dû au courant capacitif, la ligne étant ouverte)

Dès que k est proche de l'unité, la réduction est très faible

Exemple : $k = 0,9$ la valeur est de $\frac{2 \times 0,9}{1+0,9^2} = 0,9944$

La modélisation préliminaire du système triphasé en un circuit équivalent monophasé facilite l'étude des transitoires dans l'ensemble des trois phases.

Le développement de l'expression de la tension en tout point le long du câble dans le domaine temporel est aussi rendu facile.

Ce développement permet de prédire avec précision la fréquence d'oscillation ainsi que le niveau de tension, non seulement à l'extrémité du câble, mais également en tout point le long de celui-ci.

Le calcul de certains paramètres tel que : le niveau maximal des pics de tension, la fréquence des oscillations et la longueur critique du câble est rendu facile.

Pour notre cas d'étude le point de changement de l'impédance caractéristique représente un défaut dans le câble. On suppose un défaut entre les deux extrémités A et B, ce qui est traduit physiquement par un changement de l'impédance du câble. Le diagramme de Bewley devient alors le suivant :

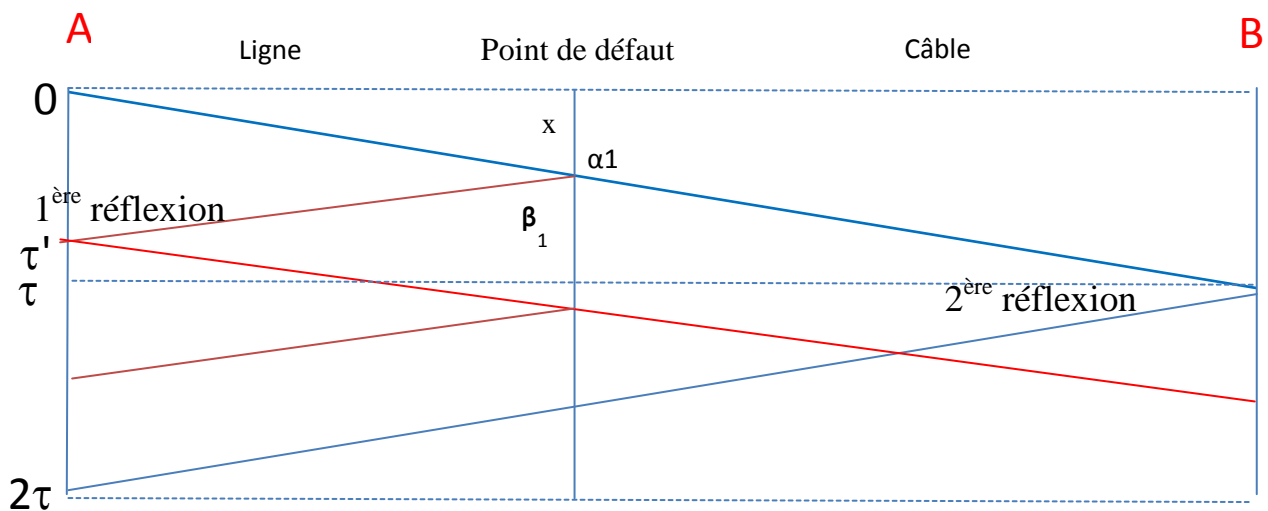


Figure II.3 : Exemple de déterminer le temps de défaut

☞ Analyse du diagramme :

Si à $t = 0$ on injecte une onde depuis l'extrémité A du câble d'impédance caractéristique connue Z_c , Soit τ le temps de propagation de l'onde à travers le câble, il est proportionnelle à la distance d séparant les deux extrémités A et B ainsi qu'à la vitesse de propagation dans le câble. Cette vitesse est elle-même dépendante de l'impédance caractéristique du câble Z_c .

