

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme master académique

Filière

Electrotechniques

Spécialité

Machines électriques

Etude d'une Ligne Aérienne Catégorie HTB

Présenté par :

Mr. Labandji Mounir

Mr. Slimani Messaoud

Encadré par :

Mr. Ahriche Aimad

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail,

Je tiens à remercier également Monsieur AHRICHE IMAD et qui à été à l'origine de ce travail, pour son encadrement, sa rigueur et ses précieux conseils,

Je présente mes chaleureux remerciements aux enseignants du département Génie électrifcation pour leurs aides et orientations pendant mes deux ans d'étude,

L'ensemble des membres du jury de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail,

Enfin, tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Mounir Labandji

Introduction Générale

L'électricité est une forme d'énergie intéressante car elle est facile à être transporter et distribuer, mais elle n'est pas disponible naturellement sur terre, elle est donc produite par conversion d'autres formes d'énergie élémentaires (hydraulique, mécanique, lumière...). Cette conversion en énergie électrique doit être efficace et continue (de quantité) pour pouvoir répondre au besoin – toujours croissant et incessant – de l'électricité.

La production de l'énergie électrique est faite dans des sites de production appelés centrales ou parcs de production, reliés à un réseau assurant :

- La gestion optimale de ces parcs de production.
- Le transport et la distribution vers des lieux de consommation.

Pour l'étude d'une ligne, SONELGAZ impose un cahier de charge à l'entreprise, Cette dernière va faire l'étude, la réalisation et la mise en fonctionnement de la ligne.

Dans cette étude les principaux chapitres que nous proposons sont les suivants :

- Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques
 - Chapitre II : Composants d'une ligne aérienne haute tension catégorie B
 - Chapitre III : Etude mécanique
 - Chapitre VI : Etude électrique
 - Chapitre V : Simulation d'un problème de défaut dans une ligne HTB
-

*Chapitre I : Généralité sur les Réseaux
Électriques*

Généralités sur les Réseaux Electriques

■ Introduction

A notre époque et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable.

Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité. Ces usines sont appelées centrales électriques. Il existe cinq principaux types de centrales électriques:

I-1- Les Centrales Thermiques :

I-1-1- Centrales à Combustion Fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) :

Dans une chaudière, l'énergie chimique des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), est convertie en chaleur. Celle-ci est utilisée pour chauffer de l'eau qui se transforme en vapeur - voir la figure (I-1).

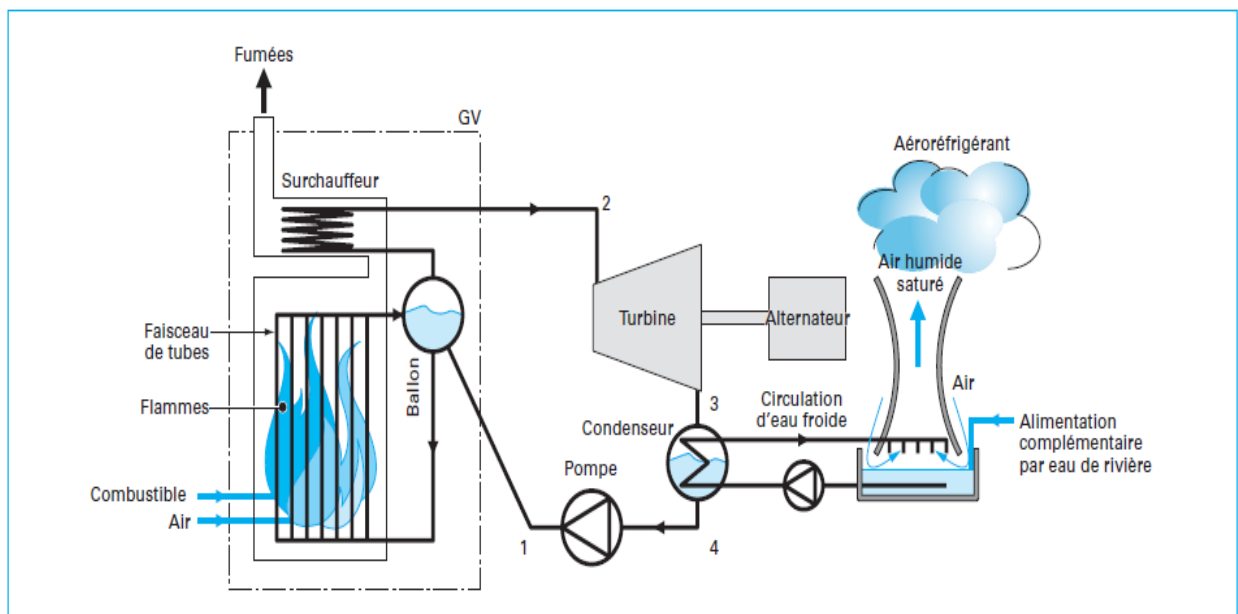


Fig. (I-1) : Schéma d'une installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn

I-1-2- Centrales nucléaires :

Produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire

- Voir figure (I-2).

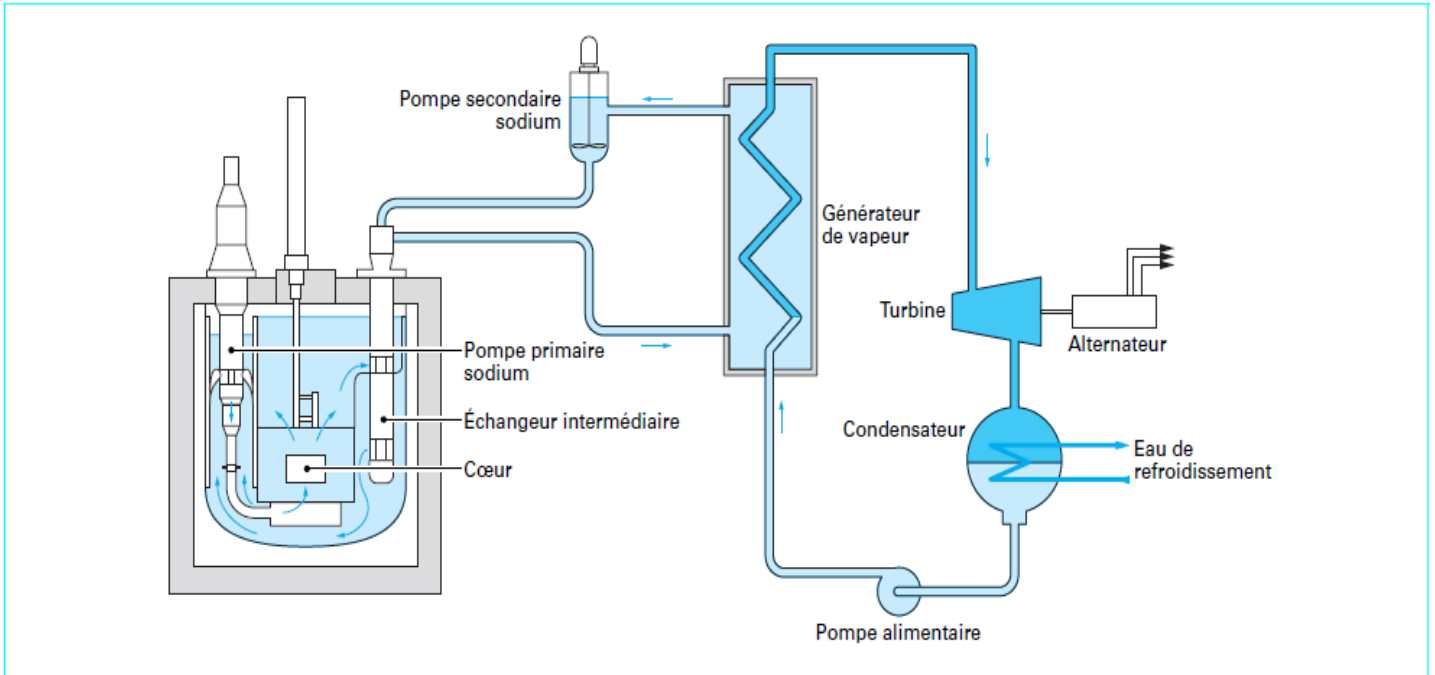


Fig. (I-2) Schéma de principe d'une chaudière à circuit primaire intégré

I-2- Les centrales hydrauliques :

Elles convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique voir la figure (I-34).

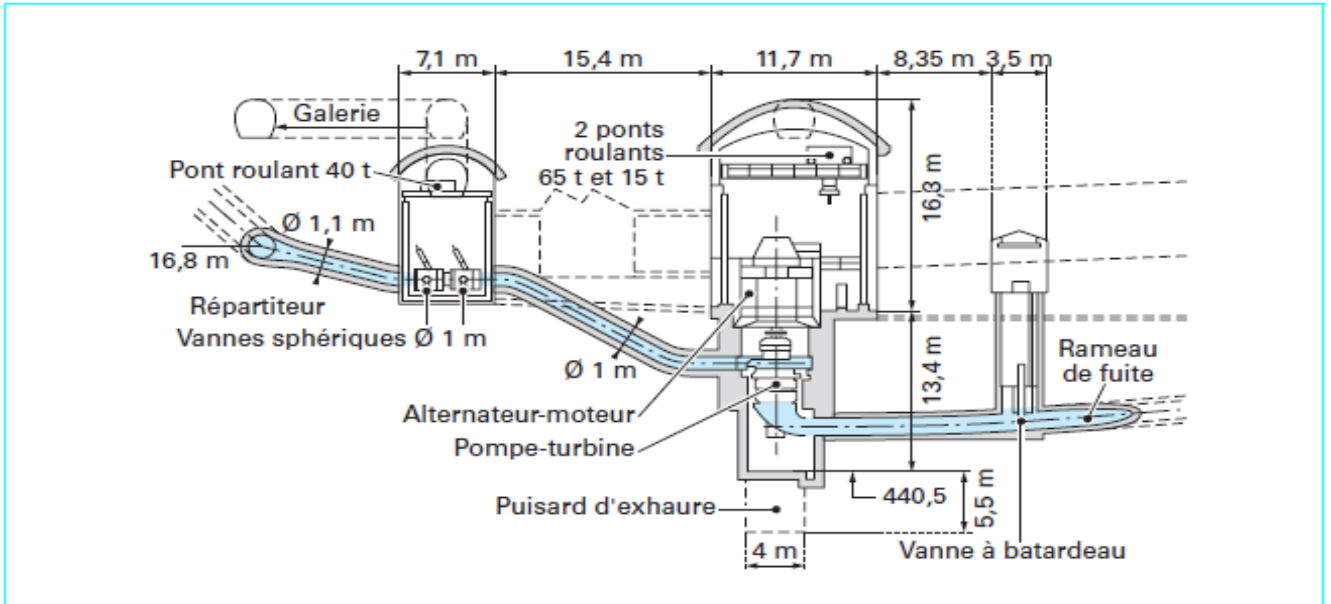


Fig. (I-3): Centrale de pompage

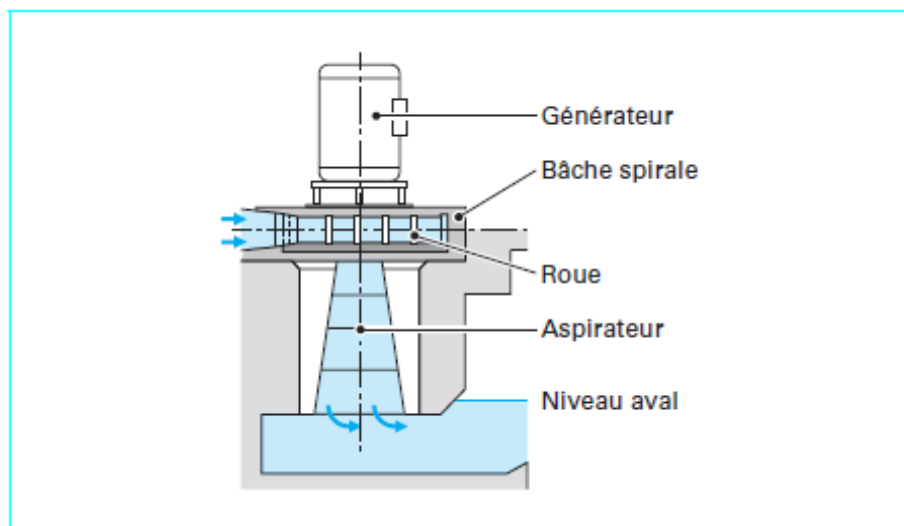


Fig. (I-4): Groupe Francis vertical

Les centrales hydrauliques utilisent l'énergie de l'eau stockée dans un lac de retenue par un barrage.

- Une conduite forcée, située en contrebas, propulse l'eau sur les pales d'une turbine. L'eau est remise ensuite dans le milieu naturel par un canal de fuite.
- La turbine entraîne un alternateur qui produit de l'énergie électrique. Cette énergie est élevée dans un transformateur pour son trajet dans les lignes à haute tension.

I-3- Les centrales solaires :

I-3-1- Les fonctionnements centraux par des panneaux photovoltaïques :

L'énergie solaire photovoltaïque produit l'électricité à partir d'un rayonnement lumineux associée aux énormes ressources énergétiques solaires constitue

- voir la figure (I-5-6).

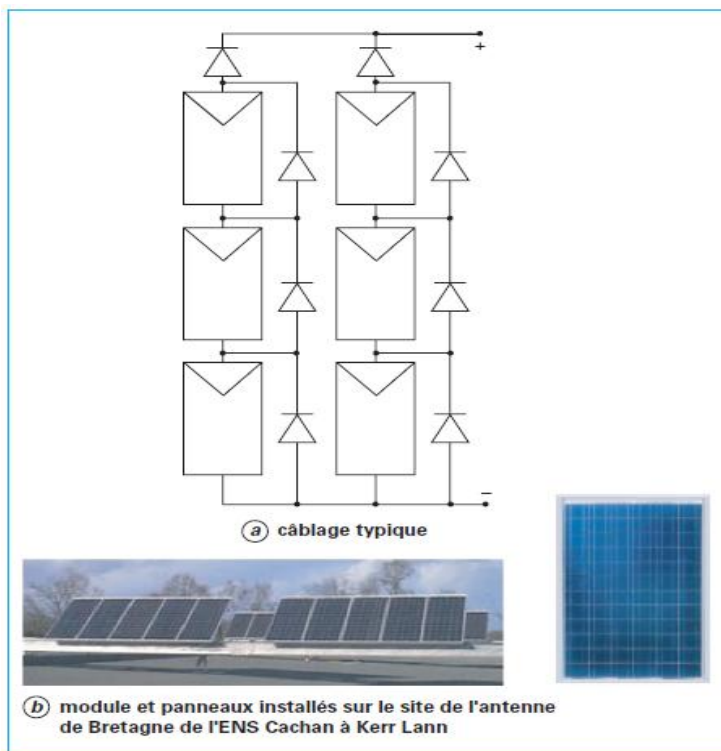


Fig. (I-5): par MPPT à une batterie d'accumulateurs
Panneau photovoltaïque constitué de modules
Connecté en série et en parallèle avec diodes de
Protection by-pass et série.

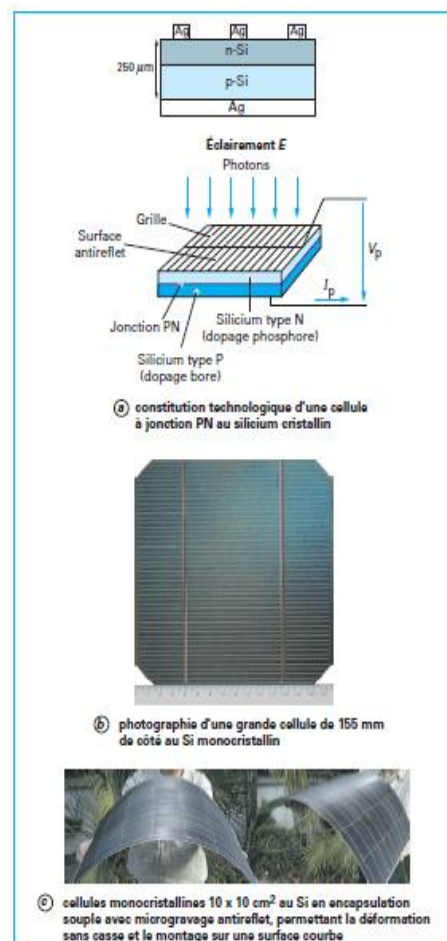


Fig. (I-6): Cellules à jonction PN au silicium cristallin

I-3-2- fonctionnement des centrales d'un tour solaire :

Les centrales solaires thermodynamiques permettent d'exploiter directement la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau en vapeur via un fluide caloporteur

Voir la figure (I-7-8).

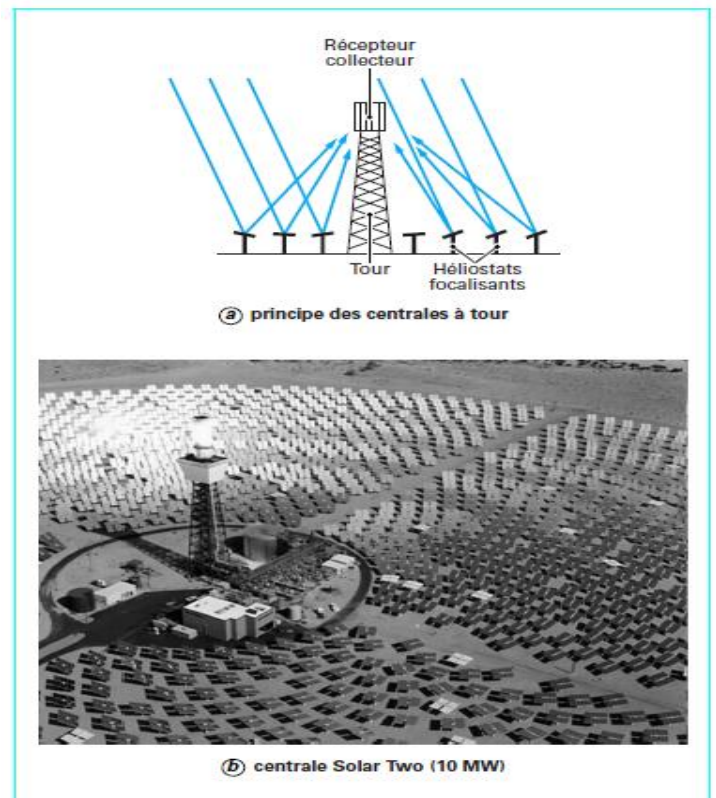
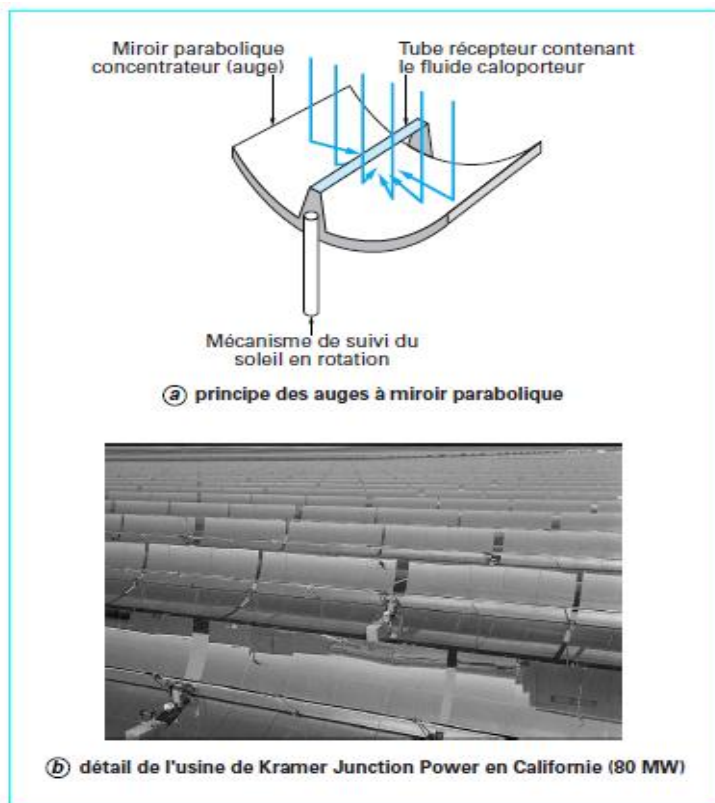


Fig. (I-7): Centrales solaires thermodynamiques à tour à auges miroirs paraboliques

Fig. (I-8): Centrales solaires thermodynamiques

I-4- Les centrales éoliennes:

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique

- voir la figure (I- 9).

Les éoliennes sont divisées en deux types :

- Les centrales éoliennes Aérodynamique (à partir du vent)
- Les centrales Hydro éoliennes (à partir du vague du fon)

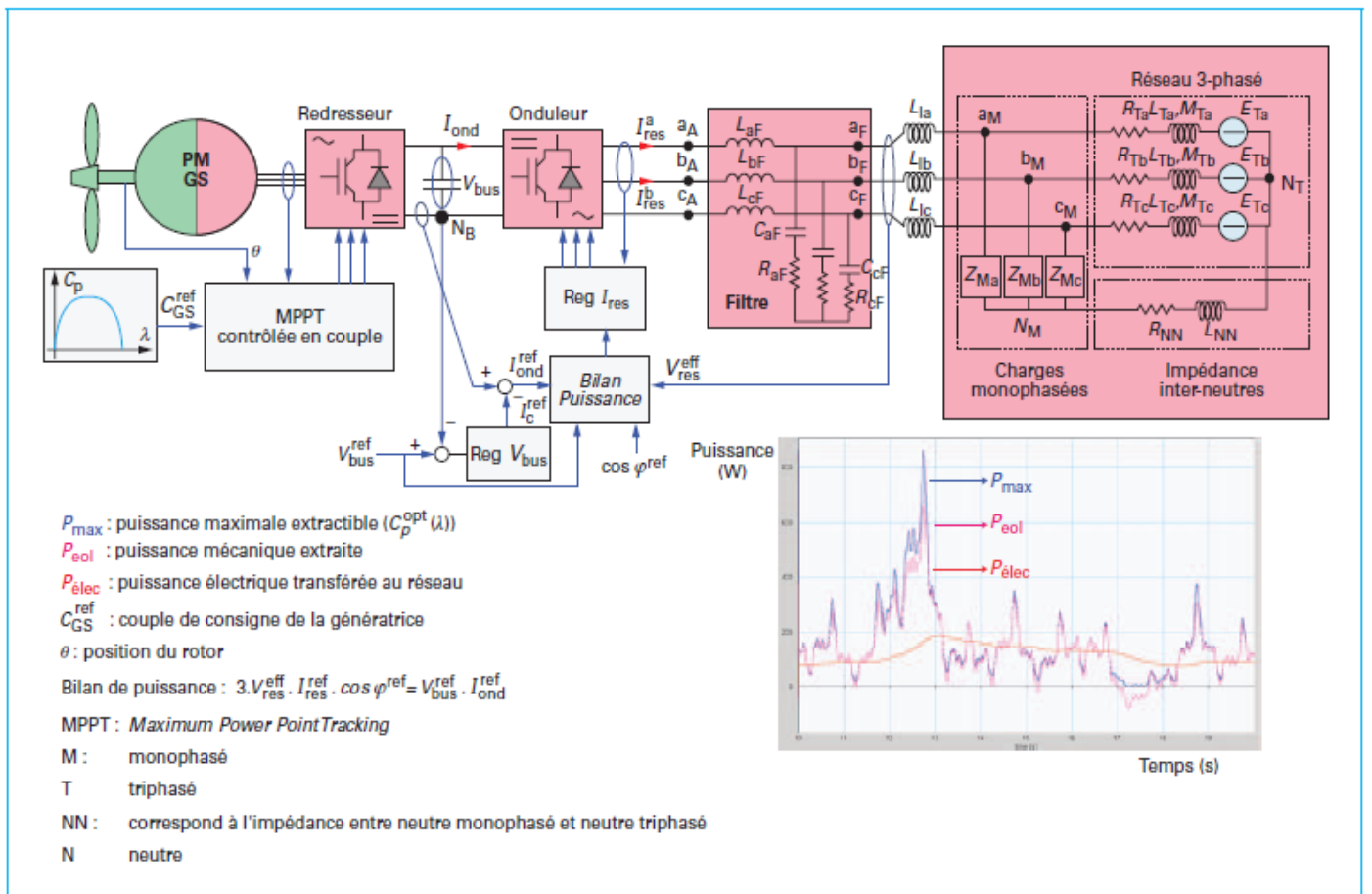


Fig. (I-9): Synoptique d'une chaîne éolienne connectée au réseau BT

I-5- Réseaux électriques:

Ces réseaux, liant les grands centres de production aux grands centres de consommation, doivent assurer la sécurité maximale, laquelle dépendra, d'une part, de la sécurité de la production et, d'autre part, de celle du transport.

L'adoption d'une structure maillée pour les réseaux de transport assure une sécurité très supérieure à celle de la production - voir figure (I-10).

I-5-1- Différents types de réseaux électriques:

Les réseaux électriques sont partagés en trois types :

I-5-1-1- Les réseaux de transport et d'interconnexion :

Sont destinés à assurer la liaison entre les réseaux de transport puissants; leur rôle est d'assurer un secours entre les réseaux de transports. La gamme de tension correspondante est de 220 et 400 kV pour SONELGAZ (voir figure I- 10).

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement les caractéristiques :

- De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport),
- De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion),
- Neutre directement mis à la terre,
- Réseau maillé.

I-5-1-2- Les réseaux de répartition:

Les réseaux de répartition établissent le lien entre les réseaux de transport et d'interconnexion et les réseaux de distribution. Ces réseaux ont une structure maillée ou en boucle qui couvre les zones plus ou moins étendues, leur rôle est de fournir la puissance aux réseaux de distribution et collecter la puissance fournie par les petites usines.

Les échelons de tensions nécessaires sont actuellement de 60 kV à 220 kV,

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HTB/HTA et, d'autre part, les utilisateurs industriels

- La tension est 60 kV ou 220 kV

- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

I-5-1-3- Les réseaux de distribution :

Les postes sources HTB/HTA fournissent de l'énergie électrique à travers les réseaux moyenne tension 10kV ou 30kV aux différents postes HTA/BTA, ces derniers alimentent les usagers à travers le réseau basse tension 230V /400V.

Il existe deux types de réseaux de distribution:

A. Réseaux de distribution à moyenne tension HTA:

- Le réseau HTA urbain souterrain, généralement à 10kV, a une structure en coupure d'artère,
- Le réseau HTA rural aérien est généralement à 30kV, ce dernier a une structure d'exploitation arborescente (radial),
- Neutre à la terre par une résistance,

B. Réseaux de distribution à basse tension BTA:

- 230 / 400 V
- Neutre directement à la terre
- Réseaux de type radial, maillé et bouclé.

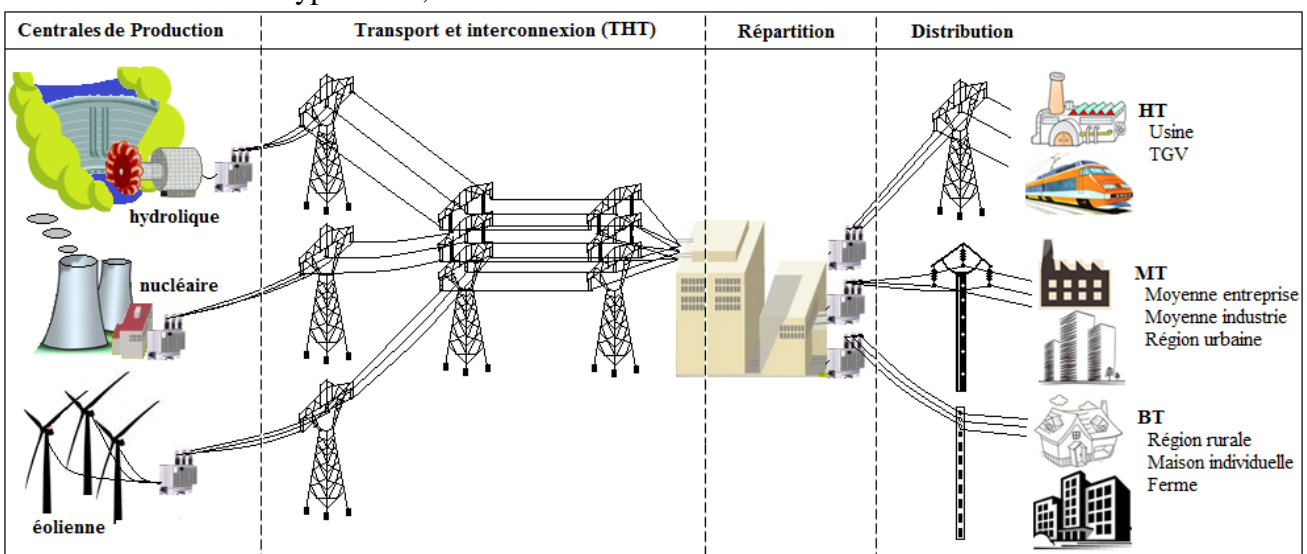


Fig. (I-10): Différents types de réseaux électriques

I-5-2- Les différents types des gammes de tension :

La nouvelle norme en vigueur UTE C 18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit (Voir le Tableaux I- 11) :

- TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V
- BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV

Celons la tension appliquée qui sont :

▪ Le type BTA :

Ce sont les lignes et la filerie installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons, ces lignes fonctionnent à des tensions entre $50 < U < 500V$.

▪ Le type BTB :

Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformations principaux, leur tension est comprise entre $500 < U < 1000V$.

▪ Le type HTA :

Ce sont les lignes reliant les postes de transformations principaux aux centrales de génération, ces lignes fonctionnent pour les tensions $1000 < U < 50\ 000V$.

▪ Le type HTB :

Ce sont les lignes qui relient les postes de transformations principaux aux centrales de génération, les centrales hydrauliques éloignées aux centres d'utilisations, ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000Km et elles fonctionnent pour les tensions $> 50\ 000 V$

Appellation normalisée	Niveau de tension usuel	Ancienne appellation (toujours d'usage courant)	Niveau de tension usuel
HTB	> 50 000V	Très haute tension (THT)	225 000V--- 400 000V
HTA	1000V---50 000V	Haute tension (HT)	63 000V --- 90 000V
BTB	500V---1000V	Moyenne tension (MT)	20 000V
BTA	50V---500V	Basse tension (BT)	230V/380V

Tab. (I-1): Les différents types des gammes de tension

I-5-3- Structure des réseaux HTA :

Nous allons identifier les principales structures de réseaux HTA permettant d'alimenter les tableaux secondaires et les transformateurs HTA / BT.

I-5-3- 1- Structure radial en simple antenne :

Le tableau 1 et 2 et les transformateurs sont alimentés par une seule source, il n'y a pas désolation de dépannage cette structure est préconisée lorsque les exigences de disponibilité sont faibles, elle est souvent retenue pour les réseaux de cimenterie

(Voir la figure I- 11).

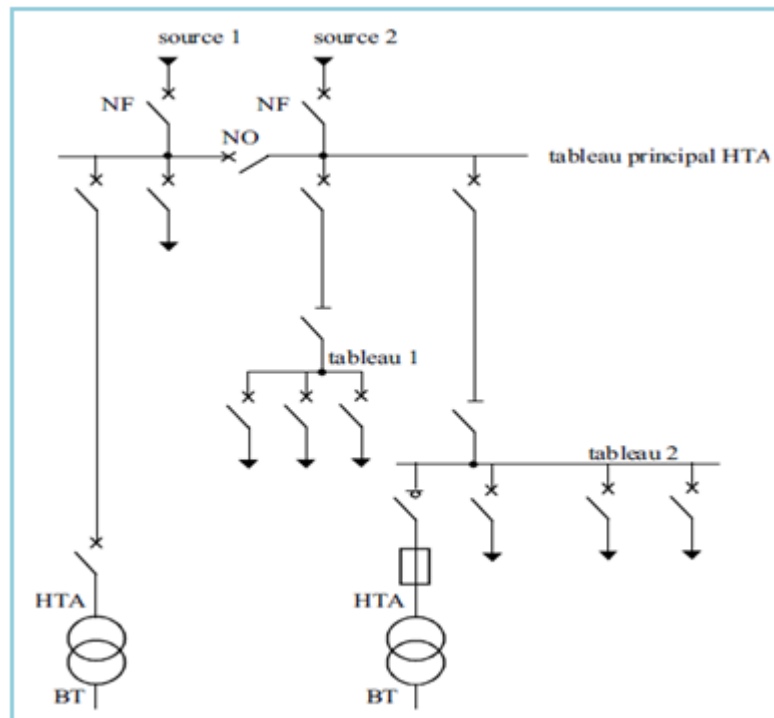


Fig. (I-11): Réseau HTA radial en simple antenne

I-5-3- 2- Structure radial en double antenne sans couplage :

- les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources sans couplage, l'une en secours de l'autre
- la disponibilité est bonne
- l'absence de couplage des sources pour les tableaux 1 et 2 entraîne une exploitation moins souple (voir figure I- 12).

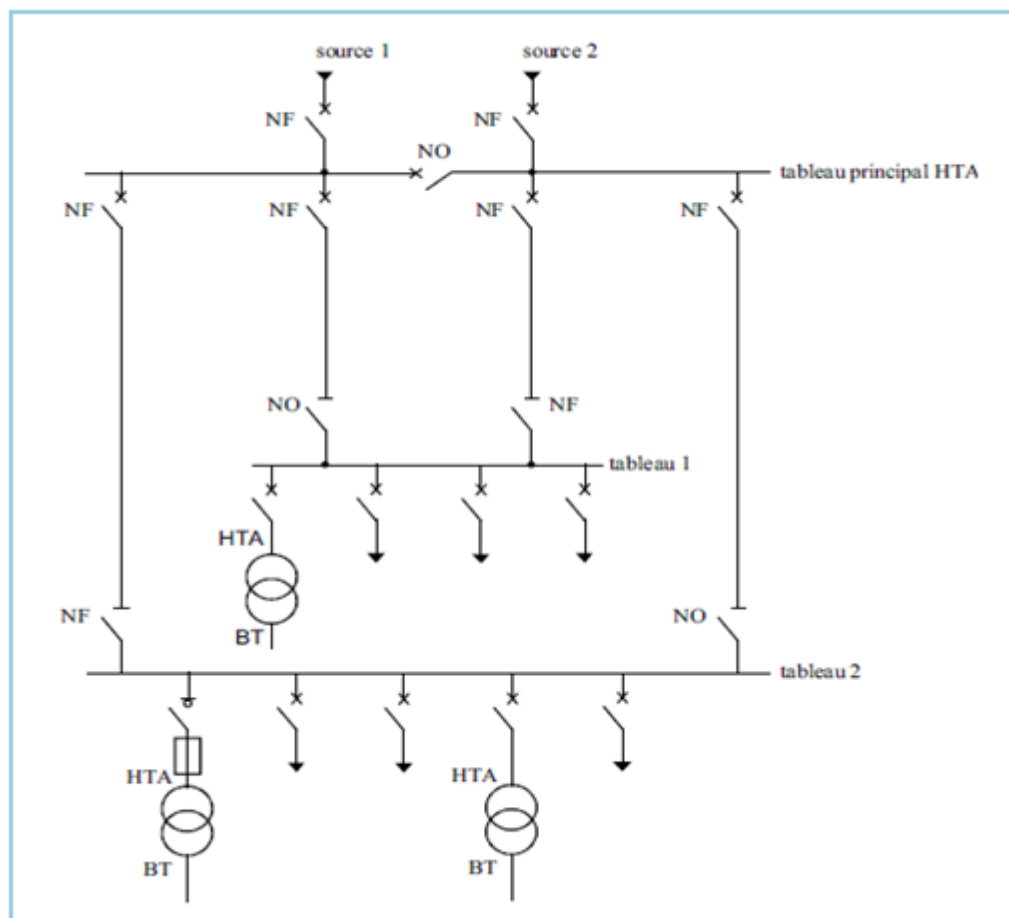


Fig. (I-12): Réseau HTA radial en double antenne sans couplage

I-5-3- 3- Structure radial en double antenne avec couplage :

Les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources avec couplage. En fonctionnement normal, les disjoncteurs de couplage sont ouverts.

- chaque demi-jour de barres peut être dépanné et être alimenté par l'une ou l'autre des sources
- cette structure est préconisée lorsqu'une bonne disponibilité est demandée, elle est souvent retenue dans les domaines de la sidérurgie et de la pétrochimie (voir la figure I- 13).

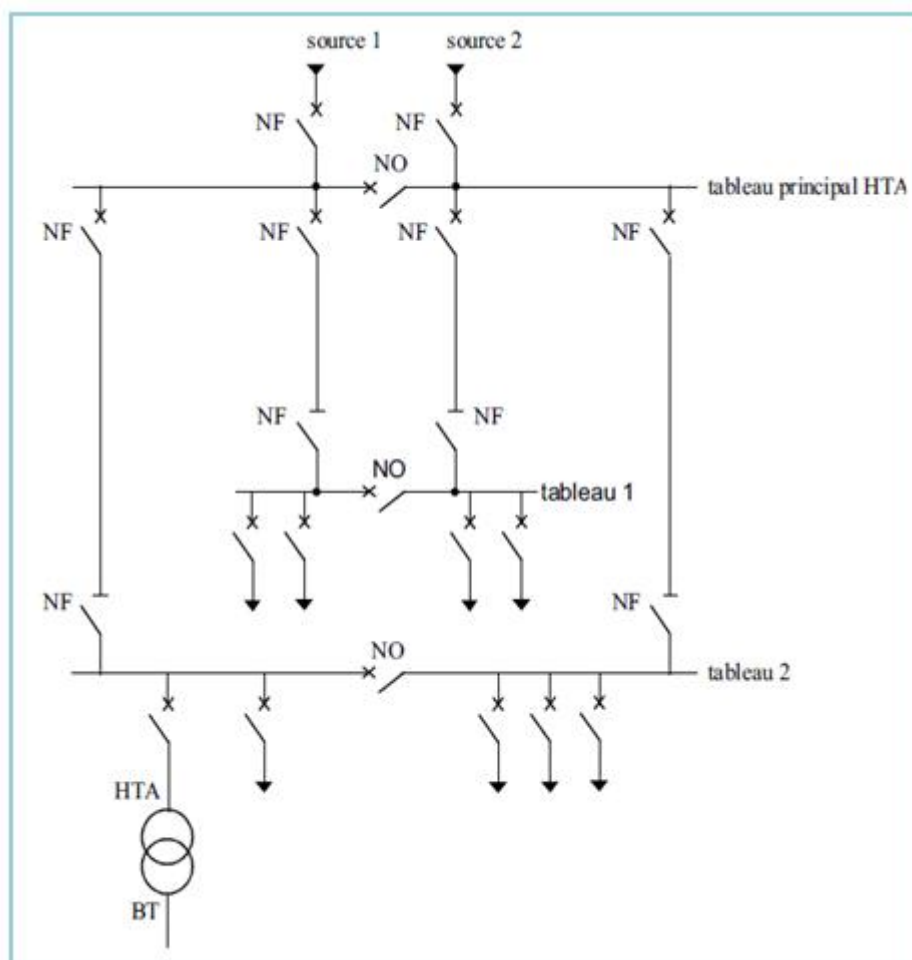


Fig. (I-13): Réseau HTA radial en double antenne avec couplage

I-6- Les postes de transformation:

I-6-1- Poste HTB/HTA:

Les postes sont constitués de transformateurs abaisseurs HTB/HTA à deux étages (exemple: 60/30/10kV) ou à un seul étage (exemple : 60/30kV, 60/10kV) - voir la figure (I- 14).



Fig. (I-14) : postes de transformation HTB/HTA.

I-6-1-2- Poste de répartition HTA/HTA :

Ce sont des postes HTA/HTA composés de jeux de barres et d'un transformateur

HTA/BTA qui servira comme poste de distribution publique ou poste livraison. Les jeux de barres sont alimentés par les lignes dérivant du poste source HTB/HTA l'objectif de l'utilisation de ce type de poste est d'assurer une bonne répartition de charge ainsi que la facilité de surveillance des départs (protection des départs). En effet les câbles de reprise par les postes de répartition sont protégés par les appareils de protection choisis – voir la figure (I- 15).

Les postes d'éclatement peuvent nous permettre plusieurs possibilités de reprises de charges en cas d'incident survenu sur un départ quelconque.



Fig. (I-15) : postes de répartition HTA/HTA

I-6-2- Les postes d'alimentation HTA/BTA :

En va voire la figure (I – 16).

I-6-2- 1- Les postes de distribution publique (DP) :

Ils sont réalisés de la façon la plus économique compatible avec la sécurité des usagers. En zone rurale le schéma d'un tel poste ne comprend pas des disjoncteurs, un défaut sur une ligne BTA étant éliminé par fusible du départ BTA, un défaut (bien rare) dans le transformateur étant vu et éliminé du poste HTB/HTA comme un défaut sur ligne HTA. En zone urbaine, les défauts sont plus rares. Les usagers desservis par un même poste de plus en plus nombreux sont de plus en plus sensibles aux interruptions de service. Aussi on est conduit à remplacer l'interrupteur placé entre le transformateur et les jeux de barre BTA par un disjoncteur, et même les fusibles de départ par des disjoncteurs BTA.

I-6-2- 2- Les postes d'utilisateurs HTA (livraison):

Un tel poste est très semblable à un poste de distribution publique, mais il en diffère par deux points :

Tout d'abord le réseau ne doit ressentir aucune conséquence d'un défaut dans l'installation de l'utilisateur et cela conduit à placer un disjoncteur HTA sur l'arrivée du poste. D'autre part le poste doit être équipé d'une cellule de comptage inaccessible par l'utilisateur.

