



école polytechnique de thiès

gm. 0443

PROJET DE FIN D'ETUDES

titre ETUDE DU RESEAU DE DISTRI
BUTION ELECTRIQUE D'UNE
USINE DE PUISSANCE MOYENNE

auteur : Idrissa NIASS

génie : Mécanique

date : Mai 1979

PROJET
DE FIN D'ETUDE S

Sujet : ETUDE DU RESEAU DE
DISTRIBUTION ELECTRIQUE
D'UNE USINE DE PUISSANCE
MOYENNE : TAIBA



école polytechnique
de thiès

Auteur : Idrissa NIASS
Collaborateur : Saliou DIOP

Mai 1979

à la Jeunesse Sénégalaise

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent singulièrement à Mr. Harvey Gagné (professeur à l'école Polytechnique) qui a joué pleinement son rôle de directeur de projet. Je remercie également la Direction et le département - Electricité de l'usine de Taïba en particulier

Mr Gages

Mr -gondiaby

Mr Gow

dont la collaboration désintéressée dans la collecte des données a été utile.

SOMMAIRE

Ce texte présente une méthode de calcul de courant de court-circuit et de coordination d'appareillage de protection, développée par l'American National Standards Institute de ANSI C37-5-69 et ANSI C37-6-71.

Cette méthode conduit à des résultats satisfaisants jusqu'à quinze mille volts. Elle est basée sur le calcul d'impédance à séquence directe et inverse, quant à la séquence propre homopolaire elle se rapporte à une deuxième méthode plus élaborée.

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1: INTRODUCTION

Chapitre 2: VARIATION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

- I) Changement de la réactance des machines tournantes
- II) Différentes réactances des machines
- III) Courants symétriques et assymétriques
- IV) Sources du courant de court-circuit

Chapitre 3: PRINCIPES DU CALCUL DE COURANT DE COURT-CIRCUIT

- I) Hypothèses de base
- II) Appareils de protection et courant de court-circuit

Chapitre 4: METHODE DE CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

- I) Synthèse
- II) Collecte de données

Chapitre 5: IMPEDANCE DES LIGNES DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE

Impédance propre de séquence directe et inverse

Chapitre 6: CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES CABLES

- I) But
- II) Règles générales

v

Chapitre 7: CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT A L'AIDE DU SYSTEME PAR UNITE

- 1) Calcul du courant de base
- 2) calcul de l'impédance de base
- 3) Calcul de l'impédance en valeur par unité
- 4) Passage d'une base à une autre
- 5) Calcul de l'impédance équivalente
- 6) courant de coupure

Chapitre 8: COORDINATION DES APPAREILS DE PROTECTION

- I) Introduction
- II) Procédure pour établir la coordination

Chapitre 9: CALCUL DES IMPEDANCES EQUIVALENTES

- I) Ligne mine 1
- II) Ligne mine 2
- III) Réseau 4 kV

Chapitre 10: DETERMINATION DE LA VALEUR DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

- I) Niveau 90 kV
- II) Ligne mine 1
- III) Ligne mine 2
- IV) Calcul du courant de coupure

Chapitre 11: REPERES ESSENTIELS POUR REALISER LA COORDINATION

I) Ligne mine 1

II) Ligne mine 2

APPENDICE

Exemples de calculs

INTRODUCTION

Dans un réseau d'installation électrique les causes d'un court-circuit sont multiples.

- connexions mal faites
- animaux (rongeurs surtout)
- montée de tension
- vieillissement de l'isolation
- humidité
- Poussière
- contact entre conducteurs etc

Quand un court-circuit se produit les risques de dégâts deviennent importants car les arcs électriques peuvent engendrer un incendie et les contraintes mécaniques induites, détruire l'appareillage.

C'est pourquoi le but du calcul de courant de court-circuit est d'établir une valeur "potentielle" disponible de courant qui circulerait si un court-circuit advenait en un point spécifique du réseau.

Les résultats auxquels on aboutit peuvent servir :

- au bon choix
- à la coordination adéquate

des appareils de protection; car la distribution électrique d'une usine ou d'un édifice doit être établie pour alimenter les

charges en respectant deux critères de base :

- la fiabilité

On doit pouvoir isoler les courts-circuits avec le moins de perturbations possibles ainsi, certains arrêts prématurés seront évités et pour les procédés de fabrication qui l'exigent un haut degré de continuité de la fabrication sera assurée.

- la sécurité

Pour les travailleurs d'une usine et les occupants d'un édifice il n'y a pas de compromis à cette notion.

Description sommaire du projet :

- a) Choisir une usine ayant une capacité électrique installée d'au moins 2.000 KVA
- b) Établir le diagramme unifilaire (description complète de l'appareillage)
- c) Obtenir du manufacturier tous les détails pertinents à l'appareillage (impédances, courbes caractéristiques etc)
- d) À partir du diagramme unifilaire établir le diagramme d'impédance et calculer les courants de faute maximums en deux points
- e) Tracer les courbes de coordination qui donneraient la protection maximale au réseau
- f) Comparer les résultats obtenus avec la calibration utilisée dans l'usine et commenter
- g) Commenter la qualité de l'installation électrique de l'usine.

VARIATION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

I) Changement de la réactance des machines tournantes :

L'impédance d'une machine tournante, consistant en une réactance dont la valeur est complexe et varie avec le temps.

II) Différentes réactances des machines :

Pour des fins pratiques de calcul on considère en général, trois valeurs de réactance, correspondant chacune à un instant précis, pour les moteurs et les générateurs.

1^o Réactance sous-transitoire : X''_d

C'est la réactance apparente de la bobine du stator à l'instant où le court-circuit se produit. Elle détermine le courant qui circule durant les quelques cycles qui suivent immédiatement l'apparition du court-circuit.

2^o Réactance transitoire : X'_d

Elle détermine la circulation du courant qui succède celui de la période sous-transitoire. Elle devient effective après une demi-seconde.

ou plus (dépendant de la constitution de la machine) après l'apparition du court-circuit

3: Réactance synchrone : X_d

C'est la réactance qui détermine le courant qui circule durant la période d'état stable. Elle ne représente pas une donnée pertinente pour le calcul de courant de court-circuit.

III) Courants symétrique et asymétrique :

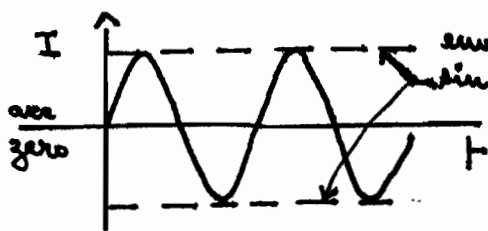


Fig 1: courant symétrique

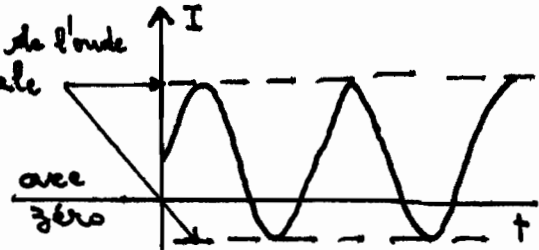


Fig 2: courant asymétrique

Les adjectifs symétrique et asymétrique précisent la position de l'enveloppe de l'onde sinusoïdale du courant alternatif par rapport à l'axe d'ordonnée zéro

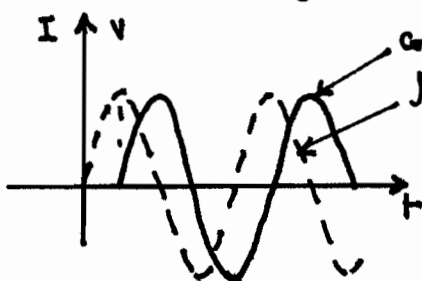


Fig 3:



Fig 4:

a) Courant de court-circuit symétrique: (fig 3)

Si un court-circuit se produit dans un circuit principalement réactif (comportant un rapport élevé de la réactance par rapport à la résistance) au moment où l'onde de tension est à son amplitude maximale, le courant de court-circuit associé débutera à zéro et décrira une onde sinusoïdale qui sera symétrique par rapport à l'axe d'ordonnée zéro. On appelle ce courant, le courant de court-circuit symétrique.

b) Courant de court-circuit asymétrique: (fig 4)

Si le court-circuit survient à un instant où les conditions diffèrent avec celles citées ci-dessus, l'onde décrite par le courant de court-circuit engendré ne sera pas symétrique.

On parlera ainsi de courant de court-circuit asymétrique.

c) Amortissement de l'onde asymétrique: (fig 5)

Dans un circuit réel contenant à la fois une résistance (R) et une réactance (X) l'onde asymétrique qui y apparaît redevient symétrique après plusieurs cycles.

Le rapport X/R détermine la vitesse d'amortissement de l'asymétrie. Si ce rapport est élevé, plusieurs cycles asymétriques apparaîtront avant l'amortissement complet. Par contre si le rapport est faible il suffira de peu de cycles (deux à trois) pour retrouver les conditions de symétrie.

d) Composantes du courant asymétrique : (Fig 5)

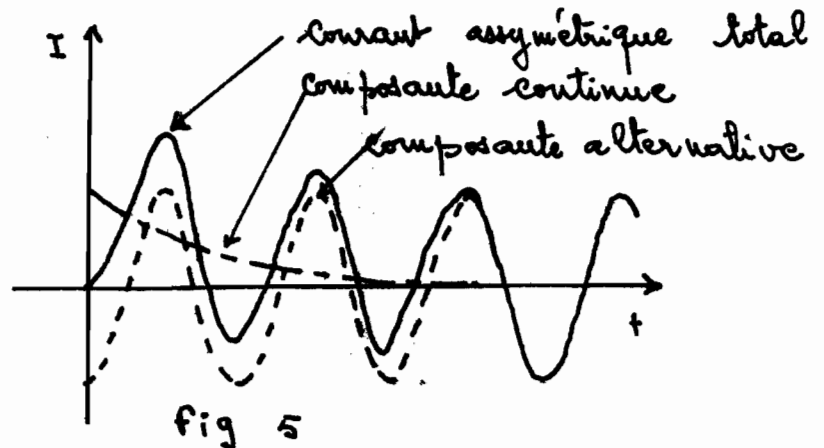


Fig 5

L'analyse du courant alternatif asymétrique est très complexe, par conséquent pour des fins pratiques on subdivise celui-ci en deux composantes qui circulerait simultanément :

- une composante de courant alternatif symétrique
- une composante de courant continu

IV Sources du courant de court-circuit :

En réalité plusieurs sources contribuent à la formation du courant total de court-circuit.

Parmi celles-ci on peut citer :

- les générateurs (ceux de la source d'alimentation et ceux du réseau considéré)
- les moteurs synchrones
- les moteurs asynchrones

Remarque : La contribution des moteurs asynchrones s'arrête complètement après quelques cycles

RéF: 1

PRINCIPES DU CALCUL DE COURANT DE COURT-CIRCUIT

I) Hypothèses de base

Le principe de base est de simuler la condition de fonctionnement la plus critique, c'est à dire celle qui fournirait la valeur la plus élevée de courant de court-circuit;

Ainsi on est amené à considérer :

- a) Un apport maximal en courant de la source d'alimentation de l'usine ou de l'édifice
- b) tous les générateurs existants, en fonctionnement
- c) Une charge connectée maximale (tous les moteurs en fonctionnement)
- d) Les disjoncteurs, interrupteurs, sectionneurs et contacteurs fermés
- e) Un court-circuit franc entre trois phases du réseau considéré

Sous ces conditions le courant de court-circuit est maximal durant son premier cycle à cause du phénomène d'asymétrie et du fait de la contribution maximale des sources. Parallèlement, les contraintes mécaniques appliquées aux éléments du réseau et qui varient en fonction du carré du courant sont maximales. Par conséquent, les appareils qui supporteraient ces sévères conditions de fonctionnement

le feront pour toute autre qui sera nécessairement plus favorable.

II) Appareils de protection et courant de court-circuit

Notant donné que le courant de court-circuit varie en fonction du temps, il y a lieu de faire les calculs pour deux états :

- le courant de court-circuit momentané asymétrique
- le courant de coupure

1° Appareillage à basse tension :

$$U < 600 \text{ volts}$$

On peut citer

- les disjoncteurs de puissance
- les centres de commande des moteurs
- les démarreurs
- les fusibles
- les jeux de barres omnibus

Ces éléments sont vendus pour des valeurs standardisées de courant symétrique. Toutefois ils sont testés sur une base de courant asymétrique conformément aux normes en vigueur.

Puisque ces éléments sont à opération rapide (ouverture des contacts durant les deux premiers cycles) leur valeur standard est calibrée sur le courant asymétrique maximal du premier cycle, et par conséquent dans les calculs on doit utiliser la réactance sous transitoire X''_d pour toutes les sources dans l'équation [(1) page 12]

Remarque : Dans le cas de ces appareils on n'utilise un facteur de multiplication dans les calculs que pour la coordination.

2: Appareillage à haute tension :

$$U > 600 \text{ volts}$$

La procédure est ici basée sur les codes américains ANSI 37-5-1969 et ANSI 37-6-1971 ainsi, pour le cas présent les éléments ont deux bases de calibrage

- le courant de court-circuit asymétrique
- le courant de coupure

a) Le courant de court-circuit asymétrique permet d'établir le calibrage ^{MAXIMUM} des contraintes mécaniques admissibles qui découlent du premier demi-cycle du courant asymétrique. On utilise donc la valeur de réactance sous-transitoire X''_d dans les calculs et ainsi

- l'équation [(1) page 12] donne la valeur de la composante symétrique du courant
- un facteur de multiplication approprié (tableau "5" page 69) permet d'obtenir la composante asymétrique

b) Le courant de coupure définit la capacité d'interruption, au courant de court-circuit qui circule après quelques cycles.