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Dans le cas où ce câble est sain l'onde se propage sans réflexion jusqu'à l'extrémité B. Elle met un temps égale à deux τ pour rejoindre l'extrémité A.

$$\tau = \frac{d}{v}$$

Dans le cas où ce câble est endommagé l'onde se propageant de A vers B, subit une réflexion au point du défaut (toujours à cause du changement de l'impédance du défaut). La partie réfléchié rejoint l'extrémité A en un temps τ' inférieur à 2τ . Connaissant la longueur et la caractéristique du câble on peut avoir la certitude de la présence d'un défaut sur ce câble. La localisation de ce défaut devient ainsi simple par l'analyse du temps de réponse (τ' : temps que met la première onde à rejoindre l'extrémité d'injection)

$$2x = v\tau'$$

Cette méthode est exploitée dans plusieurs appareils de détection et de localisation de défauts dans les câbles souterrains.

III.4.3 Etude de la propagation d'onde mobile par la méthode de Bergeron

La méthode du diagramme Bergeron est une méthode graphique valable pour les modèles linéaires et non linéaires permet de calculer le délai d'un signal électromagnétique sur une ligne de transmission électrique.

Cette méthode, basée sur les équations différentielles est pratique avec des impédances de source et de charge non linéaires [9].

Soit une ligne de longueur L et d'impédance caractéristique $Z_0 = \sqrt{L'C'}$ alimentée par un générateur délivrant un échelon de tension V_0

En utilisant la méthode Bergeron, sur le graphique caractéristique IV, démarrer à partir du point de régime avant la transition, puis déplacer le long d'une ligne droite avec une pente de Z_0 (Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne) à la nouvelle caractéristique; puis déplacer le long des lignes avec $-Z_0$ ou $+Z_0$ pente jusqu'à ce que la nouvelle situation de régime est atteinte.

La valeur est considérée toujours la même à chaque réflexion, car la méthode Bergeron est utilisé uniquement pour premières réflexions.

II.4.4 Principe d'onde mobile par la méthode de la transforme de Laplace

La méthode de Laplace est une méthode numérique permettant la résolution des équations de différentielles du second ordre telles que les équations de propagation des ondes sonores et des ondes électromagnétiques (dont la lumière). La fonction d'onde inconnue est notée $u(x,y,z,t)$, t représentant le temps [9], [10]:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{d^2u}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (4.3)$$

Le nombre c représente la célérité ou vitesse de propagation de l'onde u .

En notation d'analyse vectorielle, en utilisant l'opérateur Laplacien Δ :

$\phi = u(x, y, z, t)$, fonction d'onde.

$$\Delta \phi = \frac{1}{c^2} \frac{d^2\phi}{dt^2}$$

Chapitre 3

Etude

de cas

III. 1.Exemple 1 :

Une longue ligne aérienne est reliée à une courte longueur de câble qui est ouvert à son extrémité.

Le rapport de l'impédance caractéristique de la ligne à celle du câble est de 12.

$$\text{On a } Z_c = \frac{1}{12} Z_l$$

Donc $Z_c < Z_l$,

Tout d'abord on va calculer le coefficient de réflexion et de transmission :

- De la ligne vers le câble :