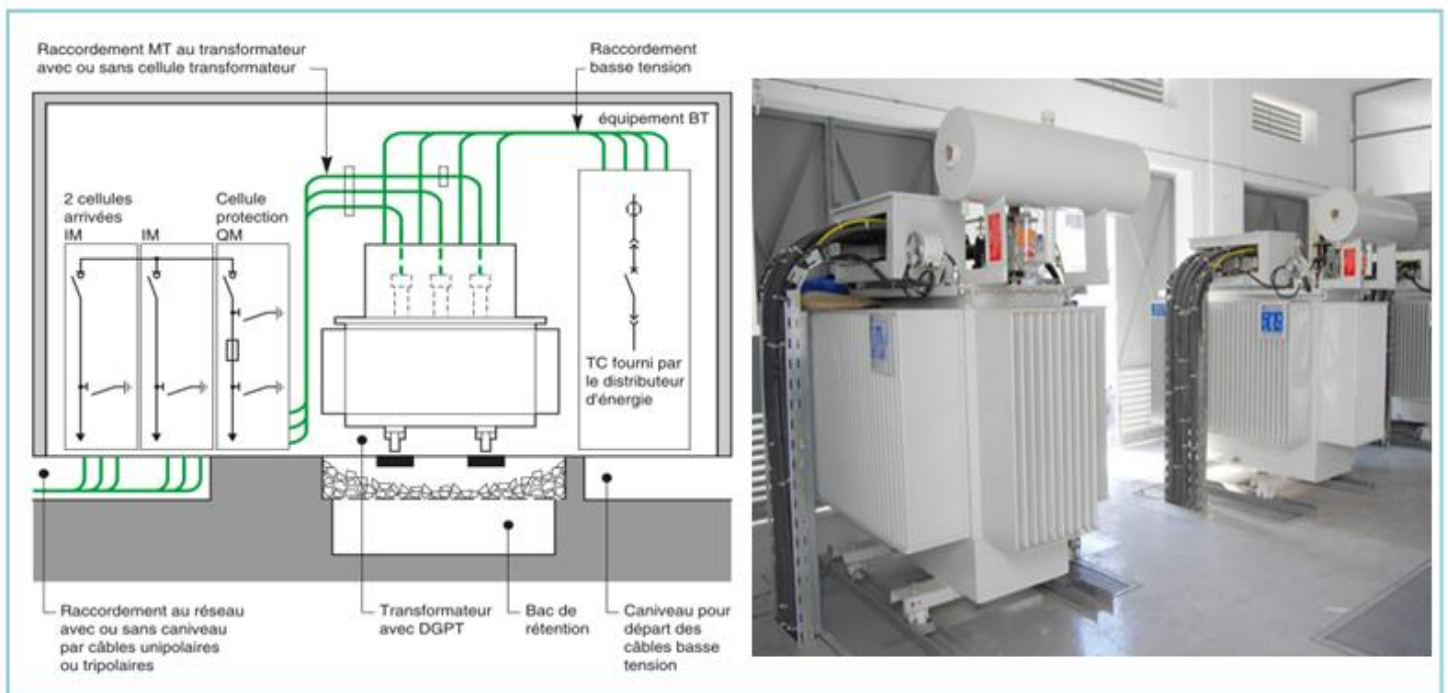


Fig. (I-1) : postes de HTA/BTA

▪ Conclusion :

On a présentés dans ce chapitre les différentes étapes dès la production d'énergie, transformation, transports réseaux à la consommation, on procède à la présentation du chapitre suivant constitué des composantes d'une ligne HTB.

*Chapitre II : Composants d'une Ligne
Aérienne Haute Tension Catégorie B*

Introduction:

Pendant l'étude du tracé, l'ingénieur responsable de l'étude aura recueilli les renseignements qui lui sont utiles pour son choix définitif sur un certain nombre de dispositions préalables à adopter ou à confirmer:

II-1- Choix du type de fondation

II-2- Choix du type des pylônes

II-3- Choix du type d'isolateurs

II-4- Choix du type des conducteurs et de câble de garde

II-5- Choix des accessoires.

II-1- Etude des fondations :

Les massifs des pylônes métalliques sont sollicités de deux façons différentes, soit à la traction (l'arrachement), soit à la compression.

Les massifs de fondation doivent résister aux efforts transmis aux embases par les pylônes (V, H, L).

II-1-1- Les efforts sur les massifs :

A. Massifs à la traction :

Sur ces massifs s'appliquent -Voir la figure (II-1):

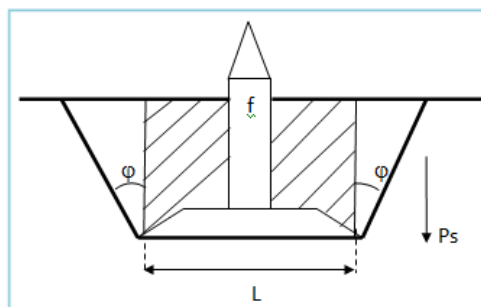


Figure (II-1):Schéma de la Représentation d'une fondation.

1. vers le haut :

Les efforts F dus au pylône sont calculés à l'aide de la ligne d'ancrage T de la note de calcul générale.

Il est noté que la valeur du poids propre du pylône est à compter négativement.

2. vers le bas :

Le poids stabilisant du pylône P_s , c'est -à-dire :

- Le poids de béton
- Le poids des terres soulevées (hachurées sur la figure ci-dessus).
- Le poids d'un certain volume de terre défini par un angle de frottement interne φ qui tient compte de la cohésion du sol (ombré sur la figure ci-dessus)

Dans le cas où l'on ne dispose pas de série de massifs prédéterminés, il convient de calculer le poids stabilisant à partir des volumes et des densités des terres et du béton. Dans le cas contraire, le poids stabilisant est donné par les tableaux pour les différents massifs type utilisés.

Condition de tenue du massif :

$$\frac{P_s}{F} \rangle 1,5 \quad \text{en hypothèse A.}$$

$$\frac{P_s}{F} = \text{Coefficient de stabilité.}$$

$$\frac{P_s}{F} \rangle 1 \quad \text{en hypothèse G.}$$

B. Massifs à la compression :

Sur ces massifs s'appliquent aux efforts dus au pylône F , calculés à l'aide de la ligne ancrage C de la note de calcul générale.

B : le poids du béton.

c : le poids des terres appuyant sur le massif, (hachurées sur la figure de la page précédente).

Si l'on appelle :

c = somme des efforts ci-dessus (daN), soit l'effort à fond des fouilles.

S = surface de base du massif (cm²)

σ = contrainte admissible du sol (daN/cm²)

Condition de tenue du massif :

$$\frac{c}{S} < \sigma \quad \text{Dans toutes les hypothèses.}$$

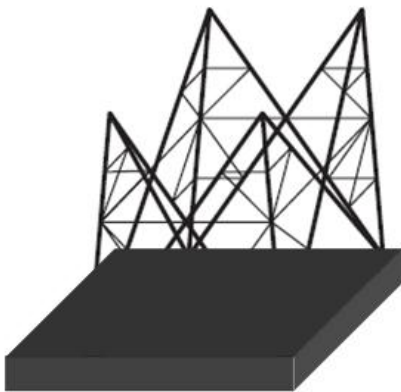
II-1-2- Types des fondations :

Il existe trois types de fondation :

A. Fondation simple :

Ce sont des fondations monopode (massif unique), elles sont utilisées dans les mauvais terrains –

Voir la figure (II-2):



Fondation monopode

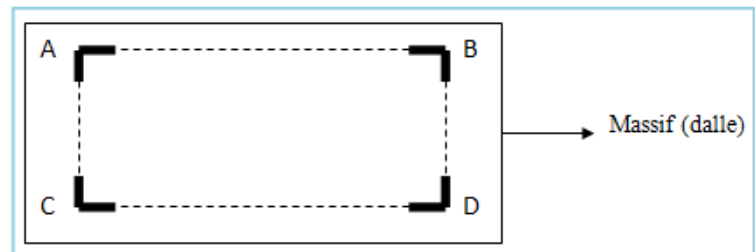
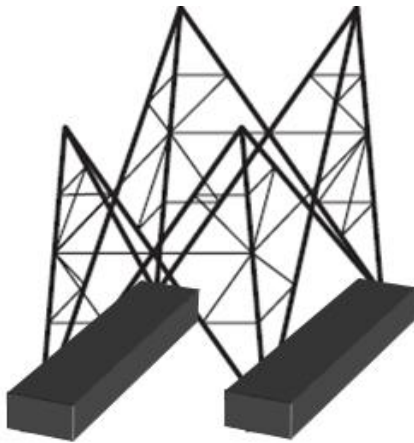


Figure: (II-2): Schéma de la fondation monopode

A, B, C, D sont les pieds du pylône.

B. Fondation bipode :

Ces types de fondation dont l'emploi est peu courant, sont constitués de deux dalles - Voir la figure (II-3):



Fondation bipode

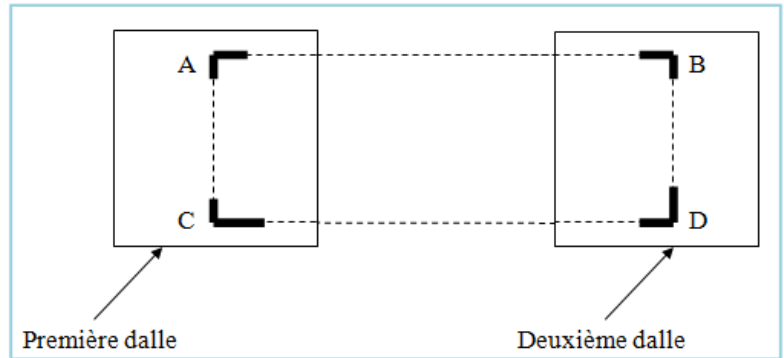
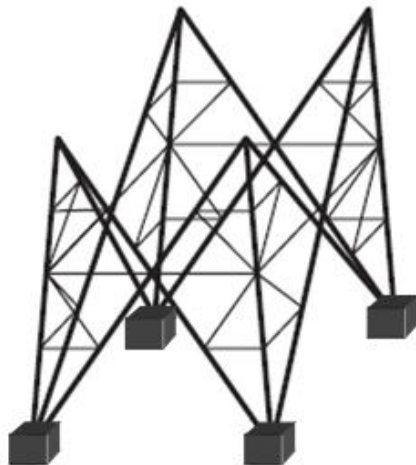


Figure (II-3): Schéma de la fondation bipode.

C. Fondations tétrapodes (multipode):

Ces types de fondation sont constitués par quatre massifs indépendants aux quatre sommets du rectangle de base du pylône - Voir la figure (II-4):



Fondation tétrapode (pieds séparés)

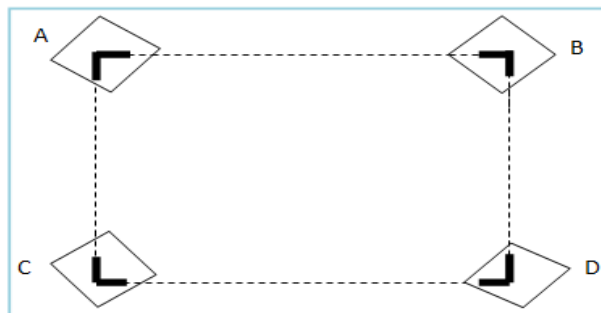


Figure (II-4): Schéma de fondation tétrapode

II-1-3- Mise à la terre des supports :

TYPE	Nature	Angle de soulèvement des terres	Densité de béton Kg/m ³	Densité de terre Kg/m ³	Pression admissible en bars
Roches dures	-calcaires durs -Granite -Grés	65°	2200	2000	7
Terrains tendres	-Craies -Schistes -Tuffeaux	40°	2200	1600	5
Terrains cohérents	- Marnes -Graviers -Marnes argiles	30°	2200	1600	3
Terrains non cohérents	-Sables -argiles -Graviers	20°	2200	1600	2
Terrains immergés. ou inondables	- Marnes	10°	1200	1000	1,3
Mauvais terrains	-Argiles saturées -Vases - tourbes	5°	1200	600	0,3

Tab. (II -1): les caractéristiques des terrains.

Les supports doivent obligatoirement être mis à la terre. Une dérogation à cette règle générale étant cependant admise pour les lignes 60 KV construites sur portiques en bois.

Il convient de relier à des prises de terre les quatre pieds des pylônes. [5]

II-1-3-1- Rôle :

Le rôle des prises de terre, est de relier le câble de garde à la terre, pour protéger la ligne contre les effets de la foudre.

II-1-3-2- L'installation de mise à la terre :

Les mises à la terre sont réalisées, en générale, par deux boucles de câbles en cuivre de 48 mm² de section, disposées, l'un contre les parois, en fond de fouille, l'autre à un mètre du niveau du sol,

dans la terre remblayée.

Ces mises à la terre doivent avoir une résistance inférieure ou égale à 20Ω , la mesure de la résistance des terres se fera avant l'installation des câbles de garde.

Cette mesure doit être faite par temps sec.

Il convient de mettre en place systématiquement une amélioration des prises de terre, lorsque la résistance de celle-ci pour le pylône dépasse 20 ohms.

Le piquet de la mise à la terre, doit être placé dans une tranchée de 80 cm de profondeur maximale.

II-1-3-3- Principe de mesure d'une terre:

A. Prise de terre réelle - notion de rayon équivalent :

On appelle hémisphère équivalente à une prise de terre réelle, l'électrode hémisphère de rayon

R_e qui, enfouie dans le même terrain, possède la même résistance de terre R_T .

Donc :

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi R_e} \quad (II - 1)$$

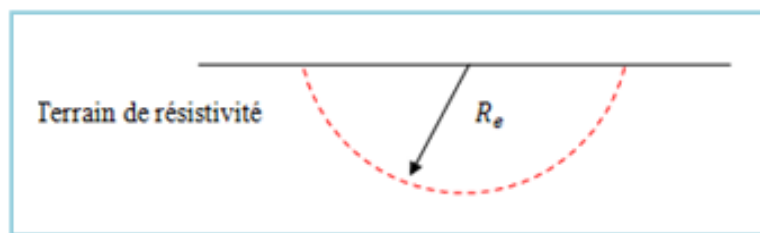


Figure (II-5): Demi-sphère équivalente.

La valeur pratique du R_e de support c'est le rayon équivalent dépend :

- de l'empattement des pieds de pylône
- de la taille des massifs (dimension de la boucle en fond de fouille).

B. L'ordre de grandeur pour R_e :

Pylône treillis HTB, il à quatre pieds mis à la terre :

- pour l'Alignement $R_e \approx 1.3$ à 4.5 m
- pour l'Ancrage $R_e \approx 1.6$ à 5.5 m

II-2- Les pylônes :

Les exigences électriques, mécaniques et géométriques de chaque ligne détermineront Une famille de pylônes réunissant les types de supports les mieux adaptés à la réalisation des ouvrages, Cette famille, ainsi déterminée, est caractérisée par la silhouette des pylônes et leur hauteur de base.

Il existe trois types de pylônes :

- Pylône de type Drapeau (simple ou double) - figure (II-6).
- Pylône de type Nappe - figure (II-7).
- Pylône de type Quinconce (en triangle ou NAS) - figure (II-8).



Figure (II-6): Pylône de type drapeau.

C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 735 000 v Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement -Voir la figure (II-7).



Figure (II-7): Pylône de type Nappe



Figure (II-8): Pylône de type quinconce.

Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110 000 à 400 000 volts.

Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres.

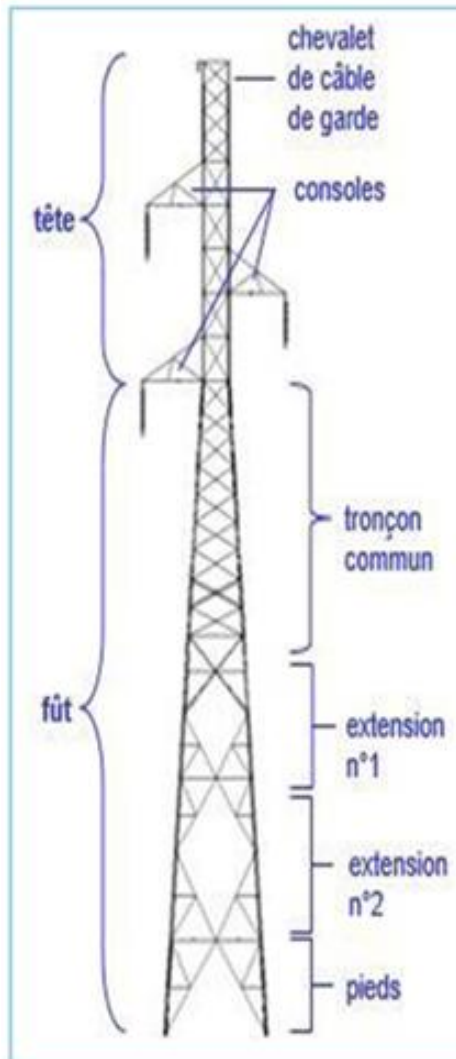
Dans le cas de notre projet, l'armement est déjà connu puisque notre étude sera appliquée sur les pylônes existants dont l'armement étant quinconce (ou triangle) -Voir la figure (II-7-8).

Ce type est le plus utilisé dans les lignes 60kV.

II-2-1- Les différentes parties d'un pylône :

Tous les pylônes de façon générale peuvent être décomposés en trois parties à savoir :

La tête, le fût et les pieds. la figure ci-dessous nous permettra de mieux comprendre le rôle des différentes parties -Voir la figure (II-9):



La tête est constituée des consoles et du chevalet de

Câble de garde Les consoles ont pour rôle de :

- Supporter conducteurs
- Assurer les distances électriques entre câbles
- assurer les distances à la masse entre câbles et Pylône

Le chevalet de câble de garde a 2 fonctions :

- Assurer l'angle de protection du câble de garde
- supporter le câble de garde

Le fût composé du tronc, des extensions et des

Pieds, sa fonction est de :

- maintenir la tête (et donc les câbles) à une certaine distance du sol.
- transmettre au sol les efforts dus aux charges appliquées sur les câbles.

Figure (II-9): Différentes parties d'un pylône

II-3- Les Chaînes d'isolateurs:

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante.

II-3-1-L'isolant :

A. Céramiques :

Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs à haute tension et correspondent à des formules voisines, soit de Al_2O_3 , SiO_2 (porcelaine traditionnelle), soit de Al_2O_3 , 5 SiO_2 (stéatite).

L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capot et tige) ou sèche (type à long fût), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenables, certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.

B. Verres :

Deux types sont utilisés : le verre recuit et le verre trempé.

Le verre recuit a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.

le verre trempé est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression : les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement ; il reste donc en extension et crée des

contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C.

C. Matériaux synthétiques :

Ces isolateurs, dits composites, sont constitués d'une âme réalisée en fibre de verre imprégnée de résine, donnant à l'isolateur sa tenue mécanique, et d'une enveloppe en matériaux synthétiques isolants.

Les revêtements ayant un comportement satisfaisant sous contraintes électriques sont certaines résines des caoutchoucs synthétiques (silicones), Ces revêtements évitent tout cheminement carboné en surface sous l'effet de contraintes électriques mais sont soumis à une érosion superficielle plus ou moins rapide selon leur constitution.

II-3-2- Caractéristiques des isolateurs :

Les grandeurs électriques les plus utiles pour définir une chaîne d'isolateurs ou un isolateur sont :

- La tension tenue spécifiée au choc à sec
- La tension tenue spécifiée à fréquence industrielle sous pluie
- En outre la tension tenue sous pollution est une valeur déterminante pour le choix de l'isolateur

Les grandeurs mécaniques pour définir le choix d'une chaîne d'isolateurs sont :

- La résistance mécanique à la traction
- La résistance mécanique à la flexion

II-3-3- Croquis détaillé de chaîne d'isolateurs simples et doubles :

Les principales chaînes d'isolateurs peuvent être composées d'isolateurs à capot et tige, cas le plus fréquent, avec utilisation généralisée du verre trempé, ou d'isolateurs à long fût en céramique. Les chaînes d'isolateurs pour lignes HTB sont représentées sur la Figure (II-10)

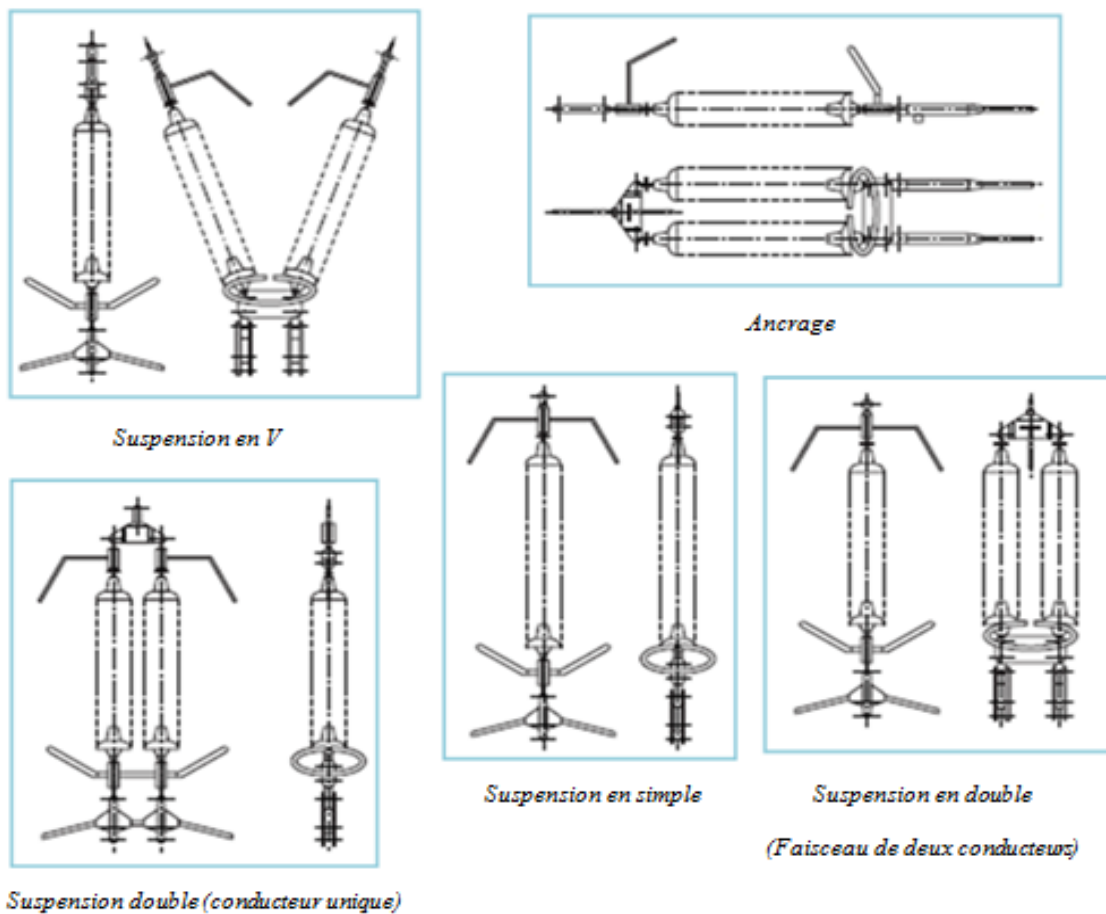


Fig. (II-10) Principales chaînes d'isolateurs pour lignes HTB

Le choix des accessoires de garde pour les isolateurs des lignes HTB doit être fait d'après les impératifs suivants :

- maintenir l'arc de puissance suffisamment loin des isolateurs inférieurs, des chaînes et des accessoires de fixation des conducteurs, pour empêcher que ces pièces vitales ne soient détruites ou endommagées.

- maintenir un niveau radiophonique perturbateur acceptable en agissant sur la répartition du potentiel sur les isolateurs inférieurs.

II-4- Les conducteurs :

Actuellement les câbles les plus couramment utilisés pour les lignes haute tension sont les conducteurs en aluminium avec âme en fils d'acier - Voir la figure (II-11).

Les conducteurs ont pour rôle de véhiculer l'énergie électrique, ils peuvent être aériens ou souterrains (et parfois sous-marins).

Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas... et doivent par conséquent être choisis de façon à résister à toutes ces intempéries.

De nos jours les matériaux les plus utilisés dans la production des câbles sont : l'aluminium, le cuivre, l'acier... le tableau ci-dessous nous présente leurs différentes des caractéristiques.

Propriétés	Cuivre	Aluminium	Acier
Résistivité à 20°C ($10^{-8} \Omega.m$)	1,72	2,8	~15
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	8 890	2 700	7 800
Contrainte de Rupture à la traction (MPA)	380 à 450	150 à 190	1410 à 1450

Tab (II-2) : Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés



Fig. (II-11): Câble en cuivre nu, Conducteur en aluminium

Le cuivre est le conducteur car il a une faible résistivité et il peut aussi tenir lors des chocs auxquels sont soumis les câbles, Par contre il est difficilement manipulable. Aluminium devient ainsi le 2e meilleur matériau pour les câbles dans le domaine des lignes électriques mais sa contrainte de rupture reste trop faible. Afin d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique l'aluminium a été traité et associé à d'autres métaux et les matériaux qui en sont ressortis sont: l'aluminium écroui dur, Aluminium recuit et les alliages (Aluminium-Acier, Almélec). Les caractéristiques de ces matériaux seront présentées dans le tableau Tab (II-3):

Matériaux	Résistivité à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	Température maximale permanente (°C)
Aluminium écroui dur	2,825	160 à 180	75
Almélec	3,26	315 à 325	75
Aluminium recuit	2,92	59 à 97	250

Tab (II-3): Caractéristiques des différents alliages en aluminium

L'almélec est un alliage d'aluminium qui contient des additions de silicium et de magnésium, c'est pour cela qu' le matériau le plus utilisé pour la construction des lignes.

II-4-1- Utilisation des câbles :

« A transit égal, (utilisation d'un conducteur homogène en Almélec permet de diminuer le cout d'établissement des lignes.»

La section du câble homogène en Almélec à installer sur ouvrage est mentionnée sur la décision. Cette section admet la valeur de transit (Intensité Maximale Admissible Permanente) souhaitée.

Cependant le maitre d'œuvre chargé la construction de l'ouvrage peut retenir,

Parmi les câbles d'utilisation courante et en fonction des caractéristiques du trace, le câble en Almélec-acier électriquement équivalent au câble en Almélec homogène, voire un câble de section supérieure si le relief du terrain conduit d faire de très grandes portiers.

II-4-2- Matériaux utilisés :

Il Ya 4 types des matériaux utilisés :

- Aluminium à une contrainte à la rupture de 160 MPA
- Alliage d'aluminium « almélec » à une contrainte à la rupture de 320 MPA
- Acier
- Cuivre.



II-4-1- Le Câble de garde :

Au plus haut de la ligne est disposé un câble appelé câble de garde, dont le rôle est de protéger des coups de foudre afin d'éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs.

Le plus souvent leur choix dépend de la nature et du choix des conducteurs mais, l'on peut aussi noter que leur dimensionnement est plus délicat que celui des conducteurs car :

- Sur le plan mécanique, ils doivent résister aux mêmes contraintes que les autres conducteurs pourtant ils sont de section plus faible.
- Sur le plan électrique, ils doivent assurer un écoulement rapide du courant du sommet du pylône jusqu'à la terre des supports par le biais des pylônes ou des masses métalliques et comme tous les autres conducteurs ils doivent être capables de résister à des surcharges

La présence du câble de garde sur une ligne aérienne a une influence dans plusieurs domaines :

- Protection électrique contre les coups de foudre directs.
- Le câble de garde divise le nombre de défauts directs, donc améliore la qualité de service et entraîne une diminution des contraintes supportées par le matériel.
- Diminution de l'induction dans les circuits de télécommunication ou les conduites enterrées.
- Les câbles de garde constituent un écran et réduisent les phénomènes d'induction dans les circuits ou conduites parallèles à la ligne.

- Amortissement des ondes de surtension de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Interconnexion des mises à la terre des supports.
- Réduction du potentiel statique des conducteurs de phase d'une ligne sous un nuage orageux.
- Transmission d'information par circuit de télécommunication incorporé au câble de garde carets de télécommunication.

II-4-3- Choix des conducteurs et des câbles de gardes :

Pour la construction des lignes électriques à haute tension, on utilise presque exclusivement des conducteurs à base d'aluminium, à la fois pour des raisons d'économie et de plus grande facilité d'exécution.

Il s'agit pour la majeure partie de conducteur :

- En aluminium acier
- En almélec (alliage d'aluminium)
- Ou en almélec acier.

II-4-4- Caractéristiques des câbles :

1. Câble conducteur 366 mm²:

Le conducteur (Almélec 366mm²) est caractérisé par :

- Code : 366 - A L 4.
- Ancien code : 366.
- Section : 336,2 (mm²).
- Nombre de fils : 61 fils.
- Diamètre de Fils : 3,55 mm
- Conducteur : 24,9 mm

-
- Masse linéique : 1008,9 kg / km.
 - Charge de rupture : 115,36 kN.
 - Résistance linéique : 0,0908 Ω / km.
 - Module d'élasticité 57000 N / mm².
 - Coefficient de dilatation linéaire : 2,30 E - 05 / K

2. Câble de garde 132 mm² (Alcatel):

- Type de câble: ASLH-D(S) bb 1×24 SMF (AA/ACS 108/24-18,8)
- Diamètre : 15,4mm
- Masse linéique : 487kN
- Section d'armure : 132,3mm²
- Charge de rupture : 61,6kN
- Module d'élasticité : 76,2kN/mm²
- Coefficient de dilatation linéaire : 19,1 10-6/k
- Résistance linéique DC : 0,285 Ω /km
- Courant de court-circuit (0,5s, 20-200°C) : 18,8kA
- Tension maximale d'exploitation : 195,6N/mm²
- Tension normale d'exploitation (EDS) : 74,5N/mm²
- Tension maximale d'installation : 18,5KN
- Longueur de livraison standard : 4000m

II-5- Accessoires fixés sur les conducteurs:

Il existe plusieurs types de pièces installées sur les conducteurs. La plupart de ces pièces sont fixées sur le câble à un couple de serrage contrôlé, leur bon comportement dans le temps dépend aussi des critères suivants :

- 1- la forme intérieure de la pince de fixation des pièces doit se terminer par des arrondis afin de ne pas blesser le conducteur
- 2- les pièces ne doivent comporter ni d'arête vive ni de boulons proéminents.

A. Amortisseurs stock bridge:

L'atténuation des vibrations éoliennes s'effectue également au moyen de dispositifs amortisseurs fixés sur les câbles à proximité des points d'accrochage.

Les plus utilisés dans le monde sont connus sous le nom de stock bridge. Ce sont des masses oscillantes chargées de modifier les caractéristiques dynamiques du conducteur et d'absorber l'énergie d'oscillation du conducteur. L'installation de stock bridge est réalisée à partir d'une étude d'amortissement qui détermine leur nombre et leur positionnement sur le câble,

Vous trouverez ci – dessous l'image d'un Stock bridge -Voir la figure (II-12).



Fig. (II-12) : Schéma d'Image d'un Stock bridge

B. Entretoise:

La géométrie de l'entretoise doit être en accord avec la configuration du faisceau pour un maintien de l'écartement des sous-conducteurs pour limiter les vibrations de câble et maintenir l'équipotentialité aussi bien dans les conditions normales qu'après court circuit -Voir la figure (II-14).

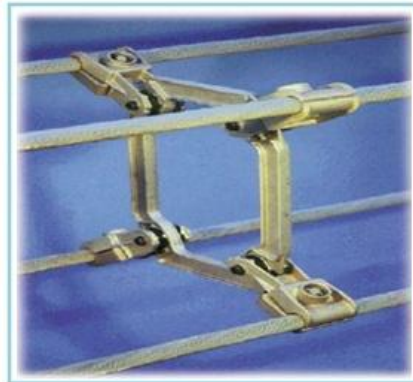


Fig. (II-13): Schéma d'entretoises vibratoires

C. Balises lumineuses:

Ces balises permettent le balisage nocturne des lignes à proximité des aérodromes, Elles sont dimensionnées en fonction de la tension d'exploitation de la ligne à équiper et sont constituées de feux fixes de couleur rouge dont l'intensité lumineuse n'est pas inférieure à 10 cd -Voir la figure (II-14).



Fig. (II-14): Schéma de la Balises lumineuses.

D. Balises diurnes:

Ces pièces permettent le balisage diurne des lignes à proximité des aérodromes. Elles sont réalisées par des sphères dont le grand cercle à une surface de $0,20 \text{ m}^2$ ou par toute autre forme présentant la même surface apparente minimale, quel que soit le point de vue.

Ces balises rouges ou blanches sont métalliques pour l'ensemble des conducteurs mais peuvent être aussi en plastique pour les câbles de garde.

Les images ci-dessous représentent les balises existantes de nos jours -Voir la figure (II-16).



Fig. (II-15): balises diurnes et balises lumineuses

E. Balises avifaunes:

Les balises avifaunes permettent le balisage des lignes sur les lieux de migration des oiseaux

Ces balises rouges ou blanches sont constituées d'un fil préformé en matière plastique, la spirale comprend à ses extrémités deux hélices d'accrochage pour la fixation sur le câble et des spires centrales de plus grand diamètre pour améliorer la visibilité -Voir la figure (II-17).

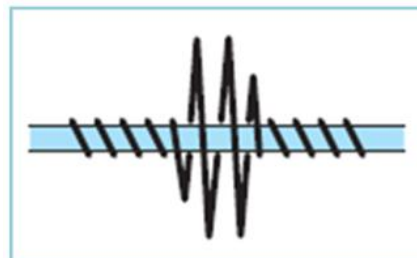


Fig. (II-16): Balises avifaunes

F. Contrepoids anti giratoires:

Les contrepoids anti giratoires limitent la surcharge de givre ou de neige collante autour des câbles. Ils sont constitués d'une pince ou mâchoire pour la fixation sur le câble, d'une tige et d'une masse sphérique (contrepoids). Ils sont dimensionnés en fonction des différentes sections de câbles et doivent être montés sur les câbles avec une garniture de câble (fils préformés en hélice).

G. Contrepoids de bretelles:

Ces contrepoids permettent de réduire l'amplitude des balancements des bretelles de continuité (ou ponts) sous l'effet du vent. Ils sont positionnés directement sur le câble constituant la bretelle et sont dimensionnés en fonction de différentes plages de sections de câbles, la masse unitaire d'un contrepoids est de 20 kg - Voir la figure (II-17)

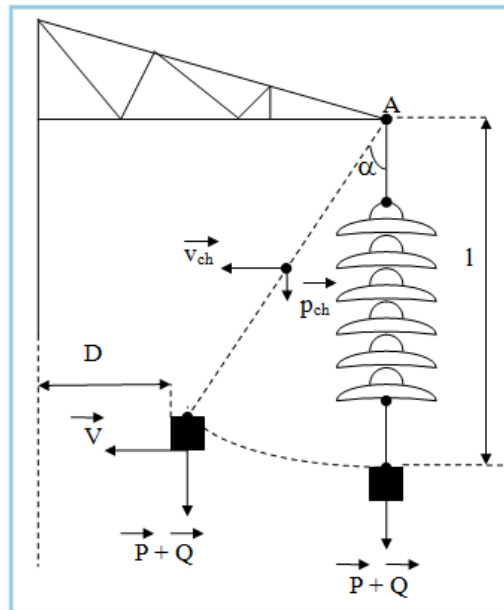


Fig. (II-17): Schéma de contrepoids de bretelles

■ Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre les différents matériaux, isolateur, pylône, fondation, accessoires utilisés dans la réalisation d'une ligne de transport HTB ; on va procéder à la présentation de chapitre suivant étude mécanique.

Chapitre III : Etude Mécanique

Introduction:

Une ligne à très haute tension est une autoroute de l'énergie, elle permet de transporter sur de grandes distances de grandes quantités d'énergie, et elle doit être un ouvrage de technologie simple, facile et rapide à étudier et à réaliser, Elle doit s'accommoder aux contraintes du tracé et d'un accès facile pour l'exploitation.

▪ But des calculs:

Le dimensionnement mécanique des lignes aériennes prend en considération plusieurs

Critères :

- Les contraintes géométriques imposées par le site
- Le comportement mécanique des câbles et les calculs des efforts exercés par les Conducteurs sur le support.
- L'influence de la température sur les câbles et les vérifications des distances Réglementaires à la flèche maximale.

III-1-Etude mécanique:

Dans l'étude mécanique, les conditions climatiques sont généralement les plus influentes sur le comportement mécanique des câbles. Dans ce qui suit ces conditions seront présent comme étant des hypothèses.

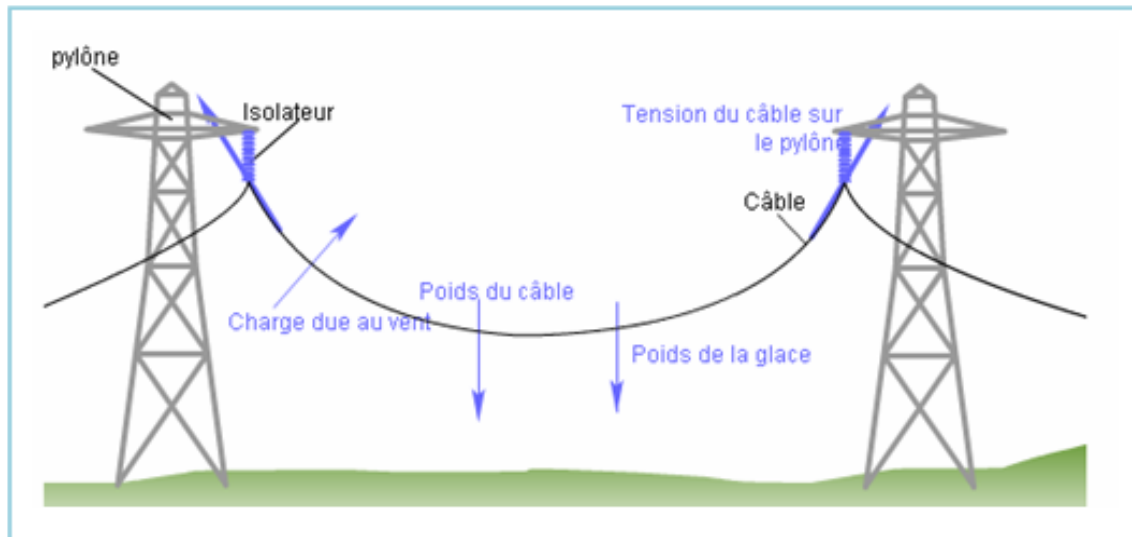


Fig. (III-1): Efforts mécaniques appliqués sur le câble.

III-1-1-Hypothèses Climatiques:

Les ouvrages seront calculés, conformément aux prescriptions de l'arrêté technique déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les études des lignes HTB de troisième catégorie.

III-1-2-Hypothèse A (d'été):

Température moyenne de la zone avec un vent horizontal créant sur les lignes les pressions suivantes.

- Conducteurs, câbles de garde : 48 daN/m²
- Surfaces planes : 120 daN/m²

III-1-3-Hypothèse B (d'hiver):

Température minimale de la zone avec un vent horizontal créant sur les lignes aériennes les pressions suivantes:

- Conducteurs, câble de garde : 18 daN/m²
- Eléments plans de supports : 30 daN/m²
- La température de répartition (max) sera de $\theta_{max} = 75^\circ \text{C}$.

Afin d'assurer une sécurité suffisante, malgré les conditions climatiques variées des régions traversées, celles-ci sont divisées en trois zones géographiques caractérisées par des régimes de températures définis ci-après:

1) Zone soumise à l'influence marine sans surcharge de givre:

- Température moyenne : 20°C
- Température minimale : -5°C
- Température maximale : 75°C

2) Zone hauts plateaux, massifs montagneux, plaines intérieures avec givre:

- Température moyenne : 20°C
- Température minimale : -5°C
- Température maximale : 75°C

3) Zone déserte sans givre:

- Température moyenne : 25°C
- Température minimale : -5°C
- Température maximale : 75°C

III-1-4-Hypothèses complémentaires:

III-1-4-1-Le Vent :

Le territoire Algérien est soumis à deux zones de vent :

A-ZVN : zone de vent normal - 480 Pa (sur les câbles) tout le territoire sauf zones ZVE

A-ZVE : zone de vent exceptionnel - 640 Pa (sur les câbles)

- le littoral sur une bande de 2 km de profondeur
- les estuaires et les baies
- les crêtes montagneuses séparant deux vallées

Pour déterminer la pression dynamique sur les câbles et sur les structures, nous utilisons une formule établie en appliquant le théorème de Bernoulli.

$$P_v = \frac{1}{2} (C_x \times \sigma \times v^2) \quad (III - 1)$$

Avec :

P_v : La pression dynamique sur les câbles

v : Vitesse du vent en (m/s)

σ : Masse volumique de l'air (kg/m³) Avec $\sigma = 1,225 \text{ kg / m}^3$.

Le coefficient de traînée C_x dépend de l'obstacle et varie avec la vitesse du vent,

Les essais, qui ont été réalisés avec des conducteurs câblés, montrent que l'on peut retenir :

$C_x = 1,00$ pour le câble

$C_x = 2,1$ pour les treillis.

Cette relation, qui permet de calculer la pression du vent sur une construction ponctuelle, ne peut s'appliquer à une ligne aérienne.

Par l'application de la formule précédente on obtient les pressions suivantes :

Zone de vent Hypothèse A	Vent sur les câbles (Pa)	Vent sur pylônes treillis (Pa)	Vent sur mono odes métalliques (Pa)	Vent sur supports cylindrique (Pa)
ZVN	480	1000	480	400
ZVE	640	1330	640	530

Tab. (III-1):. Représentation des pressions de vent

▪ **Remarque :**

La pression du vent s'exerce tout le long de la ligne HTB est égale à 180 Pa sur le manchon.

III-1-4-3-Hypothèse givre:

Il y a lieu de tenir compte dans les calculs justificatifs des dépôts de givre qui peuvent se produire sur des ouvrages-Voir le Tableaux(III-1)

On adopte les hypothèses indiquées ci-après, pour une température minimale de la zone.

		Epaisseur de manchon de givre (en cm)						
		Conducteur					C.D.G	
Désignation du givre	Poids linéique du givre Kg/m	228mm ²	288mm ²	366mm ²	411mm ²	617mm ²	116mm ²	132mm ²
Lourd	6,00	4,74	4,64	4,53	4,47	4,26		
Moyenne	4,00	3,73	3,63	3,52	3,27	3,27		
Leger	2,00	2,42	2,33	2,24	2,02	2,02		
Câble de garde	1,20	/	/	/	/	/	1,92	1,4

Tab. (III-2):Les états (catégories) de givre.

▪ **Remarque :**

pour les lignes HTB, à définir la surcharge par l'épaisseur du manchon, quelle que soit la section du câble, est égale à 0,6.