Dans les calculs on utilisera

- la réactance sous-transitoire X''_d des générateurs

Synchrones

- La réactance transitoire X'_d pour les moteurs synchrones
- quant aux moteurs asynchrones on néglige leur apport

Le courant de court-circuit s'exprime souvent en ampères ou en méga-volt-ampères

Ref : 1



METHODE DE CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

I Synthèse

1° Schémas unifilaire (dessin 1)

Définition: Le diagramme construit à l'aide d'une ligne simple et des symboles, le circuit électrique et les composants d'un réseau donné.

Le schéma comporte ces données :

- la puissance et la tension nominales des générateurs
- la puissance de court-circuit de la source d'alimentation ainsi que le pouvoir de coupure du disjoncteur d'entrée
- la puissance, les tensions primaire et secondaire et le pourcentage d'impédance des transformateurs
- la puissance et la tension nominales des charges connectées

2° Le circuit équivalent: (dessin 2)

C'est un circuit préliminaire donnant l'impédance par unité, des appareils, exprimés sur une base commune.

On ajoute à celui-ci une barre de référence imaginaire à partir de laquelle toutes les sources de courant de court-circuit vont émaner. Souvent cette ligne de référence représente la barre zéro-volt.

3° Calcul de la composante symétrique du courant de court-circuit :

Après avoir réduit le circuit équivalent en une seule impédance équivalente on applique la loi d'Ohm

$$I_m = \frac{E}{Z} \quad (\text{par unité}) \quad (1)$$

$$I_m = I_B \times \frac{E}{Z} \quad (\text{ampères}) \quad (2)$$

I_m = courant symétrique

$E = 1,0$ = tension unitaire

Z = impédance équivalente par unité

Remarque : Cette étape de la synthèse peut se réaliser de façon économique par programmation

4° Calcul du courant de court-circuit asymétrique :

$$I_{as} = I_m \times F_m \quad (3)$$

I_{as} = courant asymétrique

I_m = courant symétrique

F_m = facteur de multiplication approprié (tab 5)

II) Collecte de données :

Il s'agit de recueillir les informations pertinentes afin de pouvoir transformer le schéma unifilaire en diagramme équivalent à impédance

1° Source d'alimentation (Sénélec)

Relever les puissances maximale et minimale de court-circuit disponibles à l'entrée de l'usine ou

de l'édifice. À défaut de ces données on utilisera le pouvoir de coupure du disjoncteur à l'entrée (en kilo-volt-ampères ou en méga-volt-ampères)

2° générateurs :

Relever : a) la puissance nominale
 b) le facteur de puissance
 c) les réactances transitoires et sous-transitoires si les données en c) ne sont pas disponibles ou relève
 d) le type de la machine (Rotor bobiné ou à pôles saillants)
 e) la vitesse nominale
 ainsi d); a) et le (tableau 1) déterminent les réactances

3° Moteurs à induction et moteurs synchrones :

A) moteurs de tension moyenne : [2,4 à 4,16 kV]

- L'impédance de chaque moteur devra être relevée.
 - Si plusieurs moteurs ont la même puissance et la même impédance, on peut les regrouper en un seul moteur équivalent

- Détermination de l'impédance sous-transitoire : X''_d
 (on dispose ici de trois alternatives)

a) relever la lettre code (tableau "4")

La lettre code correspond à une classification, pour chaque lettre on a la valeur du rapport de la puissance en KVA sur la puissance en H.P à rotor bloqué; l'inverse de cette valeur représente X''_d

b) relever : - la puissance nominale
 - la vitesse nominale

14

- le facteur de puissance (moteurs synchrones seulement)
ces données et le tableau (1) déterminent les réactances transitoires et celles sous-transitoires.

c) relever : - le courant de pleine charge $I_{p.c}$
- le courant de démarrage I_d

$$X''_d = \frac{I_{p.c}}{I_d}$$

X''_d = réactance sous-transitoire

B) Moteurs à basse tension : $U < 600$ volts

Trois cas se présentent

- On peut considérer un moteur équivalent qui représente la puissance des charges connectées et ainsi approximer l'impédance équivalente (tableau 1)
- Dans le domaine de l'industrie on peut considérer que la charge connectée est égale à la puissance nominale du transformateur qui l'alimente
- Sur le plan commercial on peut considérer que la charge connectée est égale à la moitié de la puissance nominale du transformateur qui l'alimente, l'autre moitié étant affectée à l'éclairage qui ne participe aux sources de courant de court-circuit

4. Réactances :

Certaines installations comportent des réactances dont le but est de limiter les courants de court-circuit entre les jeux de barres omnibus; alors relever : - le pourcentage de chute de tension

- le courant continu nominal
- l'impédance par phase

5^e Les transformateurs :

- Relever :
- la tension primaire
 - la tension secondaire
 - la connexion du bobinage en étoile ou en triangle
 - le pourcentage d'impédance si elle n'est pas disponible, consulter (tableau 2^o)
 - la puissance nominale

6^e Les câbles et les lignes aériennes :

a) Les câbles

Un réseau de distribution électrique comporte des :

- câbles mono et triphasés
- jeux de barres omnibus
- fils

qui ajoutent une impédance appréciable dans le circuit et où la nécessité de relever

- la longueur
- le type de câble (mono, triphasé etc)
- la tension
- le genre et le calibre du conducteur
- la section (montrant la constitution du câble)

b) Les lignes aériennes

- relever :
- la tension
 - la longueur et l'espacement des conducteurs
 - la disposition
 - le matériau
 - le calibre

7: Éléments du réseau qui ne contribuent pas au courant de court-circuit :

- a) la charge d'éclairage
- b) les fours
- c) les redresseurs
- d) les condensateurs
- e) les disjoncteurs (sauf en basse tension avec fortes charges en courant de court-circuit)
- f) les fusibles, interrupteurs, sectionneurs et contacteurs

8: Les disjoncteurs :

valeurs associées aux disjoncteurs

a) courant continu nominal : - c'est le courant que l'appareil peut supporter continuellement sans dommage
- au bâti du disjoncteur
- à la bobine de déclenchement

b) courant momentané asymétrique
Il représente la limite de la résistance mécanique de l'appareil.

c) courant de coupure
Il représente la limite supérieure de la capacité de refroidir l'arc électrique et d'isoler le passage du courant de court-circuit. L'arc électrique provient de l'ouverture ou de la fermeture des contacts du disjoncteur, il peut atteindre des milliers de degrés.

Remarque :

Pour les disjoncteurs de tension moyenne on doit calculer séparément les courants :

- momentané asymétrique
- de coupure

Pour les disjoncteurs à basse tension

- le même calcul représente ces deux valeurs

Ref: 1

IMPEDANCE DES LIGNES DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE

Impédance propre de séquence directe et inverse :

c'est une impédance équivalente en ce sens qu'elle
tient compte des inductances mutuelles entre
les phases. Elle s'exprime en Ohm/km/phase

$$Z_{11} = R_c + j \left(0,1447 \frac{F}{50} \log_{10} \frac{2S}{d} + X_i \right) \quad (5)$$

$$Z_{11} = R_c + j \left(0,1447 \frac{F}{50} \log_{10} \frac{S}{r_{gm}} \right) \quad (6)$$

a) Réactance propre interne au conducteur
Elle s'exprime en Ohm/km/phase (en général
 X_i et r_{gm} sont tabulés par le constructeur)

$$X_i = 0,1447 \frac{F}{50} \log_{10} \frac{d}{2r_{gm}} \quad (7)$$

à défaut de mieux $X_i \cong 0,0157 \frac{F}{50}$ (8)

b) Résistance au conducteur (Ohm/km/phase)

$$R_c = \frac{\rho l}{A} \quad (9)$$

F = fréquence

ρ = résistance spécifique ordinaire

l = longueur en km, m

A = section

d = diamètre extérieur du conducteur

La résistance augmente avec la température

$$R_2 = R_0 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (10)$$

R_2 = résistance à la température t_2

R_0 = " " " " " " t_1

α = coefficient de température par $^{\circ}\text{C}$

métal	ρ en $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$	α par $^{\circ}\text{C}$
Cuivre	0,01724	0,0043
aluminium	0,0290	0,0040
fer pur	0,1000	0,0066
acier	0,100 à 0,250	0,0050

Remarque : pour les conducteurs torsionnés

$$A \cdot = 0,785 F d^2 \quad (13)$$

F = facteur de foisonnement $\approx 75\%$,
 d = diamètre extérieur de la phase torsionnée

c) Rayon géométrique moyen (m ou cm)

$$r_{gm} = 0,3894 d \quad (11)$$

cette équation est propre aux conducteurs lisses non torsionnés

d = diamètre extérieur du conducteur

d) espacement équivalent des conducteurs (m, cm)

$$S = \sqrt[3]{S_{ab} \cdot S_{ac} \cdot S_{bc}} \quad (12)$$

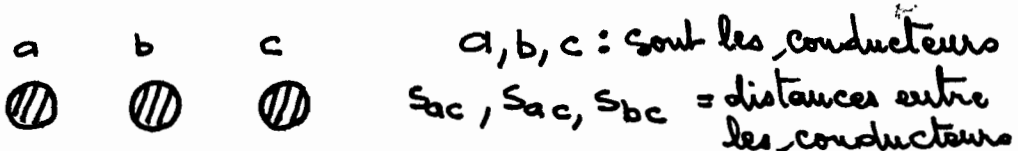


Fig 6 : exemple de disposition de conducteurs

Réf : 3

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES CABLES

I) But:

détermination des constantes électriques des câbles, nécessaires le plus souvent dans le calcul de courant de court-circuit

II) Règles générales:

Indifféremment de la complexité de l'inductance mutuelle entre les différentes composantes de chaque phase, la méthode des composantes symétriques peut à toutes fins pratiques être appliquée quand les phases sont symétriques

1° géométrie des câbles:

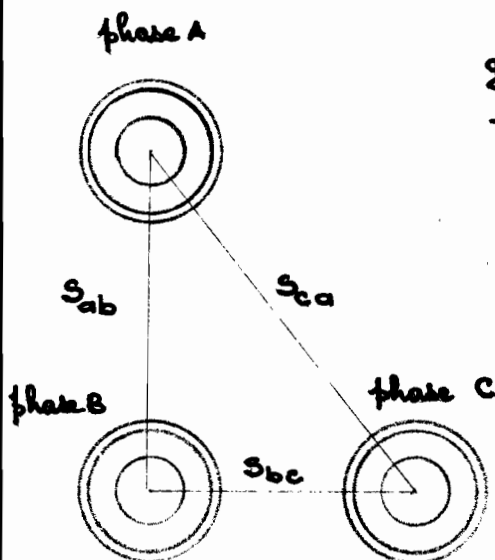


fig 9: câbles simples asymétriques

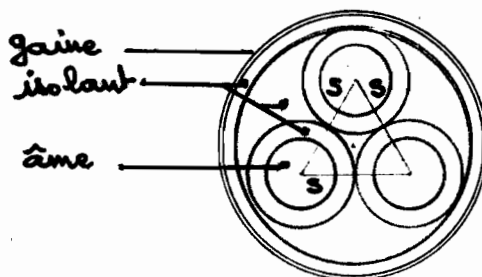


fig 7: câble triphasé

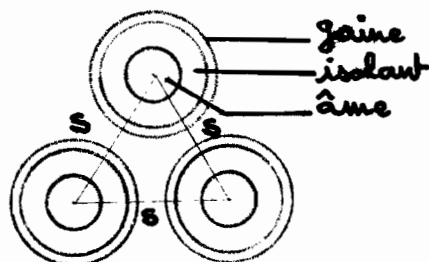


fig 8: câbles simples symétriques

L'espace séparant la gaine et le conducteur d'un câble est un facteur important pour la détermination de la réactance du câble.

2^o Rayon géométrique moyen: GMR_{1c}
 Une composante de la réactance d'un conducteur est calculée normalement en évaluant l'ensemble des liaisons de flux à l'intérieur et à l'extérieur d'un cylindre de rayon 30,5 cm. Pour un conducteur solide une partie du flux de ligne circule à l'intérieur du conducteur et contribue à l'ensemble des liaisons de flux, bien que celles-ci ne concernent qu'une portion du courant total traversant le conducteur.

Si on substitue ce conducteur avec un autre tubulaire dont l'épaisseur est infime, le flux sera nécessairement à l'extérieur du tube. Pour qu'un conducteur tubulaire théorique soit sur le plan inductif équivalent à un conducteur solide, il doit avoir un rayon plus petit, de sorte que les liaisons de flux présentes à l'intérieur du conducteur solide et absentes à l'intérieur du tube soient remplacées par des liaisons additionnelles entre la surface du tube et le cylindre limitrophe de rayon 30,5 cm.

Un conducteur solide de rayon $d/2$ peut ainsi être remplacé par un conducteur tubulaire théorique de rayon $0,779 d/2$

Ce rayon équivalent est appelé le rayon géométrique moyen

3^e distance géométrique moyenne : GMD_{3c}

L'ensemble des liaisons de flux d'un conducteur peut être divisé en deux composantes, l'une s'étendant à l'intérieur du cylindre limitrophe de rayon 30,5 cm, et l'autre à l'extérieur de ce dernier jusqu'au chemin du courant de fuite; au delà duquel il n'y a aucune liaison de flux. Les liaisons de flux par unité de courant de phase entre le cylindre limitrophe et le chemin du courant de fuite sont fonction de la distance séparant le conducteur du parcours de son courant de fuite.