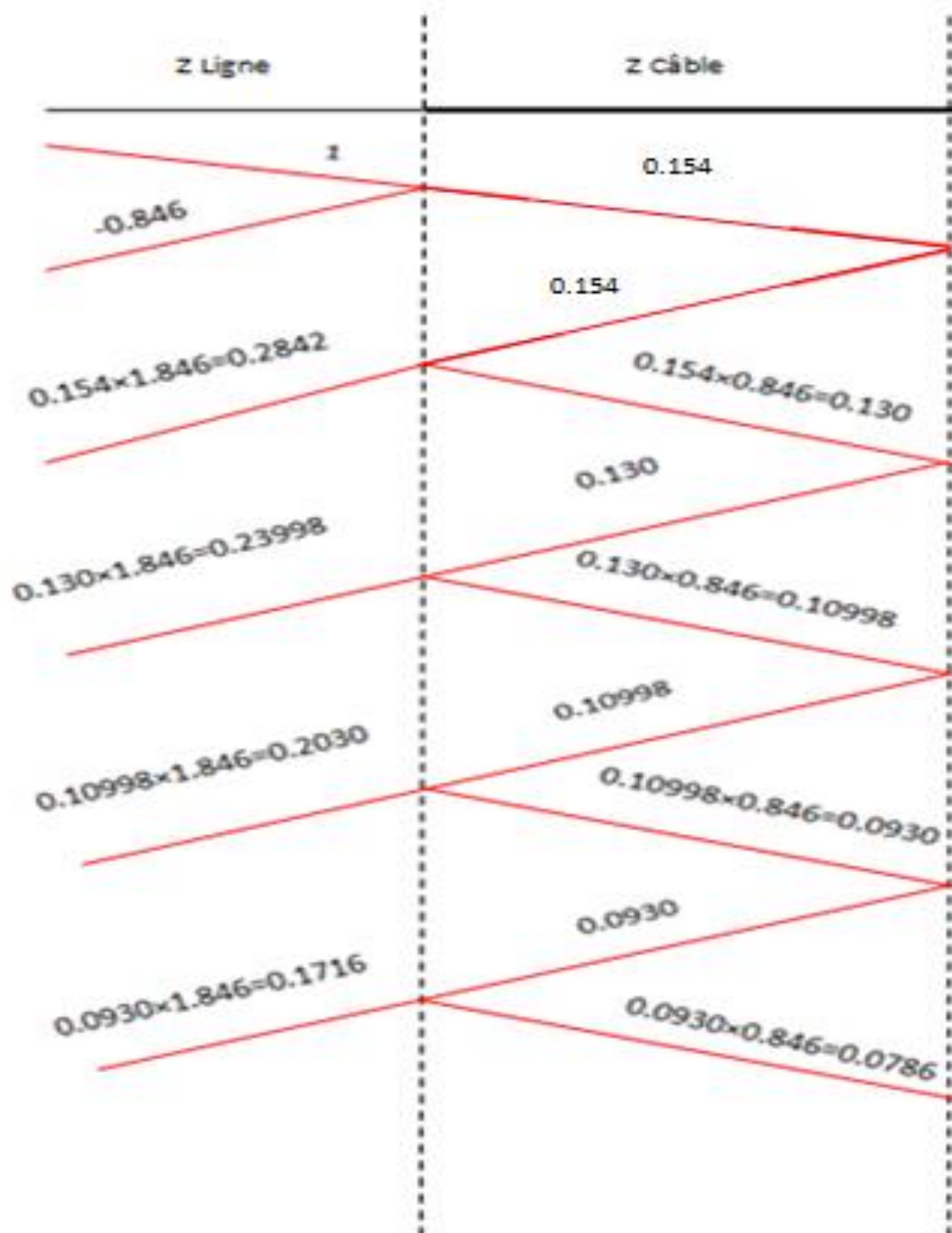
$$\text{➤ L'onde de réflexion : } \beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{11}{13} = -0.846$$

$$\text{➤ L'onde de transmission: } \alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{12})}{\frac{1}{12} + 1} = \frac{2}{13} = 0.154$$

- Du câble vers la ligne :

$$\text{➤ L'onde de réflexion: } \beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = \frac{11}{13} = 0.846$$

$$\text{➤ L'onde de transmission: } \alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2}{\frac{1}{12} + 1} = 1.846$$



$$- \beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{11}{13} = -0.846 = -84.6\%$$

Une grande partie du signal est réfléchié donc si une onde du soit a un impact de foudre ou au mouvement de disjoncteurs se propage sur la ligne elle n'impactera l'installation situé dans le poste relié par câble qu'avec la partie qui a effectivement été transmise a cette jonction ligne-câble.

$$- \alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{12})}{\frac{13}{12}} = \frac{2}{13} = 0.154 = 15.4\%$$

Donc pas plus de 15% de l'onde impactera effectivement les postes.

D'où l'intérêt de cette liaison dans la réduction de la pointe de l'onde de choc.

III.2.Exemple 2 :

Une longue ligne aérienne est reliée à une courte longueur de câble qui est ouvert à son extrémité.