A. Surcharge des supports:

Les efforts dans les barres, provenant du poids propre au support et de la pression du vent sur la charpente, sont multipliés par des coefficients forfaitaires:

B. Givre léger:

- Poids propre du support $\times 1$
- Vent sur le support= vent de l'hypothèse A $\times 0,25$

C. Givre moyen lourd:

- Poids propre du support $\times 2$
- Vent sur le support= vent de l'hypothèse A $\times 1$

D. Hypotheses E.D.S (EVERY-DAY-STRESS) :

A la température moyenne de la région, sans vent, la tension du câble ne devra, en aucun cas, dépasser les 18% de sa charge de rupture.

E. Calcul du coefficient de surcharge (m) :

Pour simplifier le calcul des câbles on introduit les efforts appliqués par le vent et le givre en multipliant le poids linéique du câble par un coefficient appelé le coefficient de surcharge m -Voir la figure(III-2-3).

Le câble peut être surchargé par un poids P de givre et par un effort horizontal F au vent.

P_c :Le poids propre du câble par mètre linéaire (dcN/m)

P_g :Le poids du givre sur le câble par mètre linéaire (dcN/m)

F : Effort transversal du vent par unité de longueur par mètre linéaire (dcN/m)

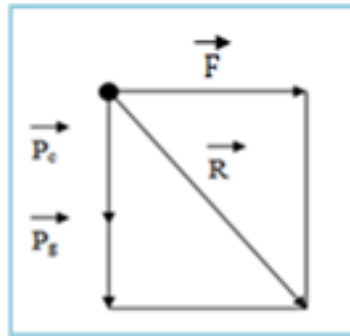


Fig. (III-2): Surcharge de câble.

On définit la notion de poids apparent R, on a ainsi :

$$R = \sqrt{F^2 + (P_c + P_g)^2} \quad (III - 2)$$

Avec :

$$m = \frac{R}{P_c} \quad (III - 3)$$

Alors :

Le coefficient m est appelé coefficient de sur charge, on à ainsi :

$$m = \frac{\sqrt{F^2 + (P_c + P_g)^2}}{P_c} \quad (III - 4)$$

▪ **Remarque :**

Lorsque il n'y à ni vent, ni givre $m = 1$

Condition climatique	Coefficient de sur charge (m)
A-ZVN	1.37
A-ZVE	1.59
B	1.06
Vent réduit	1.1
Vent réduit	1.22
Vent extrême	1.85
Givre 2kg/m	2.32
Givre 4kg/m	3.66

Tab. (III-3): Condition climatique proportionnelle à coefficient de sur charge.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F}{P_c + P_g} \right) \quad (III - 5)$$

Pour un câble donne on a :

D : diamètre du câble en (m)

e : épaisseur du givre en (m)

\emptyset : Le diamètre apparent de (câble + givré) en m Avec

$$\emptyset = (D + 2e) \quad (III - 6)$$

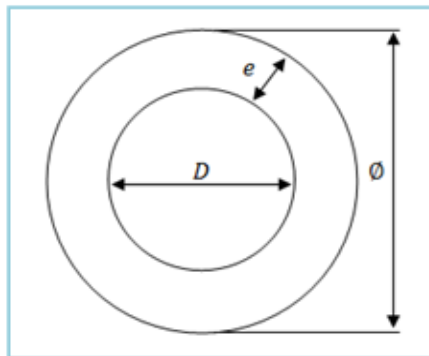


Fig. (III-3): Surcharge de câble.

Le poids linéaire du givre sur le câble est :

$$P_g = \pi e \left(\frac{D + 2e^2}{4} - \frac{D^2}{4} \right) = \pi e(D + e)\lambda \quad (III - 7)$$

λ : Le poids linéaire du givre sur le câble est $\lambda = 2\text{kg/m}$ ou 4kg/m ou 6kg/m

P_v : est la pression du vent en Pa

$$F = P_v (D + 2e) \quad (\text{III} - 8)$$

Ce qui nous donne :

$$m = \frac{\sqrt{P_v (D + 2e)^2 + (\pi e(D + e)\lambda + Pc)^2}}{Pc} \quad (\text{III} - 9)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{P_v (D + 2e)}{Pc + \pi e(D + e)\lambda} \right) \quad (\text{III} - 10)$$

F. Coefficient de sécurité (k):

Le coefficient de sécurité k est un facteur multiplicateur à appliquer à la ou aux charges maximales admissibles permettant de déterminer les efforts entraînant les destructions d'un ensemble d'éléments, soit:

$$K = \frac{CRN}{T} \quad (\text{III} - 11)$$

T :Tension du conducteur (daN)

CRN : Charge de rupture nominale (daN)

Les lignes aériennes doivent, obligatoirement, supporter les charges des hypothèses administratives, dans les conditions ci-après:

G. Conditions normales:

- Effort maximal admissible dans les câbles, haubans, pièces d'armement, isolateurs et d'une façon générale, toutes les pièces travaillant à la traction à majorer du tiers (1/3) de la charge de rupture. Alors

$$T_{Max} = \frac{CRN}{3} \quad (III - 12)$$

- Contrainte maximale admissible dans les éléments des pylônes métalliques (cornières et boulons) $\frac{1}{1.8}$ fois la contrainte de la limite d'élasticité minimale garantie.
- Coefficient de stabilité des massifs de fondation, pour les efforts d'arrachement, égaux à 1,5 aux ancrages, angles souples supérieurs à 10 grades traversées importantes 1,3 pour les autres supports.
- Effort de compression en fond de la fouille inférieure à la pression nominale pouvant être supportée par le terrain.

H. Conditions Exceptionnelles (Rupture et givre):

- Charge maximale admissible dans les câbles, haubans est $\frac{1}{1.75}$ fois la charge de rupture.
- Effort maximal admissible dans les pièces d'équipement et les isolateurs est $\frac{1}{1.75}$ fois la Charge de rupture.
- Contrainte maximale admissible dans les éléments des pylônes métalliques est :
 - 1-pylônes d'alignement est $\frac{1}{1.2}$ fois la contrainte de la limite élastique minimale garantie.
 - 2-pylônes d'angle fort et arrêt est $\frac{1}{1.2}$ fois la contrainte de la limite élastique minimale garantie.
- Le coefficient de stabilité des fondations des supports et haubans doit être supérieur à 1.

III-2-Influence de la température et du vent sur le câble :

L'équation de changement d'état permet de calculer la tension mécanique ou la flèche d'une portée en fonction de la température du câble, après avoir choisi le paramètre de réglage (ou de pose) pour une température moyenne généralement à 20 °C.

Le changement d'état est le résultat de la modification géométrique de la courbe de la cannette- Voir la figure (III-4).

Ces changements d'états sont dus essentiellement à :

- la variation de température ambiante
- des variations de transit
- l'effet du vent
- des surcharges de givre

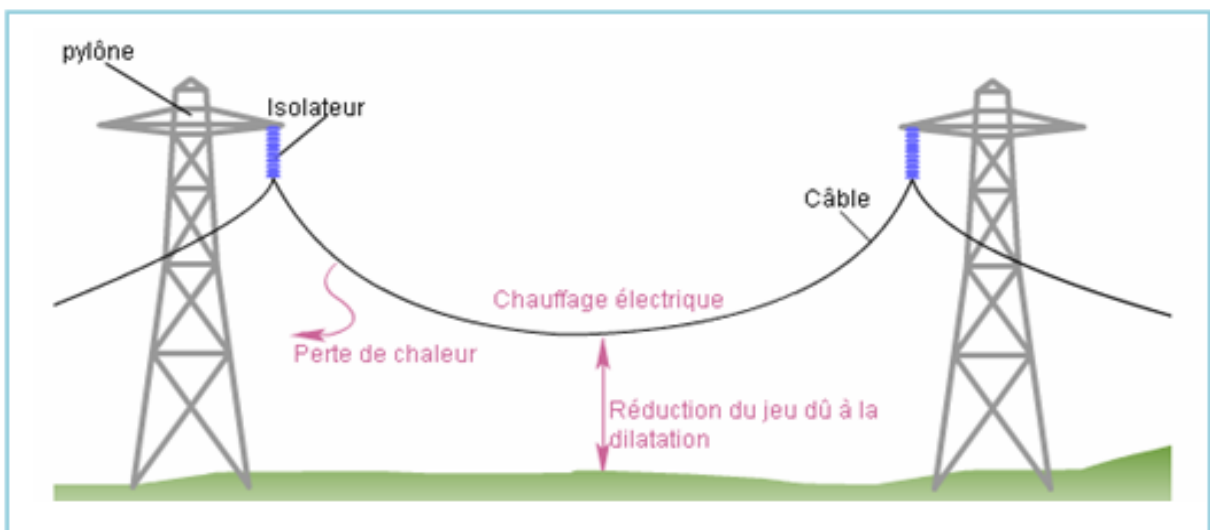


Fig. (III-4): Influence de la température et du vent sur le câble.

Considérons le câble de cette portée à deux états différents, pour chacun de ces états, le câble à une longueur d'arc différente :

- Etat initial
- Etat finale

Nous pouvons donc écrire la différence des longueurs d'arc est la somme d'un allongement thermique et d'un allongement élastique.

$$\Delta L = L_{nf} - L_{ni} = \Delta L_{term} + \Delta L_{élast} \quad (III - 13)$$

$\Delta L_{élast}$: Allongement thermique par la déformation élastique

ΔL_{term} : Allongement thermique par la déformation thermique

On désigne qu'à l'état initial (1) qui correspond à un paramètre a_1 , et un état final (2) qui correspond à un paramètre a_2 .

On note que la variation de longueur du câble entre ces deux états est égale à :

$$\Delta L = \frac{a_2^3}{24P^2} - \frac{a_1^3}{24P^2} \quad (III - 14)$$

Avec :

P : Le paramètre en (m).

a : La portée en (m).

III-2-1-Loi de déformation thermique :

Tous métaux soumis à une variation de température s'allongent ou se raccourcissent.

$$\Delta L_{term} = L \times \alpha \times \Delta \theta \quad (III - 15)$$

Avec :

α : Le coefficient de dilatation thermique en (1/°C).

$\Delta \theta$: Variation de la température en °C

θ_2 : La nouvelle température du conducteur (°C)

θ_1 : Est la température du conducteur initiale (°C)

ΔL_{term} : Allongement par la déformation thermique en (m)

L : Est la longueur du câble initiale en (m).

III-2-2-Coefficient de dilatation thermique :

Les dimensions de tout corps soumis à des variations de température varient proportionnellement à cette variation. Chaque matériau possède un coefficient de dilatation qui lui est propre, Ce coefficient est noté par la lettre α .

$$\alpha_{acier} = 11,5 \times 10^{-6}$$

$$\alpha_{almélec} = 23 \times 10^{-6}$$

Pour les câbles mixtes on considère un coefficient équivalent égal à :

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \times E_1 \times S_1 + \alpha_2 \times E_2 \times S_2}{E \times S} \quad (III - 16)$$

α_1 :Coef de dilatation de l'almélec

E_1 :Module de Young de l'almélec

S_1 :Section de l'almélec

E :Module de Young équivalent

α_2 :Coef de dilatation de l'acier

E_2 :Module de Young de l'acier

S_2 :Section de l'acier

$S = S_1 + S_2$:Section du câble

III-2-3-Loi de La déformation élastique (loi de HOOKE) :

Tout câble soumis à une force s'allonge de manière linéaire.

$$\Delta L_{\text{élast}} = L \times \frac{\Delta t}{ES} \quad (\text{III} - 17)$$

Avec :

Δt : Variation de la tension en daN

t_1 : La tension initiale du conducteur (projection horizontale) en (daN).

t_2 : La tension finale du conducteur (à calculer) en (daN).

S : La section en (mm²)

E : Le coef d'élasticité (module de Young).

$\Delta L_{\text{élast}}$: Allongement par la déformation élastique en (m)

L_{ni} : Est la longueur du câble initiale en (m).

III-2-4-Le module de Young :

Le module de Young est le module d'élasticité longitudinal d'un matériau. Chaque matériau possède un module de Young qui lui est propre. Ce module est désigné par la lettre E

Pour les câbles mixtes on considère un module de Young équivalent égal à :

$$E = \frac{E_1 \times S_1 + E_2 \times S_2}{S} \quad (\text{III} - 18)$$

Où

E_1 : Module de Young de l'almélec

S_1 : Section de l'almélec

E : Module de Young équivalent

E_2 : Module de Young de l'acier

S_2 : Section de l'acier

$S = S_1 + S_2$: Section du câble.

Dans notre cas, on écrit donc :

$$\Delta L = \frac{a_2^3}{24P^2} - \frac{a_1^3}{24P^2} = L \frac{t_2 - t_1}{ES} + L \alpha (\theta_2 - \theta_1) \quad (III - 19)$$

On peut admettre que, pour les portées courantes et peu dénivelées, est très voisin de P.

L'équation (III-16) devient, en groupant dans le même membre les termes de même indice :

$$\frac{a_2^3}{24P^2} - \frac{t_2}{ES} - \alpha \times (\theta_2) = \frac{a_1^3}{24P^2} - \frac{t_1}{ES} + \alpha \times (\theta_1) = Cte \quad (III - 20)$$

Elle s'écrit aussi :

$$\begin{aligned} t_2^3 + t_1^2 \left(\frac{a^2 \times m_1^2 \times p^2 \times E \times S}{24 \times t_1^2} \right) + (E \times S \times \alpha ((\theta_2 - \theta_1) - t_1)) \\ = \left(\frac{a^2 \times m_2^2 \times p^2 \times E \times S}{24} \right) \end{aligned} \quad (III - 21)$$

Cette équation, appelée équation de changement d'état.

Avec :

p : Poids linéique en (kg/m).

a : La portée en (m).

m_1 : L'état de charge du conducteur (le coefficient de surcharge).

m_2 : Le nouvel état de charge du conducteur.

Le changement d'état est le résultat de la modification géométrique de la courbe de la

Chainette, ces changement d'état sont dus essentiellement à :

- Des variations de température ambiante
- Des variations des transite
- L'effet de vent
- Des surcharges de givre.

III-3-Les cantons :

Le canton est un tronçon de ligne comprenant une ou plusieurs portées et se trouve encadré par deux supports d'ancrages-Voir lafigure(III-5).

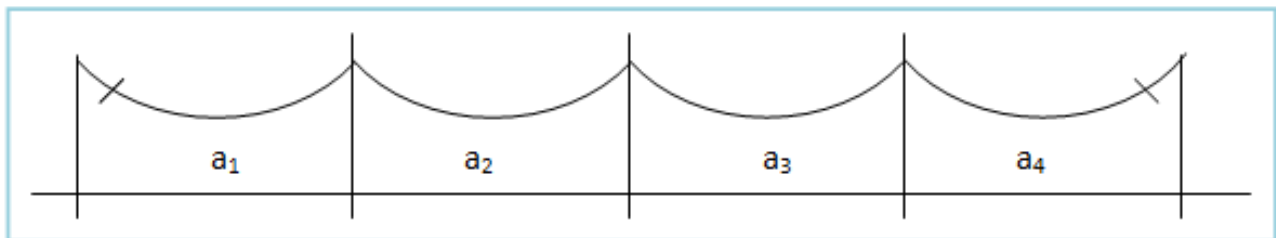


Fig. (III-5):Représentation d'un canton.

III-3-1-Les Portées:

Sur un cantons chaque porté a son propre comportement et réagit différemment au changement d'état.

En effet les longueurs d'arc sont différentes entre chaque porté donc :

- L'allongement élastique est différent de chaque porté
- L'allongement thermique est différent de chaque porté
- Les tensions horizontales sont différentes dans chaque porte à l'état final.

III-3-1-1-La portée de niveau (horizontale):

La portée de niveau représenté par le schéma (III-6) :

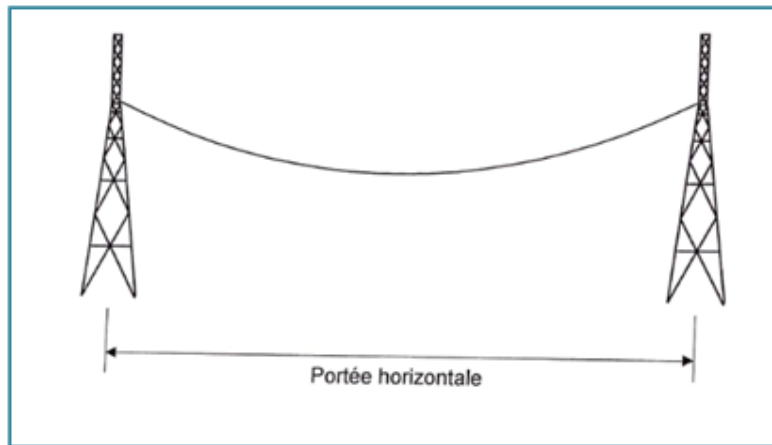


Fig. (III-6):Représentation d'une portée horizontale.

III-3-1-2-La portée de dénivelée :

En appliquons le même procédé que dans le cas des portées de niveau, pour obtenir l'équation de changement d'état. Nous arrivons au même résultat à la condition de choisir une portée fictive telle que :

La portée dénivelée représenté par le schéma (III-7)

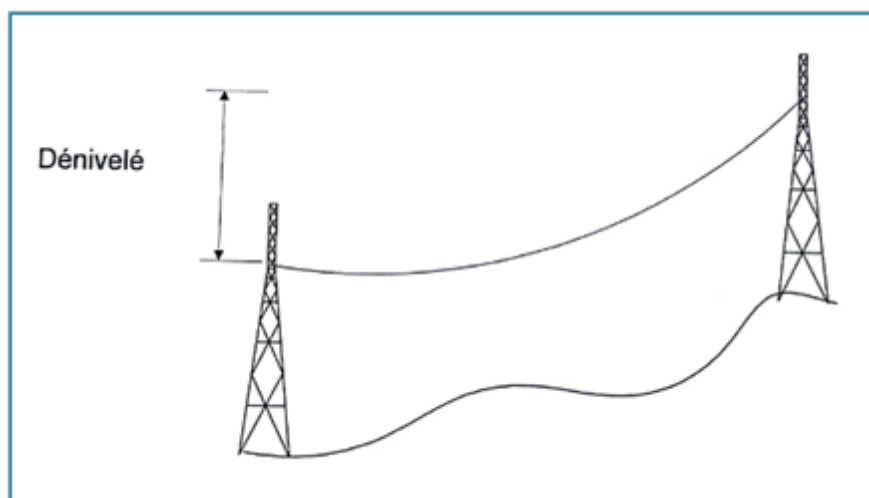
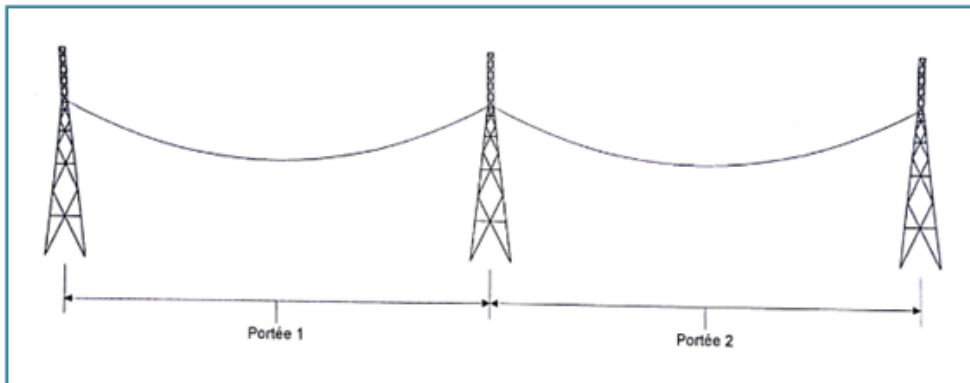


Fig. (III-7):Représentation d'une portée dénivelée.

III-3-1-3-La portée moyenne :

La portée moyenne est la somme des portées dans un canton divisée par le nombre des portées dans ce canton portée représenté par le figure (III-8).

$$a_{\text{moy}} = \frac{\sum a}{n_a} \quad (\text{III} - 22)$$



n_a : Le nombre des portées dans le canton, (dans les calculs on utilise uniquement la portée Équivalente).

La portée moyenne de ce canton est :

$$\text{Portée moyenne} = \frac{\text{portée 1} + \text{portée 2}}{2}$$



Fig. (III-8): Représentation d'une portée moyenne.

Remarque :

Ce sont toujours des portées horizontales qui sont prises en compte.

III-3-1-4-La portée poids :

La portée poids est la distance entre les deux points bas des câbles, ce portée représenté par le figure (III-9).

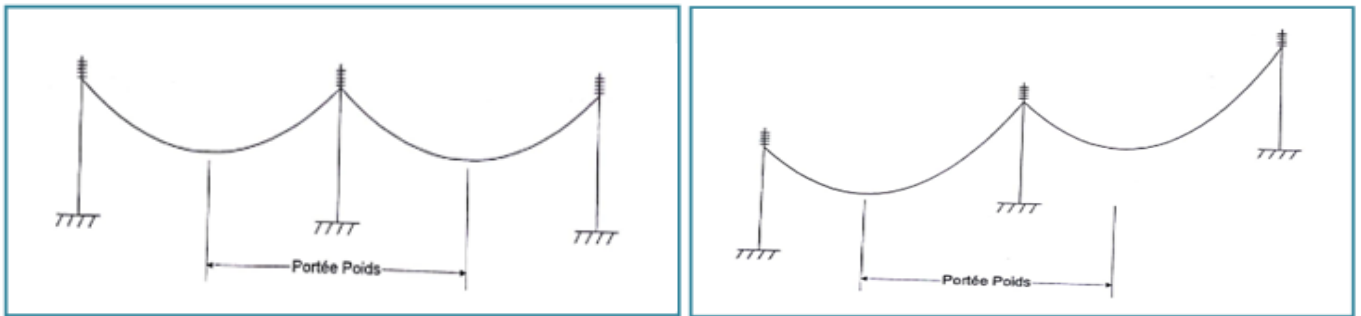


Fig. (III-9):Représentation d'une portée de poids.

III-3-1-5-La portée sèche :

C'est la portée où les deux supports adjacents sont en ancrage.

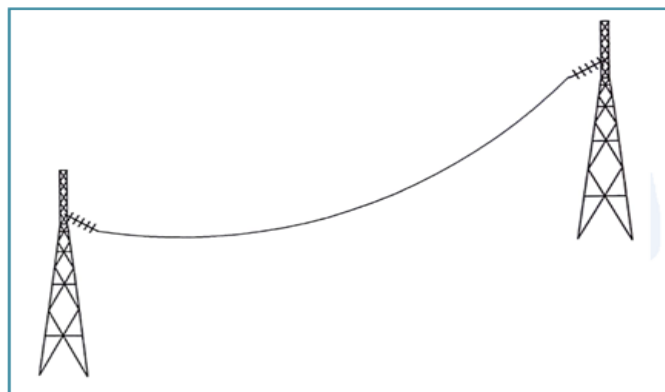


Fig. (III-10):Représentation d'une portée de sèche.

-3-1-6- Méthode de la portée équivalente :

En supposant que chaque portée se comporte de la même façon, on démontre alors que :

Chaque portée d'un contons se comporte comme une portée sèche de longueur égale à la portée équivalente, voire le figure (III-11).

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum a}} \text{ pour les portées de niveau.} \quad (III - 23)$$

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{\sum \frac{a^4}{b}}{\sum b}} \text{ pour les portées dénivelées.} \quad (III - 24)$$

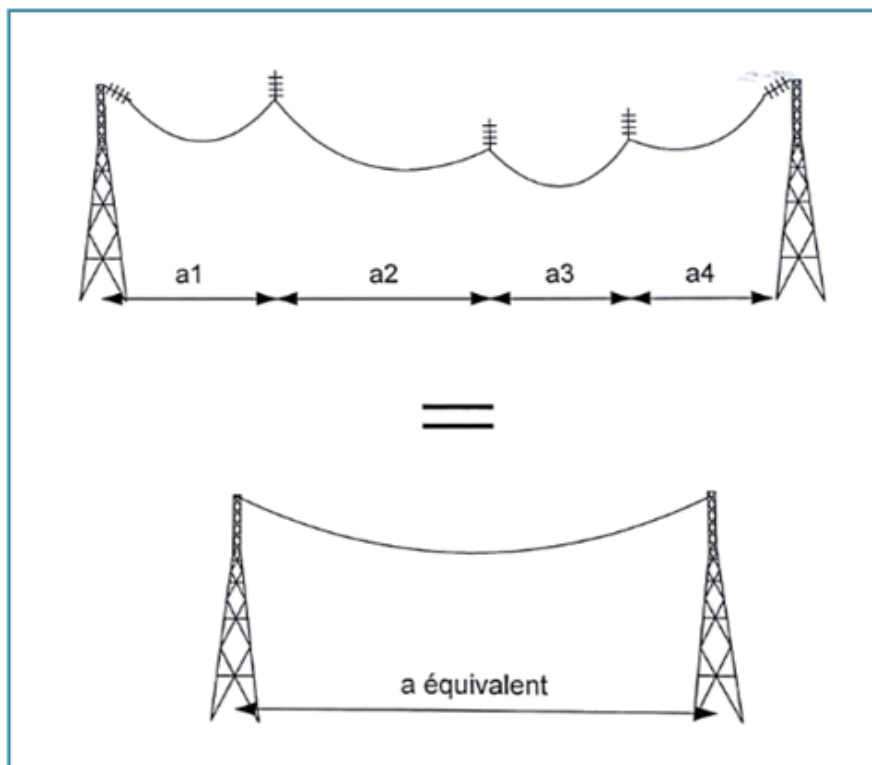


Fig. (III-11): Représentation d'une portée équivalente.

III-4-Le paramètre :

Soit deux câbles tendus à deux tensions différentes, ces deux câbles ont deux courbures différentes, pour caractériser la courbe d'un câble il a été défini une variable appelée le paramètre « P » en m.

III-4-1-Signification du paramètre :

C'est une valeur numérique exprimée en mètre donnant l'émarge de la courbure que prend le câble, voir la figure (III-13).

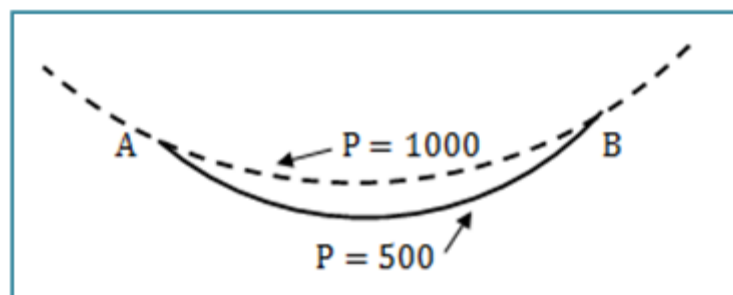


Fig. (III-13):Signification du paramètre.

▪ **Remarque :**

- Plus le paramètre est élevé plus le câble est tendu.
- Le paramètre P est compris entre plusieurs centaines de mètres et deux à trois mille mètres.

III-5- Géométrie d'un élément de câble:

Ces approximations étant admises, considérons un élément dl de fil, en équilibre sous l'action d'une charge uniformément répartie (poids propre plus surcharge éventuelle) $p dl$ et des tensions tangentielles T et $(T + dT)$ appliquées respectivement en A et B, voir la figure (III-14).

Alors :

L'équation d'équilibre est :

$$dT + p dl = 0 \quad (III - 25)$$

Si φ est l'angle formé, au point A, par la tangente au câble et l'axe horizontal, nous avons :

$$T_y = T_x \cdot \tan \varphi \quad (III - 26)$$

Avec :

T_x : Composante horizontale

T_y : Composante verticale.

De l'équation (1), la composante verticale de p étant $-p$, on tire

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_x}{dl} = 0 \\ \frac{dT_y}{dl} = p \end{array} \right. \quad (III - 27)$$

$$(III - 28)$$

Il en résulte que T_x est constant tout le long du fil, on note :

$$T = T_0$$

$$T = p \cdot dl$$

Avec :

l : Étant la longueur d'un arc de la courbe.

L'équation différentielle de la courbe s'obtient en partant des relations (2), (3) et (4) :

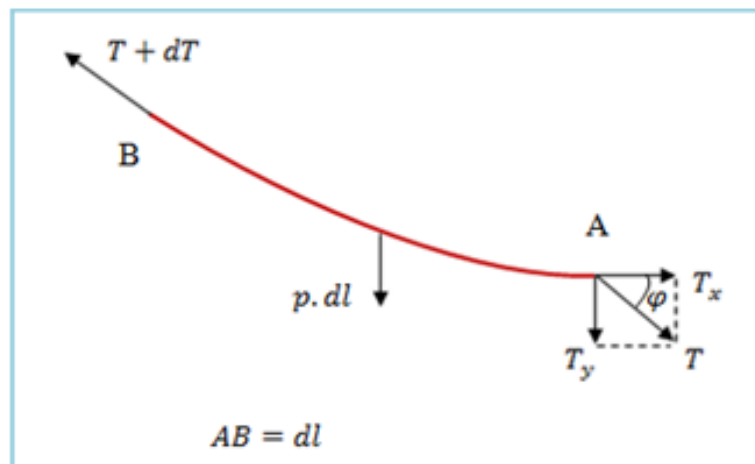


Fig. (III-13): Représentation élément de câble.

On à :

$$\frac{dT_y}{dT_x} = \tan \varphi = \frac{p \cdot l}{T_o} \quad (\text{III} - 29)$$

On à, en coordonnées cartésiennes :

$$\tan \varphi = \frac{dy}{dx} = y' \quad (\text{III} - 30)$$

Avec :

$$l = \int \sqrt{1 + y'^2} dx = \frac{T_o}{p} y'' \quad (\text{III} - 31)$$

Soit :

$$\sqrt{1 + y'^2} = \frac{T_o}{p} y'' \quad (\text{III} - 32)$$

Alors :

Le rapport P est le paramètre des câbles des lignes aériennes.

$$P = \frac{T_o}{p} \quad (III - 33)$$

Avec :

p : Est le poids linéique de câble.

III-5-1-L'équation de la courbe d'équilibre :

Mathématiquement le paramètre représente le rayon de cercle inscrit au point bas de la chaînette.

Alors :

Un câble en équilibre a pour équation :

$$y = P \operatorname{ch} \frac{x}{P} = \frac{P}{2} \left(e^{\frac{x}{P}} + e^{-\frac{x}{P}} \right) \quad (III - 34)$$

Avec :

P : Paramètre en (m).

Pour des commandes de calcul on a cherché à simplifier cette équation.

On fait un développement limite de $\operatorname{ch} \frac{x}{P}$ au voisinage de l'origine

$$y = P \operatorname{ch} \frac{x}{P} = P \left[1 + \frac{x^2}{2! P^2} + \frac{x^4}{24! P^4} + \dots \right] \quad (III - 35)$$

Négligeons les infiniment petits :

$$y = P \left[1 + \frac{x^2}{2! P^2} \right] \quad (III - 36)$$

Si on se limite au deuxième ordre :

$$y = \frac{x^2}{2P} \quad (III - 37)$$

Programme :

Le programme de cette méthode est :

```

1 - clear all;close all; clc;
2 - x=-50:0.1:50;
3
4 - P=45;
5 - y=((x.^2)/(2*P));
6 - yG=((x.^2)/(2*P))+12;
7
8 - plot(x,y,x,yG)
9 - axis equal;
10 - grid on
11 - legend('normal','avec hauteur de sol')

```

Fig. (III-14) : Représentation le programme de simulation.

Simulations :

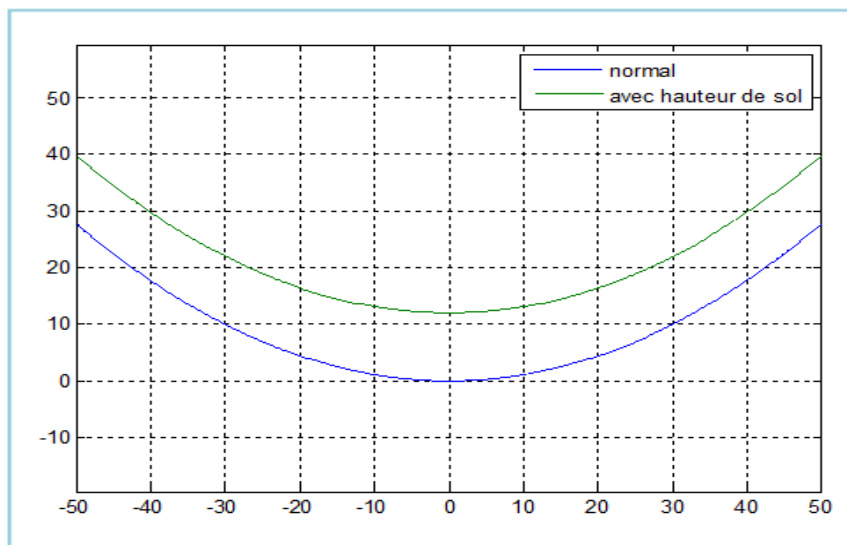


Fig. (III-15) : Représentation les deux chainettes.

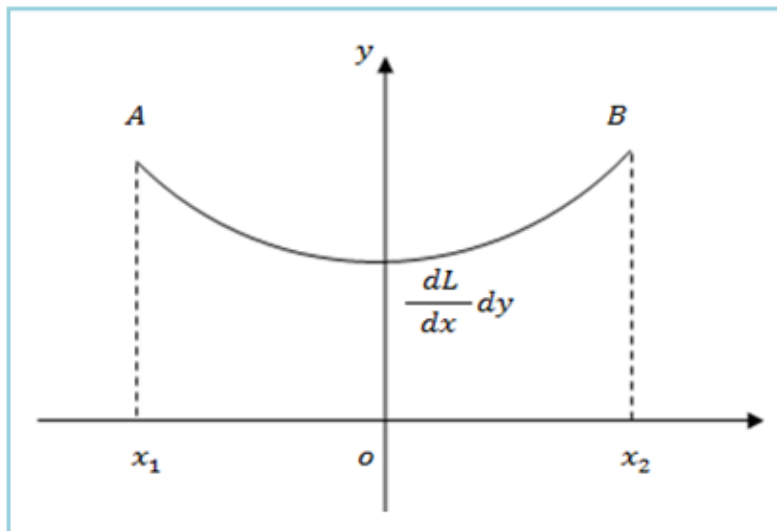


Fig. (III-16): Représentation les deux portée.

III-5-2-Longueur du câble :

III-5-2-1-Portée n'est pas dénivelée :

Formules générales :

La longueur d'un arc de chaînette se déduit aisément de la relation :

$$\left\{ \begin{array}{l} dL = \sqrt{1 + y'^2} dx = Ch \frac{x}{P} dx \\ y' = \frac{dy}{dx} \end{array} \right. \quad (III - 38)$$

Alors :

$$L = P \left(Sh \frac{x_2}{P} - Sh \frac{x_1}{P} \right) = 2P \left(Sh \frac{x_2 - x_1}{P} - Ch \frac{x_2 + x_1}{P} \right) \quad (III - 39)$$

$$\text{Or } x_2 - x_1 = a \quad (\text{III} - 40)$$

Donc :

$$L = 2P \cdot Sh \frac{a}{2P} \times Ch \frac{x_1 + x_2}{2P} = 2P \left(\frac{a}{2P} + \frac{a^3}{48P^3} \right) \left(1 + \frac{(x_1 + x_2)^2}{8P^2} \right) \quad (\text{III} - 41)$$

Nous avons:

$$d = \frac{x_2^2}{2P} - \frac{x_1^2}{2P} = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2P} = \frac{(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{2P} = \frac{(x_2 + x_1)a}{2P} \quad (\text{III} - 42)$$

D'où :

$$x_1 - x_2 = \frac{2d \times P}{a} \quad (\text{III} - 43)$$

Avec :

$$L = 2P \left(\frac{a}{2P} + \frac{a^3}{48P^3} \right) \left(1 + \frac{4d^2P^2}{8a^2P^2} \right) = 2P \left(\frac{a}{2P} + \frac{a^3}{48P^3} \right) \left(1 + \frac{d^2}{8a^2} \right) \quad (\text{III} - 44)$$

Est de la forme :

$$L = a + \frac{a^2}{24P^2} + \frac{d^2}{2a} \quad (\text{III} - 45)$$

Si la portée n'est pas dénivelée implique que $d = 0$

Donc :

$$L = a + \frac{a^3}{24P^2} \quad (\text{III} - 46)$$

III-5-2-2-Portée dénivelée :

Pour une portée dénivelée, on peut utiliser une sorte de généralisation du théorème de Pythagore appliqué à la chaînette

$$L_{\text{Dén}}^2 = L^2 + d^2 = \left(a + \frac{a^3}{24P^2}\right)^2 + d^2 \quad (\text{III} - 47)$$

En négligeant le terme :

$$\varepsilon = \left(\frac{a^3}{24P^2}\right)^2 \quad (\text{III} - 48)$$

Et en prenant le développement

Limité de $L_{\text{Dén}}^2 = a^2 + d^2$ on trouve :

$$L_{\text{Dén}} = D + \frac{a}{D} + \frac{a^3}{24P^2} \quad (\text{III} - 49)$$

La longueur du câble est donc encore voisine de la longueur de la portée réelle D , la différence étant sensiblement $\frac{a^3}{24P^2}$ pour les portées ni trop longues, ni trop dénivelées, ce modèle il va présentée à la figure (III-16).

▪ **Remarque :**

Pour des portées peu ou pas dénivelées, la longueur du câble est voisine de celle de la portée.

III-5-3-Longueur naturelle du câble :

La longueur naturelle est une longueur de référence qui est invariable, Alors

Cette longueur est une longueur d'arc d'un câble au repos (tension mécanique nulle) à une température de référence fixée à 0°C- voire le figure (III-16).

Considérons le câble a une tension donnée eu une température donnée :

$$L_n = \left(\frac{L}{1 + \alpha \times \theta + \frac{T}{ES}} \right) \quad (III - 50)$$

L_n : Longueur naturelle du câble en m.

L : Longueur d'arc à l'état donné en m

T : La tension à l'état donné en daN

S : La section en mm²

E : Module de Young en daN/mm²

α : Coefficient de dilatation thermique en 1/ °C

θ : La température à l'état donné en °C

Cette longueur naturelle permet notamment de calculer la longueur de câble à couper lors d'une retente.

$$\text{Coupe}_{\text{cab}} = L_{\text{nf}} - L_{\text{ni}} \quad (III - 51)$$

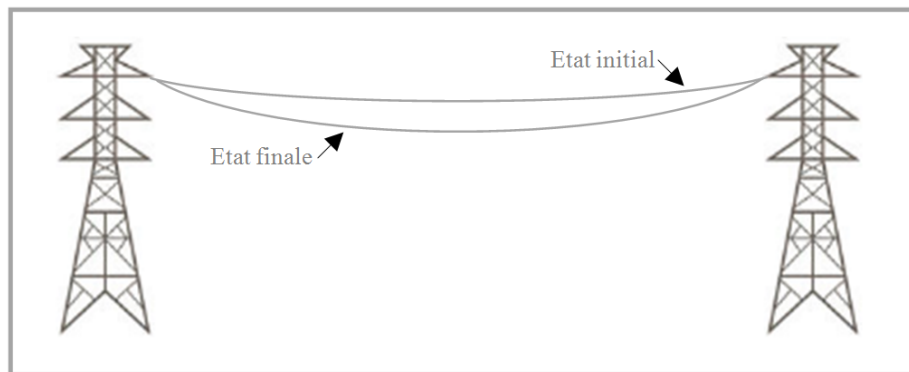


Fig. (III-17) : Représentation la longueur naturelle du câble.

Avec :

L_{ni} : Longueur naturelle du câble à l'état initial en m

L_{nf} : Longueur naturelle du câble à l'état final en m

III-5-4-Méthode de réglage des câbles par la dénivelée :

On vise la pinte M'1 puis on affiche l'angle α_2 sur l'appareil

$$tg(\alpha)_2 = \frac{D_1 \times tg(\alpha_1) - f_2}{D_2} \quad (III - 52)$$

Et calcule f_2 par la formule suivante :

$$f_2 = D_1 \times tg(\alpha_1) - D_2 \times tg(\alpha_2) \quad (III - 53)$$

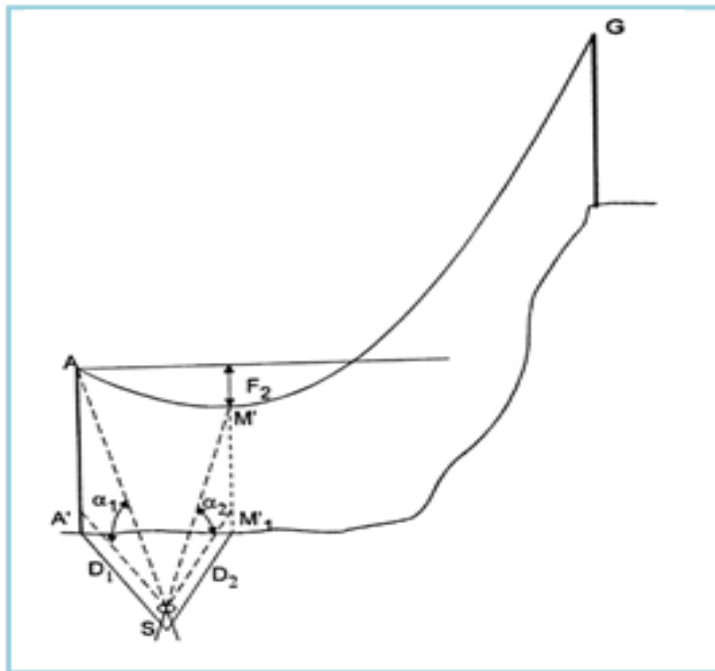


Fig. (III-18) : La méthode de réglage par la dénivelée.