Ce parcours est souvent matérialisé par un groupe de fils parallèles de telle sorte qu'une moyenne géométrique de toutes les distances séparant le conducteur de chacun des fils de courant de fuite, peut être utilisée dans les calculs. Cette moyenne est appelée la distance moyenne géométrique

Remarque :

Les indices $3c$, (pour GMD_{3c}) et $1c$ (pour GMR_{1c}) indiquent le nombre de phases

a) disposition symétrique :

fig 7 et fig 8

$$GMD_{3c} = S \quad (14)$$

b) disposition asymétrique

$$GMD_{3c} = \sqrt[3]{S_{ab} \cdot S_{bc} \cdot S_{ca}} \quad (15)$$

4° Impédance propre des cables à fréquence directe et inverse : Ohm/km/phase

$$Z_{11} = R_c + j \frac{0,2794}{1,6091} \times \frac{f}{60} \times \log_{10} \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \quad (16)$$

$$Z_{11} = R_c + j 0,1736 \times \frac{f}{60} \times \log_{10} \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \quad (17)$$

Re'F : 4

CALCUL DE COURANT DE COURT-CIRCUIT A L'AIDE DU SYSTEME PAR UNITE

Etant donné que le circuit d'une installation électrique comporte différents niveaux de tension et de puissance, il s'avère nécessaire d'établir une base commune.

On général on choisit arbitrairement deux valeurs de base

- la puissance de base : P_B (en KVA)
elle peut être exprimée en KVA et est le plus souvent la puissance la plus élevée au réseau

Ex : Dans cette étude $P_B = 10\ 000$ KVA

- la tension de base : U_B (en volts)
elle correspond au niveau de tension entre phases au point à étudier et peut être exprimé en volts ou en kilo volts

1° Calcul du courant de base

a) en monophasé :

$$I_B = \frac{P_B}{U_B} \times 1000 \quad (18)$$

b) en triphasé :

$$I_B = \frac{P_B}{\sqrt{3} \times U_B} \times 1000 \quad (19)$$

Remarque : Pour toutes les formules P_B sera en KVA et U_B en volts

2° Calcul de l'impédance de base :

$$\Omega_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} \times I_B} \quad (20)$$

$$\Omega_B = \frac{U_B^2}{P_B \times 1000} \quad (21)$$

Remarque : U_B représente dans ce cas la tension au câble ou de la ligne aérienne considérée.

3° Calcul de l'impédance en valeur par unité :

a) Source d'alimentation

$$X = X_S \times \frac{P_B}{P_{c.s}} \quad (22)$$

$X_S = 1,0$ (Valeur proposée par "General Electric Co")
= l'impédance de la source d'alimentation

$P_{c.s}$ = pouvoir de coupure du disjoncteur d'entrée

X = impédance équivalente par unité

b) transformateur

$$X = \frac{Z_T}{100} \times \frac{P_B}{P_T} \quad (23)$$

Z_T = pourcentage d'impédance selon la base de puissance nominale du transformateur

P_T = puissance nominale du transformateur

c) moteurs :

$$X'' = X''_d \times \frac{P_B}{P_m} \times \left(\frac{U_m}{U_B} \right)^2 \quad (24)$$

X'' : impédance sous transitoire par unité

X''_d : impédance sous transitoire en ohm par unité selon la base du moteur

P_m = puissance nominale du moteur

U_m : tension nominale du moteur

$$X' = X'_d \times \frac{P_B}{P_m} \times \left(\frac{U_m}{U_B} \right)^2 \quad (25)$$

X'_d = impédance ~~de~~ transitoire par unité selon la base du moteur

d) Cables et lignes aériennes

$$X = \frac{Z_{11}}{\Omega_B} \quad (26)$$

Z_{11} = impédance propre de séquence directe et inverse en ohm

Ω_B = impédance de base en ohm

4° Passage d'une base à une autre

$$X_n = X \times \left(\frac{U_B}{U_{B.m}} \right)^2 \times \frac{P_{B.m}}{P_B} \quad (27)$$

X_n = impédance par unité dans la nouvelle base

$U_{B.m}$ = tension de la nouvelle base

$P_{B.m}$ = puissance de la nouvelle base

les autres valeurs se rapportent à l'ancienne base

5^o Calcul de l'impédance équivalente du diagramme équivalent

soit un circuit comportant deux impédances X_1 et X_2 et qu'on cherche son impédance équivalente X

a) soit X_1 et X_2 en série

$$X = X_1 + X_2 \quad (28)$$

b) soit X_1 et X_2 en parallèle

$$1/X = 1/X_1 + 1/X_2 \quad (29)$$

6^o courant de coupure : I_c

$$I_c = I_B \times \frac{E}{Z'} \quad (30)$$

Z' : impédance équivalente par unité de réseau avec ses réactances transitoires

I_B : courant de base

$E = 1,0$: tension unitaire

I_c : courant de coupure

Réf : 1

COORDINATION

DES APPAREILS DE PROTECTION

I INTRODUCTION :

Le réseau électrique le plus simple comprend au moins un disjoncteur ou d'autres appareils de protection entre un point de court-circuit et la source de puissance. Pour tenter le mieux possible d'isoler la perturbation, les appareils de protection doivent fonctionner en ordre de priorité à tel enseigne que l'appareil le plus proche du court-circuit, du côté de la source de puissance, ait la plus forte chance de fonctionner le premier; en suite au tour du pivotant au cas d'un aléa de fonctionnement pour le précédent et ainsi de suite. Pour accomplir cet objectif les appareils sont l'objet d'une sélection (pour les fusibles) ou dotés d'ajustements qui leur permettent de distinguer le courant de court-circuit de la surcharge admissible. Ils doivent aussi fonctionner dans un délai minimal tout en respectant l'ordre de priorité. Le respect de ces deux exigences réduit au minimum la destruction de l'équipement et la perturbation dans la production due à une perte d'énergie durant les coupures causées par un court-circuit.

II PROCEDURE POUR ETABLIR LA COORDINATION

Elle consiste à tracer les courbes caractéristiques du temps de réponse des appareils en fonction du courant sur une feuille log-log de coordination. La coordination est réalisée en superposant les courbes caractéristiques de tous les appareils par essai et erreur et sans recourrement, tout en respectant l'ordre et les limites de fonctionnement.

A) Courbes caractéristiques :

Elles représentent les résultats de tests effectués pour déterminer le temps de réponse des appareils de protection. Elles sont établies par les manufacturiers et sont directement opérationnelles.

B) Sélection du circuit à coordonner :

En général, c'est le circuit qui comporte les charges les plus importantes. Pour la sélection on commence par les extrémités du réseau et on remonte vers la source d'alimentation.

C) Diagramme unifilaire du circuit à coordonner :

On trace le diagramme unifilaire de chaque circuit sélectionné.

D) Repérage des points importants :

1^o courant de court-circuit à bas niveau de tension

Représenter les courants de court-circuit symétrique et asymétrique des barres importantes

2^o courant de court-circuit à niveau moyen de tension

Représenter les courants de court-circuit asymétrique et de coupure. Le graphe de coordination étant représenté sur une base commune de tension, on doit ainsi corriger les courants correspondant à une tension différente à celle de base.

- courant de court-circuit asymétrique équivalent : $I_{as.e}$

$$I_{as.e} = I_{as} \times \frac{U}{U_B} \quad (31)$$

I_{as} = courant de court-circuit asymétrique

U = tension de la barre considérée

U_B = tension choisie comme base

- courant de coupure équivalent : $I_{c.e}$

$$I_{c.e} = I_c \times \frac{U}{U_B} \quad (32)$$

I_c = courant de coupure

3° Courants de pleine charge et de surintensité de l'appareil de fin de ligne

- Représenter le courant de pleine charge de l'appareillage de fin de ligne, s'il s'agit de moteurs, représenter aussi le courant de démarrage et le temps d'accélération au démarrage dont on tiendra compte des approximations suivantes, à défaut de mieux.

- petits moteurs à basse tension de deux à cinq secondes
- moteurs à moyenne tension de quatre à six secondes
(pour ce cas une valeur précise est nécessaire)

- Représenter aussi la surcharge admissible des machines, pour les moteurs elle varie de 110 % à 115 %

E) Transformateur :

1° Tension supérieure à 600 volts

a) protection au côté primaire

Chaque transformateur sera l'objet d'une protection individuelle contre les surintensités, le tableau (6) donne la limite supérieure de la surcharge admissible par type d'appareil

- Exception 1 :

Pour les fusibles si la limite autorisée par le tableau (6) ne correspond pas à une valeur

standard ou se réfère à la première valeur standard supérieure

- Exception 2 :

L'appareil de protection individuelle devient inutile si le réseau peut assurer la protection au primaire

b) protection au primaire et au secondaire

Si le secondaire est équipé aussi d'une protection contre les surintensités le tableau (7) donne les limites admissibles. Un transformateur muni d'une protection thermique contre les surcharges ne nécessitera pas de protection au primaire et le même tableau fixe les limites admissibles.

2^o tension égale ou inférieure à 600 volts:

a) protection du côté primaire:

Chaque transformateur nécessite une protection individuelle et le tableau (6) détermine les valeurs admissibles.

- Exception 1 :

Si le courant nominal du transformateur est:

- supérieur ou égal à neuf ampères : utiliser la première valeur standard supérieure pour l'appareil de protection au cas où la valeur autorisée par le tableau (6) ne correspond pas à une valeur standard
- inférieur à neuf ampères : utiliser un appareil calibré à 167 % de surintensité du côté primaire

- inférieur à deux ampères : le calibre sera alors de 300 %

b) protection au primaire et au secondaire :
 se référer au tableau (7) pour les valeurs admissibles de surintensités par type d'appareil

3° Transformateurs de potentiel :

Ils sont protégés par fusibles du côté primaire

4° Courant de magnétisation instantané :

Il représente la limite inférieure de la zone d'action des appareils de protection du transformateur. Le tableau (8) définit sa valeur.

5° le point ANSI :

c'est un point déterminé par le American National Standards Institute. Il fixe la limite supérieure de la zone d'action des appareils de protection du transformateur, le tableau (9) représente sa valeur.

Pour les transformateurs dont le pourcentage d'impédance, sur leur propre base, est compris entre 4 % et 7 % on peut utiliser l'équation (33)

$$I = I_{P.C} \times \frac{F_b}{Z} \quad (33)$$

I : valeur du courant correspondant au point ANSI en ampères

$I_{P.C}$: courant de pleine charge du transformateur

Z : pourcentage d'impédance du transformateur selon sa propre base

F_b : facteur de bobinage

facteur de bobinage : F_b

Dépendant du bobinage et de la mise à la terre du transformateur un facteur de correction sera tenu en ligne de compte.

Le tableau (10) donne la valeur de ce facteur en fonction des différentes connexions.

F) Relais de tension moyenne :

Appareil de protection qu'on retrouve à partir de 600 volts. Il est associé avec un transformateur de courant.

L'appareil comporte deux parties :

- Une partie temporisée dont la plage de réglage s'étend en général de 4 à 16 ampères. Une fois la prise choisie entre 4 et 16 ampères on doit la multiplier par le rapport de transformation du transformateur de courant, et par le quotient de la tension de ligne (sur laquelle le relais est branché) par la tension d'étude ; la valeur ainsi obtenue sera représentée sur le graphe de coordination.
- Une partie instantanée dont la plage de réglage aussi s'étend en général de 40 à 160 ampères. De même que ci-haut les facteurs identiques seront multipliés à la prise choisie.

Ref : 1 ; 2 ; 5 ; 6

CALCUL DES IMPEDANCES EQUIVALENTES PAR UNITE

I LIGNE MINE . 1

1^o Impédance équivalente de chaque charge :

Passé 27 : $X_{P.27}$

moteurs groupés	15,625
transformateur	3,125
ligne aérienne	0,021
$X_{P.27}$	= 18,771

Passé 77 : $X_{P.77}$

moteurs groupés	15,625
transformateurs	3,125
ligne aérienne	0,014
$X_{P.77}$	= 18,764

Bassin 8 :

$X_{B.8}$	
moteurs groupés : $(1/(62,5 + 3,75))$	0,015
motor 350 H.P : $1/(4,1 + 0,006)$	0,244
	0,259

$$1/0,259 = 3,861$$

transformateur	1,0
ligne aérienne	0,014
$X_{B.8}$	= 4,875

Exhaure - fouille : $X_{EX.F}$

moteurs groupés : 1(62,5 + 5) 0,015

moteur 350 H.P : 1(4,1 + 0,006 + 1) 0,196

0,211 $X_{EX.F} = 1/0,211 = 4,739$ drag - line 7.W : $X_{7.W}$

moteur 350 H.P : 1/4,1 0,244

moteurs groupés : 1/(250 + 15) 0,004

moteurs groupés : 1(500 + 30) 0,002

0,250 $1/0,250 = 4,000$

cable : 0,294

 $X_{7.W} = 4,294$ drag - line 650.B : $X_{650.B}$

moteur 650 H.P : 1/1,93 0,518

moteur 650 H.P : 1/1,93 0,518

moteurs groupés : 1/(6 + 100) 0,009

= 1,045 $1/1,045 = 0,957$

cable 0,125

 $X_{650.B} = 1,080$ drag - line 1250.B : $X_{1250.B}$

moteur 1250 H.P : 1/1,34 0,746

moteur 500 H.P : 1/2,85 0,351

moteurs groupés : 1/(15,6 + 313) 0,053

1,150 $1/1,150 = 0,870$

cable 0,119

 $X_{1250.B} = 0,989$

<u>poste mine - 1</u> :	X _{P.m.1}	
1/ X _{7.W} :	1/4,234	0,233
1/ X _{650.B} :	1/1,080	0,926
1/ X _{1250.B} :	1/0,989	<u>1,011</u>
		2,170

	1/2,17 = 0,461	
transformateur :	0,138	
X _{P.m.1}	=	<u>0,599</u>

Poste mine 2

<u>poste mine 2</u> :	X _{P.m.2}	
<u>drag - line 280 B</u> :	X _{280.B}	
motor 700 H.P :	1/2,04	0,490
motors groupés :	1/(3+50)	<u>0,019</u>
	1/0,509 = 1,965	: 0,509

Cable :	<u>0,119</u>	
X _{280.B} :	= 2,084	
transformateur :	<u>0,138</u>	
X _{P.m.2} :	= 2,222	