Le rapport de l'impédance caractéristique de la ligne à celle du câble est de 8

On a $z_c = 1/8z_l$

Donc $z_c < z_l$,

Tout d'abord on va calculer le coefficient de réflexion et de transmission

- De la ligne vers le câble :

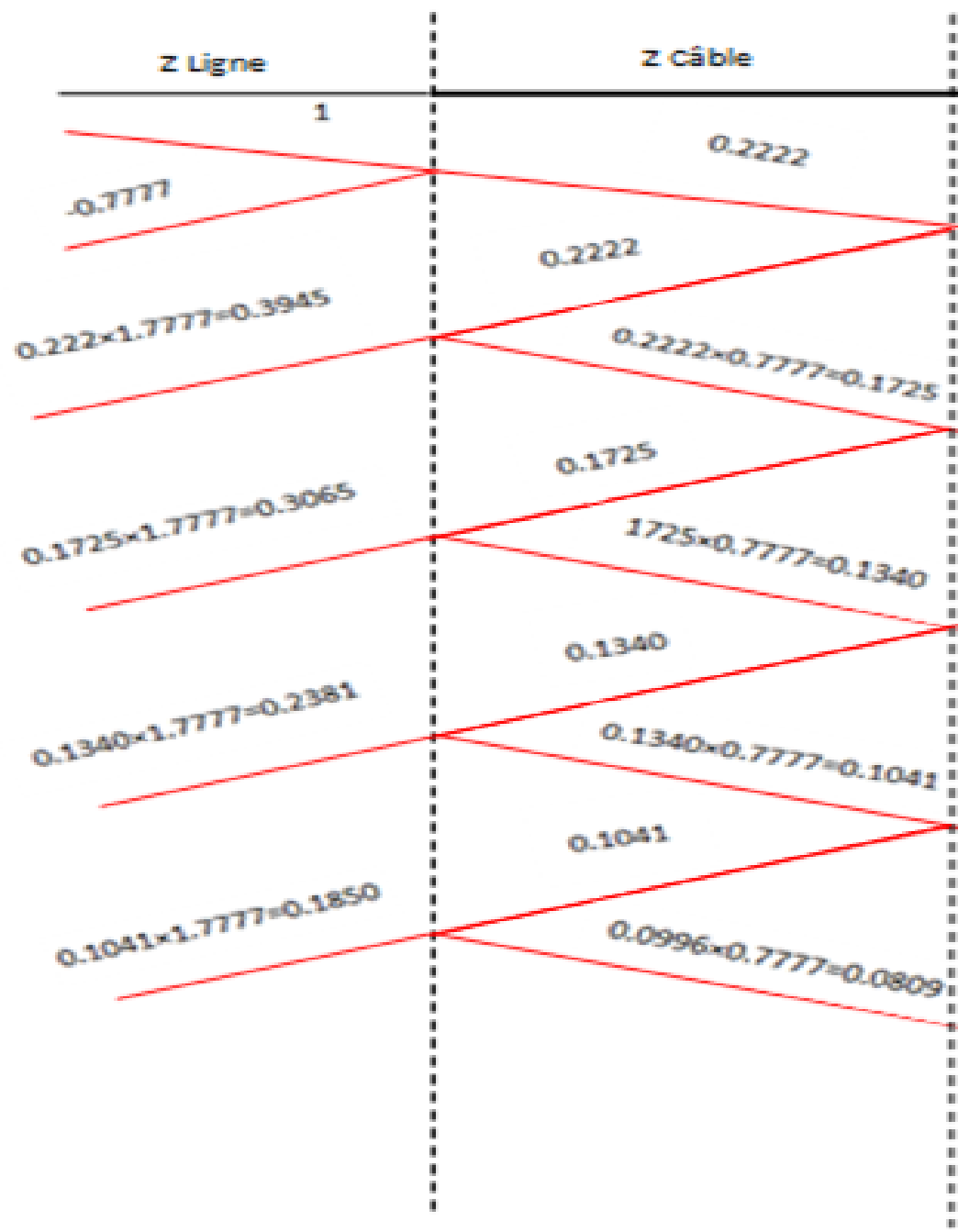
➤ L'onde de réflexion :
$$\beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{7}{9} = -0.7777$$

➤ L'onde de transmission:
$$\alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{\frac{2}{8}}{\frac{8}{8} + 1} = \frac{2}{9} = 0.2222$$

- Du câble vers la ligne :

➤ L'onde de réflexion:
$$\beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = \frac{\frac{7}{8}}{\frac{7}{8} + 1} = 0.7777$$

➤ L'onde de transmission:
$$\alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2}{\frac{7}{8} + 1} = \frac{2}{\frac{15}{8}} = 1.777$$



$$- \beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{7}{9} = -0.7777 = -77.77\%$$

Une grande partie du signal est réfléchié donc si une onde du soit a un impact de foudre ou au mouvement de disjoncteurs se propage sur la ligne elle n'impactera l'installation situé dans le poste relié par câble qu'avec la partie qui a effectivement été transmise a cette jonction ligne-câble.

$$- \alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{8})}{\frac{9}{8}} = \frac{2}{9} = 0.2222 = 22.22\%$$

Donc moins de 25% de l'onde impactera effectivement les postes.