III-5-5-Méthode de réglage par un point extérieur :

La flèche est calculé par la formule suivante :

$$f_1 = \frac{D_1 \times \text{tg}(\alpha_1) + D_2 \times \text{tg}(\alpha_2)}{2} - D_3 \times \text{tg}(\alpha_3) \quad (\text{III} - 54)$$

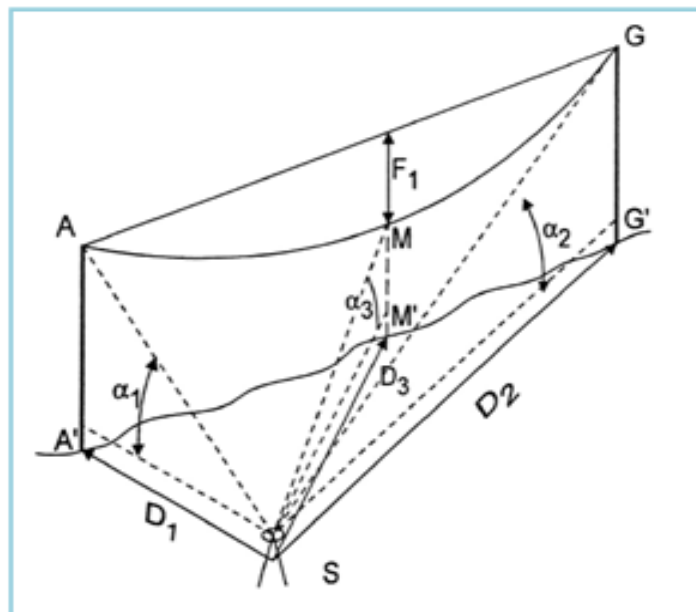


Fig. (III-19) : La méthode de réglage par un point extérieur.

- **Notations :**

f_1, f_2 : Flèches en m

D_1, D_2, D_3 : Distances en m

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: Les angles en GR

III-6-La flèche:**III-6-1-Définition de la flèche :**

La flèche f est la distance verticale qui sépare un point d'abscisse x de la droite joignant les points d'accrochage A et B (figure –III-20).

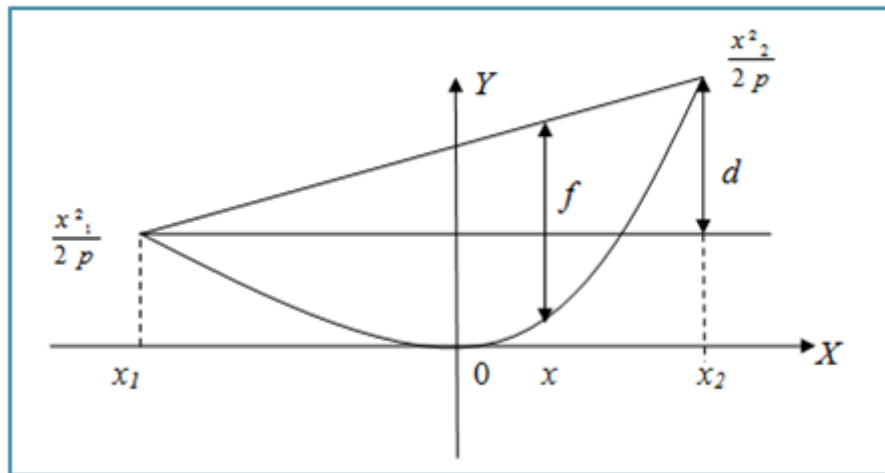


Fig.(III-20): Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée.

Nous avons la dénivelée d qui peut s'écrire :

$$d = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2P} \quad (III - 55)$$

On à :

$$Y = \frac{x_1^2}{2P} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times d \quad (III - 56)$$

Alors :

$$f = Y - \frac{x^2}{2P} = \frac{x_1^2}{2P} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times d - \frac{x^2}{2P} \quad (III - 57)$$

$$Y = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times d - \frac{x^2}{2P} \quad (III - 58)$$

La flèche f est maximale si :

$$Y = -\frac{x^2}{2P} + \frac{d \times x}{x_2 - x_1} - \frac{d \times x_1}{x_2 - x_1} \quad (III - 59)$$

$$Y' = -\frac{x}{P} + \frac{d}{x_2 - x_1} = 0 \quad (III - 60)$$

$$\frac{x}{P} = \frac{d}{x_2 - x_1} = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2P(x_2 - x_1)} \Rightarrow x = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (III - 61)$$

Donc la flèche est maximale en demi-portée qu'on appellera f_1 .

Calculons la valeur de f_1 au milieu de la portée -voire la figure (III-21).

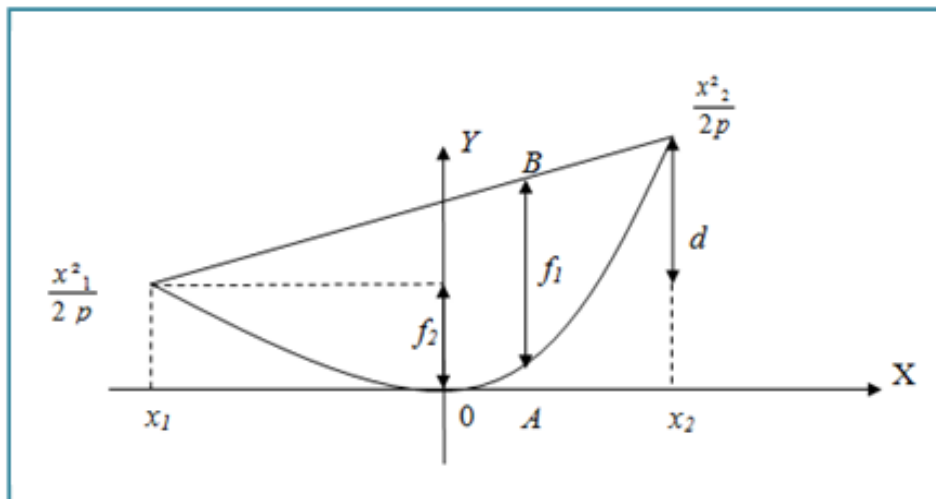


Fig. (III-21) : Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée (cas de deux flèches).

L'ordonnée de A est :

$$y_A = \frac{\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)^2}{2P} = \frac{x_1^2 + 2x_1x_2 + x_2^2}{8P} \quad (III - 62)$$

L'ordonnée de A est :

$$y_B = \frac{x_1^2 + x_2^2}{4P} \quad (III - 63)$$

Alors :

$$f_1 = y_A - y_B = \frac{x_1^2 + x_2^2}{4P} - \frac{x_1^2 + 2x_1x_2 + x_2^2}{8P} \quad (III - 64)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{x_1^2 + x_2^2}{4P} - \frac{2x_1^2 - x_1^2 + 2x_1x_2 + 2x_2^2 - x_2^2}{8P} \\ &= \frac{x_1^2 - 2x_1x_2 + x_2^2}{8P} = \frac{x_2 - x_1}{8P} \end{aligned} \quad (III - 65)$$

On sait que : $a = x_2 - x_1$ (portée)

D'où l'on déduit :

$$f_1 = \frac{a^2}{8P} \quad (III - 66)$$

f_2 : Est La flèche au point bas et c'est la distance au point d'accrochage le plus bas à la tangente horizontale à la courbe.

III-6-2-L'équation de la flèche f_2 :

$$d = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2P} = \frac{(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{2P} \quad (III - 67)$$

Avec :

$$f_1 = \frac{(x_2 - x_1)^2}{8P} \quad (III - 68)$$

Alors :

$$\frac{d}{4f_1} = \frac{(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)}{8P} \times \frac{8P}{(x_2 - x_1)^2} = \frac{(x_2 + x_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (III - 69)$$

$$1 - \frac{d}{4f_1} = \frac{x_2 - x_1 - x_2 - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{2x_1}{(x_2 - x_1)}$$

$$1 - \frac{d}{4f_1} = \frac{4x_1^2}{(x_2 - x_1)^2} = \frac{4x_1^2}{8Pf_1} = \frac{x_1^2}{2Pf_1} = \frac{x_1^2}{2Pf_1} \times \frac{1}{f_1}$$

En multiplions les deux nombres par f_1 , on obtient :

$$\left(1 - \frac{d}{4f_1}\right)^2 = \frac{x_1^2}{2Pf_1} = f_2 \quad (III - 70)$$

III-6-3-Application de l'équation de changement d'état :

Dans notre projet de ligne 60kV RAMDANE DJAMEL - HAMMA BOUZIANE, de longueur 43,635km, on à utilisé 158 pylônes repartis dans toute la ligne, et 37 cantons.

Les calculs seront appliqués à ces cantons.

Pour le choix du paramètre du conducteur est donné directement par la relation

Revenons à notre cas, la valeur maximale du paramètre est de 1300m.

▪ **Remarque :**

Dans tous les calculs des tensions unitaires aux différentes hypothèses, on compare ces tensions avec les tensions maximales admises par le cahier de charges (il faut que les tensions unitaires ne dépassent pas les tensions maximales admissibles).

				HYPOTHESES				
				A	B	E . D. S	Givre 2 kg/m	VENT
				20° C	- 5° C	20° C	- 5° C	20° C
				48 daN/m ²	18 daN/m ²	sans vent	18 daN/m ²	24 daN/m ²
CANTON	PYLONE	Paramètre (P)	PORTEE Moyenne	Tensions Unitaires (daN/mm ²)				
				10.50 max	10.50 max	5.68 max	18.00 max	10.50 max
1	0-1	950	188.95	5.48	5.86	4.09	10.08	4.53
2	1-2	900	154.84	5.73	6.93	4.59	10.14	4.94
3	2-6	1100	275.31	5.60	4.98	3.91	10.68	4.43
4	6-12	1100	290.31	5.50	4.74	3.79	10.59	4.32
5	12-16	1150	305.23	5.72	4.92	3.95	10.97	4.50
6	16-17	550	114.23	3.35	3.67	2.38	6.81	2.68
7	17-24	1200	279.94	6.21	5.75	4.44	11.54	4.99
8	24-30	1150	257.29	6.08	5.81	4.39	11.25	4.92
9	30-31	700	254.94	3.29	2.51	2.14	6.76	2.49
10	31-34	1200	313.55	5.98	5.18	4.15	11.37	4.71
11	34-35	1230	304.71	6.21	5.55	4.37	11.67	4.95
12	35-54	1150	280.12	5.89	5.31	4.15	11.10	4.69
13	54 -58	1200	330.49	5.89	4.97	4.04	11.30	4.61
14	58 -65	1100	266.30	5.67	5.14	3.99	10.74	4.51
14 bis	65-66	700	104.40	5.41	7.50	4.68	9.36	4.90
15	66-69	1150	398.25	5.36	4.17	3.56	10.64	4.11
16	69 -72	1150	426.57	5.30	4.05	3.49	10.57	4.04
17	72 -76	1300	471.71	5.98	4.61	3.97	11.81	4.58
17bis	76 -77	500	69.94	4.81	7.38	4.36	8.44	4.49
18	77 -81	1150	390.78	5.38	4.21	3.58	10.66	4.13
19	81 -87	1150	319.04	5.65	4.75	3.86	10.91	4.41
19bis	87 -92	1250	342.44	6.12	5.18	4.21	11.69	4.80
20	92 -97	1250	359.12	6.04	5.01	4.13	11.63	4.72
21	97 -105	1200	355.10	5.78	4.73	3.92	11.21	4.49
22	105 -107	900	168.03	5.44	6.18	4.17	9.90	4.57
23	107 -108	1100	305.63	5.42	4.55	3.70	10.52	4.23
24	108 -109	900	199.83	4.93	4.81	3.52	9.42	3.96
25	109 -110	900	173.74	5.33	5.89	4.02	9.80	4.43
25bis	110 -112	1200	338.38	5.85	4.88	4.00	11.27	4.57
26	112 -116	1100	226.75	6.06	6.18	4.50	11.05	4.99
27	116 -117	1100	264.59	5.68	5.18	4.01	10.75	4.53
28	117 -127	1200	316.44	5.96	5.14	4.13	11.36	4.69
29	127 -137	1250	326.44	6.20	5.38	4.32	11.74	4.90
30	137 -139	1100	289.98	5.51	4.75	3.80	10.60	4.32
31	139 -140	500	94.49	3.39	4.35	2.52	6.84	2.79
32	140 -142	600	176.50	3.00	2.45	1.99	6.22	2.29
33	142 -144	950	169.54	5.83	6.79	4.59	10.37	4.97
34	144 -152	1000	321.41	4.77	3.78	3.17	9.50	3.66
35	152 -154	1100	285.10	5.54	4.82	3.83	10.63	4.36
37	154 -160	1150	292.96	5.80	5.10	4.04	11.03	4.58
38	160-Trav	40	31.20	0.17	0.12	0.11	0.36	0.13

Tab.(III-4) : Différentes tenions unitaires pour le câble conducteur

				HYPOTHESES				
				A	B	E . D . S	Givre 1.2 kg/m	VENT
				20° C	- 5° C	20° C	- 5° C	20° C
				48 daN/m ²	18 daN/m ²	sans vent	18 daN/m ²	24 daN/m ²
				PORTEE				
				Tensions Unitaires Max (daN/mm ²)				
CANTON	PYLONE	Paramètre (P)	PORTEE Moyenne	15.52 max	15.52 max	8.39 max	26.61 max	15.52 max
1	0-1	950	188.95	7.59	6.81	4.94	14.20	5.83
2	1-2	1000	154.84	8.58	9.21	6.42	14.84	7.13
3	2-6	1200	275.31	8.94	7.25	5.61	16.86	6.72
4	6-12	1200	290.31	8.85	6.97	5.45	16.90	6.59
5	12-16	1300	305.23	9.55	7.65	5.98	17.94	7.17
6	16-17	600	114.23	5.26	5.05	3.37	10.34	4.00
7	17-24	1350	279.94	10.08	8.66	6.62	18.31	7.78
8	24-30	1300	257.29	9.85	8.72	6.58	17.76	7.68
9	30-31	800	254.94	5.80	4.06	3.30	12.02	4.11
10	31-34	1350	313.55	9.89	7.97	6.23	18.45	7.46
11	34-35	1400	304.71	10.31	8.60	6.67	18.87	7.89
12	35-54	1300	280.12	6.69	8.14	6.26	17.85	7.41
13	54 -58	1350	330.49	9.81	7.70	6.08	18.52	7.32
14	58 -65	1250	266.30	9.40	7.95	6.07	17.33	7.19
14 bis	65 -66	800	104.40	7.93	9.76	6.54	13.23	6.97
15	66 -69	1300	398.25	9.21	6.61	5.40	18.19	6.65
16	69 -72	1300	426.57	9.14	6.44	5.30	18.25	6.55
17	72 -76	1450	471.71	10.13	7.18	5.92	20.00	7.30
17bis	76 -77	600	69.94	7.19	9.78	6.36	11.81	6.60
18	77 -81	1300	390.78	9.23	6.67	5.43	18.18	6.68
19	81 -87	1300	319.04	9.48	7.43	5.86	17.99	7.07
19bis	87 -92	1400	342.44	10.13	7.96	6.30	19.05	7.58
20	92 -97	1400	359.12	10.06	7.74	6.17	19.12	7.47
21	97 -105	1350	355.10	9.71	7.38	5.90	18.61	7.17
22	105 -107	1050	168.03	8.79	9.16	6.46	15.29	7.23
23	107 -108	1250	305.63	9.16	7.19	5.65	17.45	6.82
24	108 -109	1050	199.83	8.35	7.68	5.59	15.26	6.52
25	109 -110	1050	173.74	8.70	8.87	6.28	15.28	7.08
25bis	110 -112	1350	338.38	9.77	7.58	6.02	18.55	7.27
26	112 -116	1250	226.75	9.72	9.13	6.75	17.19	7.74
27	116 -117	1250	264.59	9.41	7.99	6.10	17.33	7.21
28	117 -127	1350	316.44	9.87	7.92	6.20	18.47	7.43
29	127 -137	1400	326.44	10.20	8.20	6.44	18.98	7.70
30	137 -139	1250	289.98	9.25	7.45	5.80	17.40	6.95
31	139 -140	600	94.49	5.90	6.96	4.30	10.90	4.83
32	140 -142	700	176.50	5.39	4.12	3.17	11.00	3.90
33	142 -144	1100	169.54	9.20	9.75	6.92	15.74	7.67
34	144 -152	1150	321.41	8.32	6.14	4.93	16.39	6.05
35	152 -154	1250	285.10	9.28	7.54	5.85	17.39	7.00
37	154 -160	1300	292.96	9.62	7.87	6.11	17.90	7.28
38	160-Trav	60	31.20	0.42	0.27	0.23	0.93	0.29

Tab.(III-5): Différentes tenions unitaires pour le câble conducteur

III-6-4-Tensions et flèches de pose :

Lors de la phase réalisation de la ligne, il est nécessaire de connaître la valeur de tension ou de flèche définissant l'état d'un canton donné de câble à la température ambiante. Les tableaux de tensions et flèches de pose sont dressés pour cette fin. Par exemple, pour le canton N°26 à la température ambiante de 25° C, le câble doit être réglé à une tension de 1432 daN ou à une flèche médiane F_1 de 9.46m si la portée N°110-111 est prise comme portée de réglage ou 10.42m si la portée N°111-112 est considérée, Il est d'usage de retrancher 10°C à la température ambiante pour tenir compte du fluage du câble.

Canton 25														
N°Pyl	109 – 110													
Param.	900													
a_e (m)	173.74													
Déniv(m)	10.17													
(Portée)	109– 110													
a (m)	173.9													
Température °C		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	75°
Tension de pose daN		1936	1802	1681	1571	1474	1387	1309	1241	1179	1124	1075	1031	891
Flèche en milieu de portée F_1 (m)		1.94	2.08	2.23	2.38	2.54	2.7	2.86	3.02	3.18	3.33	3.49	3.64	4.21

Canton 26														
N°Pyl	110–112													
Param.	1200													
a_e (m)	338.38													
Déniv(m)	33.31													
(Portée)	110 - 111													
a (m)	330													
Température °C		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	75°
Tension de pose daN		1936	1802	1681	1571	1474	1387	1309	1241	1179	1124	1075	1031	891
Flèche en milieu de portée F_1 (m)		8.39	8.61	8.82	9.04	9.25	9.46	9.66	9.87	10.07	10.27	10.46	10.65	11.4
Déniv(m)	13.27													
(Portée)	111 - 112													
a (m)	347.1													
Flèche en milieu de portée F_1 (m)		9.24	9.48	9.72	9.95	10.19	10.42	10.64	10.87	11.09	11.31	11.52	11.73	12.56

Canton 27													
N°Pyl	112- 116												
Param.	1100												
a_e(m)	226.75												
Déniv(m)	3.69												
(Portée)	112 - 113												
a (m)	180												
Température °C	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	75°
Tension de pose daN	1936	1802	1681	1571	1474	1387	1309	1241	1179	1124	1075	1031	891
Flèche en milieu de portée F₁(m)	1.96	2.08	2.2	2.31	2.43	2.55	2.67	2.79	2.91	3.02	3.14	3.25	3.68
Déniv(m)	-22.2												
(Portée)	113 - 114												
a (m)	195												
Flèche en milieu de portée F₁(m)	2.32	2.45	2.59	2.73	2.87	3.02	3.16	3.3	3.43	3.57	3.71	3.84	4.35
Déniv(m)	-40.81												
(Portée)	114 - 115												
a (m)	280												
Flèche en milieu de portée F₁(m)	4.8	5.08	5.37	5.66	5.95	6.24	6.53	6.82	7.11	7.39	7.67	7.95	9
Déniv(m)	-34.881												
(Portée)	115 - 116												
a (m)	215												
Flèche en milieu de portée F₁(m)	2.84	3	3.17	3.34	3.52	3.69	3.86	4.03	4.2	4.37	4.54	4.7	5.32

Tab. (III-6): Différentes tensions et flèches de pose

III-6-5-Contraintes géométriques imposées par le site:

Les critères géométriques imposés par la nature du site sont très importants pour la conception des lignes électriques aériennes, car ils relèvent de la sécurité des humains et du bon fonctionnement du matériel- Voir la figure (III-22).

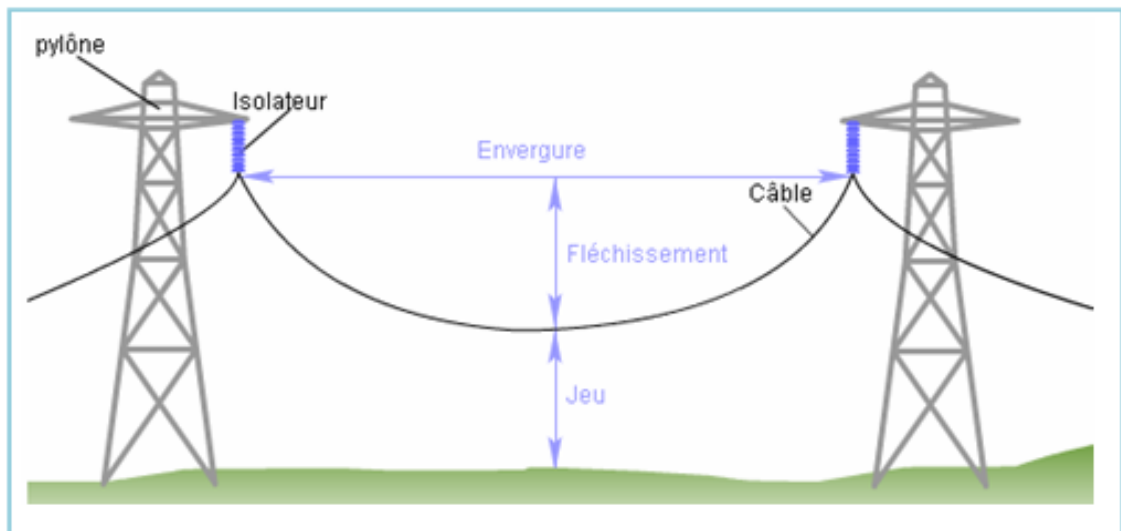


Fig. (III-22) : contraintes géométriques imposées par le site

III-6-6-Les traversées:

L'étude des traversées consiste à respecter les distances entre la ligne et les différents obstacles qui sont :

- Sol et voie de circulation
- Maisons et immeubles
- Chemins de fer
- Lignes aériennes
- Plans d'eau.

III-6-7-Terrain agricole:

La distance h à le terrain agricole doit être vérifiée a l'aide de la formule suivante:

$$h = 3 + 0.6\sqrt{f} + t_2 \quad (III - 71)$$

III-6-8-Terrain d'évolution ou de passage d'engins:

La distance h à le terrain d'évolution doit être vérifiée a l'aide de la formule suivante:

$$h = H - 2 + 0.6\sqrt{f} + t_2 \quad (III - 72)$$

Avec :

H = hauteur des engins

III-6-9-Distances aux obstacles :

La distance h à l'obstacle doit être vérifiée a l'aide de la formule suivante - Voir la figure (III-23):

$$h = 1 + \frac{2x}{a}(0.6\sqrt{f} - 1) + t_3 \quad (III - 73)$$

Avec :

a :Longueur de la portée en mètre

h :Flèche de la portée en mètre

x : Distance au support le plus proche en mètre

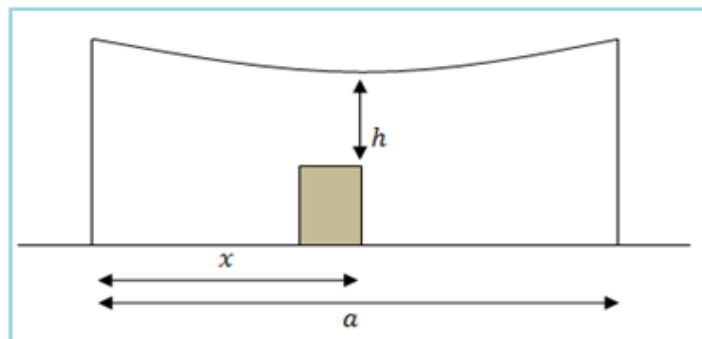


Fig. (III-23) : Distances aux obstacles

III-6-10- La garde au sol :

La garde au sol est la distance de sécurité entre la ligne électrique et le sol ou des obstacles rencontrés.

- Terrain ordinaire 7 m
- Terrain agricole 8 m
- Route normale 9 m
- Route à grande circulation 12 m
- Voie ferrée 12 m

III-6-11-Distance de croisement minimal (D_m) :

C'est la distance verticale entre l'ouvrage traversé et le point le plus proche du conducteur, à la température maximale de fonctionnement du conducteur $\theta = 75^\circ\text{C}$.

Cette distance est la somme des distances : b et t

$$D_m = b + t \quad (\text{III} - 74)$$

b : c'est la distance de base, fonction de la nature du surplomb.

Cette distance est donnée par la formule suivante :

$$b = 1 + \frac{2d}{a} (0.5 \times \sqrt{f} - 1) \quad (\text{III} - 75)$$

d' :La distance entre l'ouvrage traversé et le pylône le plus proche.

a :La portée.

f :La flèche à la température maximale :

$$f = \frac{a^2}{8P} \quad (\text{III} - 76)$$

t : C'est la distance de tension, fonction de la probabilité d'une surtension et de présence simultanée d'une personne ou d'un projet.

La valeurs des distances de tension fixées par l'arrêté techniques :

t_1 : Distance de tension pour une probabilité de voisinage faible $t_1=0,0025U$

t_2 : Distances de tension pour une probabilité de voisinage moyenne $t_2=0,0050U$

t_3 : Distances de tension pour une probabilité de voisinage fort $t_3=0,0075U$

U : Tension entre phase en kV.

▪ **Remarque:**

- Dans notre projet la distance de tension est $t_3=0,0075U$

- Dans le cas d'une traversée (route), t est nulle.

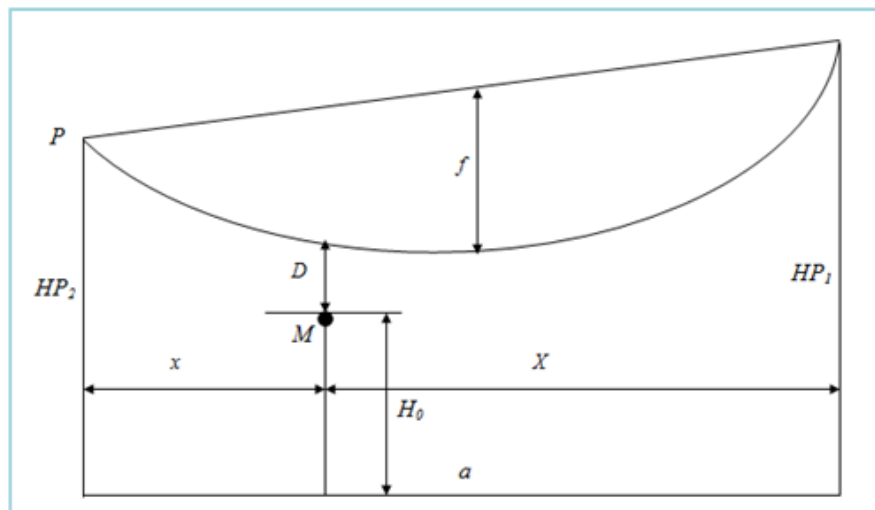


Fig. (III-24) : Représentation la distance de croisement.

- **Notations :**

a : La portée.

P :Le paramètre

f :La flèche

M :L'obstacle.

x :Distance de l'obstacle par rapport au pylône le plus proche.

X :Distance de l'obstacle par rapport au pylône le plus haut.

H_0 : Hauteur de l'obstacle par rapport au sol.

H_{p1} :Hauteur du pylône le plus haut.

H_{p2} : Hauteur du pylône le plus petit.

D : Distance de croisement.

Les équations de calcul sont données par :

$$D = H_{p1} - Y - H_0 \quad (III - 77)$$

Alors :

$$Y = \frac{X}{2P}(a - X) + \frac{X}{a}(H_{p1} - H_{p2}) \quad (III - 78)$$

Supports	56 / 57	83 / 84		87 / 88		108/109	109/110	114/115	116/117			119/120
Ouvrages	AUTOROUTE	BTA	HTA	HTA	BTA	HTA	Autoroute	Route	HTB	HTB	HTB	HTA
t_3		0.70	0.70	0.70	0.70	0.70			1.70	1.70	1.70	0.70
Portée	350	145	145	315	315	200.51	173.89	280	264.43	264.43	264.43	240
Paramètre	1200	1150	1150	1250	1250	900	900	1100	2010	2010	2010	1200
H_{p1}	247.00	642.37	642.37	668.69	668.69	651.13	661.30	690.23	619.21	619.21	619.21	599.71
H_{p2}	236.42	627.03	627.03	605.88	605.88	627.74	651.13	649.42	601.39	601.39	601.39	584.82
H_0	214.01	618.05	630.22	655.80	626.90	643.16	640.63	665.31	610.61	609.71	609.10	581.97
X	243.96	80.00	60.00	31.00	107.40	14.04	65.56	43.20	113.41	125.10	135.86	138.02
X		65.00	60.00	31.00	107.40	14.04			113.41	125.10	128.57	101.98
D_m	12.00	1.48	1.50	1.81	2.09	1.73	12.00	9.00	2.74	2.74	2.74	1.89
D	14.84	13.60	3.59	3.19	11.46	4.88	12.89	13.97	-3.31	-3.27	-3.39	3.31

Tab. (III-7): Calcul des différentes traversées.

III-6-11-Ecartement entre phases:

La distance minimale entre conducteurs simples, au milieu de la portée, est fonction de la tension U et de la flèche f .

$$D = K \cdot \sqrt{f + L_{ch}} + \frac{U}{150} \quad (III - 79)$$

Avec :

D : Ecartement entre phases en (m).

f : Flèche maximale à $\theta = 75^\circ$

L_{ch} : Longueur de la chaîne d'isolateurs.

U : Tension composée en kV.

K : Coefficient donné en fonction de la nature du conducteur et la disposition des conducteurs :

$K=0,75$ pour conducteur Cuivre.

$K=0,8$ pour conducteur Alu-Acier.

$K=0,85$ pour conducteur Almélec.

$K=1$ pour conducteur Alu.

▪ Remarque:

La distance entre pièces sous tension, de deux phases de ternes différentes doit être supérieure à la distance minimale : 3,25m pour ligne 63 et 90 kV (pour des pylônes à deux ternes du type : nappe horizontale).

III-6-12-Distance à la masse :

Les distances à la masse sont vérifiées, dans les deux hypothèses suivantes :

- Pour la température moyenne de la zone sans vent.
- Pour la température moyenne de la zone avec vent réduit exerçant, sur la surface diamètre d'un câble, une pression de 24daN/m² le cas normal, et de 36 daN/m² dans les zones à vent fort.

Les distances de la masse ne doivent pas être inférieures aux valeurs indiquées ci-dessous :

Tension normale (kV)	63	90	225
Tension maximale (kV)	72,5	100	245
Distance à température moyenne sans vent (m)	0,54	0,75	1,84
Distance à température moyenne avec vent (m)	0,36	0,50	1,225

Tab. (III-8): Distance à la masse

III-7-Différent type des tastsions :

III-7-1-Tension horizontale :

La tension dans un câble au point bas, est constante dans toute la portée - voire la représentation de la figure (III-25).

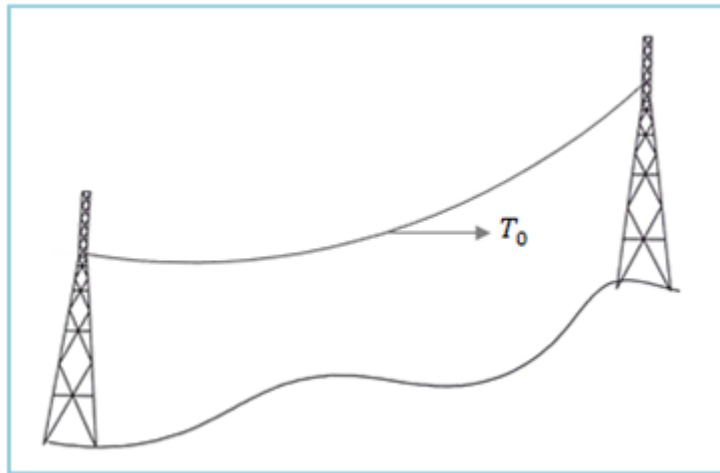


Fig.(III-25): Représentation d'une tension dans le câble au point bas.

$$T_o = m \times p \times P \quad (III - 80)$$

T_o :Tension horizontale en (daN)

m :Coefficient de surcharge

p : Poids linéiques du câble

P : Paramètre.

Le tableau suivant exprime la masse linéique pour chaque câble almélec :

Conducteurs	Poids linéiques du câble en (kg/m)
Almélec 228	0.648
Almélec 366	1.04
Almélec 570	1.631
Almélec 1144	3.291
Almélec – Acier 612	3.66

Tab.(III-9): Représentation la relation entre le poids et la longueur de câble almélec

III-7-2-Tension dans un câble :

La tension mécanique est variable en tout chaque point d'une portée - voire la représentation Figure (III-26).

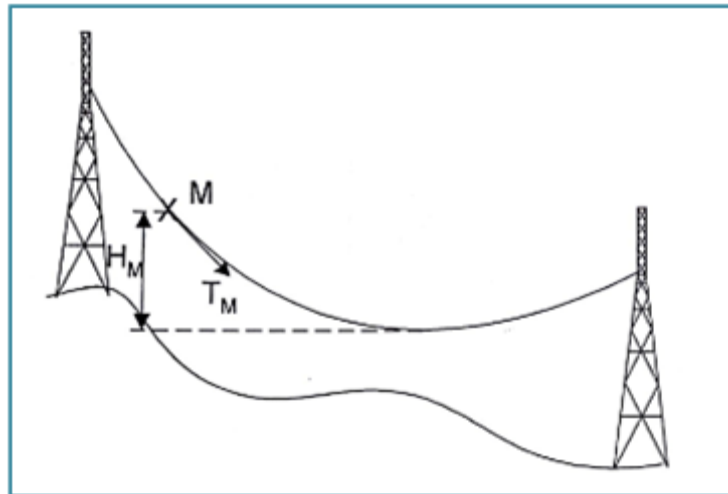


Fig. (III-26): Représentation d'une tension dans le câble au point quelconque.

$$T_M = T_0 + m \cdot p \cdot H_M \quad (III - 81)$$

Avec :

T_0 : Tension horizontale en (daN)

m : Coefficient de sur charge

p : Poids linéique du câble en (daN/m)

H_M : Hauteur entre le point M et le pont base en (m).

III-7-3-Tension dans une portée :

La tension mécanique est maximale au point d'accrochage le plus haut et elle est minimale au point bas - voire la représentation de la figure (III-27).

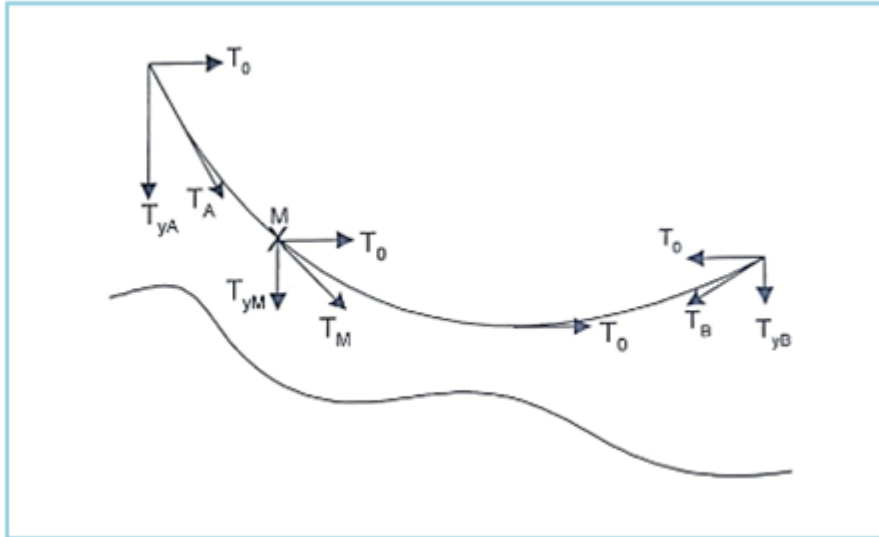


Fig. (III-27): Représentation de la tension Max et min dans un câble.

$$T_A = \sqrt{T_0^2 + T_{yA}^2} \quad (III - 82)$$

Avec :

T_A : La tension mécanique est maximale au point d'accrochage.

III-7-5-Balancement de la chaîne d'isolateurs :

En réalité, ce phénomène n'est pas du seulement à l'action du vent sur le conducteur et sur la chaîne, mais il est du surtout à l'emplacement du pylône, où l'effort du poids du conducteur et de la chaîne ne suffit pas pour assurer le maintien en position verticale de la chaîne d'isolateurs. Et il suffit alors d'une légère pression de vent transversale, la chaîne risque un fort balancement ou à la limite elle peut subir une rotation autour du point

d'accrochage et provoque un court circuit phase- terre par collision à la console- voire la représentation de la figure (III-28).

Afin d'éviter l'apparition de ce phénomène, il faut que la résultante des efforts verticaux et longitudinaux soit dirigée vers le sol. Dans le cas contraire où la charge devient insuffisante, on prévoit des contrepoids pour les chaînes d'isolateurs.

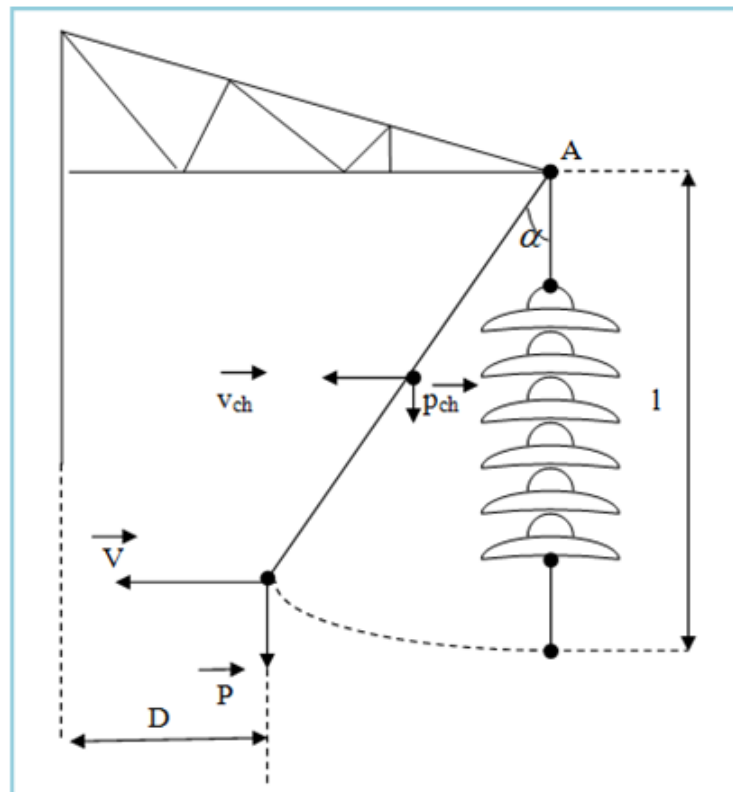


Fig. (III-28): Balancement de la chaîne.

V : Effort du vent sur le conducteur

V_{ch} : Effort du vent sur la chaîne

P : Poids du conducteur

P_{ch} : Poids de la chaîne

l : Longueur de la chaîne.

D : Distance à la masse.

α : Angle de balancement de la chaîne

Pour que le système soit équilibré, il faut que la somme des moments par rapport au point A soit égale à zéro.

$$\sum \vec{M}_t / A = 0$$

Donc :

$$P \cdot l \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} P_{ch} \cdot l \cdot \sin \alpha = V \cdot l \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} V_{ch} \cdot l \cdot \cos \alpha \quad (III - 83)$$

$$\left(P + \frac{1}{2} P_{ch} \right) \cdot l \cdot \sin \alpha = \left(V + \frac{1}{2} V_{ch} \right) \cdot l \cdot \cos \alpha \quad (III - 84)$$

Alors :

$$\tan \alpha = \frac{\left(V + \frac{1}{2} V_{ch} \right)}{\left(P + \frac{1}{2} P_{ch} \right)} \Rightarrow \alpha = \tan^{-1} \frac{\left(V + \frac{1}{2} V_{ch} \right)}{\left(P + \frac{1}{2} P_{ch} \right)} \quad (III - 85)$$

▪ **Remarque :**

Si la valeur de l'angle α dépasse 45° (50GR), donc la distance à la masse devient insuffisante, on installera des contre poids au dessous de la chaîne pour augmenter son poids qui implique une diminution de l'angle α .

III-7-6-Balancement de la chaîne d'isolateurs contre poids :

Le balancement de la chaîne d'isolateur contre poids son représenté à la figure (III-

29).L'expression devient :

$$\tan \alpha = \frac{\left(V + \frac{1}{2}V_{ch}\right)}{\left(P + \frac{1}{2}P_{ch} + Q\right)} \Rightarrow Q = \frac{\left(V + \frac{1}{2}V_{ch}\right)}{\tan \alpha} - \left(P + \frac{1}{2}P_{ch}\right) \quad (III - 86)$$

Avec :

Q :La valeur du contre poids.

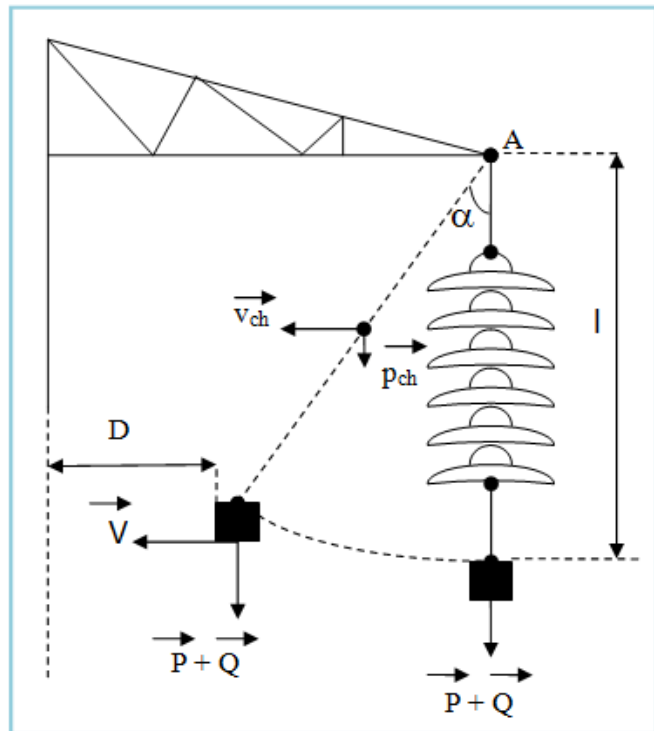


Fig. (III-29): Balancement de la chaîne en ajoutant un contre poids.