Poste: mine 3 : X_{P.m.3}

Remblayeur :	1/(4,02 + 0,123)	0,241
transporteur 4 :	1/(4,02 + 0,238)	<u>0,235</u>
		: 0,476

	1/0,476 = 2,101	
transformateur :	<u>0,138</u>	
	: 2,239	
	1/2,239	0,447
motors groupés :	1/(25 + 5)	<u>0,033</u>
	1/0,480 = 2,083	: 0,480

ligne aeriennne :	<u>0,014</u>	
X _{P.m.3}	=	2,097

Poste mine 4 : $X_{P.m.4}$		
transporteur 1 queue :	$1/(4,02 + 0,073)$	0,244
Roue pelle 1 :	$1/(4,02 + 0,135)$	0,241
Roue pelle 2 :	$1/(4,02 + 0,135)$	0,241
transporteur 1 tête :	$1/(2,73 + 0,135)$	<u>0,349</u>
		: 1,075
	$1/1,075 = 0,930$	
transformateur		<u>0,138</u>
		: 1,068
	$1/1,068$	0,936
moteurs groupés :	$1/(25 + 5)$	<u>0,033</u>
		: 0,969
$X_{P.m.4}$	$1/0,969 = 1,032$	
<u>2^e Impédance équivalente de la ligne</u>		
<u>mine 1</u> :	$X_{L.M.1}$	
$1/X_{P.m.3}$:	$1/2,097$	0,477
$1/X_{P.m.4}$:	$1/1,032$	<u>0,969</u>
		: 1,446
	$1/1,446 = 0,692$	
ligne aérienne :		<u>0,014</u>
		0,706
	$1/0,706$	1,416
$1/X_{P.m.2}$	$1/2,222$	<u>0,450</u>
		1,866
	$1/1,866 = 0,536$	
ligne aérienne		<u>0,014</u>
impédance équivalente de P.m.2, P.m.3, P.m.4 :	$X_2 = 0,550$	
$1/X_2$:	$1/0,55$	1,818
$1/X_{P.m.1}$:	$1/0,599$	<u>1,669</u>
		3,487
	$1/3,487 = 0,287$	
ligne aérienne :		<u>0,018</u>
X_3		0,305

$1/X_{B.8}$:	$1/4,875$		$0,205$
$1/X_{EX.F}$:	$1/4,739$		$0,211$
				$0,416$
ligne aeriennne :		$1/0,416 = 2,404$		
				$0,015$
X_4	:			$= 2,419$
$1/X_4$:	$1/2,419$		$0,413$
$1/X_3$:	$1/0,305$		$3,279$
				$3,692$
ligne aeriennne :		$1/3,692 = 0,271$		
				$0,025$
				$0,296$
		$1/0,296$		$3,378$
$1/X_{P.77}$		$1/18,764$		$0,053$
				$3,431$
		$1/3,431 = 0,291$		
ligne aeriennne :				$0,016$
				$0,307$
		$1/0,307$		$3,257$
$X_{P.27}$		$1/18,771$		$0,053$
				$3,310$
impedance de la ligne				
mine 1 pour le transformateur 10MVA :	$X_5 = 1/3,310$			$= 0,302$
$1/X_5$:	$1/0,302$		
transformateur :		$0,070$		
$X_{L.M.1}$		$= 0,372$		
<u>II LIGNE MINE 2</u>				
<u>1^o Impédance équivalente de chaque charge</u>				
<u>Goupes relais 1 et 2 : $X_{R.1} = X_{R.2}$</u>				
moteur 450 c.v	:			$3,210$
cable				$0,006$
transformateur	:			$1,000$
$X_{R.1} = X_{R.2}$:			$= 4,216$

Centre de bourbage : X_{deb} .

moteurs 350 H.P :	$1/(4,07 + 0,006)$	0,245
Moteurs groupés :	$1/(15,63 + 3,12)$	0,053
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteur 450 C.V :	$1/(3,21 + 0,006)$	0,311
moteur 190 C.V :	$1/(7,626 + 0,006)$	0,131
moteur 450 C.V :	$1/(3,21 + 0,006)$	0,311
moteur 450 C.V :	$1/(3,21 + 0,006)$	0,311
		<hr/>
		1,624

$X_1 = 1/1,624 = 0,616$

transformateur	0,220
ligne aerienn	<hr/>
	0,018

$X_{deb} = 0,854$

2° Impédance équivalente de la ligne mine 2 : $X_{L.M.2}$

$1/X_{deb}$: $1/0,854$	1,171
$1/X_{R.2}$: $1/4,216$	<hr/>
		0,237
		<hr/>
		1,408

	$1/1,408 = 0,710$
ligne aerienn :	<hr/>
	0,030
	<hr/>
	0,740

	$1/0,740$	1,350
$1/X_{R.1}$	$1/4,216$	<hr/>
		0,237
		<hr/>
		1,587

	$1/1,587 = 0,630$
ligne aerienn	<hr/>
	0,017

impédance ligne mine 2
sans le transformateur 10MVA : $X_{\nabla} = 0,647$

transformateur

 0,070

$X_{L.M.2} = 0,717$

III RESEAU 4 KV

Poste de préparation P.1 : $X_{P.1}$

moteurs 190 C.V :	$1/(7,63 + 0,006)$	0,131
moteur 290 C.V :	$1/(4,99 + 0,006)$	0,200
moteur 700 C.V :	$1/(2,1 + 0,006)$	0,475
moteur 450 C.V :	$1/(3,21 + 0,006)$	0,311
moteur 800 C.V :	$1/(1,81 + 0,006)$	0,551
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteur 800 C.V :	$1/(1,81 + 0,006)$	0,551
moteur 450 C.V :	$1/(3,21 + 0,006)$	0,311
moteur 700 C.V :	$1/(2,1 + 0,006)$	0,475
moteur 290 C.V :	$1/(4,99 + 0,006)$	0,200
moteur 190 C.V :	$1/(7,63 + 0,006)$	0,131
		<hr/>
	$1/4,384 =$	0,228

Cable

$$\frac{0,072}{0,300}$$

$$X_{P.1} = 0,300$$

poste de flottation P.2 : $X_{P.2}$

moteur 330 KW :	$1/(3,23 + 0,006)$	0,309
moteur 140 KW :	$1/(7,59 + 0,006)$	0,132
moteur 250 KW :	$1/(4,26 + 0,006)$	0,234
moteur 140 KW :	$1/(7,59 + 0,006)$	0,132
moteurs groupés :	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
		<hr/>
		1,069

moteurs groupés	:	$1/(3,125 + 0,688)$	1,069
			0,262
moteurs groupés	:	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
moteur 140 kW	:	$1/(7,59 + 0,006)$	0,132
moteur 250 kW	:	$1/(4,26 + 0,006)$	0,234
moteurs groupés	:	$1/(3,125 + 0,688)$	0,262
			<hr/> 2,221
		$1/2,221 = 0,450$	
Cable			<hr/> 0,072
$X_{P.2}$			<hr/> 0,522
<u>Poste P.9</u>	:	$X_{P.9}$	
moteurs groupés	:	$1/(15,63 + 3,13 + 0,072)$	0,053
$X_{P.9}$:	$1/0,053 = 18,868$	
<u>Poste P.8</u>	:	$X_{P.8}$	
moteurs	:	$1/(7,81 + 3,13)$	0,091
$X_{P.8}$:	$1/0,091 = 10,989$	
<u>Impédance poste P.8 et P.9</u>	:	$X_{P.8-9}$	
$1/X_{P.8}$:	$1/10,989$	0,091
$1/X_{P.9}$:	$1/18,868$	0,053
			<hr/> 0,144
		$1/0,144 = 6,944$	
Cable			<hr/> 0,072
$X_{P.8.9}$			<hr/> 7,016
<u>Poste Au club P.10</u>	:	$X_{P.10}$	
moteurs groupés	:	$1/(3,13 + 31,25)$	0,029
moteurs groupés	:	$1/(3,13 + 31,25)$	0,029
			<hr/> 0,058
		$1/0,058 = 17,190$	
Cable			<hr/> 0,072
$X_{P.10}$			<hr/> = 17,262

Poste M'baye M'baye P.7 : $X_{P.7}$

$$1/X_{P.8-9} : 1/7,015 \quad 0,143$$

$$1/X_{P.10} : 1/17,262 \quad \underline{0,058}$$

$$1/0,201 = 4,975 \quad 0,201$$

$$\text{Cable} \quad \underline{0,072}$$

$$X_{P.7} \quad \underline{5,047}$$

Poste F.5 et F.6 : $X_{F.5-6}$

$$\text{moteurs groupés F5: } 1/(3,13 + 15,63) \quad 0,053$$

$$\text{moteurs groupés F6: } 1/(3,13 + 15,63 + 0,08) \quad \underline{0,053}$$

$$1/0,106 = 9,433 \quad 0,106$$

$$\text{Cable} \quad \underline{0,080}$$

$$X_{F.5-6} \quad \underline{9,513}$$

Poste administration P.6 : $X_{P.6}$

$$\text{moteurs groupés F.4: } 1/(0,08 + 3,13 + 15,63) \quad 0,053$$

$$\text{moteurs groupés SP.II: } 1/(0,08 + 3,13 + 15,63) \quad 0,053$$

$$\text{moteurs groupés F.S.99: } 1/(0,08 + 3,13 + 15,63) \quad \underline{0,053}$$

$$1/0,159 = 6,289 \quad 0,159$$

$$\text{Cable} \quad \underline{0,080}$$

$$X_{P.6} \quad \underline{6,369}$$

Poste atelier P.4 : $X_{P.4}$

$$\text{moteurs groupés} : 1/(3,13 + 15,63) \quad 0,053$$

$$\text{moteurs groupés} : 1/(3,13 + 15,63) \quad \underline{0,053}$$

$$X_{P.4} \quad 1/0,106 = 9,380 \quad 0,106$$

Poste séchage P.3 : $X_{P.3}$

moteur 290 c.v :	$1/(4,99 + 0,006)$	0,200
moteurs groupés :	$1/(3,12 + 0,688)$	<u>0,263</u>
		0,463

$X_{P.3}^1 = 1/0,463 = 2,160$

$1/X_{P.4}$	1/9,380	0,106
$1/X_{P.6}$	1/6,369	0,157
$1/X_{F.5.6}$	1/9,513	0,105
$1/X_{P.7}$	1/5,047	<u>0,198</u>
		0,566

$1/0,566 = 1,767$

cable $\frac{0,072}{1,839}$

$1/X_{P.3}^1$	1/1,839	0,544
	1/2,160	<u>0,463</u>
		1,007

$1/1,007 = 0,993$

cable $X_{P.3} = \frac{0,072}{1,065}$

Impédance équivalente Réseau 4 KV : $X_{R.4}$

$1/X_{P.1}$	1/0,300	3,333
$1/X_{P.2}$	1/0,522	1,916
$1/X_{P.3}$	1/1,065	<u>0,939</u>
		6,188

$1/6,188 = 0,162$

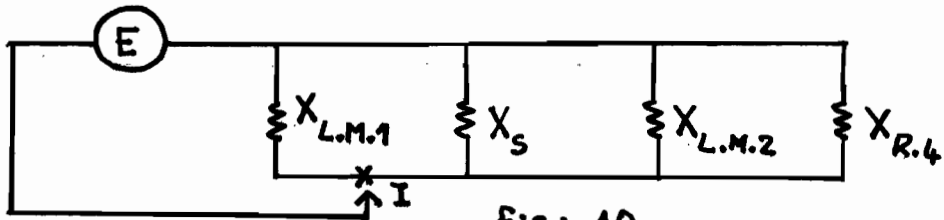
transformateur $\frac{0,070}{0,232}$

$X_{R.4} = 0,232$

DETERMINATION DE LA VALEUR DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

1^{er} Niveau 90 KV : point I

a) Impédance équivalente par unité



$1/X_S$:	$1/1/350$	350,000
$1/X_{L.M.1}$:	$1/0,372$	2,688
$1/X_{L.M.2}$:	$1/0,717$	1,394
$1/X_{R.4}$:	$1/0,232$	4,310
X		$1/358,392$	= 0,0028

b) Calcul du courant de base : (équation 19)

$$I_B = \frac{10^4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 90\,000}$$

$$I_B = 64,15 \text{ ampères}$$

c) Courant de court-circuit symétrique : (équation 2)

$$I_m = 64,15 \times \frac{1}{0,0028}$$

$$I_m = 22\,991 \text{ ampères}$$

d) courant de court-circuit asymétrique : (équation 3)

$$I_{as} = 22\,991 \times 1,6 = 36\,786 \text{ ampères}$$

II Ligne mine 1 :