D'où l'intérêt de cette liaison dans la réduction de la pointe de l'onde de choc.

III.3.Exemple 3 :

Une longue ligne aérienne est reliée a une courte longueur de câble qui est ouvert à son extrémité.

.

Le rapport de l'impédance caractéristique de la ligne à celle du câble est de 10

On a $z_c = -\frac{9}{11} z_l$

Donc $z_c < z_l$,

Tout d'abord on va calculer le coefficient de réflexion et de transmission

- De la ligne vers le câble :

➤ L'onde de réflexion : $\beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{9}{11} = -0.8181$

➤ L'onde de transmission: $\alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{10})}{\frac{11}{10}} = \frac{2}{11} = 0.1818$

- Du câble vers la ligne :

➤ L'onde de réflexion: $\beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = \frac{9}{11} = 0.8181$

➤ L'onde de transmission: $\alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{10})}{\frac{11}{10}} = \frac{2}{1 + \frac{1}{10}} = 1.8181$



$$- \beta = \frac{(Z_c - Z_l)}{(Z_c + Z_l)} = -\frac{9}{11} = -0.8181 = -81.81\%$$

Une grande partie du signal est réfléchié donc si une onde du soit a un impact de foudre ou au mouvement de disjoncteurs se propage sur la ligne elle n'impactera l'installation situé dans le poste relié par câble qu'avec la partie qui a effectivement été transmise a cette jonction ligne-câble.

$$- \alpha = \frac{2Z_c}{(Z_c + Z_l)} = \frac{2(\frac{1}{10})}{\frac{11}{10}} = \frac{2}{11} = 0.1818 = 18.18\%$$

Donc moins de 20% de l'onde impactera effectivement les postes.

D'où l'intérêt de cette liaison dans la réduction de la pointe de l'onde de choc.

Conclusion

Suite à l'étude des cas où l'on bien choisi les valeurs des impédances caractéristiques de la ligne et celle du câble, nous avons pu mettre en évidence l'effet de la liaison ligne-câble sur l'atténuation du pic d'onde transitoire. Un choix du rapport Z_L / Z_c de **10** a effectivement permis d'atténuer l'onde de choc, avec réflexion de près de 80 % de l'onde, seul 20% de cette onde impactera réellement le transformateur.

Pour ne pas générer l'effet inverse au niveau du transformateurs on doit tenir compte, lors du choix du câble, de l'impédance caractéristique du transformateur qui elle dépend essentiellement des grandeurs du transformateur. On effectue ainsi une adaptation d'impédance on fixant Z_C voisine de Z_T

Nous espérons dans la continuité de ce travail qu'une simulation sur une plateforme soit réalisée afin de vérifier l'impact réel de cette protection supplémentaire.

Bibliographie

[1] Mr.H.BENCHIKH EL HOUCIN, << les étages moyens tension >>, INSTITUTB DE FORMATION EN ELECTRICITE ET GAZ, CENTRE AIN MILA, GROUPE SONELGAZ AVRIL 2004.

[2] Mr.H.BENCHIKH EL HOUCIN, << Protection des réseaux HTA >>, INSTITUTB DE FORMATION EN ELECTRICITE ET GAZ, CENTRE AIN MILA, GROUPE SONELGAZ AVRIL 2011.

[3] Guide de conception des réseaux électriques industriels « les architectures du réseau » Schneider Electric T&D 6 883 427/A

[4] Mlle BEN DERRADJI selsabil. « calcul des protection d'un départ HTA (30 KV). » Thèse de master académique, Université de UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA, 10 JUIN 2014

[5] Cours théorie des ondes, Master II RETHT, CUAT, Dr FATMI, 2016.

[6] A literature review on use of Bewley's lattice diagram, Brajagopal Datta, Dr. Saibal Chatterjee IEEE 2012