DONNEES						CALCULS					
N°	a ₁	d ₁	a ₂	d ₂	Chaîne	t	σ _{max}	α	CP-calc.	CP-réel	α _{réel}
Pylône	m	m	m	m	1: SS 2: SD	daN/mm ²	GR	GR	kg	kg	GR
54											
55	260	-5.4	350	10.58	2	4.61	50	30.3	---		30.3
56	350	-10.58	356	11.94	2	4.61	50	31.5	---		31.5
57											
58											
59	270	36.33	200	-20.1	1	4.51	50	27.4	---		27.4
60	200	20.1	190	-9.06	1	4.51	50	23.8	---		23.8
61	190	9.06	270	-8.34	1	4.51	50	29.7	---		29.7
62	270	8.34	185	-6.08	1	4.51	50	32.8	---		32.8
63	185	6.08	375	-45.69	1	4.51	50	53.5	18	75	40.9
64	375	45.69	128.9	-6.86	1	4.51	50	24.1	---		24.1
65											
66											
67	475	29.64	285	-4.99	1	4.11	50	29.1	---		29.1
68	285	4.99	363.7	-1.1	1	4.11	50	31.4	---		31.4
69											
70	470	-9.2	450	-43.61	2	4.04	50	45.1	---		45.1
71	450	43.61	305.4	-7.14	1	4.04	50	27	---		27
72											
73	250	-6.75	580	-0.29	2	4.58	50	35.3	---		35.3
74	580	0.29	395.85	2.1	2	4.58	50	32.1	---		32.1
76											
77											
78	400	37.44	220	-22.73	2	4.13	50	32.7	---		32.7
79	220	22.73	490	-62.83	2	4.13	50	34.7	---		34.7
80	490	62.83	176.5	-21.45	1	4.13	50	32.3	---		32.3
81											
82	350	37.27	412	-39.81	1	4.41	50	32.2	---		32.2
83	412	39.81	143	-15.17	2	4.41	50	32.6	---		32.6
84	143	15.17	305	-42.08	2	4.41	50	36.6	---		36.6
85	305	42.08	120	-19.02	1	4.41	50	36.7	---		36.7
86	120	19.02	105	34.78	1	4.41	50	4.8	---		4.8
87											
88	315	-62.8	250	36.68	2	4.8	50	41.1	---		41.1
89	250	-36.68	360	34.7	1	4.8	50	42.4	---		42.4
90	360	-34.7	430	34.02	1	4.8	50	35.5	---		35.5
91	430	-34.02	260	-0.34	2	4.8	50	45.4	---		45.4
92											

Tab. (III-10): Calcul des angles de balancement

III-7-7-Bretelle de jonction :

Les bretelles de jonction sont destinées à établir la continuité électrique de la ligne aux pylônes d'ancrages, elles sont réalisées en câble de même nature que celui de la ligne. Elles sont en générale assez rigide pour ne pas nécessiter la pose de contre poids de bretelle, si la longueur a été calculée correctement en tenant compte de la flèche prescrite (distance entre le câble de bretelle et la masse).

III-7-8-Efforts transmis aux pylônes par les conducteurs:

Dans ce titre les pylônes seront vérifiés pour 3 hypothèses :

- Hypothèse A ou hypothèse d'été (vent de 48 daN, température +15°C)

Charge maximale $< \frac{CRN}{3}$ (CRN : charge de rupture nominal).

- Hypothèse B ou hypothèse d'hiver (vent de 18 daN, température -20°C)

Charge maximale $< \frac{CRN}{3}$

- Hypothèse G ou hypothèse givre léger (vent de 18 daN, température -5°C, manchon de Givre 2cm de chaque coté du pylône).

- Charge maximale $<$ charge maximale admissible (limite élastique).

- Les efforts verticaux sont dus- voir la représentation de la figure (III-27).

- au poids des câbles (avec surcharges)
- à la différence d'altitude des points d'accrochages

- au poids des chaines d'isolateurs

Les efforts horizontaux sont dus :

- au vent sur câbles
- au vent sur les chaises
- à l'effet de ('angle

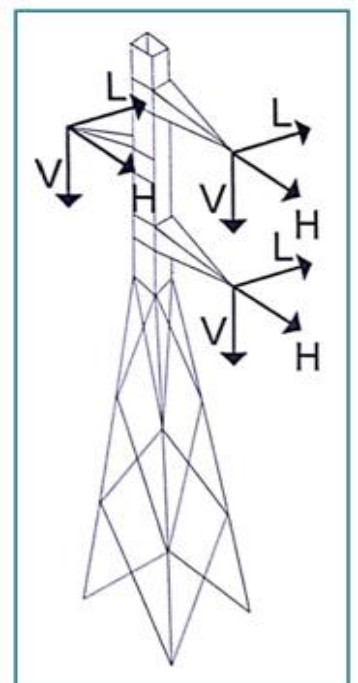


Fig. (III-30) : Efforts transmis au pylône.

III-7-9-Efforts verticaux, horizontaux et longitudinaux :

III-7-9-1-Pylône en suspension :

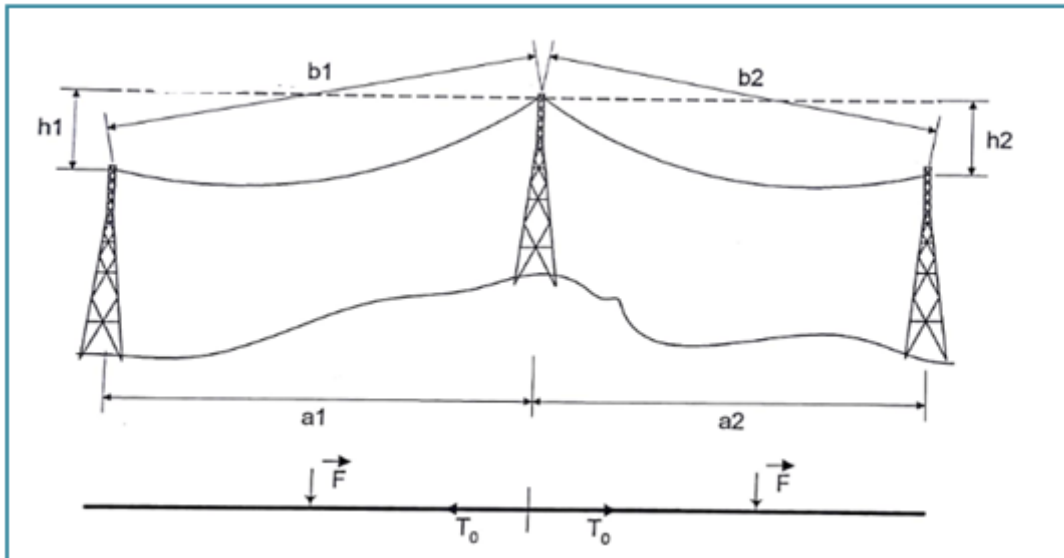


Fig. (III-31): Représentation des efforts (pylône en suspension)

- Verticale :

$$V = (p + \gamma) \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + T_0 \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right) + P_{ch} \quad (III - 87)$$

Avec :

$$F = P_v \times \phi = \frac{1}{2} (C_x \times \sigma \times v^2) (D + 2e) \quad (III - 88)$$

- Horizontale :

$$H = F \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + V_{ch} \quad (III - 89)$$

- Longitudinal :

$$L = 0 \quad (III - 90)$$

- Notation :

V : Effort vertical (en daN)

H : Effort horizontal (en daN) L : effort longitudinal (en daN)

F : Force due au vent (en daN/m)

D : Diamètre du câble en (m)

e : Épaisseur du givre en (m)

\emptyset : Le diamètre apparent de (câble + givré) en m

T_0 : Tension horizontale (en daN)

p : Poids linéique du câble (daN/m)

γ : Poids linéique du givre (daN/m)

a_1 et a_2 : portées horizontales (en m)

b_1 et b_2 : portées obliques (en m)

h_1 , et h_2 : deniveles (en m)

P_{ch} : Poids de la chaine (daN)

V_{ch} : Vent surla chaine (daN).

D O N N E E S												Calcul		
	Type	a ₁	d ₁	a ₂	d ₂	Chaîne		Hypothèse:	Vent	Givre	t	V	H	L
		m	m	m	m	1: Simp. 2: Doub.	GR		daN/m ²	kg/m	daN/mm ²	daN	daN	daN
54	SX													
55	NZ	260	-5.4	350	10.58	2	0.0	A	48	0	5.89	408	386	0
56	NZ	350	-10.6	356	11.94	2	0.0	A	48	0	5.89	443	443	0
57														
58	S													
59	NX	270	36.3	200	-20.1	1	0.0	A	48	0	5.6	346	292	0
60	N	200	20.1	190	-9.06	1	0.0	A	48	0	5.6	345	244	0
61	NR	190	9.1	270	-8.34	1	0.0	A	48	0	5.6	305	286	0
62	NR	270	8.3	185	-6.08	1	0.0	A	48	0	5.6	264	283	0
63	NZ	185	6.1	375	-45.69	1	0.0	A	48	0	5.6	137	345	0
64	NY	375	45.7	129	-6.86	1	0.0	A	48	0	5.6	434	312	0
65	SR													
66	S													
67	A-8	475	29.6	285	-4.99	2	0.0	A	48	0	5.4	550	476	0
68	NR	285	5.0	364	-1.1	1	0.0	A	48	0	5.4	392	398	0
69	S													
70	A-8	470	-9.2	450	-43.61	2	0.0	A	48	0	5.3	315	571	0
71	A-8	450	43.6	305	-7.14	1	0.0	A	48	0	5.3	560	462	0
72	SR													
73	AR4	250	-6.8	580	-0.29	2	0.0	A	48	0	6.0	437	518	0
74	A0	580	0.3	396	2.1	2	0.0	A	48	0	6.0	582	605	0
76	SX													
77	SR													
78	NR	400	37.4	220	-22.73	2	0.0	A	48	0	5.4	374	392	0
79	NY	220	22.7	490	-62.83	2	0.0	A	48	0	5.4	388	446	0
80	A-8	490	62.8	177	-21.45	1	0.0	A	48	0	5.4	386	409	0
81	S													
82	A-8	350	37.3	412	-39.81	1	0.0	A	48	0	5.7	440	466	0
83	A+4	412	39.8	143	-15.17	2	0.0	A	48	0	5.7	341	353	0
84	N	143	15.2	305	-42.08	2	0.0	A	48	0	5.7	242	289	0
85	NX	305	42.1	120	-19.02	1	0.0	A	48	0	5.7	211	265	0
86	AR8	120	19.0	105	34.78	1	0.0	A	48	0	5.7	1 168	145	0
87	S													
88	NX	315	-62.8	250	36.68	2	0.0	A	48	0	6.1	248	359	0
89	NX	250	-36.7	360	34.7	1	0.0	A	48	0	6.1	232	375	0
90	NX	360	-34.7	430	34.02	1	0.0	A	48	0	6.1	395	483	0
91	NZ	430	-34.0	260	-0.34	2	0.0	A	48	0	6.1	247	434	0
92	SR													
93	A+8	415	-18.0	400	-21.3	1	0.0	A	48	0	6.0	233	498	0
94	N	400	21.3	285	-19.61	1	0.0	A	48	0	6.0	348	420	0
95	NX	285	19.6	280	-18.89	1	0.0	A	48	0	6.0	326	348	0
96	NY	280	18.9	350	-19.71	1	0.0	A	48	0	6.0	379	387	0

Tab. (III-11): Calcul des efforts sur les pylônes de suspension.

III-7-9-2-Pylône en angle souple :

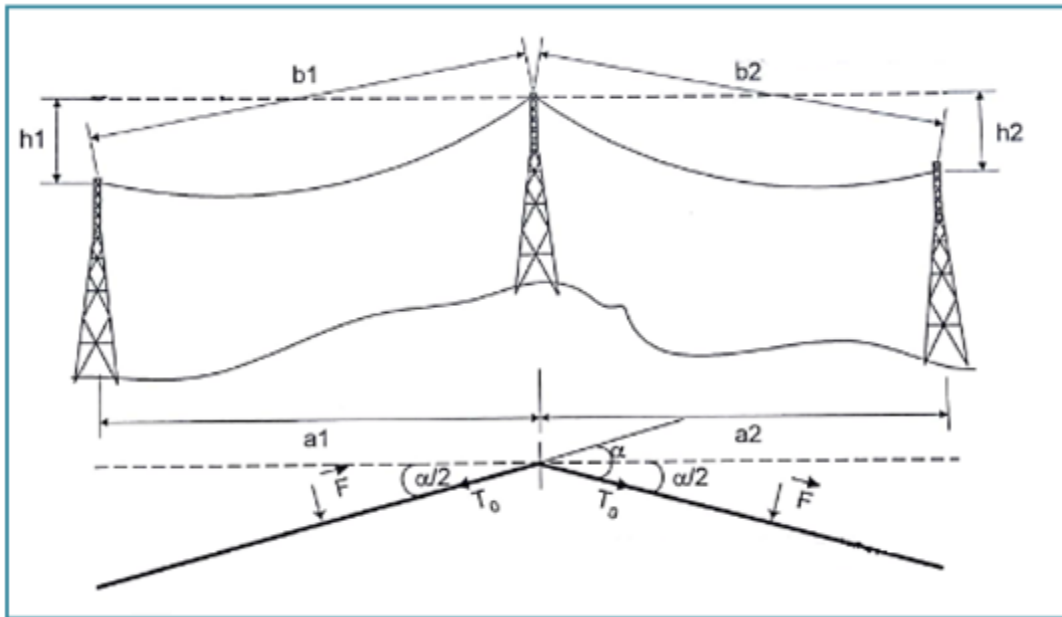


Fig. (III-32): Représentation des efforts (pylône en angle souple)

- **Verticale :**

$$V = (p + \gamma) \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + T_0 \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right) + P_{ch} + C_P \quad (III - 91)$$

- **Horizontale :**

$$H = F \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + 2 \cdot T_0 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + V_{ch} \quad (III - 92)$$

- **Longitudinal :**

$$L = 0$$

- Notation :

V : Effort vertical (en daN)

H : Effort horizontal (en daN)

L : effort longitudinal (en daN)

F : Force due au venten (daN/m)

T_0 : Tension horizontale (en daN)

α : Angle de piquetage en grade

p : Poids linéique du câble (daN/m)

γ : Poids linéique du givre (daN/m)

a_1 et a_2 : portées horizontales (en m)

b_1 et b_2 : portées obliques (en m)

h_1 , et h_2 : deniveles (en m)

P_{ch} : Poids de la chaine (daN)

V_{ch} : Vent surla chaines (daN)

C_p : Poids des contre poids (daN)

III-7-9-3-Pylône en ancrage :

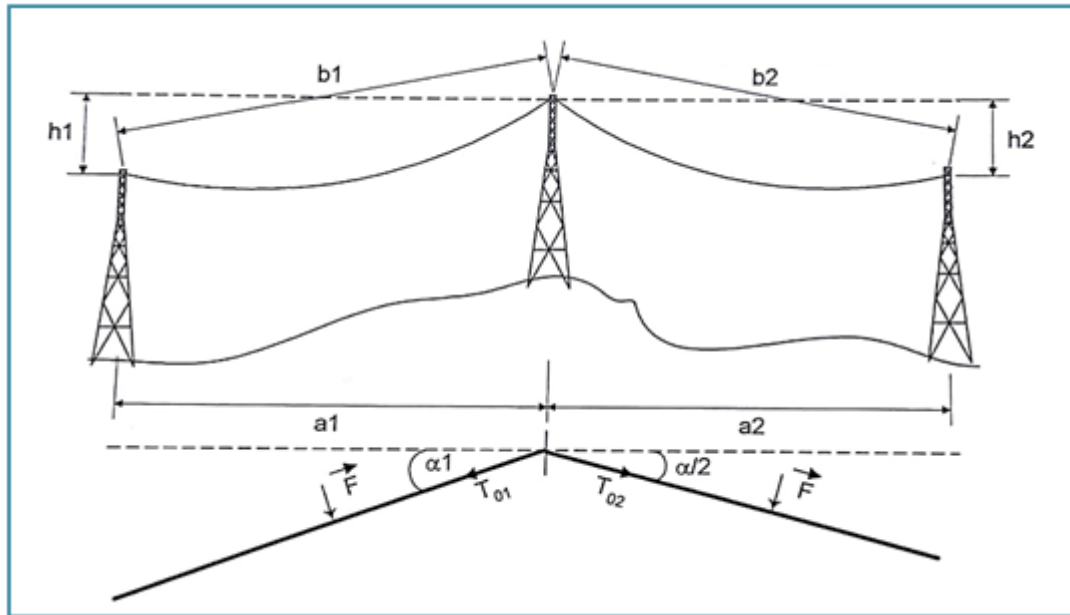


Fig. (III-33): Représentation des efforts (pylône en ancrage)

- **Verticale :**

$$V = (p + \gamma) \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) + T_{01} \left(\frac{h_1}{a_1} \right) + T_{01} \left(\frac{h_2}{a_2} \right) + P_{ch1} + P_{ch2} \quad (III - 93)$$

- **Horizontale :**

$$H = F \left(\frac{b_1 \cos \alpha_1 + b_2 \cos \alpha_1}{2} \right) + T_{01} \sin \alpha_1 + T_{01} \sin \alpha_2 + V_{ch1} + V_{ch2} \quad (III - 94)$$

- **Longitudinal :**

$$L = T_{01} \cos \alpha_1 + T_{01} \cos \alpha_2 \quad (III - 95)$$

- Notation :

V : Effort vertical (en daN)

H : Effort horizontal (en daN)

L : effort longitudinal (en daN)

F : Force due au vent en (daN/m)

T_o : Tension horizontale (en daN)

p : Poids linéique du câble (daN/m)

γ : Poids linéique du givre (daN/m)

a_1 et a_2 : portées horizontales (en m)

b_1 et b_2 : portées obliques (en m)

h_1 , et h_2 : dénivèles (en m)

P_{ch1} et P_{ch2} : Poids de la chaine (daN)

V_{ch1} et V_{ch2} : Vent sur la chaine (daN)

T_{01} et T_{02} : Tension horizontale en daN

α_1 et α_2 : Angles de piquetage en grade

D O N N E E S																			
N° Pylône	Type	a1	d1	a2	d2	α1	α2	Hypothèse:	t1 - daN/mm ²	t2 - daN/mm ²	V1	V2	H1	H2	L1	L2	V	H	L
		m	m	m	m	GR	GR				daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN
54	SX	154	8.5	260	5.4	20.00	20.00	A	5.89	5.89	238	216	765	825	2051	2051	455	1 590	0
58	S	351	-3	270	-36.3	19.03	19.03	A	5.89	5.67	198	-103	846	776	2061	1984	95	1 623	77
65	SR	114	6.4	105	16.02	3.67	3.67	A	5.67	5.41	216	397	198	188	2073	1977	613	386	96
66	S	105	-16.02	475	-29.6	0.00	0.00	A	5.41	5.36	-207	156	74	295	1981	1964	-52	368	17
69	S	364	1.1	470	9.2	9.59	9.59	A	5.36	5.30	229	314	520	580	1941	1918	542	1 100	23
72	SR	305	7.14	250	6.8	7.33	7.33	A	5.30	5.98	239	226	415	411	1927	2176	465	826	249
76	SX	396	-2.1	70	4.0	4.38	4.38	A	5.98	4.81	227	178	397	174	2185	1759	405	571	426
77	SR	70	-3.99	400	-37.6	0.00	0.00	A	4.81	5.38	-23	56	53	250	1763	1971	33	302	208
81	S	177	21.5	350	-37.3	1.21	1.21	A	5.38	5.65	370	-4	154	259	1970	2068	366	413	97
87	S	105	-34.8	315	62.8	0.00	0.00	A	5.65	6.12	-591	646	74	199	2068	2241	55	273	173
92	SR	260	0.34	415	18.0	0.00	0.00	A	6.12	6.04	175	344	166	259	2241	2213	519	425	28
97	SX	350	19.7	180	6.5	9.44	9.44	A	6.04	5.78	341	208	544	430	2189	2092	549	974	97
105	SR	204	12.9	190	17.1	15.06	15.06	A	5.78	5.44	278	359	625	599	2056	1936	637	1 224	121
107	SR	131	-11.35	306	-0.1	9.27	9.27	A	5.44	5.42	-65	193	377	480	1970	1964	128	856	6
108	SX	306	0.13	201	-23.4	16.58	16.58	A	5.42	4.93	195	-25	698	602	1918	1744	170	1 301	173
109	SX	201	23.4	174	-10.2	17.17	17.17	A	4.93	5.33	396	58	618	642	1740	1881	454	1 260	141
110	SX	174	10.17	330	-33.3	10.17	10.17	A	5.33	5.85	286	-10	435	546	1927	2115	276	981	188
112	SX	347	13.28	180	-3.7	22.00	22.00	A	5.85	6.06	297	87	932	864	2016	2088	383	1 795	73
116	CR8	215	-44.0	265	18.8	0.00	0.00	A	6.06	5.68	-305	322	139	169	2219	2081	17	308	138
117	CR8	265	-18.8	170	-13.0	15.61	15.61	A	5.68	5.96	26	3	670	650	2019	2117	29	1 320	98
127	SX	273	28.1	270	7.7	7.70	7.70	A	5.96	6.20	403	242	436	445	2167	2255	644	881	88
137	SR	326	11.2	160	-1.7	6.47	6.47	A	6.20	5.51	325	144	446	321	2260	2006	469	767	254
139	SX	335	-20.09	95	14.0	0.00	0.00	A	5.51	3.39	131	273	222	68	2016	1242	403	289	775
140	EGA 12.3	95	-14.0	175	-19.5	0.00	0.00	A	3.39	3.00	-93	7	68	115	1242	1100	-86	183	142
142	S	178	3.73	150	16.3	4.93	4.93	A	3.00	5.83	197	349	213	265	1097	2127	547	478	1 030
144	S	185	-29.23	260	34.3	14.95	14.95	A	5.83	4.77	-202	445	615	579	2075	1698	243	1 193	377
154	SX	290	-22.8	270	30.8	18.10	18.10	A	5.54	5.80	71	461	757	772	1946	2038	532	1 529	91

Tab. (III-12): Calcul des efforts sur les pylônes d'ancrage.

▪ Conclusion :

L'étude du comportement mécanique des câbles nous permet d'évaluer les efforts principaux transmis à la structure en fonction des conditions climatiques et des emplacements des supports, Ceci va nous permettre de dimensionner les modules de la structure en prenant compte des conditions climatiques les plus défavorables.

Chapitre VI : Etude Electrique

Introduction :

L'étude électrique consiste à :

- Etudier les isolateurs.
- Etudier les paramètres linéiques de la ligne (résistance, inductance et capacité).
- Détermination de la chute de tension
- Les pertes par effets joule.

IV- 1-Dimensionnement de la Section des conducteurs :

Nous devons vérifier que le câble supporte le courant nominal sur toute sa durée de vie.

Vu $P_{départ}$ et à donnés, nous déterminons tout d'abord la puissance circulant dans le câble

Après les $T_{années}$ d'utilisation par la relation (IV-1) :

$$P_T = P_{départ}(1 + \delta)^T [MW] \quad (IV - 1)$$

Nous en déduisons le courant circulant alors dans chaque phase du câble :

$$I_{nT} = \frac{P_T}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} \quad (IV - 2)$$

▪ Exemple de calcul:

Dans le cas où nous devrions compter sur une durée de vie de 20 ans et avec une augmentation annuelle de la consommation de 4 %...

La puissance que la ligne devra transiter alors sera de :

$$P_{20} = 10 \times (1 + 0.04)^{20} = 21.9[\text{MW}]$$

Le courant nominal qui correspondra à cette puissance est :

$$I_{n20} = \frac{P_{20}}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} = \frac{21.9 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 60 \times 10^3 \cos 0.9} = 211 \text{ A}$$

La plus petite section normalisée que nos tables nous proposent et supportant un courant de 211 A au moins vaut 95 mm². Toutes les sections supérieures respectent ce critère du courant nominal.

IV-2-Les isolateurs :**IV-2-1-Caractéristiques technique d'un isolateur :**

Les Caractéristiques de l'isolateur qu'on a utilisé sont– Voir la figure (IV-1):

- Type : SEDIVER U120A/127.
- Norme : 16 A.
- Diamètre : 380 mm.
- Pas : 127 mm.
- Ligne de fuite nominale : 360 mm.
- Charge minimale de rupture mécanique : 120 kN.
- Poids net approximatif : 5,7 kg.

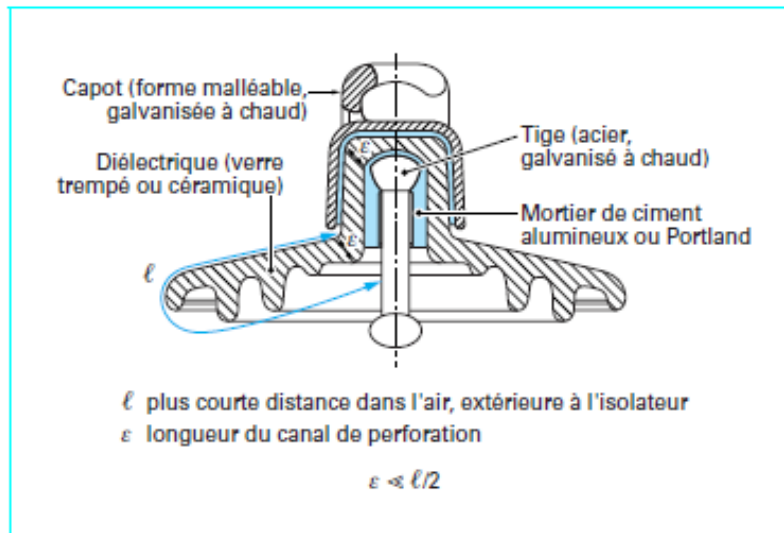


Fig. (IV.1) : Représentation d'une isolatrice capot tige normale.

IV-2- 2-Pollution des isolateurs :

La pollution des isolateurs est due essentiellement à des activités de l'homme, dont la production industrielle d'une part, et les transports, la mise en feu des déchets publics quotidiens d'autre part.

Pour diminuer les effets de la pollution des isolateurs on utilise les différents procédés suivants :

IV-2-3- L'augmentation du nombre d'isolateurs dans une chaîne :

On augmente le nombre d'isolateurs pour augmenter la ligne de fuite totale d'une chaîne. Cette méthode est employée de plus dans les zones à pollution moyenne mais elle est limitée par la configuration géométrique du pylône, la topologie du terrain et la distance limitée à la masse, elle est limitée aussi par le facteur économique.

IV-2-4- Isolateurs spéciaux :

Appelés généralement isolateurs anti-pollution, servent à allonger la ligne de fuite, et utilisables dans les zones à forte pollution.

IV-2-5-Isolateurs munis de revêtements :

Utilisables dans le but de déduire l'effet de la pollution.

Les revêtements les plus employées sont des graisses, soit minérales, soit à base de silicones.

IV-3- Chaîne d'isolateur :

La chaîne d'isolateurs est constituée d'un certain nombre d'éléments en porcelaine ou en verre réuni par des pièces de liaison entre le conducteur et le support.

Il y a deux types de chaînes :

IV-3-1-Les chaînes d'ancrage :

Elles sont utilisées sur les pylônes d'ancrage.

IV-3-2-Les chaînes de suspension :

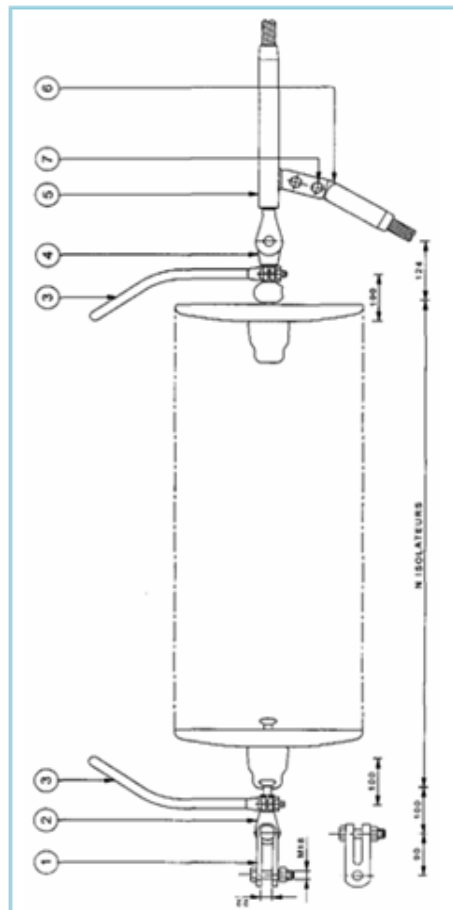
Elles sont utilisées sur les pylônes d'alignement.

Lors du croisement des voies de communication (Autoroutes, routes nationales, routes à grandes circulation, route de wilaya, des chemins de fer, des lignes électrique (HTA,BTA..), lignes téléphonique PTT et pour les portées supérieure à 400 m) les chaînes doivent être de type chaînes doubles.

IV-4-Représentation des types des chaînes :

IV-4-1-Chaîne d'ancrage simple :

Voir la figure (IV-2):

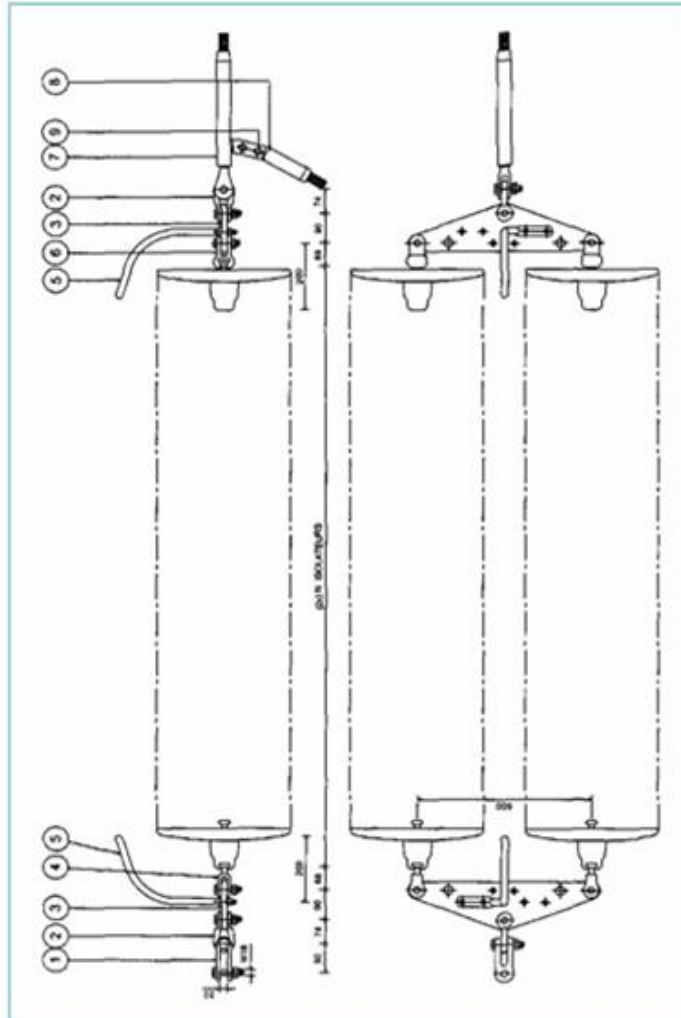


Rep	Qté	Désignation	Matière
7	2	Boulon pour cosses	Acier galvanisé
6	1	Cosse de dérivation	Aluminium
5	1	Manchon d'ancrage	Acier galva + alliage Alu
4	1	Ball socket	Fonte galvanisée
3	2	Corne simple	Acier galvanisé
2	1	Œillet	Acier forge galvanisé
1	1	Connecteur double	Acier galvanisé

Fig. (IV-2) : Chaîne d'ancrage simple.

IV-4-2-Chaîne d'ancrage double :

Voir la figure (IV-3):

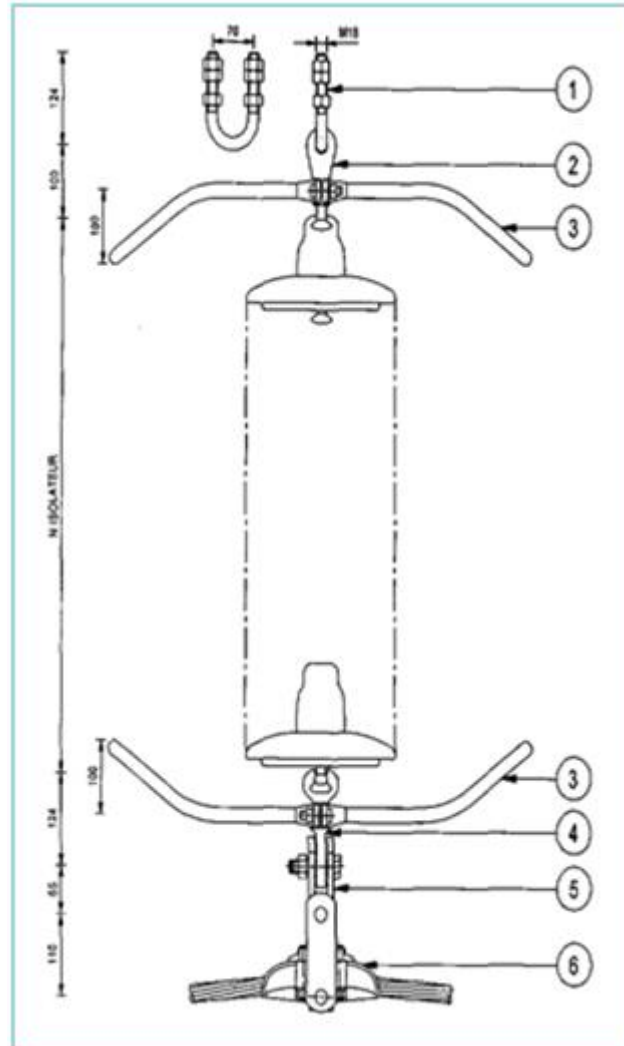


Rep	Qté	Désignation	Matière
9	2	Boulon pour cosses	Acier galvanisé
8	1	Cosse de dérivation	Aluminium
7	1	Manchon d'ancrage	Acier galva + Aluminium
6	2	Ball socket a chape	Acier forge galvanisé
5	2	Corne	Acier galvanisé
4	2	Œillet a chape	Acier forge galvanisé
3	2	Palonnier	Acier galvanisé
2	2	Manille	Acier galvanisé
1	1	Connecteur double	Acier galvanisé

Fig. (IV-3) : Chaîne d'ancrage double.

IV-4-3-Chaîne de suspension simple :

Voir la figure (IV-4) :

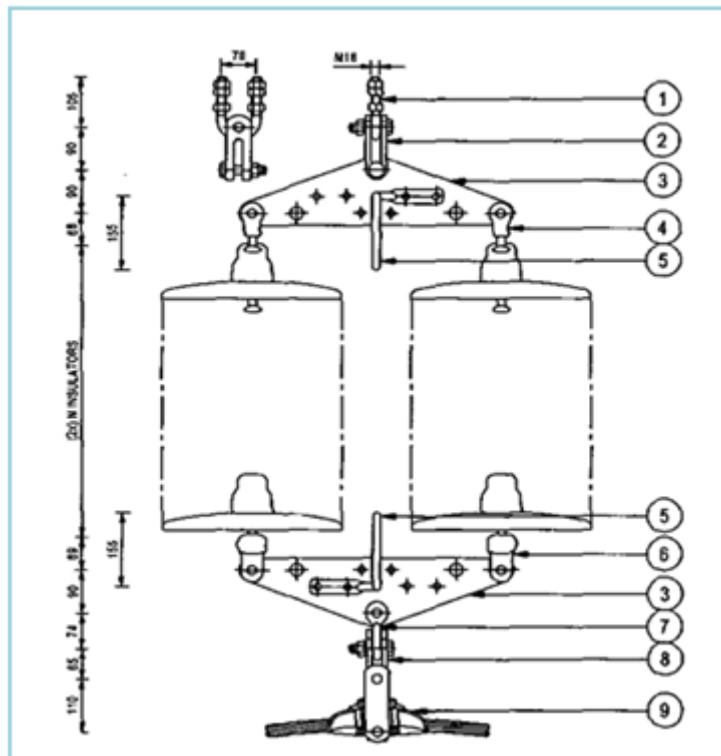


Rep	Qté	Désignation	Matière
6	1	Pince de suspension	Alliage aluminium
5	1	Connecteur de pince	Acier galvanisé
4	1	Ball socket	Acier galva + alliage Alu
3	2	Corne double	Acier galvanisé
2	1	Œillet	Acier forge galvanisé
1	1	Etrier	Acier galvanisé

Fig. (IV-4): Chaîne de suspension simple

IV-4-4-Chaîne de suspension double :

Voir la figure (IV-5):



Rep	Qté	Désignation	Matière
9	1	Pince de suspension	Alliage aluminium
8	1	Connecteur de pince	Acier galvanisé
7	2	Ball socket a chape	Acier forge galvanisé
6	4	Corne simple	Acier galvanisé
5	1	Œillet a chap.	Acier forge galvanisé
4	2	Palonnier	Acier galvanisé
3	2	Manille	Acier forge galvanisé
2	1	Connecteur de pince	Acier galvanisé
1	1	boulon Axe	Acier galvanisé

Fig. (IV-5) : Chaîne de suspension double

IV-5-Nombres et dimensionnement :

IV-5-1-Le nombre d'isolateurs par chaîne :

Le nombre d'isolateurs par chaîne est donné par l'expression suivante :

$$N_{is} = \frac{\text{tension la plus élevée pour le matériel} \times \text{Niveau d'isolement}}{\text{Ligne de fuite nominale}}$$

- Niveau d'isolement = 25 mm/kV

- Tension la plus élevée pour le matériel = 72,5 kV

$$N_{is} = \frac{72,5 \times 25}{360} = 5,034 \approx 6 \text{ isolateurs}$$

Alors :

$$N_{is} = 6 \text{ Isolateurs}$$

IV-5-2-Longueur de la chaîne de suspension simple :

$$L_{chs} = 104 \text{ (Etrier)} + 119 \text{ (Œillet à rotule)} + 106 \text{ (Ball socket)} \\ + 133 \text{ (Pince de suspension)} = 1.224 \text{ m.}$$

Alors :

$$L_{chs} \approx 1,3 \text{ m}$$

IV-5-3-Longueur de la chaîne de suspension double:

$$L_{chd} = [104 \text{ (Etrier)} + 100 \text{ (Œillet droit)} + 47 \text{ (Palonnier)} + 104 \text{ (Œillet à rotule)} + \\ 6 \times 127 \text{ (6 isolateurs)} + 106 \text{ (Ball socket)} + 133 \text{ (Pince de suspension)}] = \\ 1.356 \text{ m.}$$

Alors :

$$L_{chd} \approx 1,4 \text{ m}$$

IV-5-5-Poids de la chaîne de suspension simple :

$$P_{chs} = (\text{Poids d'accessoires} + \text{Poids d'isolateurs}) = (8,25 + 6 \times 5,8) = 43,05$$

Alors :

$$P_{chs} \approx 43 \text{ kg}$$

IV-5-6-Poids de la chaîne de suspension double :

$$\begin{aligned} P_{chd} &= (\text{Poids d'accessoires} + \text{Poids d'isolateurs}) \\ &= (16,45 + 6 \times 5,8) = 86,05 \text{ kg} \end{aligned}$$

Alors :

$$P_{chd} \approx 86 \text{ kg}$$

IV-6- Les paramètres linéiques de la ligne :**IV-6-1- La résistance:**

Cette résistance est donnée en courant continu à la température de 20°C :

$$R_{20} = 0,090 \ \Omega / \text{km. (Voir les caractéristiques du conducteur).}$$

Mais, la température de service est de 75°C, donc la résistance de cette température est de :

$$R_{75} = R_{20}[1 + \alpha(\theta_{75}^o - \theta_{20}^o)] \quad (IV - 3)$$

▪ **Remarque :**

Dans le cas d'un courant alternatif, il y'aura une petite augmentation de cette résistance due à la fréquence (l'effet de peau), on l'a supposée négligeable.

IV-6-2-Le Position des conducteurs :

IV-6-2-1-Cas d' une position en triangle polygone:

r : le rayon du conducteur.

$D_{12}D_{23}D_{31}$: Distance entre conducteurs.