1^o Niveau 15 KV : point II

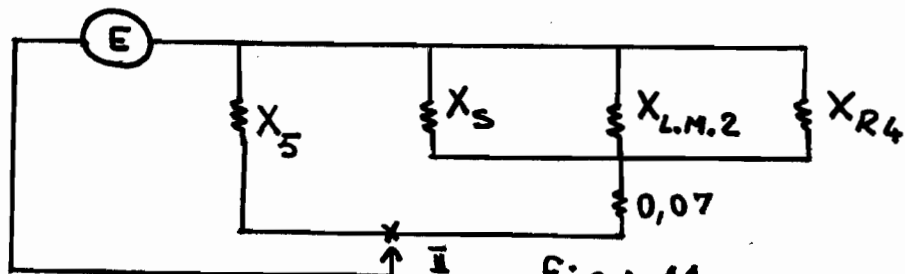


Fig: 11

a) Impedance équivalente par unité

$1/X_S :$	$1/1/350$	350,000
$1/X_{L.M.2} :$		1,394
$1/X_{R4} :$		4,310
		355,704

$$1/355,704 = 0,00281$$

Transformateur

X_6

$$\frac{0,07}{0,07281}$$

$X_6 =$ impedance équivalente de X_S , $X_{L.M.2}$, X_{R4} et le transfo

$1/X_6$	$1/0,07281$	13,734
$1/X_S$	$1/0,302$	3,310
		17,044

$$X = 1/17,044 = 0,0587$$

b) Courant de base

$$I_B = \frac{10^4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 15000}$$

$$I_B = 385 \text{ ampères}$$

c) Courant de court circuit momentané symétrique

$$I_m = 385 \times \frac{1}{0,0587}$$

$$I_m = 6\,562 \text{ ampères}$$

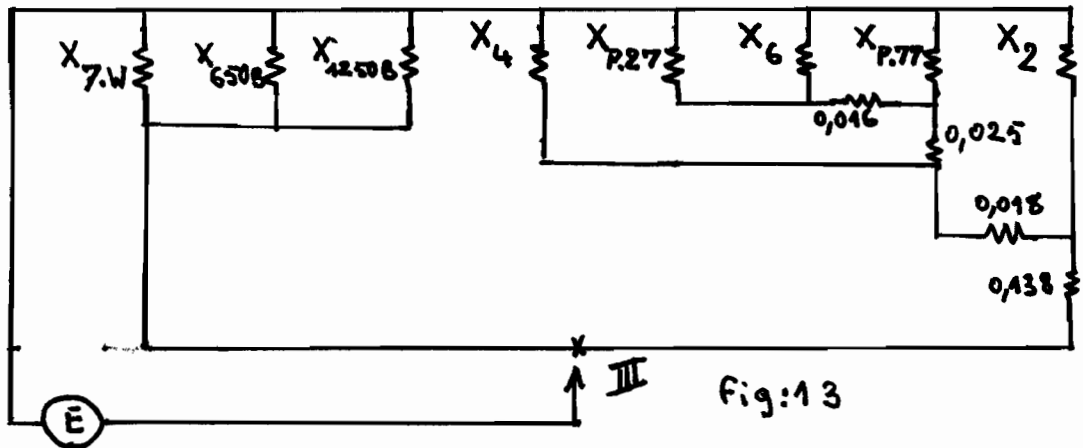
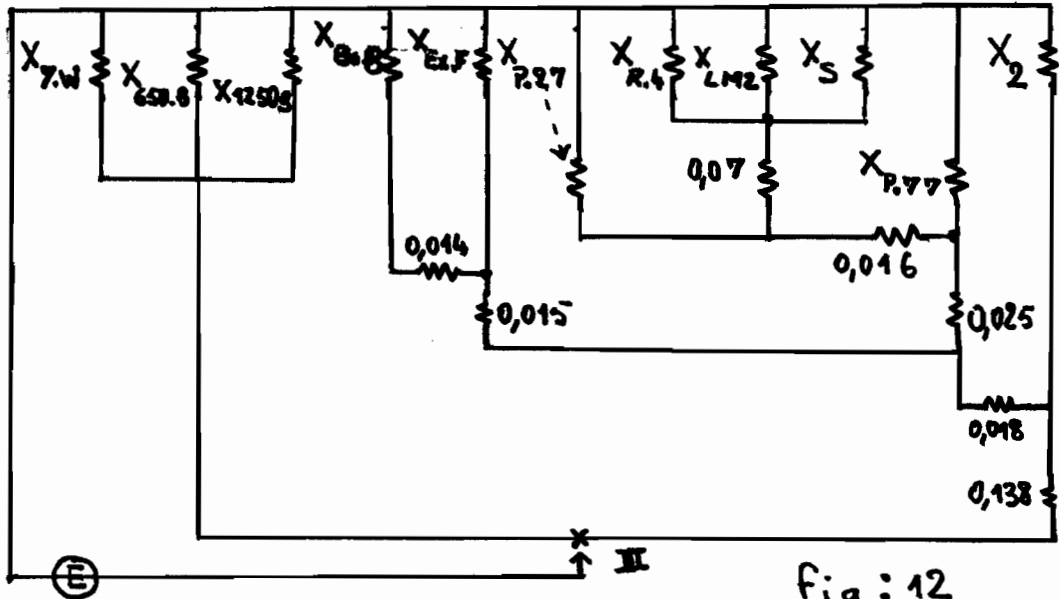
d) courant de court-circuit asymétrique

$$I_{as} = 6\,562 \times 1,6$$

$$I_{as} = 10\,500 \text{ ampères}$$

2° Niveau 4,16 kV : point III

a) Impédance équivalente par unité :



$1/X_{P.27}$:	$1/18,771$		0,053
$1/X_6$:	$1/0,07281$		<u>13,734</u>
				13,787
		$1/13,787$	=	0,0725
ligne aérienne :				<u>0,016</u>
				0,0885
		$1/0,0885$		11,295
$1/X_{P.77}$:	$1/18,764$		<u>0,053</u>
				11,348
		$1/11,348$	=	0,088
ligne aérienne :				<u>0,025</u>
				0,113
		$1/0,113$		8,840
$1/X_4$		$1/2,419$		<u>0,413</u>
				9,253
		$1/9,253$	=	0,108
ligne aérienne :				<u>0,018</u>
				0,126
		$1/0,126$		7,932
$1/X_2$		$1/0,55$		<u>1,818</u>
				9,750
		$1/9,750$	=	0,103
transformateur :				<u>0,138</u>
				0,241
		$1/0,241$		4,157
$1/X_{P.W}$:	$1/$		0,233
$1/X_{650.B}$:	$1/$		0,926
$1/X_{1250.B}$:	$1/$		<u>1,011</u>
				6,327
X	:	$1/6,327$	=	0,158

b) Courant de base :

$$I_B = \frac{10^4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 4160}$$

$$I_B = 1388 \text{ ampères}$$

c) Courant de court-circuit non entaillé symétrique

$$I_m = 1388 \times \frac{1}{0,158}$$

$$I_m = 8785 \text{ ampères}$$

d) Courant de court-circuit asymétrique

$$I_{as} = 8785 \times 1,6$$

$$I_{as} = 14056 \text{ ampères}$$

3^e Niveau 440 volts : point IV

a) Impédance équivalente par unité

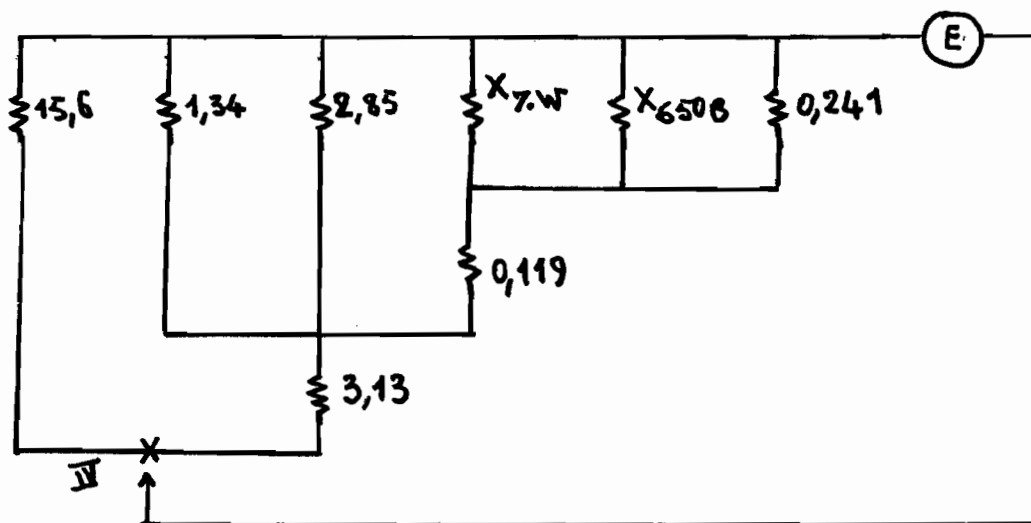


fig : 14

	1/0,241	
1/X _{7.W}		4,149
1/X _{650.B}		0,233
		0,926
		<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>
		5,308

Cable	1/5,308		0,188
			<u>0,119</u>
			0,307
	1/0,307	= 3,257	
	1/2,85	0,351	
	1/1,34	<u>0,746</u>	
		4,354	
transformateur	1/4,354		0,230
			<u>3,130</u>
			3,360
	1/3,360	= 0,298	
	1/15,6	<u>0,064</u>	
		0,362	
X	= 1/0,362	= 2,762	

b) courant de base :

$$I_B = \frac{10^4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 440} = 13\ 122$$

$$I_B = 13\ 122 \text{ ampères}$$

c) courant de court circuit momentané symétrique

$$I_m = 13\ 122 \times \frac{1}{2,762}$$

$$I_m = 4\ 751 \text{ ampères}$$

d) courant de court circuit asymétrique :

$$I_{as} = 4\ 751 \times 1,6$$

$$I_{as} = 7\ 602 \text{ ampères}$$

III LIGNE MINE 2

1^{er} Niveau 15KV : Point V

a) Impédance équivalente par suite:

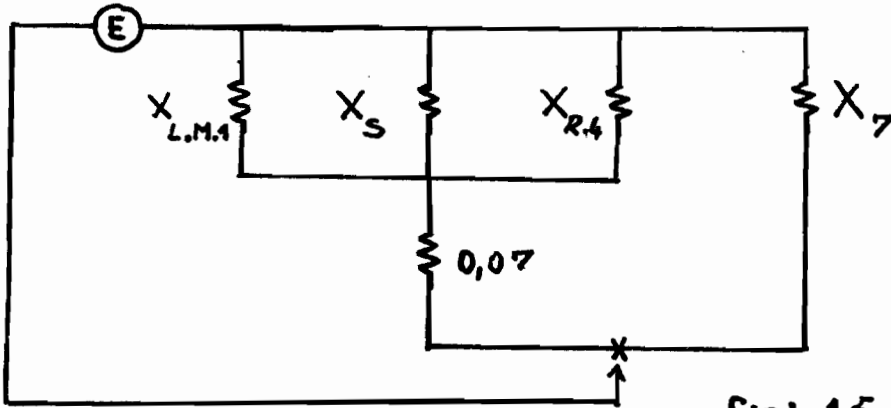


Fig: 15

$1/X_{L.M.1}$: $1/0,302$	3,311
$1/X_S$		350,000
$1/X_{R.4}$		<u>4,310</u>
		357,621
	$1/357,621 = 0,0028$	
transformateur		<u>0,07</u>
		0,0728
	$1/0,0728$	13,737
$1/X_7$	$1/0,647$	<u>1,546</u>
		15,283
X	$1/15,283 = 0,0654$	

b) courant de base

$$I_B = \frac{10^4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 15\,000} =$$

$$I_B = 385 \text{ ampères}$$

c) courant de court circuit momentané symétrique

$$I_m = 385 \times \frac{1}{0,0654}$$

$$I_m = 5\,887 \quad \text{ampères}$$

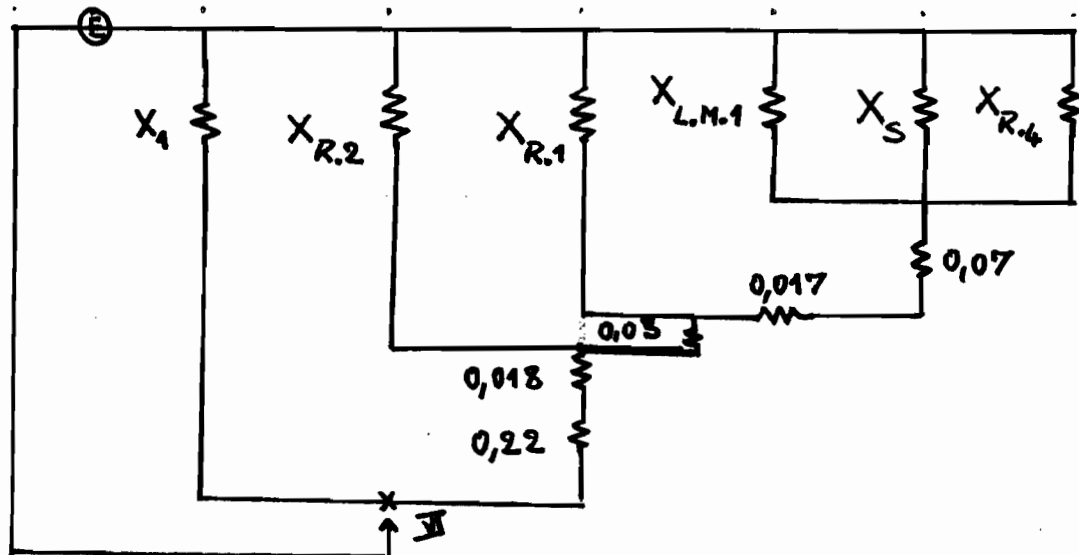
d) courant de court-circuit asymétrique

$$I_{as} = 5\,887 \times 1,6$$

$$I_{as} = 9\,420 \quad \text{ampères}$$

2^e Niveau 4,16 kV : point VI

a) Impédance équivalente par suite



$1/X_{L.M.1}$:	$1/0,372$	2,688
$1/X_S$:	$1/1\,350$	350,000
$1/X_{R.4}$:	$1/0,232$	4,310
			<hr/>
			356,998

$$1/356,998 = 0,0028$$

transformateur
ligne aerienn

$$\begin{array}{r} 0,07 \\ 0,017 \\ \hline 0,0898 \end{array}$$

	$1/0,0898$		$11,136$
$1/X_{R.1}$	$1/4,216$		$0,237$
			<hr/>
			$11,373$
	$1/11,373$	$= 0,0879$	
ligne aeriene		$0,03$	
		<hr/>	
		$0,1179$	
	$1/0,1179$		$8,4796$
$1/X_{R.2}$	$1/4,216$		$0,237$
			<hr/>
			$8,7166$
	$1/8,717$	$= 0,115$	
ligne aeriene		$0,018$	
transformateur		$0,220$	
X_8		<hr/>	
		$= 0,353$	
$\sqrt{X_8}$	$1/0,353$		$2,833$
$1/X_1$	$1/0,616$		$1,624$
			<hr/>
			$4,457$
X	$1/4,457$	$= 0,224$	

b) courant de base

$$I_B = 1388 \text{ ampères}$$

c) courant de court-circuit momentané symétrique

$$I_m = 1388 \times \frac{1}{0,224}$$

$$I_m = 6196 \text{ ampères}$$

d) courant de court-circuit asymétrique

$$I_{as} = 6196 \times 1,6$$

$$I_{as} = 9914 \text{ ampères}$$

3^e Niveau 4,16 KV : point IV
 (pompe sable)

a) Impédance équivalente par unité :

X_8 : c.f page précédente

X_9 = impédance du centre de bourrage sans la pompe sable et le transformateur

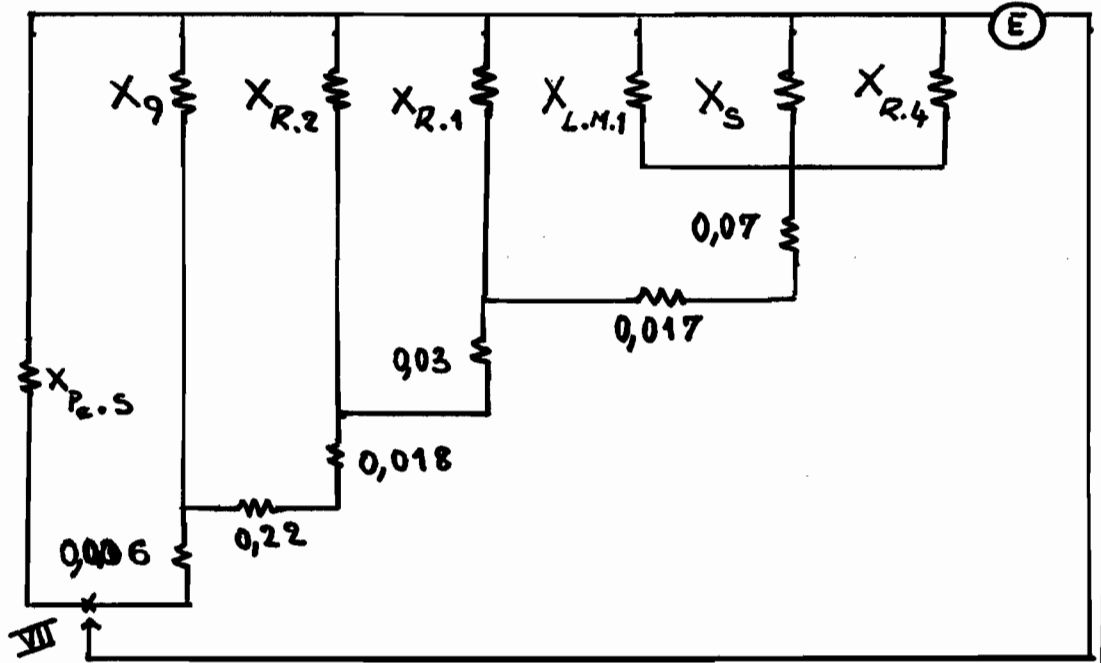


Fig: 17

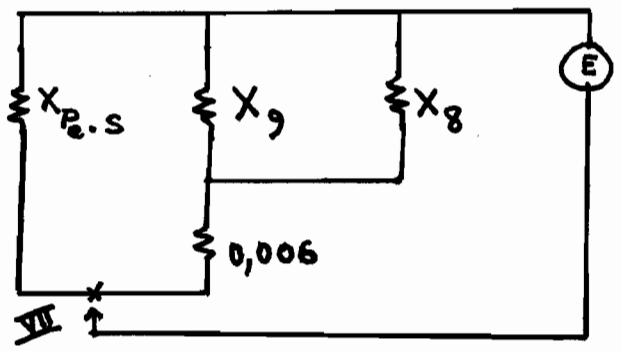


Fig: 18

Cable		0,006
$X_{p.e.s}$		<u>3,210</u>
		3,216
	$1/3,26 = 0,311$	
$1/x_9 = 1/x_1$	$- 0,311 = 1,624 - 0,311$	
$1/x_9$		1,313
$1/x_8$		<u>2,833</u>
		4,146
	$1/4,146 = 0,241$	
Cable		0,006
		<u>0,247</u>
	$1/0,247$	4,045
$1/x_{p.e.s}$	$1/3,210$	<u>0,312</u>
		4,357
X.	$1/4,357 = 0,230$	

b) courant de base:

$$I_B = 1388 \text{ ampères}$$

c) courant momentané symétrique

$$I_m = 1388 \times \frac{1}{0,23}$$

$$I_m = 6048 \text{ ampères}$$

d) courant asymétrique:

$$I_{as} = 6048 \times 1,6$$

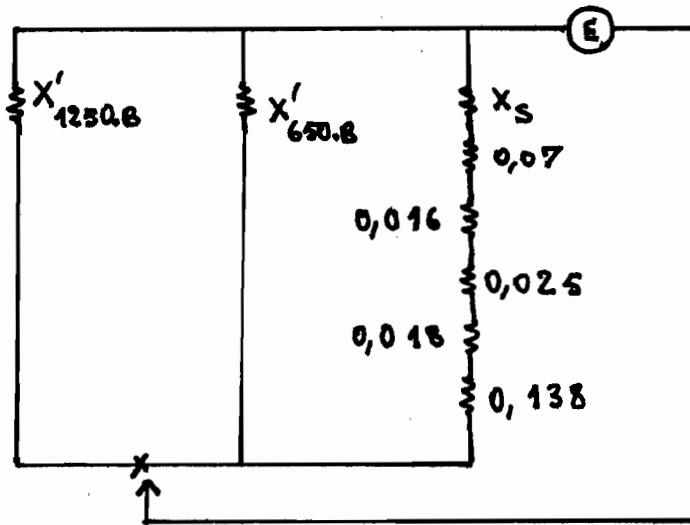
$$I_{as} = 9677 \text{ ampères}$$

IV CALCUL DU COURANT DE COUPURE

Ligne Mine 1

1^{er} Niveau 4,16 Kv :

a) Impédance équivalente transitoire par unité



moteur 650 H.P :	1/2,97	0,337
moteur 650 H.P :	1/2,97	0,337
		<hr/>
	1/0,674 :	1,484
cable		<hr/>
$X'_{650.8}$		0,123
		<hr/>
X_s		1,607
		0,003
transformateur 10MVA :		0,07
ligne aérienne :		0,016
ligne aérienne :		0,025
ligne aérienne :		0,018
transformateur 4 MVA :		0,138
		<hr/>
		0,270

	$1/0,27$	$3,704$
$1/X'_{650.B}$:	$1/1,607$
		$0,622$
$1/X'_{1250.B}$:	$1/(0,119 + 2)$
		$0,472$
		<hr style="width: 100%;"/>
		$4,798$
Z'	$1/4,798 = 0,208$	

b) Courant de base

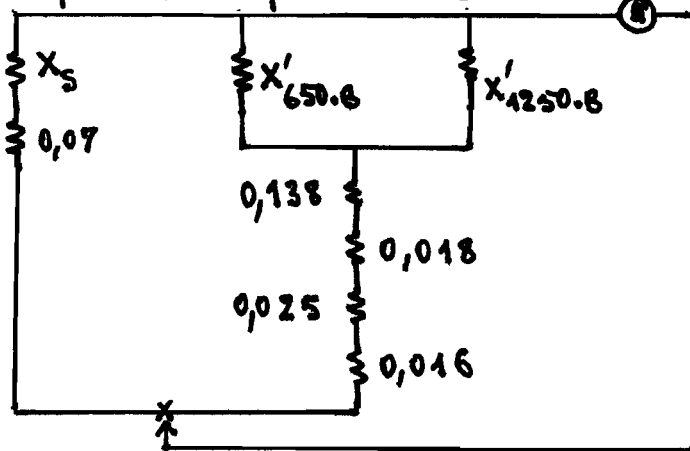
$$I_B = 1388 \text{ ampères}$$

c) Courant de court-circuit

$$I_c = 1388 \times \frac{1}{0,208} = 6673 \text{ ampère}$$

2^e Niveau 15 KV :

a) Impédance équivalente transitoire par suite'



	$1/1,607$	$0,622$
$1/X'_{650.B}$:	$1/(0,119 + 2)$
		$0,472$
$1/X'_{1250.B}$:	<hr style="width: 100%;"/>
		$1,094$

$$1/1,094 : 0,914$$

ligne aérienne

$$0,018$$

ligne aérienne

$$0,025$$

ligne aérienne

$$0,016$$

transformateur 4 MVA

$$0,1388$$

$$\hr style="width: 100%;"/>
1,111$$

transformateur 10 MVA :

$$X_s \quad : \quad 1/350 \quad \begin{array}{r} 0,07 \\ 0,0029 \\ \hline 0,0729 \end{array}$$

$$1/0,0729 \quad : \quad 13,717$$

$$1/1,111 \quad \quad \quad 0,900$$

$$\hline 14,617$$

$$Z' \quad \quad \quad 1/14,617 = 0,068$$

b) courant de base

$$I_b = 385 \text{ ampères}$$

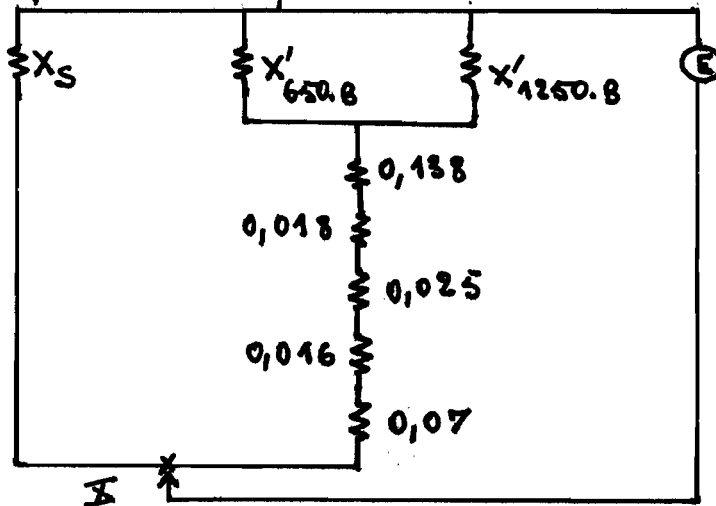
c) Courant de coupure

$$I_c = 385 \times \frac{1}{0,068}$$

$$I_c = 5662 \text{ ampères}$$

3^o Niveau 90 KV : point X

a) Impédance équivalente transitoire par suite



transformateur 10MVA

$$\begin{array}{r} 1,111 \\ 0,07 \\ \hline 1,181 \end{array}$$

$$1/x_s \quad 1/1,181 \quad \begin{array}{r} 0,847 \\ 350,000 \\ \hline 350,847 \end{array}$$

$$Z' \quad 1/350,847 = 0,0029$$

b) courant de base

$$I_b = 64,15 \text{ ampères}$$

c) courant de coupe

$$I_c = 64,15 \times \frac{1}{0,0029}$$

$$I_c = 22\ 120 \text{ ampères}$$

Tableau des résultats
 courants de court-circuit : symétriques, asymétriques
 et de coupure

Charge	niveau de tension (kV)	X	I_B (amps)	I_w (amps)	I_{as} (amps)	Z'	I_c (amps)
ligne mine 1	90	0,0028	64,15	22 991	36 786	0,0029	22 120
ligne mine 2	15	0,0587	385	6 562	10 500	0,068	5 662
ligne mine 2		0,0654		5 887	9 420	—	—
ligne mine 1		0,158	1 388	8 785	14 056	0,208	6 673
ligne mine 2	4,16	0,224		6 196	9 914	—	—
Pompe Sable		0,230		6 048	9 677	—	—
ligne mine 1	0,44	2,762	13 122	4 751	7 602	—	—

REPERES ESSENTIELS POUR REALISER LA COORDINATION

tension de base : 4,16 kV

I LIGNE MINE 1

A) Transformateur 10 MVA

1^o Courant de court-circuit équivalent au niveau 90 kV

$$I_{c.e} = 22\,120 \times \frac{90}{4,16} = 478\,558 \text{ ampères}$$

$$I_{as.e} = 36\,786 \times \frac{90}{4,16} = 795\,850 \text{ ampères}$$

2^o Courant de court-circuit équivalent au niveau 15 kV

$$I_{c.e} = 5\,662 \times \frac{15}{4,16} = 20\,416 \text{ ampères}$$

$$I_{as.e} = 10\,500 \times \frac{15}{4,16} = 37\,860 \text{ ampères}$$

3^o points caractéristiques du transformateur

$$I_{p.c} = \frac{P_T}{U \times \sqrt{3}} \quad (34)$$

$I_{p.c}$ = courant de pleine charge

P_T = puissance du transformateur

U = tension du transformateur

a) courant de pleine charge

$$I_{p.c} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \times 15} = 385 \text{ ampères}$$

b) courant équivalent de pleine charge

$$I_{p.c.e} = 385 \times \frac{15}{4,16} = 1\,388 \text{ ampères}$$

$$200\% I_{p.c.e} = 2 \times 1388 = 2776 \text{ ampères}$$

$$250\% I_{p.c.e} = 2,5 \times 1388 = 3470 \text{ ampères}$$

c) point ANSI

$$\text{ANSI} = \frac{1388 \times 0,87}{0,07} = 17251 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 5 \text{ secondes}$$

d) courant de magnétisation à l'appel

$$I_{\text{rush}} = 1388 \times 12 = 16656 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 0,1 \text{ seconde}$$

b) Transformateur 4 MVA

1° - courant momentané asymétrique

$$I_m = 8785 \text{ ampères}$$

2° courant asymétrique

$$I_{as} = 14056 \text{ ampères}$$

3° Points caractéristiques du transformateur

a) - courant de pleine charge

$$I_{p.c} = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 4,16} = 555 \text{ ampères}$$

$$600\% I_{p.c} = 6 \times 555 = 3330 \text{ ampères}$$

b) point ANSI

$$\text{ANSI} = \frac{555 \times 0,87}{0,055} = 8779 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 3 \text{ secondes}$$

c) courant de magnétisation à l'appel

$$I_{\text{rush}} = 12 \times 555 = 6660 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 0,1 \text{ seconde}$$