La distance entre conducteurs

$$\left\{ \begin{array}{l} D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \\ D_{12} = D_{23} = D_{31} \end{array} \right. \quad (IV - 4) \quad \text{Avec :}$$

Voir la figure (IV-6) :

Alors :

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{D_{12}^3} = D_{12} \quad (IV - 5)$$

$$D = D_{12}$$

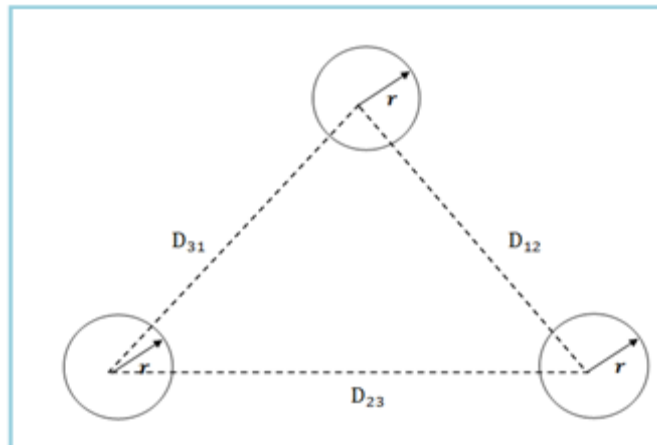


Fig. (IV-6) : position en triangle polygone

IV-6-2-2-Cas d'une position droite :

$$\begin{cases} D_{12} = D_{23} \neq D_{31} \\ D_{31} = D_{12} + D_{23} = 2D_{12} \end{cases} \quad (IV - 6)$$

Voir la figure (IV-7):

Alors :

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{2 D_{12}^3} = (2)^{\frac{1}{3}} \cdot D_{12} \quad (IV - 7)$$

$$D = (2)^{\frac{1}{3}} \cdot D_{12}$$

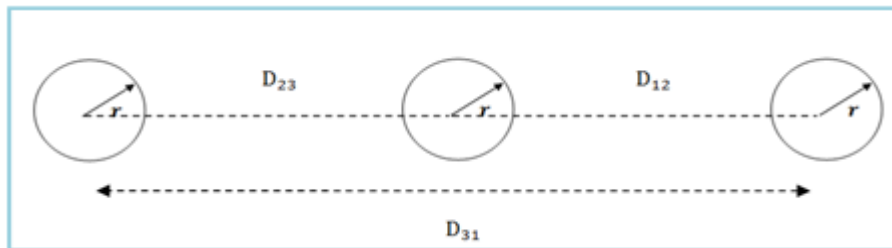


Fig. (IV-7) : Position en symétrie horizontale ou verticale

IV-6-2-3-Cas d'une position de triangle rectangle :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{12} = D_{23} \neq D_{31} \text{ Avec :} \\ D_{31} = \sqrt{D_{12}^2 + D_{23}^2} = \sqrt{2D_{12}^2} = \sqrt{2}D_{12} \end{array} \right. \quad (IV - 8)$$

Voir la figure (IV-8) :

Alors :

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{\sqrt{2} D_{12}^3} = (2)^{\frac{1}{6}} \cdot D_{12} \quad (IV - 9)$$

$$D = (2)^{\frac{1}{6}} \cdot D_{12}$$

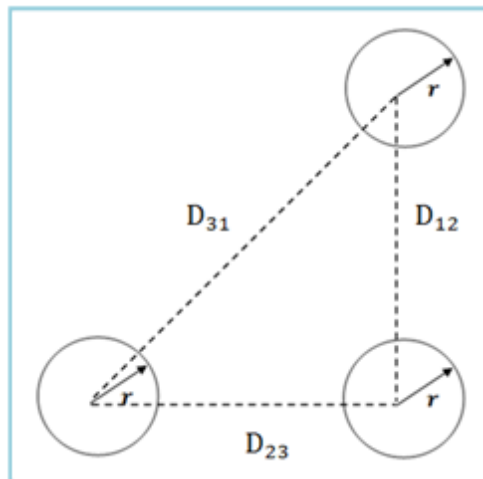


Fig. (IV-8) : position en triangle rectangle

IV-6-2-4-L'inductance :

On a :

$$\Phi = L \times i \quad \Rightarrow \quad L = \Phi / i \text{ Avec } \frac{\Phi}{i} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[0,5 + 2 \ln \frac{D}{r} \right]$$

Alors :

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[0,5 + 2 \ln \frac{D}{r} \right] \left(\frac{mH}{km} \right) \quad (IV - 10)$$

Avec :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

IV-6-2-5- La capacité :

Elle est calculée par la formule suivante :

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \cdot \ln \frac{D}{r}} (\mu F / km) \quad (IV - 11)$$

ϵ_r : Permittivité relative de l'isolant utilisé / Pour l'air $\epsilon_r = 1$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

IV-6-2-6-L'impédance :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (IV - 12)$$

Avec :

$$X = X_L - X_C = L\omega - \frac{1}{C\omega} \quad (IV - 13)$$

IV-6-2-7-Calcul du courant :

$$I = \frac{S_1}{\sqrt{3} U_1} \quad (IV - 14)$$

On à:

S_1 : Puissance apparente en MVA

U_1 : Tension nominale en kV

IV-6-2-8-La chute de tension :

La chute de tension dans les lignes est due à l'impédance du courant électrique, elle est de forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X_L \cdot \sin \varphi) \quad (IV - 15) \\ \Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_1} \quad (IV - 16) \end{array} \right.$$

Avec :

$\cos(\varphi)$ Est le facteur de puissance du ligne.

▪ **Remarque :**

Sur les lignes à haute tension HTB, la réactance est prépondérante et le choix du conducteur n'a guère d'influence sur les chutes de tension.

IV-6-2-9-Les pertes joule :

Elles sont fonction de la résistance et du carrée du courant.

$$P_j = 3 \times R \times I^2 \quad (IV - 17)$$

IV-6-2-10-Calculer la puissance de départ :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (IV - 18)$$

IV-6-2-11-Le rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_j}{P_1} \quad (IV - 19)$$

IV-7-Exemple de calcul :**1. La résistance de la ligne :**

Alors :

$$R_{75} = 0,090 \cdot [1 + 0,004 \cdot (75^\circ - 20^\circ)]$$

$$R_{75} = 0,1098 \Omega/km$$

Dans cette ligne la longueur de câble est :43.635 km

$$R_{75} = 0,1098 \times 43,635$$

Alors :

$$R_{75} = 4,79 \Omega$$

La ligne qu'on a étudiée est symétrique (même rayon des conducteurs et même distance entre eux), les conducteurs sont disposés au sommet d'un triangle horizontal- Voir la figure (IV-9) :

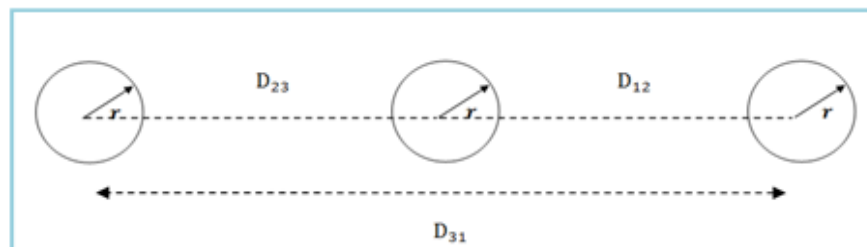


Fig. (IV-9): Position en symétrie horizontale ou verticale.

Les distances entre conducteurs :

$$D_{12} = D_{23} = 4,5 \text{ m}$$

$$D_{31} = 2D_{12} = 9 \text{ m}$$

Donc :

$$D = (2)^{\frac{1}{3}} \cdot D_{12} = (2)^{\frac{1}{3}} \times 4,5 = 5,669 \text{ m}$$

Alors :

$$D = 5,669 \text{ m}$$

On a :

$$S = 336 \text{ mm}^2 \text{ Est la section du conducteur}$$

Donc :

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{366 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 10,79 \text{ mm}$$

Alors :

$$L = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[0,5 + 2 \ln \frac{D}{r} \right] = \frac{\mu_o}{4\pi} \left[0,5 + 2 \ln \frac{5,669}{10,79 \cdot 10^{-3}} \right] = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L = 1,3 \text{ mH/km}$$

Dans cette ligne la longueur de câble est : 43.635 km

Alors :

$$L = 1,3 \times 43,635 = 56,848 \text{ mH}$$

$$L = 56,848 \text{ mH} = 0,0568 \text{ H}$$

Alors:

$$X_L = L \cdot \omega \Rightarrow X_L = 0,0572 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50$$

Alors :

$$X_L = 17,85 \Omega$$

2. La capacité :

Elle est calculée par la formule suivante :

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \cdot \ln \frac{D}{r}} = \frac{1}{18 \cdot \ln \left(\frac{5,669}{10,79 \cdot 10^{-3}} \right)} = 0.0088 \text{ F/m}$$

Alors :

$$C = 8810257 \mu\text{F/km}$$

Dans cette ligne la longueur de câble est :43.635 km

Alors :

$$C = 8810257 \times 43,635 = 384435564,2 \mu\text{F}$$

$$C = 384435564,2 \mu\text{F}$$

Donc:

$$X_c = \frac{1}{384,432 \cdot \pi \cdot 50} = 8.284 \mu\Omega$$

Alors :

$$X_c = 8.284 \mu\Omega$$

3. L'impédance :

$$X = X_L - X_c = L\omega - \frac{1}{C\omega} \approx 17.85$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{4.79^2 + 17.85^2} = 18.481 \Omega$$

Alors :

$$Z = 18.481 \Omega$$

4. Calcul du courant :

On à:

La puissance apparente $S_l = 40 \text{ MVA}$

La tension nominale $U_l = 63 \text{ KV}$ donc :

$$I = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 63} = 366,57 \text{ A}$$

Alors :

$$I = 366,57 \text{ A}$$

5. Détermination de la chute de tension :

On à :

$$\cos \varphi = 0,9$$

La chute de tension dans les lignes est due à l'impédance du courant électrique, elle est de forme :

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 366,57 \cdot (4,79 \cdot 0,9 + 17,85 \cdot 0,43) = 7,6 \text{ KV}$$

$$\Delta U = 7,6 \text{ KV}$$

Alors La chute de tension est :

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_1} = \frac{7,6}{63} \times 100 = 12\%$$

Alors :

$$\Delta U\% = 12\%$$

6. Détermination des pertes joule :

Elles sont fonction de la résistance et du carrée du courant.

$$P_j = 3 \times 4.79 \times (366.57)^2$$

Alors :

$$P_j = 1.93 \text{ MW}$$

7. Calcule la puissance de départ :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot 63 \cdot 10^3 \cdot 366,57 \cdot \cos \varphi$$

Alors :

$$P_1 = 36 \text{ MW}$$

8. Calcule du rendement :

$$\eta = \frac{36 - 1,93}{36} = 0.94$$

Alors :

$$\eta = 94\%$$

*Chapitre V : Simulation et
interprétation d'un problème de défaut*

▪ Introduction :

Chaque système d'énergie électrique est soumis à des perturbations affectant la qualité et la stabilité du service fourni aux clients, les lignes HTB sont souvent exposées à des incidents ou défauts telle que les courts circuits qui peuvent interrompre ce service et engendrer des pertes financières importantes.

Pour cela, nous étudierons dans ce chapitre les différents types de défauts en se basant sur les courts circuits.

V-1- Les anomalies dans un réseau électrique :

V-1-1- Les courts circuits :

Les courts circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau.

V-1-2- Les surtensions :

L'élévation de l'intensité de 1 à 10 In d'un circuit. Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes sur le réseau et accélère le vieillissement des équipements de réseau.

V-1-3- Les oscillations:

Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques.

V-1-4- Les déséquilibres :

Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution ; ils donnent naissance à la composante inverse du courant ; cette composante provoque :

- Des chutes de tension supplémentaires.
- Des pertes de puissance.
- Des échauffements.

V-1-5- Les surcharges :

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible (élévation de l'intensité de 1 à 10 I_n d'un circuit) ; les origines de surcharges sont :

- Les courts circuits.
- Les pointes de consommation.
- L'enclenchement des grandes charges.

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes sur le réseau et accélère le vieillissement des équipements de réseau.

V-2- Les origines des défauts dans les lignes de transport :

Le court-circuit représente le test le plus sévère pour valider les modèles de systèmes connectés sur un réseau électrique. On peut avoir diverses origines pour les courts circuits.

V-2-1- Electriques :

C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En Effet, les matériaux électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts circuits.

V-2-2- Atmosphériques :

Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.

V-2-3- Mécaniques :

C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.

V-2-4- Humaines :

Ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple.

V-2-5- La forme des défauts de simulation:

Les défauts qui affectant les lignes de transport peuvent être divisés en quatre types :

- Les défauts monophasés : entre une phase du réseau et la terre.
- Les défauts biphasés : entre deux phases du réseau et la terre.
- Les défauts triphasés : entre les trois phases du réseau et la terre.

V-3- La modélisation du réseau électrique :

Une ligne électrique est constituée par un faisceau de conducteurs cylindriques aériens ou souterrains parallèles entre eux et au sol, Chaque conducteur est caractérisé par:

- Sa résistance linéique ' R ' en Ω/m .
- Son inductance linéique ' L ' en H/m
- Sa capacité linéique ' C ' en F/m .

Les lignes électriques et les câbles sont des systèmes à constantes réparties, c'est-à-dire que ces grandeurs physiques sont réparties sur toute la longueur de la ligne.

V-3-1- Méthode de calcul des régimes déséquilibrés :

Nous allons examiner le comportement d'un réseau triphasé linéaire et symétrique, c'est-à-dire composé d'impédances constantes et identiques pour les 3 phases (c'est le cas en pratique) ne comportant que les sources équilibrées mais dont les courants et tensions peuvent se trouver déséquilibrés du fait de la connexion à une zone dissymétrique D.

Les sources constituent par nature des systèmes directs, les sources des systèmes inverses et homopolaires étant nulles.

Le fonctionnement du réseau est interprété en considérant la superposition de trois régimes correspondant chacun à l'un des systèmes direct, inverse ou homopolaire.

En effet, dans ce réseau linéaire et symétrique, les courants de chaque système sont liés uniquement aux tensions du même système, et réciproquement, par l'intermédiaire des impédances du système considéré. Notons que ces impédances Z_d , Z_i et Z_0 sont fonction des impédances réelles, notamment des inductances mutuelles.

Pour un réseau comportant les composantes symétriques de tension et de courant définissant les 3 régimes sont :

$$E = V_d + Z_d \times I_d \quad (V - 1)$$

$$0 = V_i + Z_i \times I_i \quad (V - 2)$$

$$0 = V_0 + Z_0 \times I_0 \quad (V - 3)$$

Not :

Z_d, Z_i, Z_0 : Impédances symétriques

Z : Impédance de terre

Elles sont schématisées par la figure (V-1). Pour les réseaux comportant plusieurs sources, ces équations restent valables à condition de considérer E et Z_d, Z_i, Z_0 , respectivement comme une source et comme les impédances internes du réseau équivalent de Thévenin.

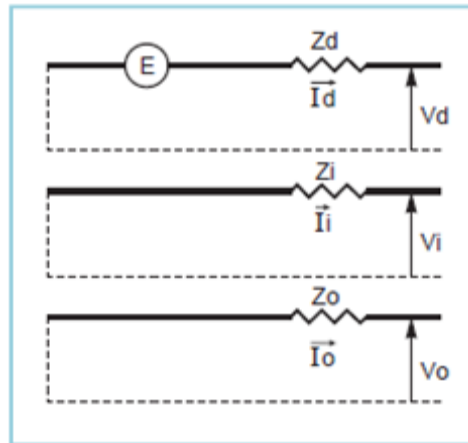


Fig. (V-1)

V-3-2- Méthode de résolution pratique :

La méthode résumée ci-dessous est développée en détail dans l'exemple du paragraphe suivant (défaut monophasé terre).

- Le réseau est divisé en 2 zones :
 - une zone dissymétrique D (réseau déséquilibré),
 - une zone symétrique S (réseau équilibré).
- On écrit les équations liant courants et tensions :
 - dans la zone D (composantes réelles),
 - dans la zone S (composantes symétriques),
 - continuité à la frontière D-S,
 - fonctionnement dans la zone S.
- La résolution mathématique des équations permet de calculer les valeurs des composantes symétriques et des composantes réelles des courants et tensions des zones D et S.

Il est à noter que les schémas représentatifs des systèmes symétriques offrent la possibilité de calculer directement les valeurs des composantes symétriques Fig. (V-1).

V-3-2-1- Défaut phase-terre (dit défaut homopolaire) :

Le circuit est supposé non chargé.

▪ **Ecriture des équations :**

- Equations des composantes réelles dans la zone (D) :

Ces équations décrivent le cas examiné de la figure (V-2).

$$I_2 = I_3 = 0 \quad (V - 4)$$

$$V_1 = Z \times I_1 \quad (V - 1)$$

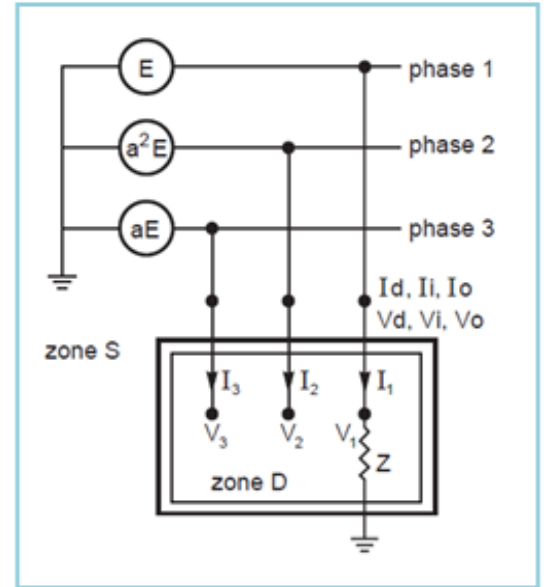


Fig. (V-2): Réseau avec défaut phase terre

- Equations des composantes symétriques dans la zone (S) :

Soit $V_1 V_2 V_3$ un système triphasé déséquilibré.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix}$$

Avec :

$$a = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Alors :

$$V_1 = V_d + V_i + V_o \quad (V - 6)$$

$$V_2 = a^2V_d + aV_i + V_o \quad (V - 7)$$

$$V_3 = aV_d + a^2V_i + V_o \quad (V - 8)$$

$$I_1 = I_d + I_i + I_o \quad (V - 9)$$

$$I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \quad (V - 10)$$

$$I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o \quad (V - 11)$$

Ces équations lient respectivement les courants réels et les tensions réelles à leurs composantes symétriques.

On les retrouvera à l'identique dans tous les calculs de régimes déséquilibrés.

- Continuité à la frontière D-S :

En combinant entre elles les équations des composantes réelles dans (D) et les équations des composantes symétriques dans (S) on obtient :

$$I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o = 0 \quad (V - 12)$$

$$I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o = 0 \quad (V - 13)$$

$$\text{Pour : } I_1 + I_2 + I_3 = I_d + I_i + I_o + a^2 I_d + a I_i + I_o + a I_d + a^2 I_i + I_o$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = (a^2 I_d + a I_d + I_d) + (a^2 I_i + a I_i + I_i) + (I_o + I_o + I_o)$$

Alors :

$$(a^2 + a + 1) I_d = 0$$

$$(a^2 + a + 1) I_i = 0$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = (I_o + I_o + I_o) = 3 I_o$$

$$\text{Pour : } I_2 = I_3 = 0 \quad \text{Alors :}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_1 + 0 + 0 = 3 I_o \quad \text{Alors } I_1 = 3 I_o \quad (V - 14)$$

A partir des équations (V-5), (V-6) et (V-14) :

$$V_1 = V_d + V_i + V_o = 3 Z \times I_o \quad (V - 15)$$

Equations de fonctionnement de S :

A partir des équations (V-5), (V-6) et (V-14) :

$$E = V_d + Z_d \times I_d \quad (V - 16)$$

$$0 = V_i + Z_i \times I_i \quad (V - 17)$$

$$0 = V_o + Z_o \times I_o \quad (V - 18)$$

Ces trois équations se retrouveront systématiquement dans tous les calculs de régimes déséquilibrés ne comportant qu'une seule source de tension.

▪ **Résolution des équations :**

On-à

$$\begin{cases} I_1 = 3 I_0 \\ I_1 = I_d + I_i + I_o \end{cases} \Rightarrow$$

$$3 I_0 = I_d + I_i + I_o \Rightarrow$$

$$2 I_0 = I_d + I_i$$

D'où :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_d}{2} + \frac{I_i}{2} \\ I_2 = 0 = a^2 I_d + a I_i + I_o \end{cases}$$

On trouve :

$$a^2 I_d + a I_i + \frac{I_d}{2} + \frac{I_i}{2} = 0 \Rightarrow$$

$$\left(a^2 + \frac{1}{2}\right) I_d + \left(a + \frac{1}{2}\right) I_i = 0$$

$$\text{Pour : } a = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Alors :

$$\left(-0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}\right) I_d + \left(-0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}\right) I_i = 0 \Rightarrow$$

$$\left(-j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_d + \left(j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_i = 0 \Rightarrow$$

$$\left(j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_i = \left(j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_d$$

Alors :

$$I_i = I_d$$

D'où :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_d}{2} + \frac{I_i}{2} \\ I_i = I_d \end{cases}$$

$$\text{On trouve :} \quad I_i = I_d = I_0 \quad (V - 19)$$

- Valeurs des composantes symétriques des courants et des tensions :

$$E + 0 + 0 = V_d + Z_d \times I_d + V_i + Z_i \times I_i + V_o + Z_o \times I_o \quad (V - 20)$$

$$E = (V_d + V_i + V_o) + Z_d \times I_d + Z_i \times I_i + Z_o \times I_o$$

$$E = V_1 + Z_d \times I_d + Z_i \times I_i + Z_o \times I_o$$

$$E = (Z \times I_1) + Z_d \times I_d + Z_i \times I_i + Z_o \times I_o$$

$$E = 3Z \times I_0 + Z_d \times I_d + Z_i \times I_i + Z_o \times I_o$$

$$E = (3Z + Z_d + Z_i + Z_o)I_o$$

$$I_0 = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (V - 21)$$

Soit :

$$I_d = I_i = I_0 = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_d = E - Z_d \times I_d = E - Z_d \times \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (V - 22)$$

$$V_d = E \times \frac{(Z_i + Z_o + 3Z)}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (V - 23)$$

$$V_i = -Z_i \times I_i \quad \Rightarrow \quad (V - 24)$$

$$V_i = -E \times \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (V - 25)$$

$$V_o = -Z_o \times I_o \quad \Rightarrow \quad (V - 26)$$

$$V_o = -E \times \frac{Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \quad (V - 27)$$

▪ Valeurs des tensions et des courants réels :

$$I_1 = I_d + I_i + I_o \quad \Rightarrow \quad (V - 28)$$

$$I_1 = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \quad (V - 29)$$

$$I_2 = I_3 = 0 \quad (V - 30)$$

$$V_1 = Z \times I_1 \quad \Rightarrow \quad (V - 31)$$

$$V_1 = E \times \frac{3Z}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \quad (V - 32)$$

$$V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \quad \Rightarrow$$

$$V_2 = E \times \frac{Z_i(a^2 - a) + Z_0(a^2 - 1) + 3Za^2}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \quad \Rightarrow$$

$$V_2 = a^2 E \times \left(1 - \frac{Z_d + a^2 Z_i + a Z_o}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \right) = a^2 E K_1 \quad (V - 33)$$

Avec :

$$K_1 = \left(1 - \frac{Z_d + a^2 Z_i + a Z_o}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \right) \quad (V - 34)$$

$$V_3 = a^2 V_d + a V_i + V_o \quad \Rightarrow$$

$$V_3 = E \times \frac{Z_i(a - a^2) + Z_0(a - 1) + 3Za}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \quad \Rightarrow$$

$$V_3 = a E \times \left(1 - \frac{Z_d + a Z_i + a^2 Z_o}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \right) = a^2 E K_2 \quad (V - 35)$$

Avec :

$$K_2 = \left(1 - \frac{Z_d + a Z_i + a^2 Z_o}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \right) \quad (V - 36)$$

▪ Cas particuliers :

- Défaut franc :

Soit $Z = 0$, le courant de défaut phase-terre prend la valeur :

$$I_1 = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z} \quad (V - 37)$$

- Défaut de terre impudent :

Soit $Z \gg Z_d + Z_i + Z_0$, le courant de défaut phase-terre est défini par l'impédance de défaut :

$$I_1 = \frac{E}{Z} \quad (V - 38)$$

▪ Remarque:

Les termes k_1 et k_2 sont appelés facteurs de défaut à la terre, leurs valeurs varient entre 1 et 1,8.

Le facteur de défaut à la terre à un endroit donné est le rapport de la tension efficace la plus élevée entre une phase saine et la terre pendant que le réseau est affecté par un défaut, rapporté à la tension efficace entre phase et terre en l'absence du défaut.

V-3-2-2- Défaut biphasé terre :

▪ Ecriture des équations :

- Dans la zone (D) :

Ces équations décrivent le cas examiné de la figure (V-3).

$$I_1 = 0 \quad (V - 39)$$

$$V_2 = V_3 = Z(I_2 + I_3) \quad (V - 40)$$

- Dans la zone (S) :

$$V_1 = V_d + V_i + V_o \quad (V - 41)$$

$$V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \quad (V - 42)$$

$$V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_o \quad (V - 43)$$

$$I_1 = I_d + I_i + I_o \quad (V - 44)$$

$$I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \quad (V - 45)$$

$$I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o \quad (V - 46)$$

- Continuité à la frontière (D) - (S) :

$$I_d + I_i + I_o = 0 \quad (V - 47)$$

$$V_d = V_i(V - 1)$$

$$V_o = V_d + 3Z \times I_o \quad (V - 48)$$

Fonctionnement de (S) :

$$E = V_d + Z_d \times I_d \quad (V - 49)$$

$$0 = V_i + Z_i \times I_i \quad (V - 50)$$

$$0 = V_o + Z_o \times I_o \quad (V - 51)$$

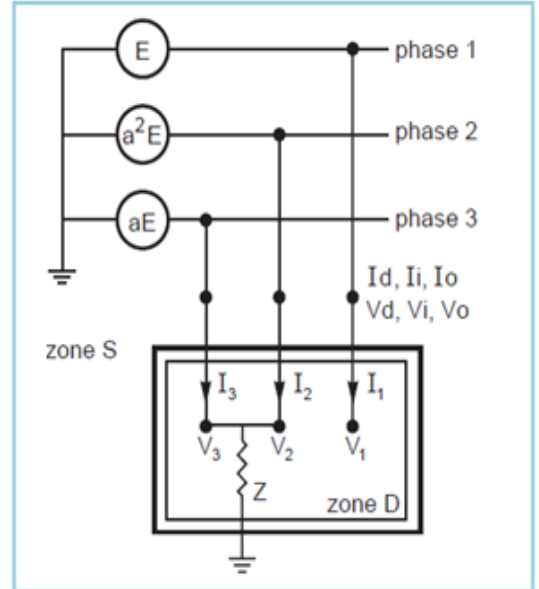


Fig. (V-3): Réseau avec défaut biphasé terre

▪ **Résolution des équations :**

$$I_d = E \times \frac{(Z_i + Z_0 + 3Z)}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 52)$$

$$I_i = -E \times \frac{(Z_0 + 3Z)}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 53)$$

$$I_i = -E \times \frac{Z_i}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 54)$$

$$V_d = V_i = E \times \frac{Z_i \times Z_0}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 55)$$

$$V_o = E \times \frac{Z_i \times Z_0}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 56)$$

▪ **Valeurs des tensions et des courants réels :**

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = -j\sqrt{3}E \times \frac{(Z_o - aZ_i + 3Z)}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 57)$$

$$I_3 = j\sqrt{3}E \times \frac{(Z_o - a^2Z_i + 3Z)}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 58)$$

Alors :

$$I_2 + I_3 = -3E \times \frac{Z_i}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 59)$$

$$V_1 = E \times \frac{3Z_i \times (Z_0 + 2Z)}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 60)$$

$$V_2 = V_3 = -E \times \frac{3Z \times Z_i}{(Z_d \times Z_i) + (Z_0 + 3Z)(Z_d + Z_i)} \quad (V - 61)$$

▪ **Cas particuliers :**

- Défaut franc :

Soit $Z = 0$, le courant de défaut phase-terre prend la valeur

$$I_2 + I_3 = 3E \times \frac{Z_i}{(Z_d \times Z_i) + (Z_i + Z_o) + (Z_o + Z_d)} \quad (V - 62)$$

- Défaut biphasé

Soit $Z = \infty$, le courant de défaut phase vaut alors :

$$I_2 = -I_3 = E \times \frac{(a^2 - a)}{(Z_d + Z_i)} = -jE \times \frac{\sqrt{3}}{(Z_d + Z_i)} \quad (V - 63)$$

V-3-2-3- Défaut triphasé terre :

▪ **Ecriture des équations :**

- Dans la zone (D) :

Ces équations décrivent le cas examiné de la figure (V-4).

$$V_1 = V_2 = V_3 = Z(I_1 + I_2 + I_3) \quad (V - 64)$$

- Dans la zone (S) :

$$V_1 = V_d + V_i + V_o \quad (V - 65)$$

$$V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \quad (V - 66)$$

$$V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_o \quad (V - 67)$$

$$I_1 = I_d + I_i + I_o \quad (V - 68)$$

$$I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \quad (V - 69)$$

$$I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o \quad (V - 70)$$

- Continuité à la frontière (D) - (S) :

$$I_d + I_i + I_o = 3I_o = \frac{V_o}{Z} \quad (V - 71)$$

$$V_d = V_i = 0 \quad (V - 72)$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_o \quad (V - 73)$$

Fonctionnement de (S) :

$$E = V_d + Z_d \times I_d \quad (V - 74)$$

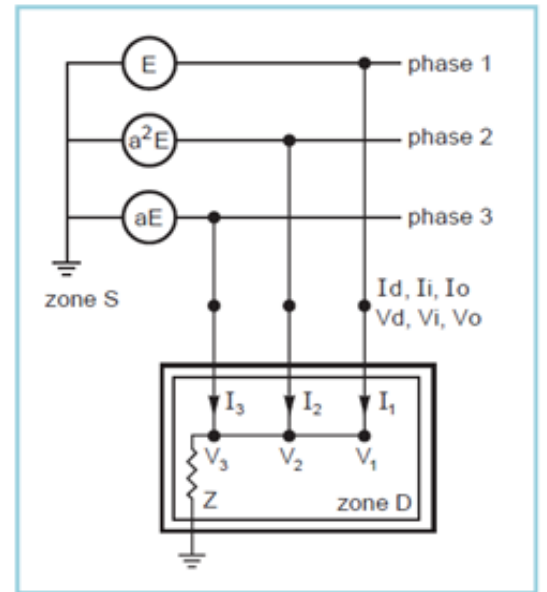


Fig. (V-4): Réseau avec défaut triphasé terre

$$0 = V_i + Z_i \times I_i \quad (V - 75)$$

$$0 = V_o + Z_o \times I_o \quad (V - 76)$$

Les résultats sont indépendants des valeurs Z , Z_i et Z_o .

V-4- Les paramètres associés aux composantes symétriques :

V-4-1- Les lignes aériennes :

Considérons des lignes transposées :

- L'impédance et la capacité directes ou inverses dépendent de la géométrie de la ligne.
- L'impédance homopolaire vaut environ trois fois l'impédance directe. La capacité homopolaire vaut environ 0,6 fois la capacité directe.

V-4-2- Les Câbles :

- La réactance et la capacité directes et inverses sont fonction de la géométrie des câbles.
- Les caractéristiques homopolaires d'un câble ne se déduisent pas facilement de celles directe et inverse.
- Elles sont en général négligeables devant celles des transformateurs qu'ils alimentent.

Ligne	HTB	Câble	HTB
$R_d = R_i \ \Omega/Km$	0,02 à 0,12	$R_d = R_i \ \Omega/Km$	0,02 à 0,05
$X_d = X_i \ \Omega/Km$	0,2 à 0,4	$X_d = X_i \ \Omega/Km$	0,1 à 0,2
$C_d = C_i \ nF/Km$	9 à 13	$C_d = C_i \ \mu F/Km$	0,2
$R_o = \ \Omega/Km$	0,25	$R_o = \ \Omega/Km$	
$X_o = \ \Omega/Km$	0,75 à 1,5	$X_o = \ \Omega/Km$	
$C_o = \ nF/Km$	4,5 à 9	$C_o = \ \mu F/Km$	0,1 à 0,6

Tab. (V-1) : Paramètres associés aux composantes symétriques (câble-ligne).

V-5- Simulation d'un défaut électrique par logiciel (Matlab-Simulink) :

La simulation du réseau est réalisée par le logiciel « Matlab-Simulink » avec Sim power système, pour régénérer les signaux des tensions et des courants au niveau des jeux de barres, et au point de court-circuit.

Le schéma bloc de simulation est montré sur la figure (V-5).

Les fonctions exécutées sur MATLAB sont :

- Simulation d'une ligne avant et après un défaut avec réglage des paramètres du réseau (les paramètres de la ligne, la fréquence, la résistance du défaut et la tension des sources).
- Interprétation des signaux de tension et de courant au niveau de jeu de barre

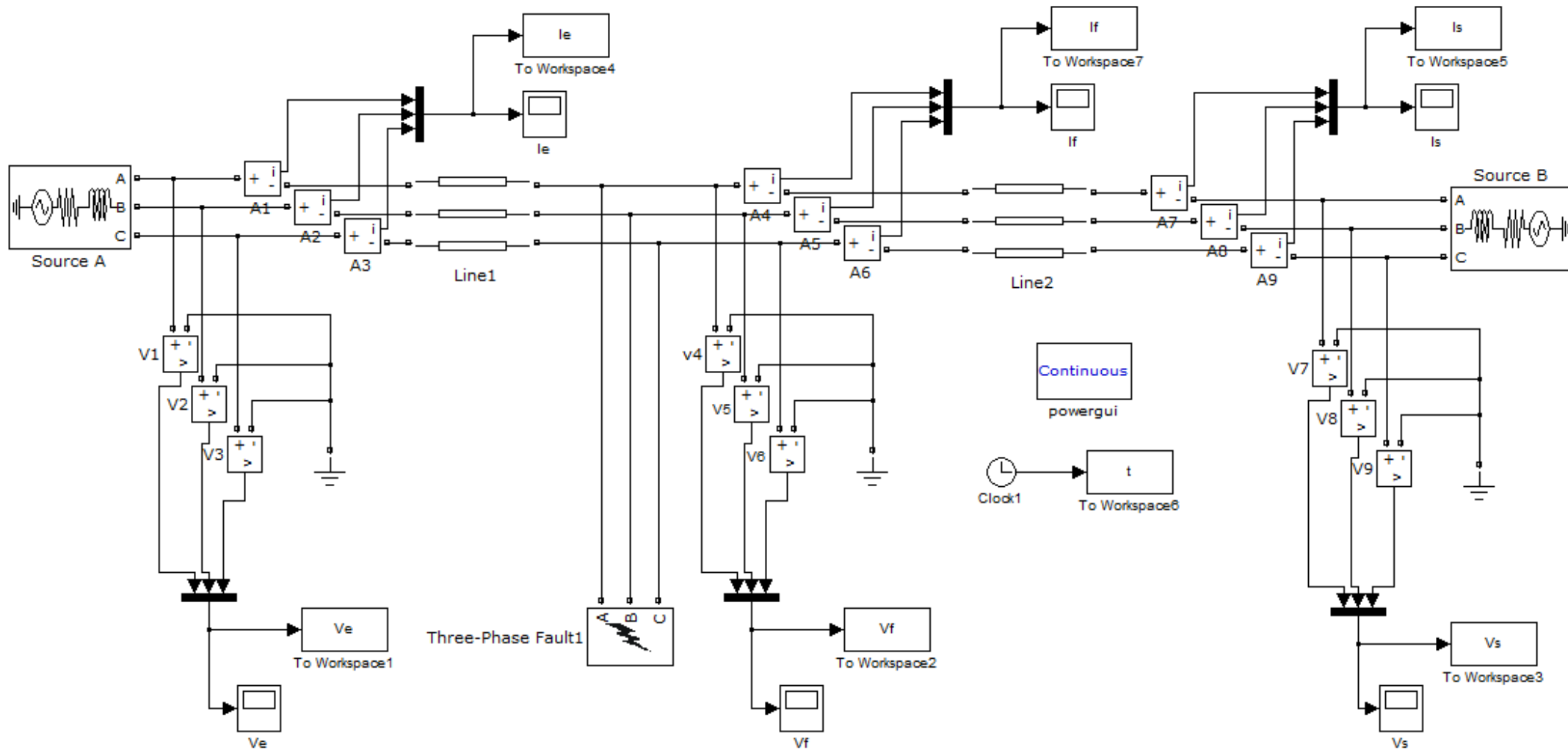


Fig. (V-5) : Schéma bloc de simulation

V-5-1- Résultats de simulation :

V-5-1- 1- Les signaux des tensions et des courants obtenus au niveau de J1:

Les signaux de tension et de courant avant le défaut (V_e et I_e) sont montrés sur les figures (V-6) et (V-7) respectivement :

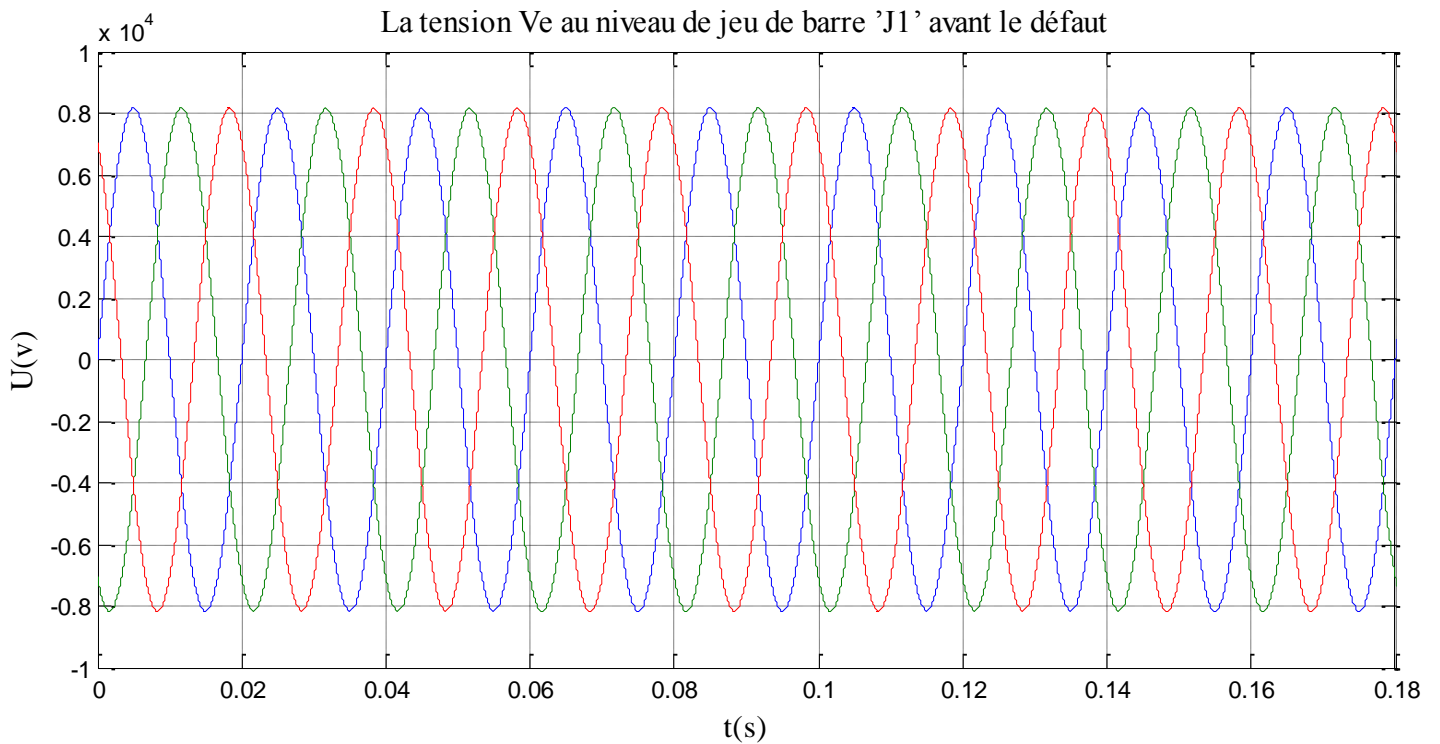


Fig.(V-6) : la tension V_e au niveau de jeu de barre 'J1' avant le défaut.

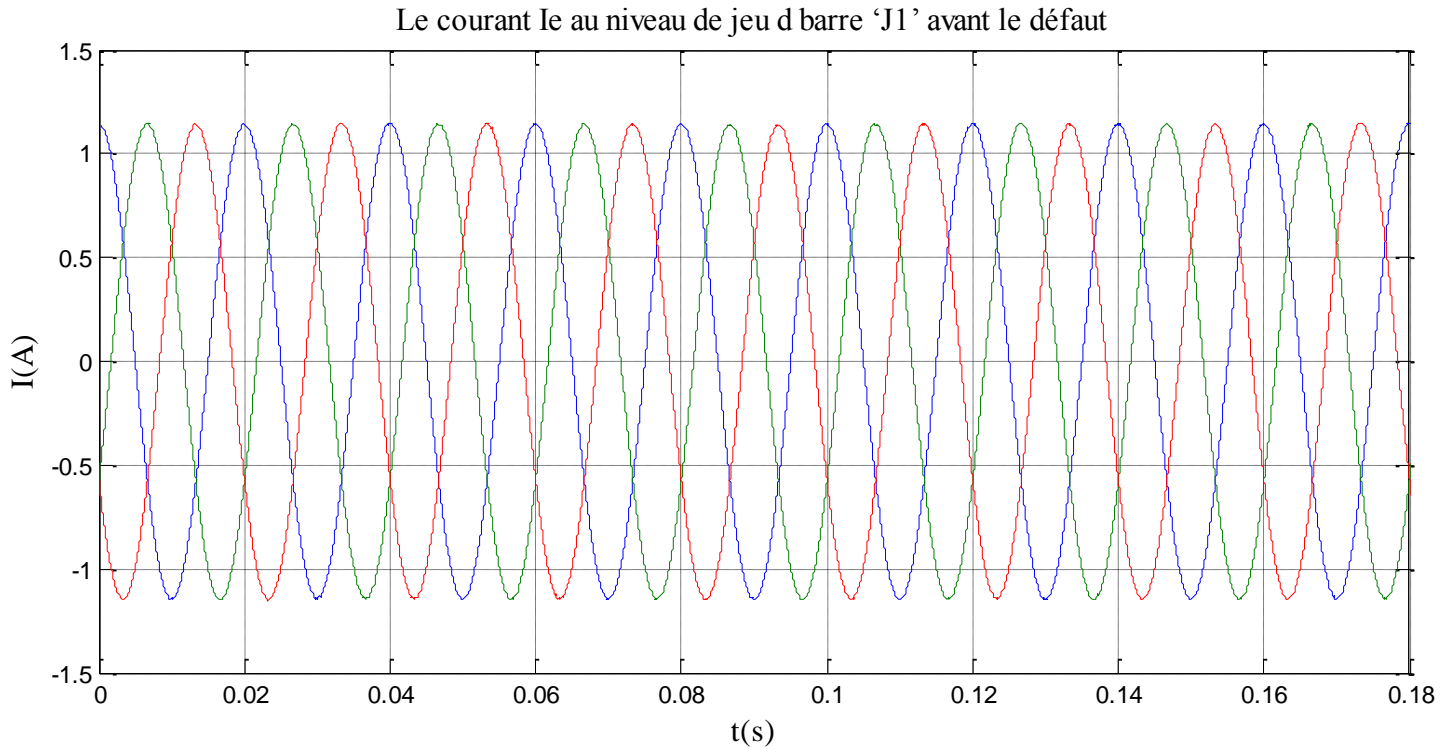


Fig.(V-7) : le courant I_e au niveau de jeu de barre 'J1' avant le défaut.

Pour une distance $L= 70km$ à partir du jeu de barres 'J1', on prend les visualisations des signaux des courants et des tensions pour les différents types de défaut.

1. Défaut monophasé à la terre :

Les signaux des tensions et des courants pour un défaut monophasé (phase A1 - terre) sont montrés sur les figures (V-8) et (V-9) respectivement.