4^o Points caractéristiques Au moteur

a) courant de pleine charge

$$I_{p.c} = 186 \text{ ampères}$$

b) -courant de démarrage proposé

$$I_d = 4 \times I_{p.c} = 4 \times 186 = 744 \text{ ampères}$$

$$\text{durée proposée} = 8 \text{ secondes}$$

II LIGNE MINE 2

A) Transformateur 10 MVA

1^o courant de court-circuit équivalent Au niveau 90 kV

$$I_{m.e} = 22\,991 \times \frac{90}{4,16} = 497\,400 \text{ ampères}$$

$$I_{as.e} = 795\,850 \text{ ampères}$$

2^o courant de court-circuit équivalent Au niveau 15 kV

$$I_{m.e} = 5\,887 \times \frac{15}{4,16} = 21\,227 \text{ ampères}$$

$$I_{as.e} = 33\,966 \text{ ampères}$$

3^o Points caractéristiques Au transformateur

a) $I_{p.c} = 1388 \text{ ampères}$

$$200\% \bar{I}_{p.c} = 2 \times 1388 = 2776 \text{ ampères}$$

$$250\% \bar{I}_{p.c} = 2,5 \times 1388 = 3470 \text{ ampères}$$

b) point ANSI

$$\text{ANSI} = \frac{1388 \times 0,87}{0,07} = 17\,251 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 5 \text{ seconde}$$

c) courant de magnétisation à l'appel

$$I_{rush} = 12 \times 1388 = 16\,656 \text{ ampères}$$

$$\text{durée} = 0,1 \text{ seconde}$$

b) Transformateur 2,5 MVA

1° courant momentané symétrique

$$I_m = 6048 \text{ ampères}$$

2° courant asymétriques

$$I_{as} = 9677 \text{ ampères}$$

3° Points caractéristiques du transformateur

a) courant de pleine charge

$$I_{p.c} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 4,16} = 347 \text{ ampères}$$

$$600\% I_{p.c} = 6 \times 347 = 2087 \text{ ampères}$$

b) point ANSI

$$ANSI = \frac{347 \times 0,87}{0,055} = 5490 \text{ ampères}$$

c) courant de magnétisation à l'appel

$$I_{rush} = 8 \times 347 = 2776 \text{ ampères}$$

$$\text{durée } I_{rush} = 0,1 \text{ secondes}$$

$$\text{durée ANSI} = 3 \text{ secondes}$$

4° Points caractéristiques du moteur

a) courant de pleine charge

$$I_{p.c} = 60 \text{ ampères}$$

b) courant de démarrage proposé

$$I_d = 6 \times 60 = 360 \text{ ampères}$$

$$\text{durée proposée} = 8 \text{ secondes}$$

Relais de tension moyenne

Ligne mine	Equi - pement	Type de relais	Rapport TC	Calibration avec temporisation						Calibration instantanée	
				délai	prise (Amp)	courant de prise (Amp)	limite inf. (Amp)	limite sup. (Amp)	prise (Amp)	courant de prise (Amp)	
1	1250,8	IAC-51	60	2	4	240	240	960	-	-	
	Transfo 4MVA	IAC-51	30	2	15	1600	433	4730	70	7572	
	Transfo 10MVA	IAC-53	60	2	10	2463	865	3462	92	19904	
2	Pompe - Sable	IAC-51	20	2	4	80	80	320	-	-	
	Transfo 2,5MVA	IAC-51	20	5	14	1010	288	1154	70	5048	
	Transfo 10MVA	IAC-53	30	2	16	1730	433	1730	157	16983	

tableau: 1

Réactances standards exprimées selon la propre base des appareils

type d'appareil	Réactance sous-transitoire X''_d	Reactance transitoire X'_d
Turbine génératrice		
2 pôles (3600 tr/mn)	0,09	0,15
4 pôles (1800 tr/mn)	0,15	0,23
Générateur à poles saillants		
12 pôles ou moins (600tr/mn)	0,16	0,33
14 pôles ou plus (≤ 514 tr/mn)	0,21	0,33
Moteurs synchrones		
6 pôles (1200tr/mn)	0,15	0,23
8-14 pôles (514-900 tr/mn)	0,20	0,30
Condensateur synchrone	0,24	0,37
Moteur à induction		
> 600 volts	0,17	
≤ 600 volts	0,25	

tableau : 2

Pourcentage d'impédance des transformateurs
exprimé sur leur propre base

Tension primaire nominale	Puissance nominale en KVA		
	25 - 100	100 - 500	> 500
2,4 - 4,16 KV	0,015 - 0,018	0,05	0,055
13,8 KV	0,015 - 0,025	0,05	0,055
46 KV	-	0,06	0,065
69 KV	-	0,065	0,07

tableau : 3

Puissance nominale

type d'appareil	puissance nominale entrepris (en KVA)
quelconque	$\frac{U_n \cdot I_n \cdot \sqrt{3}}{1000}$
Moteur à induction	1,0 x puissance en H.P
Moteur synchrone avec facteur de puissance = 0,8	1,0 x puissance en H.P
Moteur synchrone avec facteur de puissance = 1,0	0,8 x puissance en H.P

Tableau : 4

Lettre - Code

lettre	kilo . volt . amperes par horse power (avec rotor bloqué)		
A	0	-	3,14
B	3,15	-	3,54
C	3,55	-	3,99
D	4,0	-	4,49
E	4,5	-	4,99
F	5,0	-	5,59
G	5,6	-	6,29
H	6,3	-	7,09
J	7,1	-	7,99
K	8,0	-	8,99
L	9,0	-	9,99
M	10,0	-	11,19
N	11,2	-	12,49
P	12,5	-	13,99
R	14,0	-	15,99
S	16,0	-	17,99
T	18,0	-	19,99
U	20,0	-	22,39
V	22,4	-	et plus

Reactance à l'appareillage et facteur de multiplication pour le calcul de courant de court-circuit

Tableau : 5

Appareillage	Type de courant de court-circuit	Reactance à utiliser.			Facteur de multiplication à appliquer pour				
		Generateur synchro ne	Motor synchro ne	Motor à induction	appareils de protection et vérification de fonctionnement		appareils de protection et coordination		
à basse tension disjoncteur centré de commande de moteur fusible - barres de -	symétrique	X''	X''	X''	à négliger	1,0		1,6	1,0
						1,0			
plus de 600 volts disjoncteur de puissance	assymétrique	X''	X''	X''	à négliger	1,6		1,6	1,0
						1,6			
plus de 1500 volts fusibles	coupure - symétrique	X''	X''	X''	à négliger	cas général 1,0		1,6	1,0
						cas spécial 1,1			
plus de 1500 volts fusibles	coupure - assymétrique	X''	X''	X''	à négliger	cas général 1,6		1,6	1,0
						cas spécial 1,2			

légende : X'' : réactance sous-transitoire
X' : reactance transitoire

Tableau : 6

Résumé des surcharges maximales admissibles des transformateurs en fonction des appareils de protection et de leur position

Pourcentage d'impédance	Protection au primaire			Protection au Secondaire		
	volts	disjoncteur	fusible	600 V et plus		600 et moins
				disjoncteur	Fusible	
tout type		$\leq 3 X$	$\leq 1,5 X$	--	--	--
6% et moins	plus de 600 V	$\leq 6 X$	$\leq 3 X$	$\leq 3 X$	$\leq 1,5 X$	$\leq 2,5 X$
6% à 10%		$\leq 4 X$	$\leq 2 X$	$\leq 2,5 X$	$\leq 1,25 X$	$\leq 2,5 X$
tout type	600 V ou moins	$\leq 1,25 X$	$\leq 1,25 X$	pas applicable		--
		$\leq 2,5 X$	$\leq 2,5 X$			$\leq 1,25 X$
6% et moins		$\leq 6 X$	$\leq 6 X$			* P.T.I doit agir au primaire
6% à 10%		$\leq 4 X$	$\leq 4 X$			

* P.T.I = protection thermique intégrée

Tableau : 7

Surcharges des transformateurs de plus 600 V et protégés des deux côtés

Surcharge maximale admissible

Pourcentage d'impédance	Primaire		Secondaire		
	plus de 600 volts		plus de 600 volts		600 V et moins
	disjoncteur	Fusible	disjoncteur	Fusible	
6% et moins	600 %	300 %	300 %	150 %	250 %
6% à 10%	400 %	200 %	250 %	125 %	250 %

tableau : 8

Courant de magnétisation instantané du transformateur

Puissance de transformateur	Inrush	durée
≤ 3 MVA	$8 \times I_{p.c}$	0,1 secondes
> 3 MVA	$12 \times I_{p.c}$	0,1 secondes

tableau : 9

Spéc ANSI du transformateur

Pourcentage d'impédance	Valeur RMS du courant de court-circuit admissible	durée (secondes)
4% et moins	25 fois le courant de pleine charge	2
5%	20 fois le courant de pleine charge	3
6%	16,6 fois le courant de pleine charge	4
7% ou plus	14,4 ou moins le courant de pleine charge	5

graphe récapitulatif

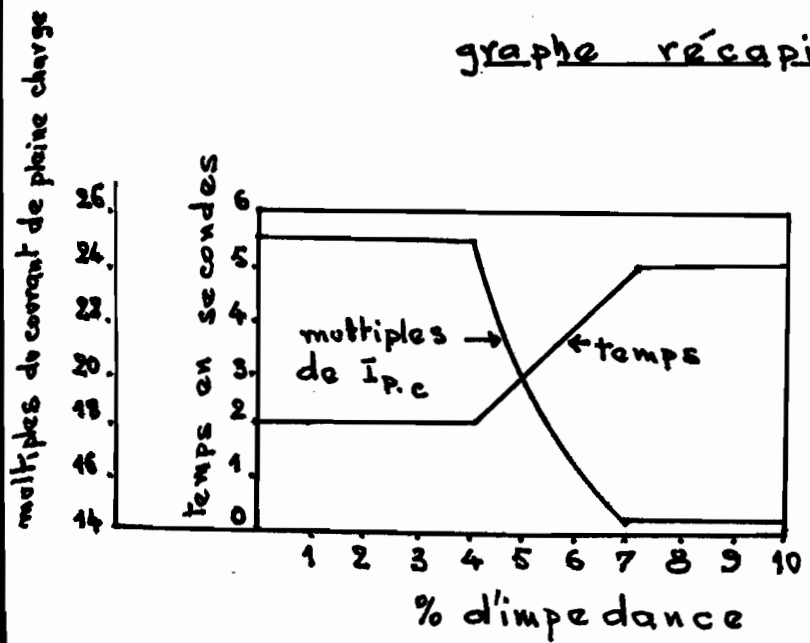





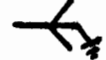




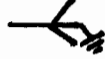
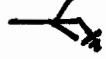






tableau : 10facteur de bobinage au transformateur : F_b

connexion		F_b	Connexion		F_b
P.	S.	L-L	P.	S.	L-L
		0,87			0,87
		L-N 0,58			L-L 0,58
		L-L 0,87			L-L 0,87
		L-L 0,87			L-L 0,87

DISCUSSIONS - CONCLUSIONS

DISCUSSIONS

Cette étude comporte certaines difficultés qui constituent une source d'erreurs dans les résultats obtenus

a) - Au niveau de l'usine de Taïba

- Ne disposant pas de plan pour le réseau de 4 KV, les distances localisant les charges sont approximatives.

- De même, faute de plan, la longueur de la majorité des cables est approximative, en plus certaines longueurs étaient composées de cables de natures différentes, néanmoins le calcul d'impédance a été basé sur le type de cable prédominant pour chacune de ces longueurs.

- Pour les lignes aériennes les plans ont fourni les longueurs réelles, cependant l'espacement entre les lignes est approximatif pour la plupart.

- Le temps exact d'accélération et le courant de démarrage des moteurs n'ont pas été disponibles.

b) - Sur le plan général

- L'usine comporte un grand nombre de petits moteurs fonctionnant à une tension égale ou inférieure à 440 volts avec une puissance inférieure à 50 H.P. Ainsi on a procédé à des regroupements en moteurs équivalents dont

la puissance est égale à la puissance nominale des transformateurs qui les alimentent. Ceci a pour effet de rendre les résultats des calculs légèrement plus élevés

- Les courbes caractéristiques des appareils de protection étant rares sur le marché sénégalais les quelques ones obtenues sont établies pour une fréquence de 60 Hz

Conclusions

Les calculs de courants de court-circuit peuvent constituer des données pertinentes pour la disposition du réseau électrique de l'usine de Taïba, correspondante à la période de l'étude, étant donné que celle-ci évolue en fonction de l'emplacement des mines.

Quant à la coordination, elle constitue un exemple démonstratif, dans la mesure où les données indispensables à sa réalisation n'ont pas été disponibles.

Il est à noter aussi que l'étude a été élaborée dans le cadre général selon les normes actuelles, en vigueur aux Etats Unis d'Amérique, ce qui implique que pour des données nouvelles il s'agit de reprendre les calculs en suivant la procédure exposée.