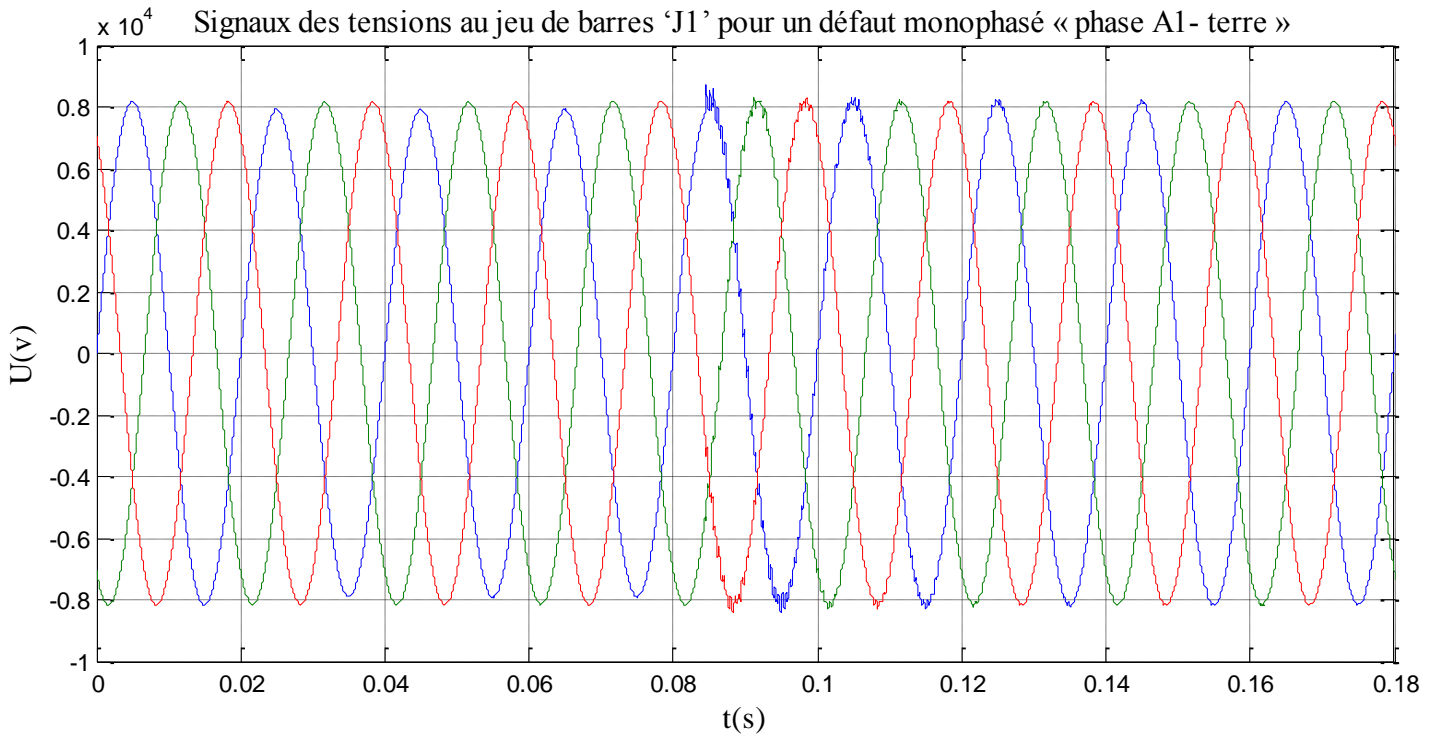


Fig.(V-8): Signaux des tensions au jeu de barres 'J1' pour un défaut monophasé «phase A1- terre»

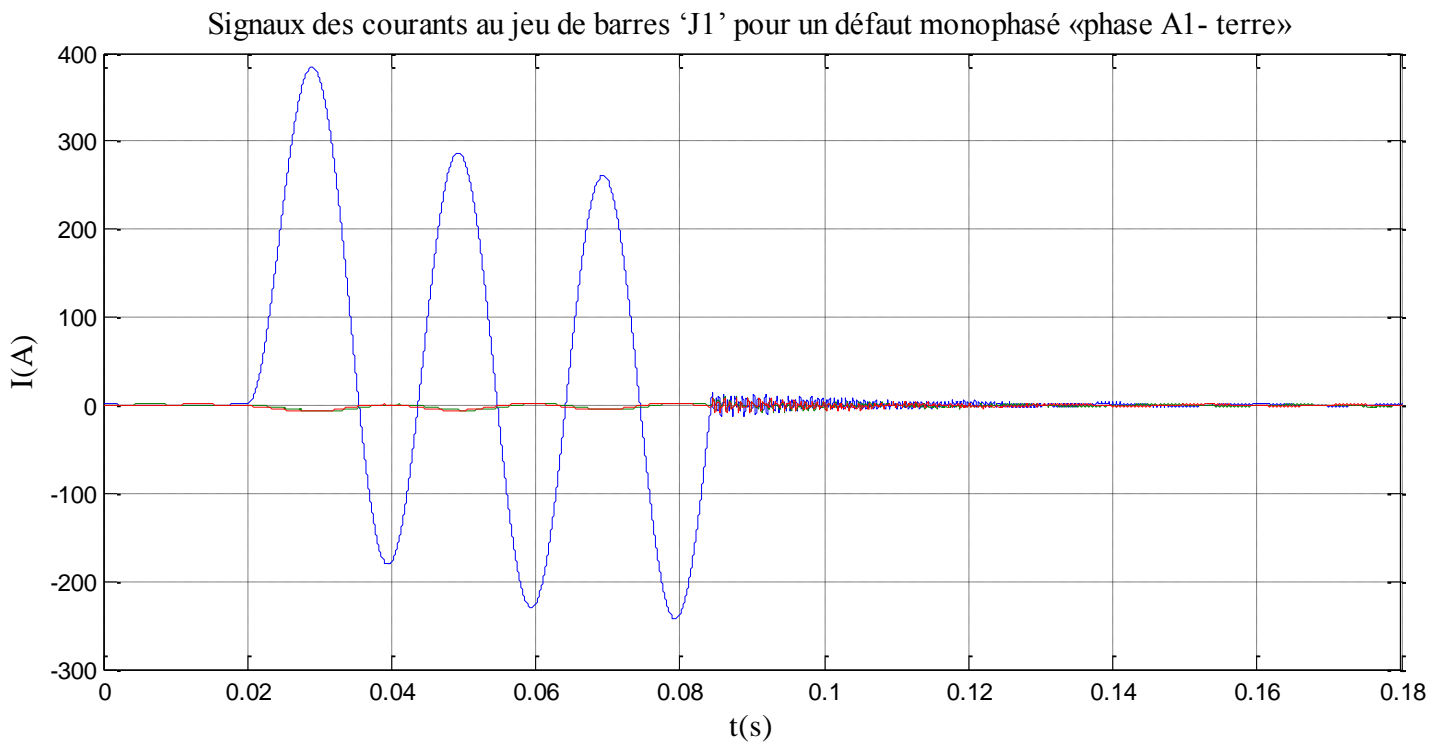


Fig.(V-9) : Signaux des courants au jeu de barres 'J1' pour un défaut monophasé «phase A1- terre».

2. Défaut biphasé à la terre :

Les signaux des tensions et des courants pour un défaut biphasé (phases A1, B1- terre) à la terre sont montrés sur les figures (V-10) et (V-11) respectivement.

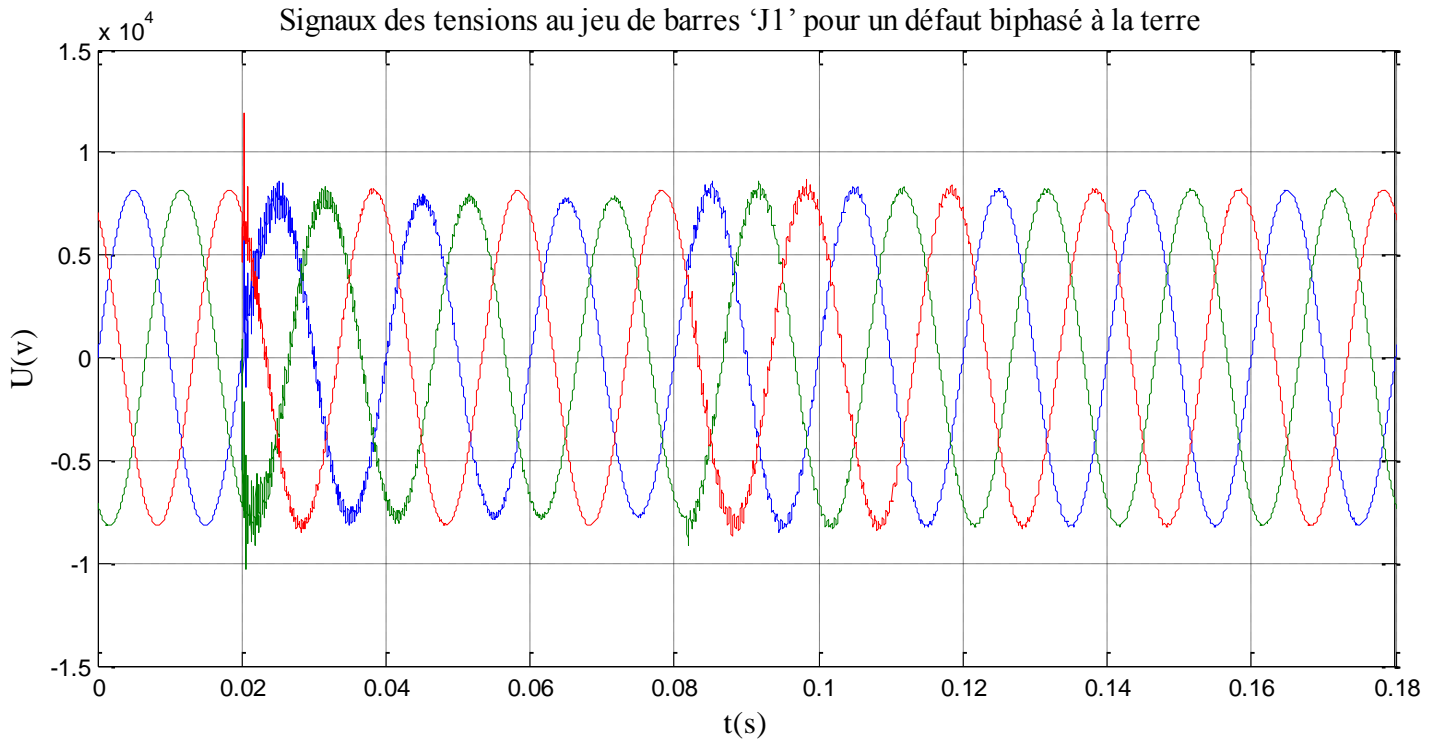


Fig. (V-10): Signaux des tensions au jeu de barres 'J1' pour un défaut biphasé à la terre

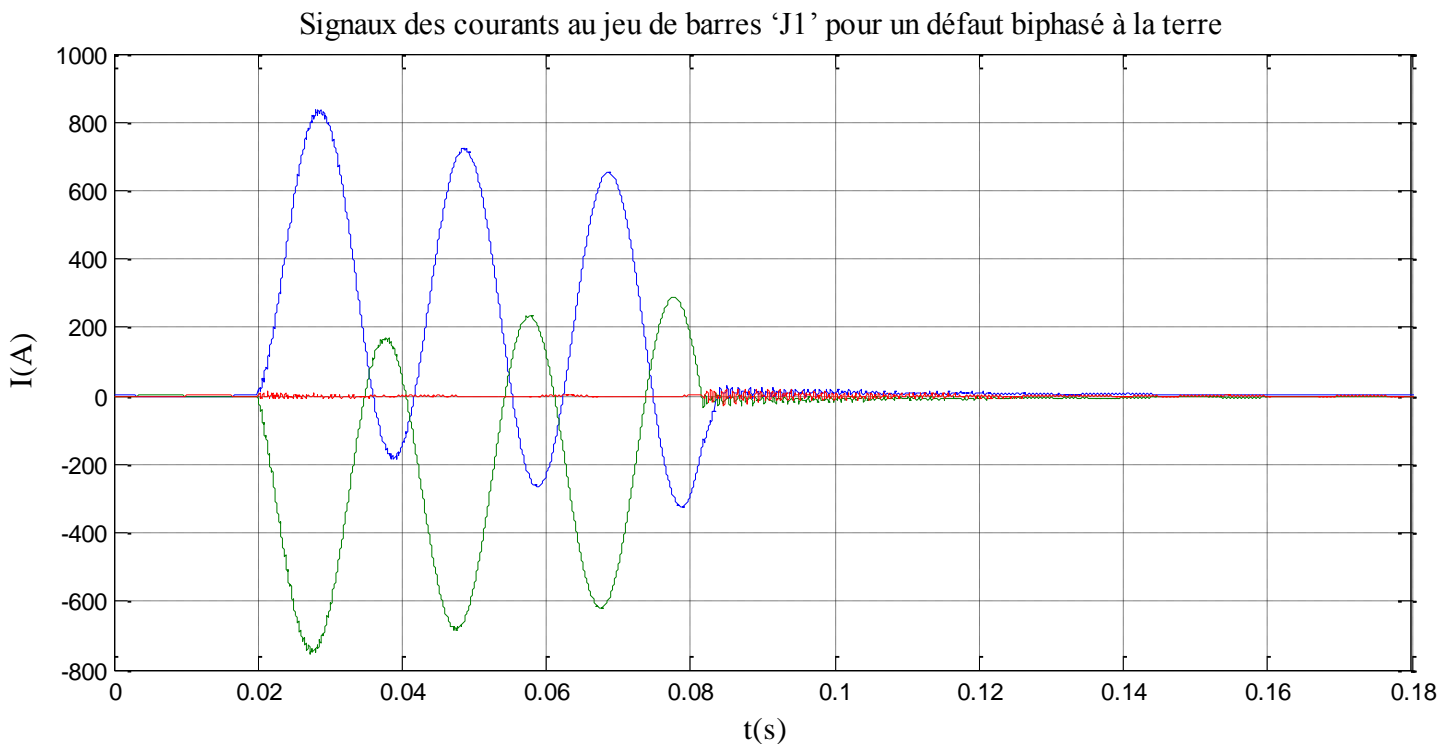


Fig. (V-11) : Signaux des courants au jeu de barres 'J1' pour un défaut biphasé à la terre.

3. Défaut triphasé :

Les signaux des tensions et des courants pour un défaut triphasé à la terre sont montrés sur les figures (V-12) et (V-13) respectivement :

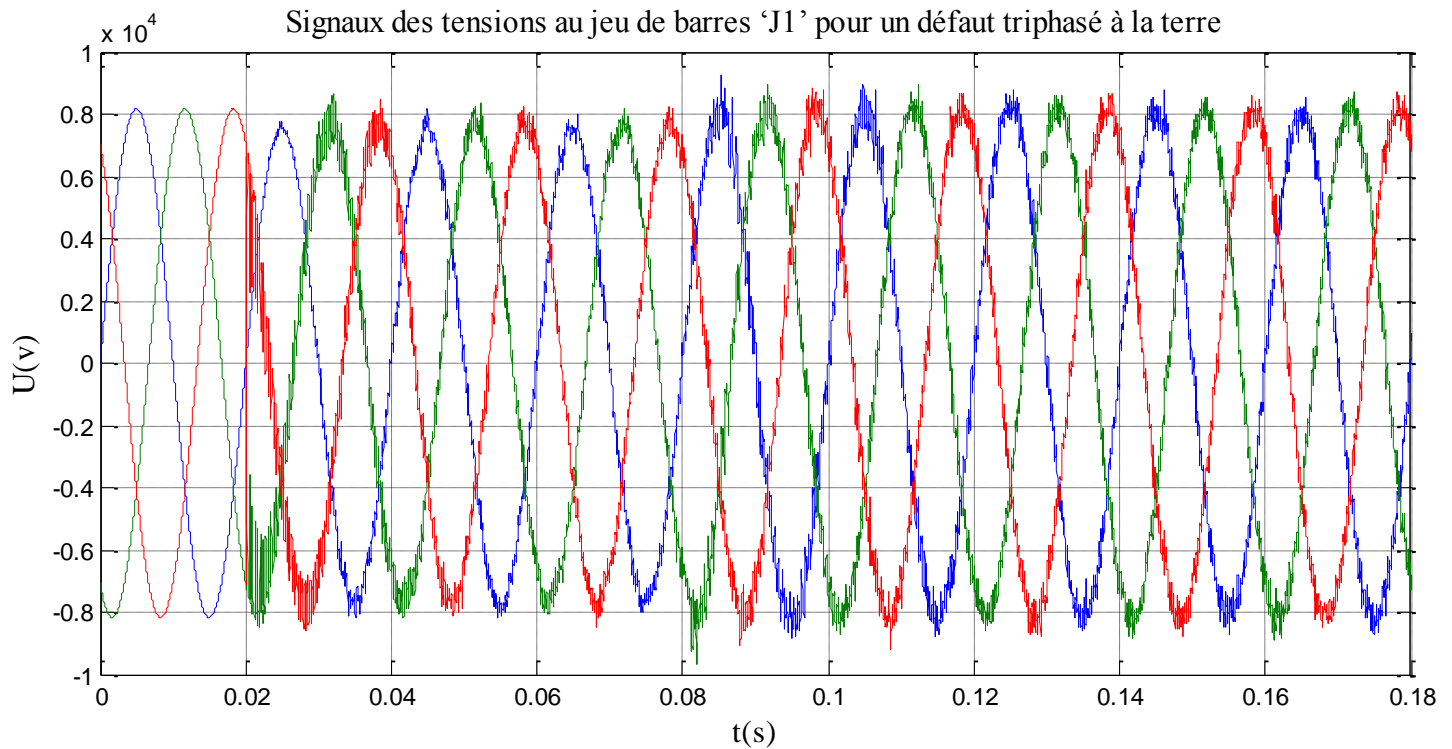


Fig. (V-12) : Signaux des tensions au jeu de barres 'J1' pour un défaut triphasé à la terre.

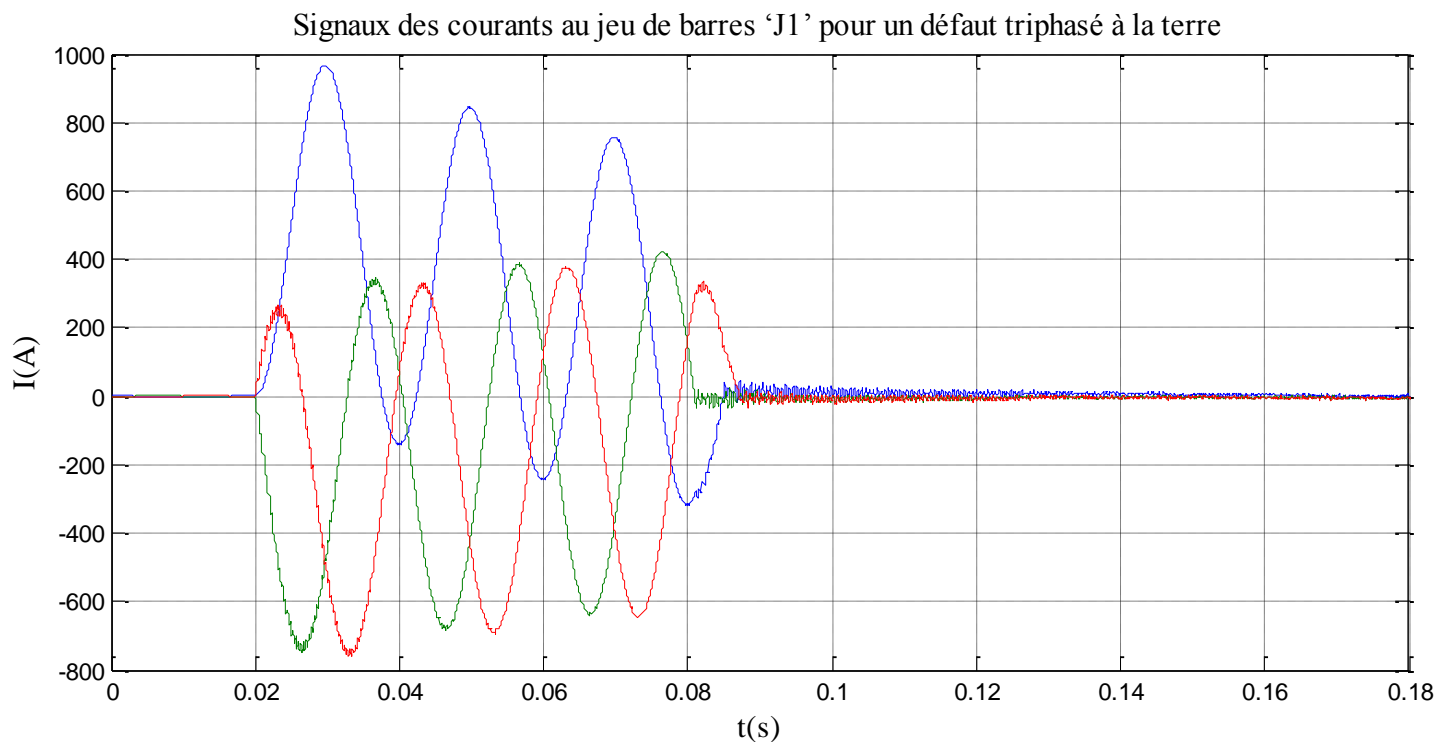


Fig.(V-13) : Signaux des courants au jeu de barres 'J1' pour un défaut triphasé à la terre.

V-5-1- 2- Les signaux des tensions et des courants obtenus au niveau de J2:

Les signaux de tension et de courant avant le défaut (V_f et I_f) sont montrés sur les figures

(V-14) et (V-15) respectivement :

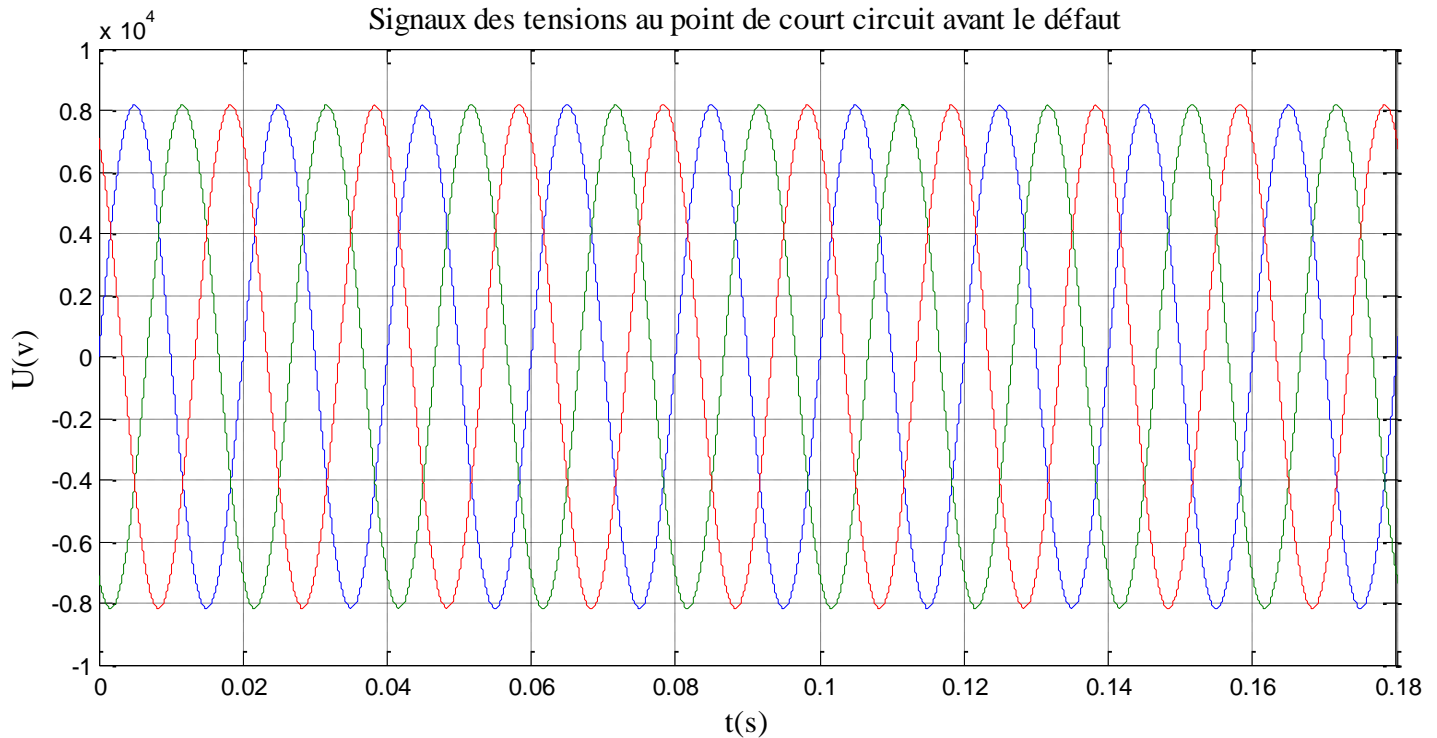


Fig.(V-14) : Signaux des tensions au point de court-circuit avant le défaut.

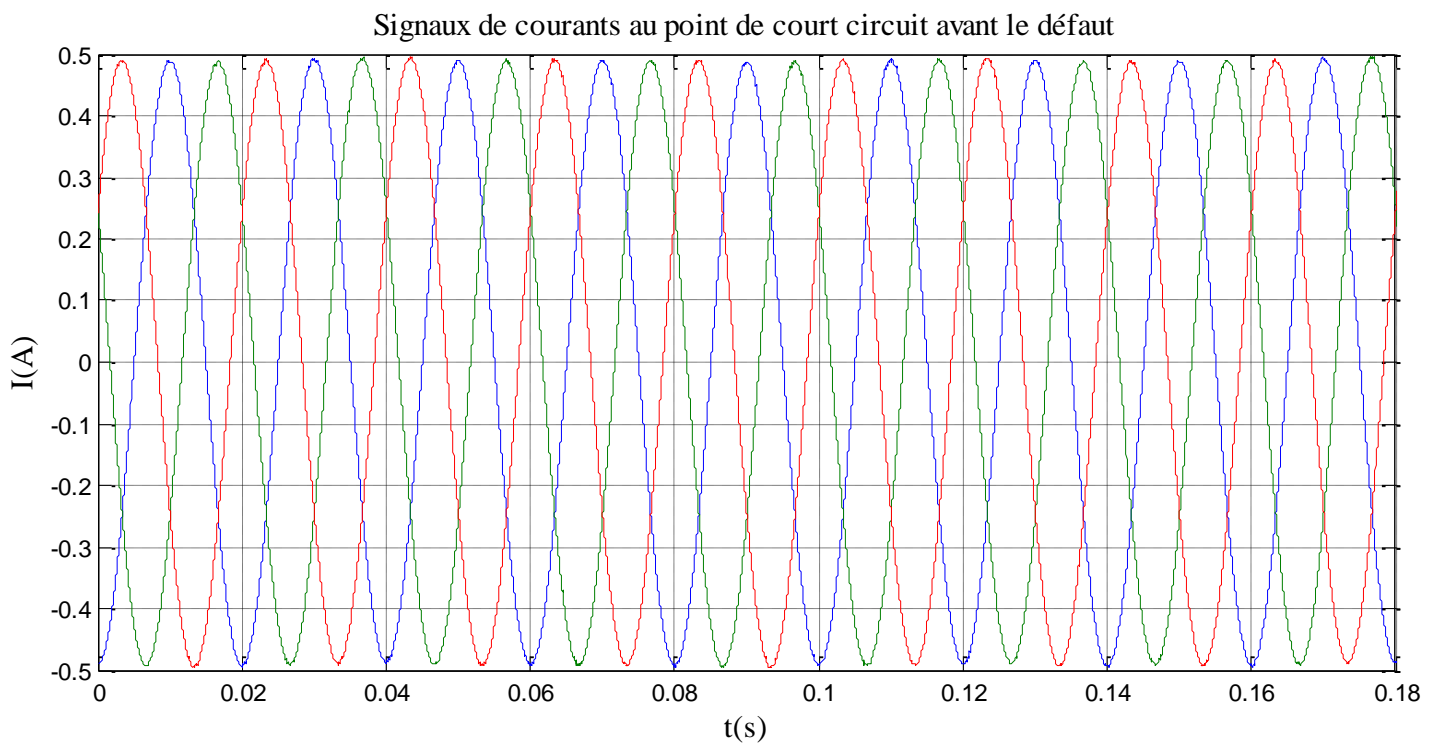


Fig.(V-15): Signaux de courants au point de court-circuit avant le défaut.

1. Défaut monophasé à la terre :

Les signaux des tensions et courants pour un défaut monophasé (phase A1- terre) sont montrés sur les figures (V-16) et (V-17) respectivement :

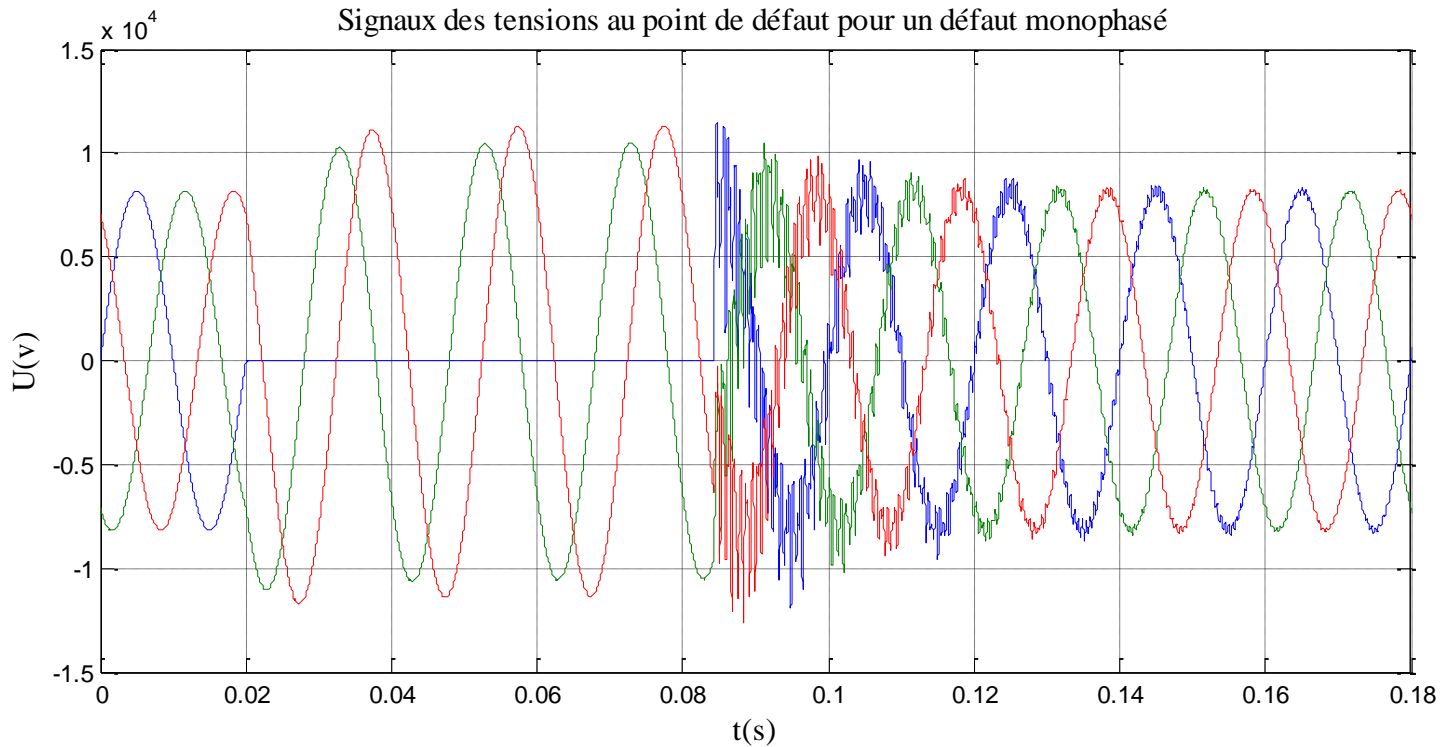


Fig. (V-16) : Signaux des tensions au point de défaut pour un défaut monophasé.

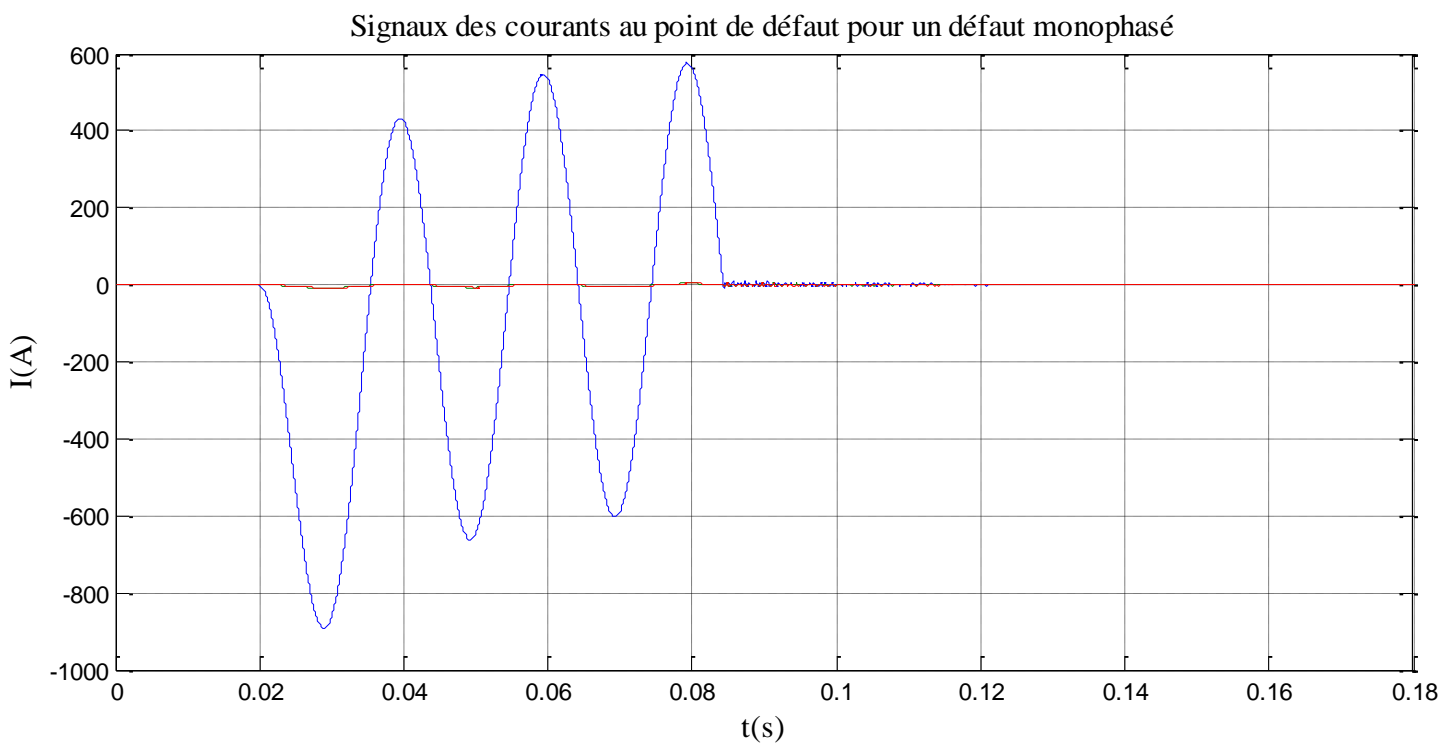


Fig. (V-17) : Signaux des courants au point de défaut pour un défaut monophasé.

2. Défaut biphasé à la terre :

Les signaux des tensions et courant pour un défaut biphasé (phases A, B) à la terre sont montrés sur les figures (V-18) et (V-19) respectivement :

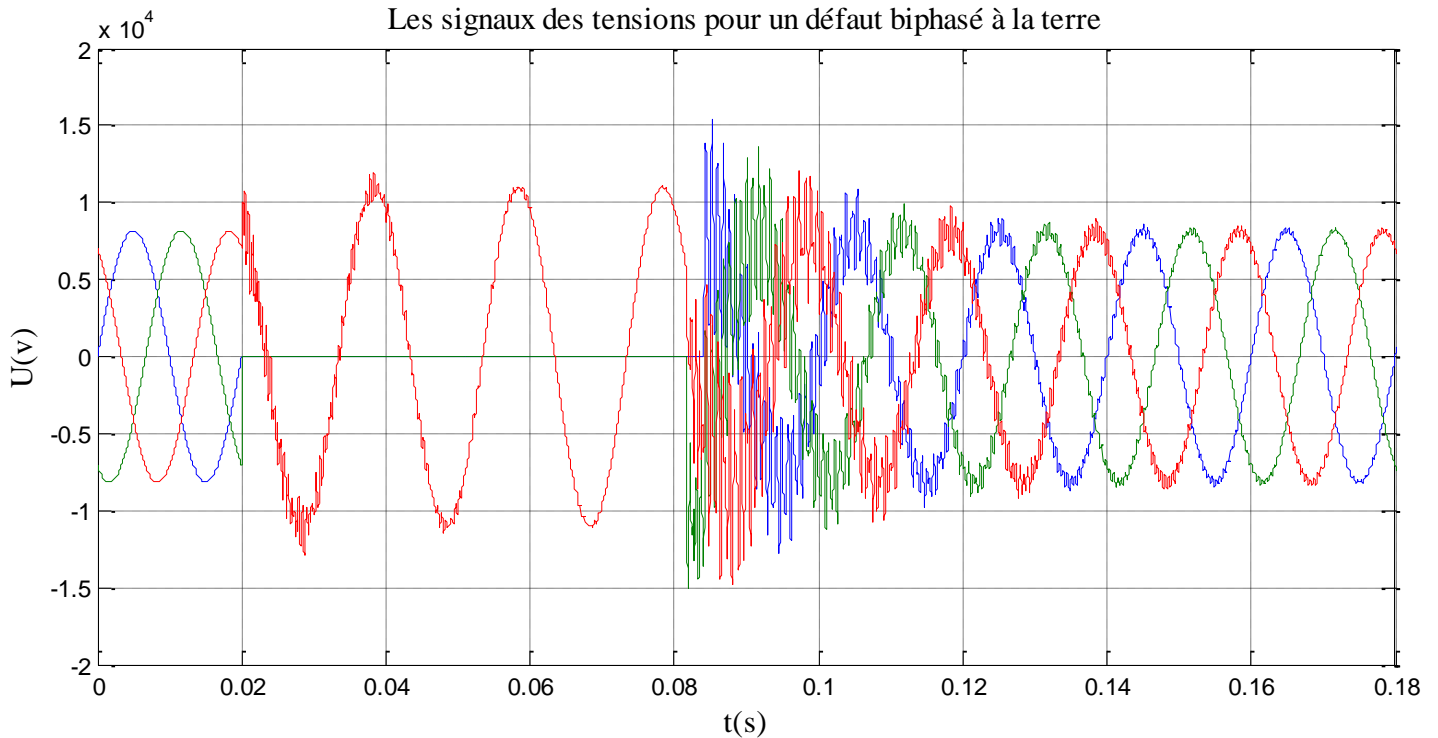


Fig. (V-18) : les signaux des tensions pour un défaut biphasé à la terre.

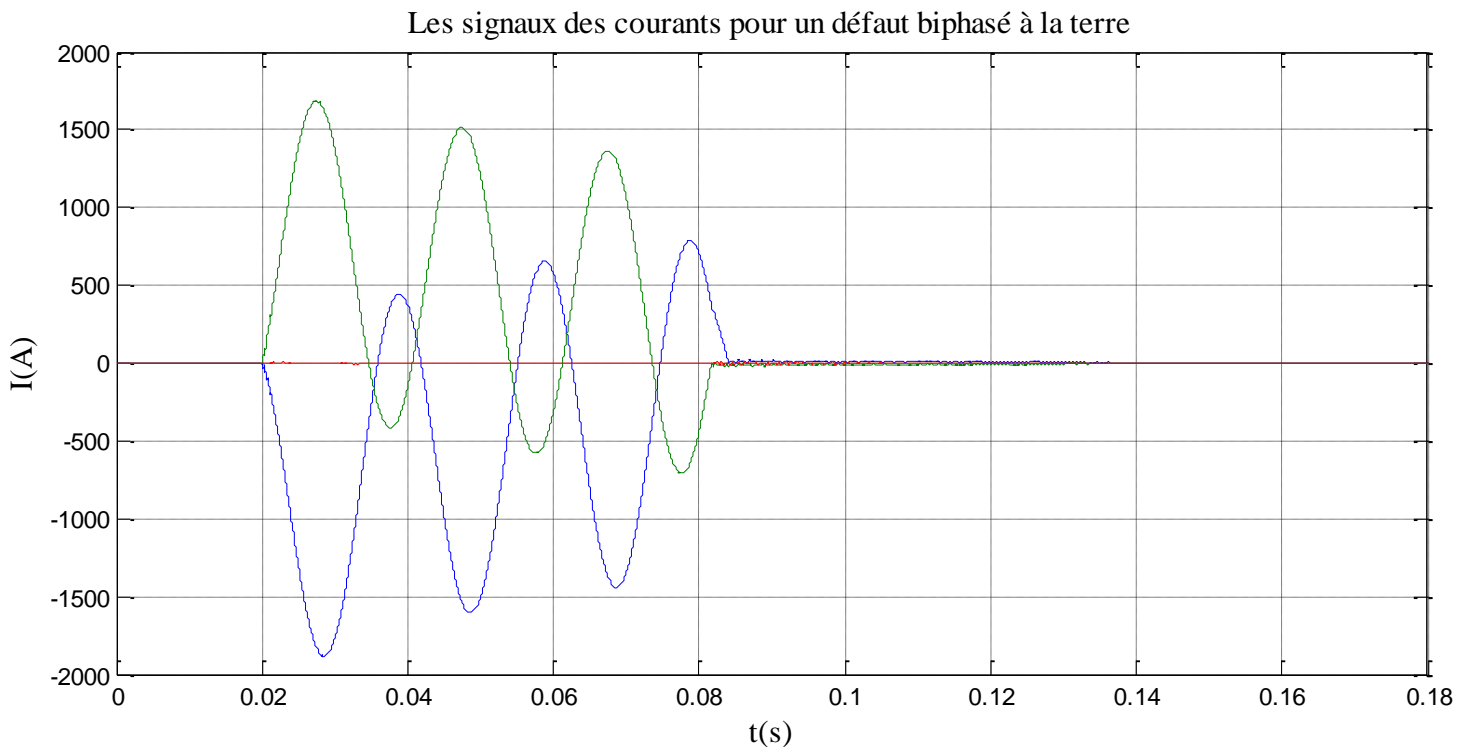


Fig. (V-19) : les signaux des courants pour un défaut biphasé à la terre.

3. Défaut triphasé :

Les signaux des tensions et courant pour un défaut triphasé (phases A, B, C) à la terre sont montrés sur les figures (V-20) et (V-21) respectivement :

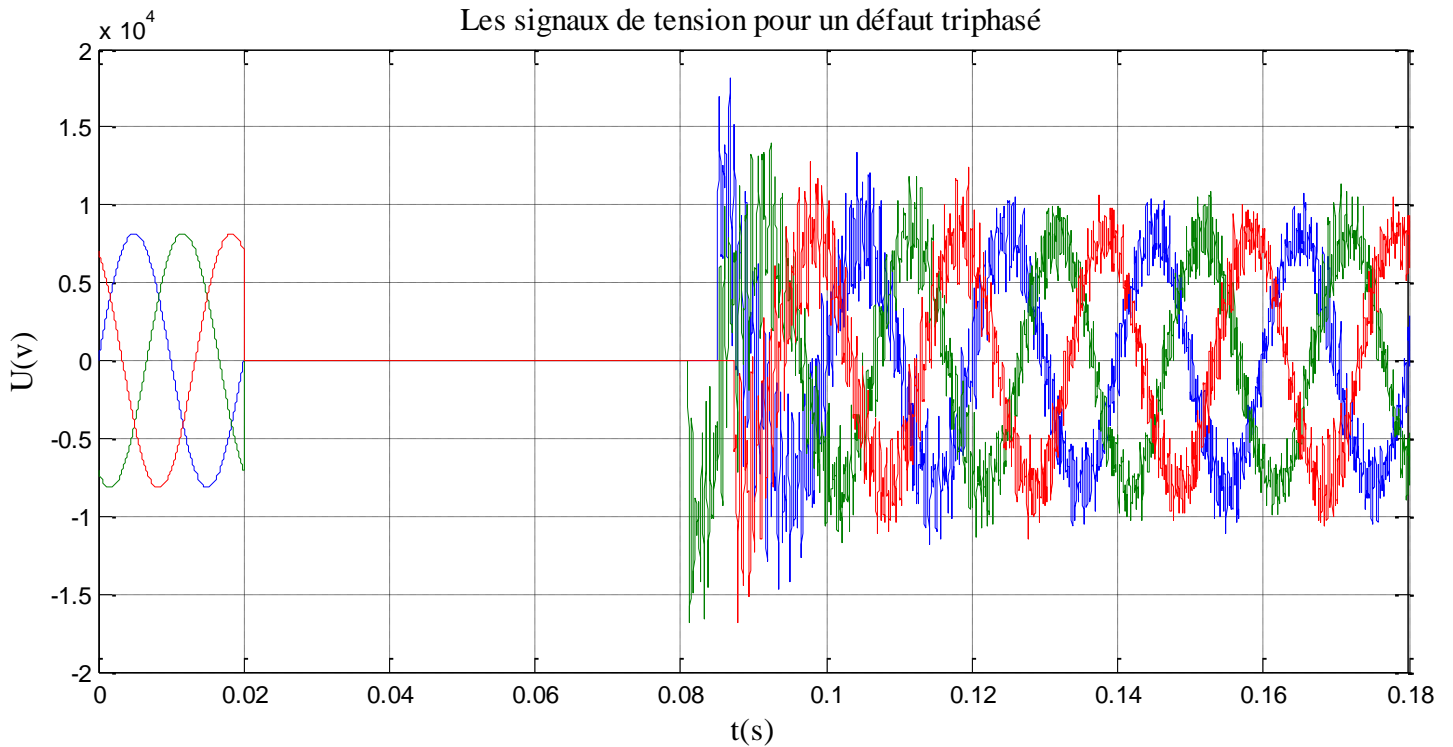


Fig. (V-20) : les signaux de tension pour un défaut triphasé.

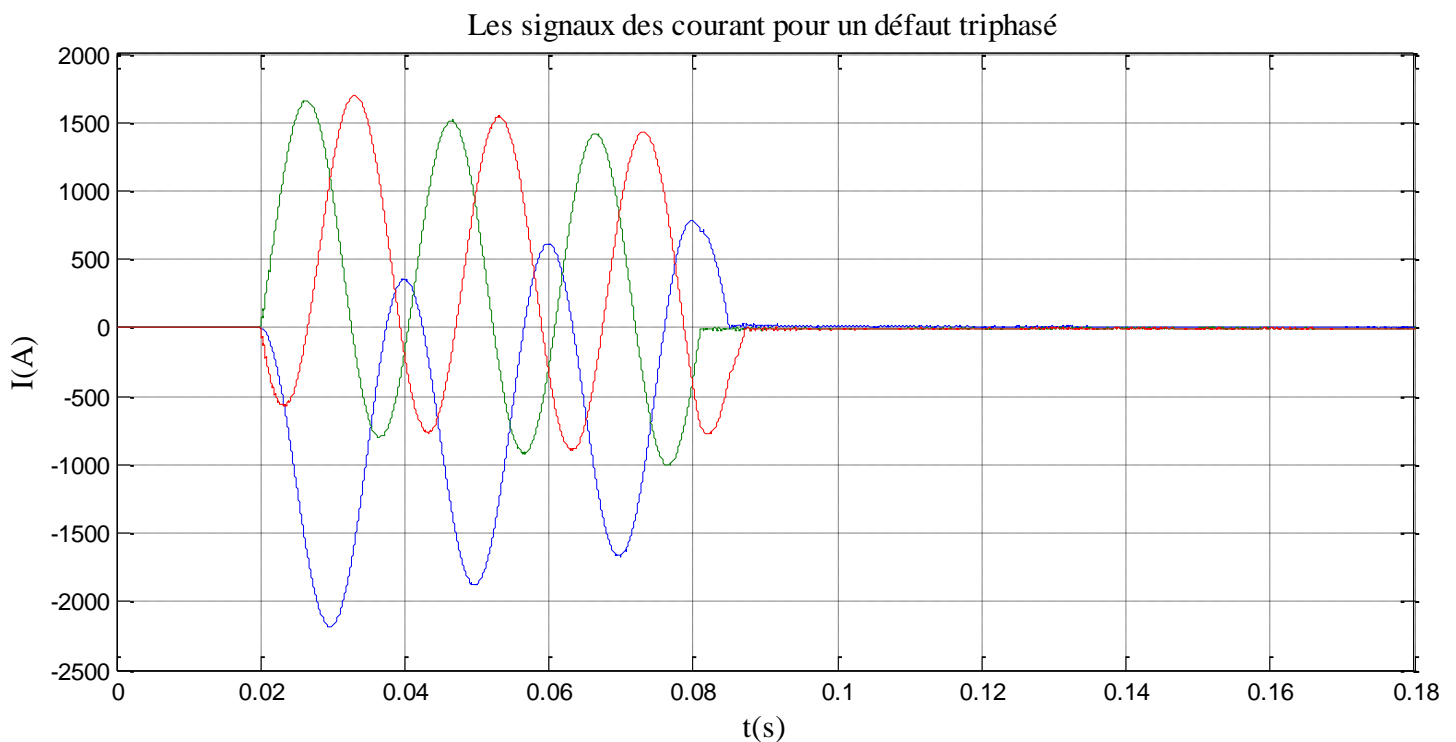


Fig. (V-21) : les signaux de courant pour un défaut triphasé.

V-5-2- Interprétation des résultats :

V-5-2-1- Au niveau de jeu de barre J1 :

1. Défaut monophasé :

- La tension de la phase A1 est chutée par rapport aux phases A2 et A3.
- Le courant de court-circuit provoqué par un défaut monophasé au niveau de jeu de barre 'J1' prend des valeurs très élevées, mais moins petites que celles au point de court-circuit.
- Nous avons vu que THD de la phase A1 est égale à THD de la phase A2 et à la phase A3, et l'amplitude de la phase A1 est très élevé par rapport aux phases A2 et A3.

2. Défaut biphasé à la terre :

- Les tensions de ces deux phases en défaut chutent.
- Le court-circuit biphasé à la terre provoque un très grand courant de court-circuit dans les deux phases, et c'est le même pour les amplitudes des deux phases et est très élevé par rapport à la troisième phase.
- L'amplitude de courant des deux phases en défaut est très élevée par rapport à la troisième phase.
- Le taux de distorsion des phases en défaut (phases A1 et A2) est très élevé par rapport à THD de la troisième phase.

3. Défaut triphasé :

- Les tensions des trois phases chutent, avec des perturbations (harmoniques).
- L'amplitude des trois phases de tension chute beaucoup plus que les autres types de défauts.
- Le courant triphasé provoque un plus grand courant de court-circuit, mais inférieur au courant de court-circuit au point de défaut.
- Les amplitudes de courant des trois phases sont très élevées par rapport aux autres types de défauts.

- On remarque que le taux de distorsion (THD) des trois signaux est élevé.

V-5-2-2- Au niveau de point de défaut J2:

1. Défaut monophasé :

- La tension de la phase en défaut chute au voisinage de Zéro.
- Lorsque l'apparition d'un court-circuit dans la phase 'A1' et dans la terre, la valeur du courant de la phase en court-circuit va augmenter à une valeur très élevée, et les courants des autres phases sont nuls.

2. Défaut biphasé à la terre :

- Le court-circuit biphasé à la terre provoque de très grands courants de court-circuit dans les deux phases en défaut.

3. Défaut triphasé :

- Un court-circuit triphasé provoque de plus grande chute de tension, (les tensions des trois phases sont nulles).
- Un court-circuit triphasé provoque un plus grand courant de court-circuit.

▪ Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé le réseau électrique HTB avec Simulink MATLAB.

D'après les résultats, nous constatons que :

Les résultats de simulation des signaux de tension et de courant au niveau du jeu de barre J1,

Les résultats de simulation des signaux de tension et de courant au point de défaut.

Nous avons vu que les courts circuits provoquent des perturbations importantes telle que la déformation de l'onde.

Alors nous avons proposé à utiliser un filtre pour éliminer les harmoniques ou la partie transitoire pour obtenir une forme d'onde nette.

Conclusions générales

Ce travail nous à permis d'approfondir nos connaissances en électrotechnique et plus particulièrement dans le domaine du transport de l'énergie électrique.

D'autre part notre travail nous à permis de connaître les différentes étapes à suivre, pour l'étude d'une ligne HTB.

Dans la partie mécanique, l'étude est basé sur l'équation de changement d'état, Cette équation qu'on peut calculer plusieurs paramètres de la ligne (tensions, flèche....etc.), Pour ces calculs, il faut prendre en considération les hypothèses climatiques.

Dans la partie électrique, notre étude consiste à déterminer la chute de tension, les pertes joules et aussi l'isolation de la ligne.

Dans le dernier chapitre nous avons simulé le réseau électrique HTB avec Simulink MATLB.

Est en obtention les résultats de simulation des signaux de tension et de courant au niveau de jeu de barre J1 et au niveau au point de défaut (le jeu de barre J2).

Nous tenons enfin, à signaler que le stage effectué au sein de la société SONALGAZ, nous a été bénéfique à plus d'un titre, et nous a été un complément appréciable, à notre formation et un enrichissement à nos connaissances théoriques que nous avons reçus au cours de notre formation à l'université.

Chapitre I : Généralité sur les Réseaux Électriques

Introduction.....	2
I-1- Les Centrales Thermiques.....	2
I-1-1- Centrales à Combustion Fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).....	2
I-1-2- Centrales nucléaires	3
I-2- Les centrales hydrauliques.....	4
I-3- Les centrales solaires.....	5
I-3-1- Les centraux fonctionnements par des panneaux photovoltaïques	5
I-3-2- Les centrales fonctionnent d'un tour solaire.....	6
I-4- Les centrales éoliennes.....	7
I-5- Réseaux électriques.....	8
I-5-1- Différents types de réseaux électriques.....	8
I-5-1-1- Les réseaux de transport et d'interconnexion	8
I-5-1-2- Les réseaux de répartition.....	8
I-5-1-3- Les réseaux de distribution	9
Réseaux de distribution à moyenne tension HTA.....	9
Réseaux de distribution à basse tension BTA.....	9
I-5-2- Les déférents types des gammes de tension	10
Le type BTA	10
Le type BTB	10
Le type HTA	10
Le type HTB	10
I-5-3- Structure des réseaux HTA	11
I-5-3- 1- Structure radial en simple antenne.....	11
I-5-3- 2- Structure radial en double antenne sans couplage	12

I-5-3- 3- Structure radial en double antenne avec couplage	13
I-6- Les postes de transformation.....	14
I-6-1- Poste HTB/HTA	14
I-6-1-2- Poste de répartition HTA/HTA.....	14
I-6-2- Les postes d'alimentation HTA/BTA	15
I-6-2- 1- Les postes de distribution publique (DP)	15
I-6-2- 2- Les postes d'usagers HTA (livraison)	16
Conclusion	16
 Chapitre II : Composants d'une Ligne Aérienne Haute Tension Catégorie B	
Introduction.....	17
II-1- Etude des fondations	17
II-1-1- Les efforts sur les massifs.....	17
Massifs à la traction	17
vers le haut	18
vers le bas	18
Massifs à la compression.....	18
II-1-2-Types des fondations	19
Fondation simple	19
Fondation bipode	20
Fondations tétrapodes (multipode)	20
II-1-3- Mise à la terre des supports	21
II-1-3-1- Rôle	21
II-1-3-2- L'installation de mise à la terre.....	21
II-1-3-3- Principe de mesure d'une terre.....	22
Prise de terre réelle - notion de rayon équivalent.....	22

L'ordre de grandeur pour R_e	23
II-2- Les pylônes	23
II-2-1- Les différentes parties d'un pylône	25
II-3- Les Chaînes d'isolateurs.....	26
II-3-1-L'isolant.....	26
Céramiques.....	26
Verres	26
Matériaux synthétiques	27
II-3-2- Caractéristiques des isolateurs	27
II-3-3- Croquis détaillé de chaîne d'isolateurs simples et doubles.....	28
II-4- Les conducteurs	29
II-4-1- Utilisation des câbles.....	30
II-4-2- Matériaux utilisés	31
II-4-1- Le Câble de garde	31
II-4-3- Choix des conducteurs et des câbles de gardes	32
II-4-4- Caractéristiques des câbles	32
Câble conducteur 366 mm ²	32
Câble de garde 132 mm ² (Alcatel)	33
II-5-Accessoires fixés sur les conducteurs.....	34
Amortisseurs stock bridge.....	34
Entretoise.....	35
Balises lumineuses.....	35
Balises diurnes.....	36
Balises avifaunes.....	36
Contrepoids antigiratoires.....	37
Contrepoids de bretelles.....	37

Conclusion.....	37
Chapitre III : Etude Mécanique	
Introduction.....	38
But des calculs.....	38
III-1-Etude mécanique.....	39
III-1-1-Hypothèses Climatiques.....	39
III-1-2-Hypothèse A (d'été)	39
III-1-3-Hypothèse B (d'hiver)	40
III-1-4-Hypothèses complémentaires.....	41
III-1-4-1-Le Vent	41
III-1-4-3-Hypothèse givre.....	42
Surcharge des supports.....	43
Givre léger.....	43
Givre moyen lourd.....	43
Hypothèses E.D.S (EVERY-DAY-STRESS)	43
Calcul du coefficient de surcharge (m)	43
Coefficient de sécurité (k)	46
Conditions normales.....	47
Conditions Exceptionnelles (Rupture et givre)	47
III-2-Influence de la température et du vent sure le câble.....	48
III-2-1-Loi de délitation thermique	49
III-2-2-Coefficient de dilatation thermique	50
III-2-3-Loi de La déformation élastique (loi de HOOKE)	51
III-2-4-Le module de Young	51
III-3-Les contons	53
III-3-1-Les Portées.....	53

III-3-1-1-La portée de niveau (horizontale)	54
III-3-1-2-La portée de dénivelée	54
III-3-1-3-La portée moyenne	55
III-3-1-4-La portée poids	56
III-3-1-5-La portée sèche	56
-3-1-6- Méthode de la portée équivalente	57
III-4-Le paramètre	58
III-4-1-Signification du paramètre	58
III-5- Géométrie d'un élément de câble.....	58
III-5-1-L'équation de la courbe d'équilibre	61
III-5-2-Longueur du câble	63
III-5-2-1-Portée n'est pas dénivelée	63
III-5-2-2-Portée dénivelée	65
III-5-3-Longueur naturelle du câble	66
III-5-4-Méthode de réglage des câbles par la dénivelée	67
III-5-5-Méthode de réglage par un point extérieur	68
III-6-La flèche.....	69
III-6-1-Définition de la flèche	69
III-6-2-L'équation de la flèche f_2	71
III-6-3-Application de l'équation de changement d'état	72
III-6-4-Tensions et flèches de pose	75
III-6-5-Contraintes géométriques imposées par le site.....	77
III-6-6-Les traversées.....	77
III-6-7-Terrain agricole.....	78
III-6-8-Terrain d'évolution ou de passage d'engins.....	78
III-6-9-Distances aux obstacles	78

III-6-10- La garde au sol	79
III-6-11-Distance de croisement minimal (Dm)	79
III-6-11-Ecartement entre phases.....	82
III-6-12-Distance à la masse	83
III-7-Différent type des tasons	84
III-7-1-Tension horizontale	84
III-7-2-Tension dans un câble	85
III-7-3-Tension dans une portée	86
III-7-5-Balancement de la chaîne d'isolateurs	86
III-7-6-Balancement de la chaîne d'isolateurs contre poids	89
III-7-7-Bretelle de jonction	91
III-7-8-Efforts transmis aux pylônes par les conducteurs.....	91
III-7-9-Efforts verticaux, horizontaux et longitudinaux	92
III-7-9-1-Pylône en suspension	92
III-7-9-2-Pylône en angle souple	95
III-7-9-3-Pylône en ancrage	97
Conclusion	99
 Chapitre VI : Etude Electrique	
Introduction	100
IV- 1-Dimensionnement de laSectiondes conducteurs.....	100
IV-2-Les isolateurs.....	101
IV-2-1-Caractéristiques technique d'un isolateur.....	101
IV-2- 2-Pollution des isolateurs	102
IV-2-3- L'augmentation du nombre d'isolateurs dans une chaîne	102
IV-2-4- Isolateurs spéciaux	103
IV-2-5-Isolateurs munis de revêtements	103

IV-3- Chaîne d'isolateur	103
IV-3-1-Les chaînes d'ancrage	103
IV-3-2-Les chaînes de suspension	103
IV-4-Représentation des types des chaînes	104
IV-4-1-Chaîne d'ancrage simple	104
IV-4-2-Chaîne d'ancrage double.....	105
IV-4-3-Chaîne de suspension simple	106
IV-4-4-Chaîne de suspension double.....	107
IV-5-Nombres et dimensionnement	108
IV-5-1-Le nombre d'isolateurs par chaîne	108
IV-5-2-Longueur de la chaîne de suspension simple	108
IV-5-3-Longueur de la chaîne de suspension double.....	108
IV-5-5-Poids de la chaîne de suspension simple	109
IV-5-6-Poids de la chaîne de suspension double	109
IV-6- Les paramètres linéiques de la ligne.....	109
IV-6-1- La résistance	109
IV-6-2-Le Position des conducteurs	110
IV-6-2-1-Casd' une position en triangle polygone.....	110
IV-6-2-2-Cas d'un position horizontale.....	111
IV-6-2-3-Cas d'une position de triangle rectangle	112
IV-6-2-4-L'inductance	113
IV-6-2-5- La capacité.....	113
IV-6-2-6-L'impédance	113
IV-6-2-7-Calcul du courant.....	114
IV-6-2-8-La chute de tension	114
IV-6-2-9-Les pertes joule.....	114
IV-6-2-10-Calcule la puissance de départ.....	115

IV-6-2-11-Le rendement.....	115
IV-7-Exemple de calcule	115
1. La résistance de la ligne	115
2. La capacité.....	117
3. L'impédance	117
4. Calcul du courant.....	118
5. Détermination de la chute de tension.....	118
6. Détermination des pertes joule	119
7. Calcule la puissance de départ	119
8. Calcule du rendement.....	119
 Chapitre V : Simulation et interprétation d'un problème de défaut.	
Introduction	120
V-1- Les anomalies dans un réseau électrique	120
V-1-1-Les courts circuits	120
V-1-2- Les surtensions	120
V-1-3- Les oscillations.....	120
V-1-4- Les déséquilibres	121
V-1-5- Les surcharges	121
V-2- Les origines des défauts dans les lignes de transport	121
V-2-1- Electriques.....	121
V-2-2- Atmosphériques	122
V-2-3- Mécaniques.....	122
V-2-4- Humaines	122
V-2-5- La forme des défauts.....	122
V-3- La modélisation du réseau électrique.....	122
V-3-1- Méthode de calcul des régimes déséquilibrés.....	123

V-3-2- Méthode de résolution pratique	124
V-3-2-1- Défaut phase-terre (dit défaut homopolaire)	125
Ecriture des équations	125
Résolution des équations	127
Valeurs des tensions et des courants réels.....	129
Cas particuliers.....	130
V-3- 2- 2- Défaut biphasé terre.....	131
Ecriture des équations	131
Résolution des équations.....	132
Valeurs des tensions et des courants réels.....	132
Cas particuliers	132
V-3- 2- 3- Défaut triphasé terre.....	133
Ecriture des équations	133
V-4- Les paramètres associés aux composantes symétriques.....	134
V-4-1- Les lignes aériennes.....	134
V-4-2- Les Câbles	134
Simulation d'un défaut électrique par logiciel (Matlab-Simulink).....	135
V-5-1- Résultats de simulation.....	137
V-5-1- 1- Les signaux des tensions et des courants obtenus au niveau de J_1	137
Défaut monophasé à la terre	138
Défaut biphasé à la terre	140
Défaut triphasé	141
V-5-1- 2- Les signaux des tensions et des courants obtenus au niveau de J_2	142
Défaut monophasé à la terre	143
Défaut biphasé à la terre	144
Défaut triphasé	145

V-5-2- Interprétation des résultats	146
V-5-2-1- Au niveau de jeu de barre J_1	146
Défaut monophasé	146
Défaut biphasé à la terre	146
Défaut triphasé	146
V-5-2-2- Au niveau de point de défaut J_2	147
Défaut monophasé	147
Défaut biphasé à la terre	147
Défaut triphasé	147
Conclusion.....	147
Sommaire	249

Liste des figures

Chapitre : I

Figure (I-1) : Schéma d'une installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn.....	2
Figure (I-2) Schéma de principe d'une chaudière à circuit primaire intégré.....	2
Figure (I-3): Centrale de pompage.....	3
Figure (I-4): Groupe Francis vertical.....	4
Figure (I-5): par MPPT à une batterie d'accumulateurs Panneau photovoltaïque constitué de modules Connecté en série et en parallèle avec diodes de Protection by-pass et série.....	5
Figure (I-6): Cellules à jonction PN au silicium cristallin.....	5
Figure (I-7): Centrales solaires thermodynamiques à tour à auges miroirs paraboliques.....	5
Figure (I-8): Centrales solaires thermodynamiques.....	6
Figure (I-9): Synoptique d'une chaîne éolienne connectée au réseau BT.....	6
Figure (I-10): Différents types de réseaux électriques.....	9
Figure (I-11): Réseau HTA radial en simple antenne.....	11
Figure (I-12): Réseau HTA radial en double antenne sans couplage.....	12
Figure (I-13): Réseau HTA radial en double antenne avec couplage.....	14
Figure (I-14) : postes de transformation HTB/HTA.....	14
Figure (I-15) : postes de répartition HTA/HTA.....	15
Figure (I-16) : postes de HTA/BTA.....	16

Chapiter : II

Figure (II-1): Schéma de la Représentation d'une fondation.....	18
Figure: (II-2): Schéma de la fondation monopode.....	19
Figure (II-3): Schéma de la fondation bipode.....	20
Figure (II-4): Schéma de fondation tétrapode.....	20
Figure (II-5) Demi-sphère équivalente.....	23
Figure (II-6): Pylône de type drapeau.....	24
Figure (II-7): Pylône de type Nappe.....	25
Figure (II-8) : Pylône de type quinconce.....	25
Figure (II-9): Différentes parties d'un pylône.....	26
Figure (II-10) : Principales chaînes d'isolateurs pour lignes HTB.....	29

<i>Figure (II-11): Câble en cuivre nu, Conducteur en aluminium</i>	30
<i>Figure (II-12):Schéma d'Imaged'un Stock bridge</i>	35
<i>Figure (II-13):Schéma d'entretoises vibratoires</i>	36
<i>Figure (II-14): Schéma de la Balises lumineuses.</i>	36
<i>Figure (II-15): balises diurnes et balises lumineuses</i>	37
<i>Figure(II-16): Balises avifaunes</i>	37
<i>Figure (II-17):Schéma decontrepoids de bretelles</i>	38

Chapitre : III

<i>Figure (III-1): Efforts mécaniques appliqués sur le câble.</i>	41
<i>Figure (III-2): Surcharge de câble.</i>	46
<i>Figure (III-3): Surcharge de câble.</i>	47
<i>Figure (III-4): Influence de la température et du vent sur le câble.</i>	50
<i>Figure (III-5):Représentation d'un canton.</i>	55
<i>Figure (III-6): Représentation d'une portée horizontale.</i>	56
<i>Figure (III-7): Représentation d'une portée dénivelée.</i>	56
<i>Figure (III-8): Représentation d'une portée moyenne.</i>	57
<i>Figure (III-9): Représentation d'une portée de poids.</i>	58
<i>Figure (III-10): Représentation d'une portée de sèche.</i>	58
<i>Figure (III-11): Représentation d'une portée équivalente.</i>	59
<i>Figure (III-12):Signification du paramètre.</i>	60
<i>Figure (III-13): Représentation élément de câble.</i>	62
<i>Figure (III-14) : Représentation le programme de simulation</i>	64
<i>Figure (III-15) : Représentation les deux chainettes</i>	64
<i>Figure (III-16): Représentation les deux portée.</i>	65
<i>Figure (III-17) : Représentation. la longueur naturelle du câble.</i>	69
<i>Figure (III-18) : Laméthode de réglagepar la dénivelée</i>	70
<i>Figure (III-19) : Laméthode de réglage par un point extérieur</i>	70
<i>Figure (III-20): Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée.</i>	71
<i>Figure (III-21) : Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée (cas de deux flèches)</i>	72
<i>Figure (III-22) : contraintes géométriques imposées par le site</i>	80
<i>Figure (III-23) : Distances aux obstacles</i>	81
<i>Figure (III-24) : Représentationla distance de croisement</i>	84

<i>Figure (III-25): Représentation d'une tension dans le câble au point bas.</i>	87
<i>Figure (III-26): Représentation d'une tension dans le câble au point quelconque.</i>	88
<i>Figure (III-27): Représentation de la tension Max et min dans un câble.</i>	89
<i>Figure (III-28) : Balancement de la chaîne.</i>	90
<i>Figure (III-29): Balancement de la chaîne en ajoutant un contrepoids.</i>	92
<i>Figure (III-30) : Efforts transmis au pylône.</i>	95
<i>Figure (III-31): Représentation des efforts (pylône en suspension)</i>	95
<i>Figure (III-32): Représentation des efforts (pylône en angle souple)</i>	99
<i>Figure (III-33): Représentation des efforts (pylône en ancrage)</i>	101

Chapitre : IV

<i>Figure (IV.1) : Représentation d'une isolatrice capot tige normale.</i>	107
<i>Figure (IV-2) : Chaîne d'ancrage simple.</i>	110
<i>Figure (IV-3) : Chaîne d'ancrage double.</i>	111
<i>Figure (IV-4): Chaîne de suspension simple</i>	112
<i>Figure (IV-5) : Chaîne de suspension double</i>	113
<i>Figure (IV-6) : position en triangle polygone</i>	116
<i>Figure (IV-7) : Position en symétrique horizontale ou verticale</i>	117
<i>Figure (IV-8) : position en triangle rectangle</i>	118
<i>Figure (IV-9): Position en symétrique horizontale ou verticale.</i>	121

Chapitre : V

<i>Figure (V-1) : Différents types de défauts</i>	124
<i>Figure (V-2)</i>	126
<i>Figure (V-3): Réseau avec défaut phase terre</i>	127
<i>Figure (V-4): Réseau avec défaut biphasé terre</i>	133
<i>Figure (V-5): Réseau avec défaut triphasé terre</i>	135
<i>Figure (V-6): Réseau avec ouverture d'une phase</i>	136

Liste des figures

Chapitre : I

Figure (I-1) : Schéma d'une installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn.....	2
Figure (I-2) Schéma de principe d'une chaudière à circuit primaire intégré.....	2
Figure (I-3): Centrale de pompage.....	3
Figure (I-4): Groupe Francis vertical.....	4
Figure (I-5): par MPPT à une batterie d'accumulateurs Panneau photovoltaïque constitué de modules Connecté en série et en parallèle avec diodes de Protection by-pass et série.....	5
Figure (I-6): Cellules à jonction PN au silicium cristallin.....	5
Figure (I-7): Centrales solaires thermodynamiques à tour à auges miroirs paraboliques.....	5
Figure (I-8): Centrales solaires thermodynamiques.....	6
Figure (I-9): Synoptique d'une chaîne éolienne connectée au réseau BT.....	6
Figure (I-10): Différents types de réseaux électriques.....	9
Figure (I-11): Réseau HTA radial en simple antenne.....	11
Figure (I-12): Réseau HTA radial en double antenne sans couplage.....	12
Figure (I-13): Réseau HTA radial en double antenne avec couplage.....	14
Figure (I-14) : postes de transformation HTB/HTA.....	14
Figure (I-15) : postes de répartition HTA/HTA.....	15
Figure (I-16) : postes de HTA/BTA.....	16

Chapiter : II

Figure (II-1): Schéma de la Représentation d'une fondation.....	18
Figure: (II-2): Schéma de la fondation monopode.....	19
Figure (II-3): Schéma de la fondation bipode.....	20
Figure (II-4): Schéma de fondation tétrapode.....	20
Figure (II-5) Demi-sphère équivalente.....	23
Figure (II-6): Pylône de type drapeau.....	24
Figure (II-7): Pylône de type Nappe.....	25
Figure (II-8) : Pylône de type quinconce.....	25
Figure (II-9): Différentes parties d'un pylône.....	26
Figure (II-10) : Principales chaînes d'isolateurs pour lignes HTB.....	29

<i>Figure (II-11): Câble en cuivre nu, Conducteur en aluminium</i>	30
<i>Figure (II-12):Schéma d'Imaged'un Stock bridge</i>	35
<i>Figure (II-13):Schéma d'entretoises vibratoires</i>	36
<i>Figure (II-14): Schéma de la Balises lumineuses.</i>	36
<i>Figure (II-15): balises diurnes et balises lumineuses</i>	37
<i>Figure(II-16): Balises avifaunes</i>	37
<i>Figure (II-17):Schéma decontrepoids de bretelles</i>	38

Chapitre : III

<i>Figure (III-1): Efforts mécaniques appliqués sur le câble.</i>	41
<i>Figure (III-2): Surcharge de câble.</i>	46
<i>Figure (III-3): Surcharge de câble.</i>	47
<i>Figure (III-4): Influence de la température et du vent sur le câble.</i>	50
<i>Figure (III-5):Représentation d'un canton.</i>	55
<i>Figure (III-6): Représentation d'une portée horizontale.</i>	56
<i>Figure (III-7): Représentation d'une portée dénivelée.</i>	56
<i>Figure (III-8): Représentation d'une portée moyenne.</i>	57
<i>Figure (III-9): Représentation d'une portée de poids.</i>	58
<i>Figure (III-10): Représentation d'une portée de sèche.</i>	58
<i>Figure (III-11): Représentation d'une portée équivalente.</i>	59
<i>Figure (III-12):Signification du paramètre.</i>	60
<i>Figure (III-13): Représentation élément de câble.</i>	62
<i>Figure (III-14) : Représentation le programme de simulation</i>	64
<i>Figure (III-15) : Représentation les deux chainettes</i>	64
<i>Figure (III-16): Représentation les deux portée.</i>	65
<i>Figure (III-17) : Représentation. la longueur naturelle du câble.</i>	69
<i>Figure (III-18) : Laméthode de réglagepar la dénivelée</i>	70
<i>Figure (III-19) : Laméthode de réglage par un point extérieur</i>	70
<i>Figure (III-20): Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée.</i>	71
<i>Figure (III-21) : Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée (cas de deux flèches)</i>	72
<i>Figure (III-22) : contraintes géométriques imposées par le site</i>	80
<i>Figure (III-23) : Distances aux obstacles</i>	81
<i>Figure (III-24) : Représentationla distance de croisement</i>	84

<i>Figure (III-25): Représentation d'une tension dans le câble au point bas.</i>	87
<i>Figure (III-26): Représentation d'une tension dans le câble au point quelconque.</i>	88
<i>Figure (III-27): Représentation de la tension Max et min dans un câble.</i>	89
<i>Figure (III-28) : Balancement de la chaîne.</i>	90
<i>Figure (III-29): Balancement de la chaîne en ajoutant un contrepoids.</i>	92
<i>Figure (III-30) : Efforts transmis au pylône.</i>	95
<i>Figure (III-31): Représentation des efforts (pylône en suspension)</i>	95
<i>Figure (III-32): Représentation des efforts (pylône en angle souple)</i>	99
<i>Figure (III-33): Représentation des efforts (pylône en ancrage)</i>	101

Chapitre : IV

<i>Figure (IV.1) : Représentation d'une isolatrice capot tige normale.</i>	107
<i>Figure (IV-2) : Chaîne d'ancrage simple.</i>	110
<i>Figure (IV-3) : Chaîne d'ancrage double.</i>	111
<i>Figure (IV-4): Chaîne de suspension simple</i>	112
<i>Figure (IV-5) : Chaîne de suspension double</i>	113
<i>Figure (IV-6) : position en triangle polygone</i>	116
<i>Figure (IV-7) : Position en symétrique horizontale ou verticale</i>	117
<i>Figure (IV-8) : position en triangle rectangle</i>	118
<i>Figure (IV-9): Position en symétrique horizontale ou verticale.</i>	121

Chapitre : V

<i>Figure (V-1) : Différents types de défauts</i>	124
<i>Figure (V-2)</i>	126
<i>Figure (V-3): Réseau avec défaut phase terre</i>	127
<i>Figure (V-4): Réseau avec défaut biphasé terre</i>	133
<i>Figure (V-5): Réseau avec défaut triphasé terre</i>	135
<i>Figure (V-6): Réseau avec ouverture d'une phase</i>	136

Liste des figures

Chapitre : I

Figure (I-1) : Schéma d'une installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn.....	2
Figure (I-2) Schéma de principe d'une chaudière à circuit primaire intégré.....	2
Figure (I-3): Centrale de pompage.....	3
Figure (I-4): Groupe Francis vertical.....	4
Figure (I-5): par MPPT à une batterie d'accumulateurs Panneau photovoltaïque constitué de modules Connecté en série et en parallèle avec diodes de Protection by-pass et série.....	5
Figure (I-6): Cellules à jonction PN au silicium cristallin.....	5
Figure (I-7): Centrales solaires thermodynamiques à tour à auges miroirs paraboliques.....	5
Figure (I-8): Centrales solaires thermodynamiques.....	6
Figure (I-9): Synoptique d'une chaîne éolienne connectée au réseau BT.....	6
Figure (I-10): Différents types de réseaux électriques.....	9
Figure (I-11): Réseau HTA radial en simple antenne.....	11
Figure (I-12): Réseau HTA radial en double antenne sans couplage.....	12
Figure (I-13): Réseau HTA radial en double antenne avec couplage.....	14
Figure (I-14) : postes de transformation HTB/HTA.....	14
Figure (I-15) : postes de répartition HTA/HTA.....	15
Figure (I-16) : postes de HTA/BTA.....	16

Chapitre : II

Figure (II-1): Schéma de la Représentation d'une fondation.....	18
Figure (II-2): Schéma de la fondation monopode.....	19
Figure (II-3): Schéma de la fondation bipode.....	20
Figure (II-4): Schéma de fondation tétrapode.....	20
Figure (II-5) Demi-sphère équivalente.....	23
Figure (II-6): Pylône de type drapeau.....	24
Figure (II-7): Pylône de type Nappe.....	25
Figure (II-8) : Pylône de type quinconce.....	25
Figure (II-9): Différentes parties d'un pylône.....	26
Figure (II-10) : Principales chaînes d'isolateurs pour lignes HTB.....	29

<i>Figure (II-11): Câble en cuivre nu, Conducteur en aluminium</i>	30
<i>Figure (II-12):Schéma d'Imaged'un Stock bridge</i>	35
<i>Figure (II-13):Schéma d'entretoises vibratoires</i>	36
<i>Figure (II-14): Schéma de la Balises lumineuses.</i>	36
<i>Figure (II-15): balises diurnes et balises lumineuses</i>	37
<i>Figure(II-16): Balises avifaunes</i>	37
<i>Figure (II-17):Schéma decontrepoids de bretelles</i>	38

Chapitre : III

<i>Figure (III-1): Efforts mécaniques appliqués sur le câble.</i>	41
<i>Figure (III-2): Surcharge de câble.</i>	46
<i>Figure (III-3): Surcharge de câble.</i>	47
<i>Figure (III-4): Influence de la température et du vent sur le câble.</i>	50
<i>Figure (III-5):Représentation d'un canton.</i>	55
<i>Figure (III-6): Représentation d'une portée horizontale.</i>	56
<i>Figure (III-7): Représentation d'une portée dénivelée.</i>	56
<i>Figure (III-8): Représentation d'une portée moyenne.</i>	57
<i>Figure (III-9): Représentation d'une portée de poids.</i>	58
<i>Figure (III-10): Représentation d'une portée de sèche.</i>	58
<i>Figure (III-11): Représentation d'une portée équivalente.</i>	59
<i>Figure (III-12):Signification du paramètre.</i>	60
<i>Figure (III-13): Représentation élément de câble.</i>	62
<i>Figure (III-14) : Représentation le programme de simulation</i>	64
<i>Figure (III-15) : Représentation les deux chainettes</i>	64
<i>Figure (III-16): Représentation les deux portée.</i>	65
<i>Figure (III-17) : Représentation. la longueur naturelle du câble.</i>	69
<i>Figure (III-18) : Laméthode de réglagepar la dénivelée</i>	70
<i>Figure (III-19) : Laméthode de réglage par un point extérieur</i>	70
<i>Figure (III-20): Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée.</i>	71
<i>Figure (III-21) : Représentation d'un conducteur avec une portée dénivelée (cas de deux flèches)</i>	72
<i>Figure (III-22) : contraintes géométriques imposées par le site</i>	80
<i>Figure (III-23) : Distances aux obstacles</i>	81
<i>Figure (III-24) : Représentationla distance de croisement</i>	84

<i>Figure (III-25): Représentation d'une tension dans le câble au point bas.</i>	87
<i>Figure (III-26): Représentation d'une tension dans le câble au point quelconque.</i>	88
<i>Figure (III-27): Représentation de la tension Max et min dans un câble.</i>	89
<i>Figure (III-28) : Balancement de la chaîne.</i>	90
<i>Figure (III-29): Balancement de la chaîne en ajoutant un contrepoids.</i>	92
<i>Figure (III-30) : Efforts transmis au pylône.</i>	95
<i>Figure (III-31): Représentation des efforts (pylône en suspension)</i>	95
<i>Figure (III-32): Représentation des efforts (pylône en angle souple)</i>	99
<i>Figure (III-33): Représentation des efforts (pylône en ancrage)</i>	101

Chapitre : IV

<i>Figure (IV.1) : Représentation d'une isolatrice capot tige normale.</i>	107
<i>Figure (IV-2) : Chaîne d'ancrage simple.</i>	110
<i>Figure (IV-3) : Chaîne d'ancrage double.</i>	111
<i>Figure (IV-4): Chaîne de suspension simple</i>	112
<i>Figure (IV-5) : Chaîne de suspension double</i>	113
<i>Figure (IV-6) : position en triangle polygone</i>	116
<i>Figure (IV-7) : Position en symétrique horizontale ou verticale</i>	117
<i>Figure (IV-8) : position en triangle rectangle</i>	118
<i>Figure (IV-9): Position en symétrique horizontale ou verticale.</i>	121

Chapitre : V

<i>Figure (V-1) : Différents types de défauts</i>	124
<i>Figure (V-2)</i>	126
<i>Figure (V-3): Réseau avec défaut phase terre</i>	127
<i>Figure (V-4): Réseau avec défaut biphasé terre</i>	133
<i>Figure (V-5): Réseau avec défaut triphasé terre</i>	135
<i>Figure (V-6): Réseau avec ouverture d'une phase</i>	136

Liste des tableaux :

<i>Tab. (I-1): Les différents types des gammes de tension</i>	<i>27</i>
<i>Tab. (II -1): les caractéristiques des terrains</i>	<i>39</i>
<i>Tab (II-2) : Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés</i>	<i>48</i>
<i>Tab (II-3): Caractéristiques des différents alliages en aluminium.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. (III-1):. Représentation des pressions de vent.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. (III-2): Les états (catégories) de givre.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. (III-3): Condition climatique proportionnelle à coefficient de sur charge.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. (III-4) : Différentes tenions unitaires pour le câble conducteur</i>	<i>94</i>
<i>Tab. (III-5): Différentes tenions unitaires pour le câble conducteur</i>	<i>96</i>
<i>Tab. (III-6): Différentes tenions et flèches de pose.....</i>	<i>98</i>
<i>Tab. (III-7): Calcul des différentes traversées.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. (III-8): Distance à la masse.....</i>	<i>105</i>
<i>Tab. (III-9): Représentation la relation entre le poids et la longueur de câble almélec</i>	<i>107</i>
<i>Tab. (III-10): Calcul des angles de balancement</i>	<i>113</i>
<i>Tab. (III-11): Calcul des efforts sur les pylônes de suspension.....</i>	<i>118</i>