D'autre part l'agencement actuel des appareils de protection tel qu'établi à l'usine de Taïba

présente une faiblesse car un défaut au niveau Au secondaire d'un des transformateurs de 10MVA peut occasionner l'arrêt de l'usine en entier, cependant la solution de la double protection, au primaire et au secondaire, pour chaque ligne prise individuellement palie à cet inconvénient

APPENDICE

Exemples de calculs

circuit considéré : poste mine 1
 1° Calcul d'impédances par unité :

Puissance de base

$$P_B = 10 \text{ MVA} \quad (\text{valeur choisie})$$

a) source d'alimentation

$$X_S = 1,0 \quad (\text{valeur proposée par "General Electric Co."})$$

équation (22) \Rightarrow

$$X = 1,0 \times \frac{10}{3500} = \frac{1}{350}$$

b) transformateur 4 MVA ; 15 kV / 4,16 kV

tableau 2 $\Rightarrow Z_T = 5,5 \%$

équation (23) \Rightarrow

$$X = \frac{5,5}{100} \times \frac{10}{4} = 0,138 = 13,8 \%$$

c) moteur synchrone 1250 B

Puissance du moteur : $P_m = 1250 \text{ H.P.}$

tension de base

$$U_B = 4,16 \text{ kV}$$

tension nominale du moteur : $U_m = 3,81 \text{ kV}$

facteur de puissance : F.P. < 1

tableau 3 $\Rightarrow P_m = 1250 \text{ kVA}$

tableau 1 $\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} X''_d = 0,20 \quad (\text{sous-transitoire}) \\ X'_d = 0,30 \quad (\text{transitoire}) \end{array} \right.$

équation 24 \Rightarrow

$$X'' = 0,2 \times \frac{10\,000}{1250} \times \left(\frac{3,81}{4,16}\right)^2 = 1,34$$

équation 25 \Rightarrow

$$X' = 0,3 \times \frac{10\,000}{1250} \times \left(\frac{3,81}{4,16}\right)^2 = 2$$

d) ligne aérienne de 1750 mètres

$$Z_{11} = 0,251 + j0,318$$

$$Z_{11} = \left[0,251^2 + 0,318^2\right]^{1/2} = 0,405 \, \Omega$$

impédance de base

équation 21 \Rightarrow

$$\Omega_B = \frac{U_B^2}{P_B \times 1000} = \frac{15\,000^2}{10\,000 \times 1000} = 22,5 \, \Omega$$

ici la tension de base $U_B = 15 \text{ kV}$

équation 26 \Rightarrow

$$X = \frac{0,405}{22,5} = 0,018$$

e) câble au drag line 1250. B

$$Z_{11} = 0,206$$

équation 21 \Rightarrow

$$\Omega_B = \frac{4160^2}{10\,000 \times 1000} = 1,73 \, \Omega$$

ici la tension de base $U_B = 4,16 \text{ kV}$

équation 26 \Rightarrow

$$X = \frac{0,206}{1,73} = 0,119$$

2° Calcul d'impédance propre de séquence directe et inverse

a) ligne aériennes : ligne aérienne Ae 1095 m, 120 mm² en cuivre, $S_{ab} = S_{bc} = 0,6$ m $S_{ac} = 1,2$ m

équation 12 \Rightarrow

$$S = [0,6 \times 0,6 \times 1,2]^{1/3} = 0,756 \text{ m} = 756 \text{ mm}$$

équation 9 \Rightarrow

$$R_c = \frac{0,01724 \times 1095}{120} = 0,157 \ \Omega$$

équation 8 \Rightarrow

$$X_i = 0,0157 \times \frac{50}{50} = 0,0157$$

équation 9 \Rightarrow

$$\Rightarrow Z_{11} = 0,157 + j(0,1447 \log_{10} \frac{2 \times 756}{12,36} + 0,0157)$$

$$Z_{11} = 0,157 + j 0,318$$

$$\text{ici } \rho = 0,01724 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

b) cables de 1000 m ; 120 mm² ; S = 50 mm

équat 14 \Rightarrow

$$GMD_{3c} = 50 \text{ mm}$$

$$GMR_{1c} = 0,779 \times \frac{12,36}{2} = 4,81 \text{ mm}$$

équat 9 \Rightarrow

$$R_c = \frac{0,01724 \times 1000}{120} = 0,144 \ \Omega$$

équat 17 \Rightarrow

$$Z_{11} = 0,144 + j(0,1736 \times \frac{50}{60} \times \log_{10} \frac{50}{4,81}) \times 1$$

$$Z_n = 0,144 + j 0,148$$

3^e Calibration de relais

Protection du transformateur de 4 MVA (poste mine 1)

Type de relais adopté : IAC : 51

Prise (pickup) adoptée : 15 ampères

gamme de prises temporisées : 4 à 16 ampères

décalage de temporisation : 2

tension de ligne au relais : 15 kV

tension d'étude : 4,16 kV

Rapport de transformation du transformateur de courant

$$\frac{150}{5} = 30$$

courant de prise avec temporisation

$$15 \times 30 \times \frac{15}{4,16} = 1622 \text{ ampères}$$

gamme de prises instantanées

40 à 160 ampères

prise (pickup) adoptée = 70 ampères

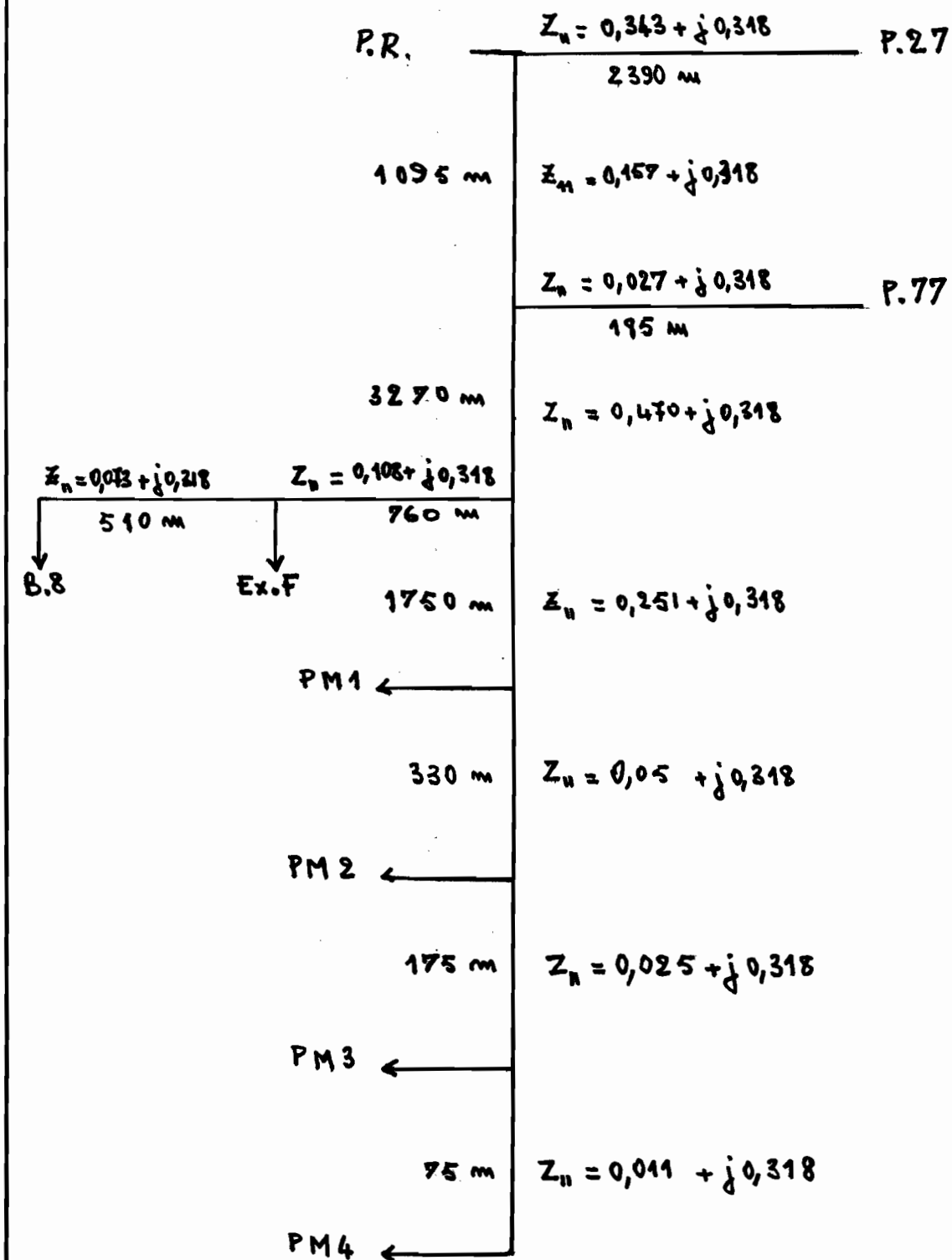
courant de prise instantané

$$70 \times 30 \times \frac{15}{4,16} = 7572 \text{ ampères}$$

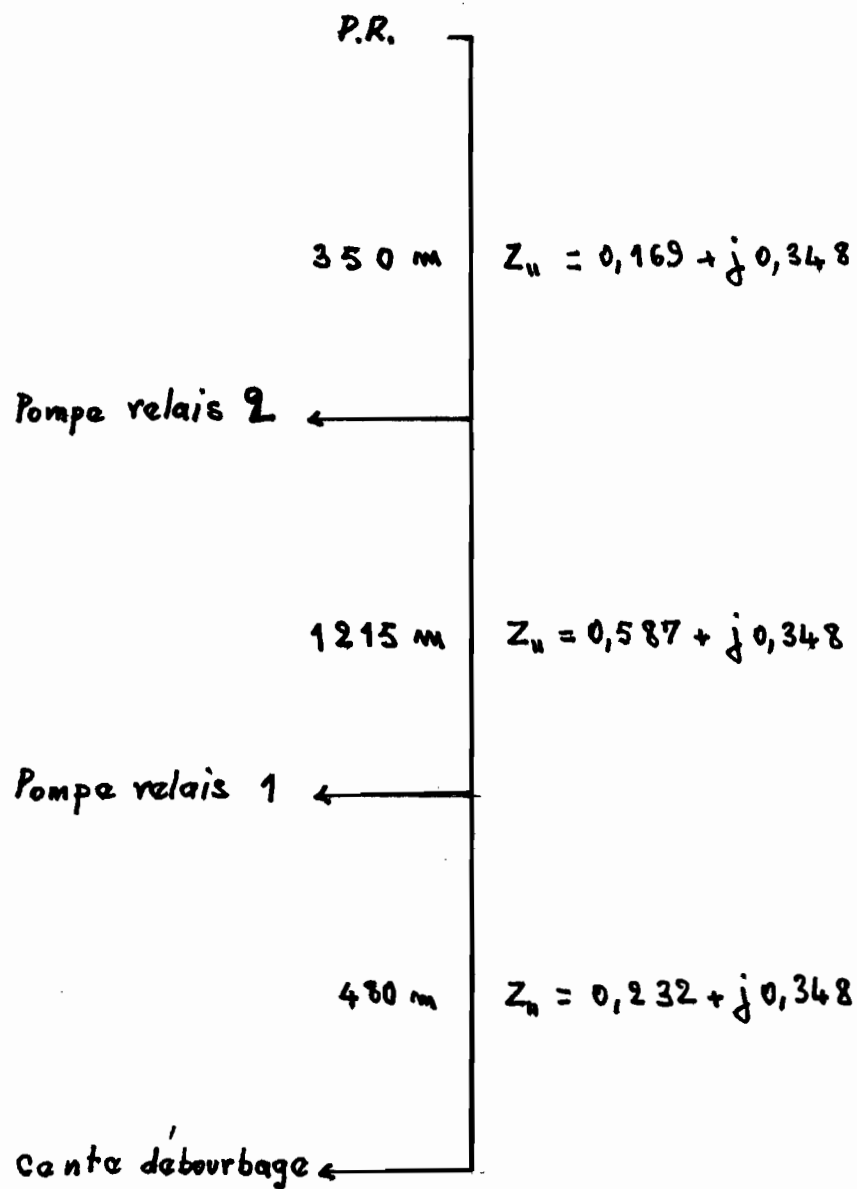
cables : ligne mine 1

charge	Longueur (km)	Section ext. mm ²	diamètre âme (mm)	GMD _{3c} (mm)	GM _{Rac} (mm)	X	R _c	Z ₁₁
Ramblayeur	1	95	11	25	4,28	0,111	0,181	0,212
T ₄	2,0	120	12,36	50	4,81	0,295	0,287	0,412
T _{1T}	1,1	95	11	25	4,28	0,122	0,200	0,234
T _{1Q}	0,25	35	6,7	18	2,61	0,03	0,123	0,127
Roue pelle 1	1,1	95	11	25	4,28	0,122	0,200	0,234
Roue pelle 2	1,1	95	11	25	4,28	0,122	0,200	0,234
1250 . 8	1	120	12,36	50	4,81	0,148	0,144	0,206
650 . 8	1	95	11	25	4,28	0,111	0,181	0,212
280 . 8	1	120	12,36	50	4,81	0,148	0,144	0,206
7.W	1	35	6,7	18	2,61	0,121	0,193	0,508

Lignes aeriennes : ligne mine 1



lignes aeriennes : ligne mine 2



BIBLIOGRAPHIE

Référence 1: Notes de cours Installations Electriques (Elec 421) - HARVEY GAGNE - page 1 à 150 - 1979

Référence 2: publié par l' Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc; IEEE Recommended Practice for Power Distribution for Industrial Plants 4^e édition; page 73 - 136; 1976

Référence 3: J.J. ARCHAMBAULT - cours de lignes électriques, chapitre IX, 1966-67

Référence 4: Central Engineers of the Westinghouse Electric Corporation; Electrical Transmission and Distribution; 4^e édition, page 64-94 - 1950

Référence 5: catalogue Général - Delle-Alsthom DMR - Avril 79

Référence 6: Relais et dispositifs de protection Schumberger - Electrité - Février 72
page 6 607B - 6790 A