

11621, 800

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie électrotechnique et Automatique  
Parcours : Master



Domaine. Science et technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité: Réseaux Electriques

Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique

# HARMONIQUES ET QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Réalisé par :

MAVOUNGOU Jean.Moïse.Aimé

Sous la direction de :

Ph. Dr. BOUNAYA KAMEL

2012/2013



# DÉDICACE

A l'Afrique très cher continent, berceau de l'humanité nous croyons à un futur meilleur avenir.

Je dédie spécialement ce travail à toutes ces familles dont les noms sont cités :

MAVOUNGOU , TCHICAYA ,N'GOMA, PEMBELLOT

Ma Grand-mère : Tchivanga Jeanne

Mon Grand père : Tchicaya André

Ma Mère : Tchicaya Blanche Hortense

Mes Oncles :

AIMÉ,METHODE,PHILLIP,GASTON,BENJAMIN,FLORENT,ROGER

Mes Sœurs : Rivellie ,Ornella ,Laure,Jehanne,Doris,Aymone,Karine,Bijou,Flora ,  
Séraphine,Nicole,Vicky,Analtacha,Léticia,Exaucé,Narcie,Antonine,Claudie...

Mes Frères :

HORACE ,GRACE ,FRANCIS,PRINCE,TALIANE,BREL,STEPHEN,

MOHAMED,CARDOREL,ISSA,CHRISTEL,GILDAS,REGIS,Apoli.

A tous mes ami(es) et collègues :

TOURÉ ADIZATOU, BEN'HACER ABDELAZIZ, EBOUA Bienvenu ,  
IKONGA Evrar ,MAKAYAT Andrix ,BOKAYAKA Irich,OTOUBOU  
Jules,BANGELIER Steven,TALL MADINA,DIALO Ada, ILOKI,CHRIS,BOKA  
Junior,PETERSON, JUCE, NGOUABI,MECHAC,Safia ,AWA  
Cissé ,POUNDZOU Reid,Alberto,Kyрил,Minion,Perel,Matthieu  
Miandz,AMOUR ,Ance Ngababa,Patrick Mayouko,...



# SOMMAIRE

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
---------------------------	----------

## **Premier chapitre : Notion sur les réseaux électriques**

<b>I.1. Généralités sur les réseaux électriques.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.2. Acheminement de l'énergie électrique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.3. Niveaux de tension des réseaux électriques.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.4. Description des réseaux électriques.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1.5. Structure des réseaux électriques.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2. Production de l'énergie électrique</b>	
<b>I.2.1. Alternateur.....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2. Transformateur.....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3. Réseaux de transport.....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.1. Charge .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.2. Illustration du report de charge .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.4. Réseau de répartition .....</b>	<b>14</b>
<b>I.2.5. Réseau de distribution .....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.5.1 Réseau à moyenne tension .....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.5.2 Ossatures des réseaux électriques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.5.3 Réseau de moyenne tension aérien.....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.5.4 Réseau souterrain .....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.6. Réseau à basse tension.....</b>	<b>16</b>

## Deuxième chapitre : Qualité de l'énergie électrique

II.1.	<b>Introduction</b> .....	28
II.2.	<b>Définitions</b> .....	28
II.2.1.	<b>Energie électrique</b> .....	28
II.2.3.	<b>Système d'énergie</b> .....	28
II.1.4.	<b>Système d'énergie électrique</b> .....	28
II.3.	<b>Nature et exploitations des réseaux électriques</b> .....	29
II.3.1.	<b>Types de sources</b> .....	29
II.3.2.	<b>Types de récepteurs</b> .....	29
II.3.3.	<b>Normes et usages locaux</b> .....	30
II.4.	<b>calculs nécessaires</b> .....	31
II.5.	<b>Choix stratégiques de l'onde électrique</b> .....	33
II.5.1.	<b>Grandeurs électriques importantes</b> .....	33
II.5.2.	<b>Surveillance de la tension</b> .....	33
II.5.3.	<b>Nécessité de transporté de l'énergie avec une tension élevée</b> .....	33
II.5.4	<b>Courant alternatif ou courant continu</b> .....	33
II.6.	<b>Les phénomènes électriques dans les réseaux</b> .....	33
II.7.	<b>Problématique de l'intensité</b> .....	34
II.7.1.	<b>Intensité de court circuit</b> .....	35
II.7.2.	<b>Courant de court circuit</b> .....	35
II.7.3.	<b>Conséquences des défauts</b> .....	36
II.7.3.	<b>Tenue du matériel</b> .....	37
II.7.4.	<b>Qualité de la fourniture</b> .....	37
II.8.	<b>Dégradation de la qualité de l'énergie électrique</b> .....	37
II.8.1.	<b>Généralité</b> .....	37

II.8.2.	<b>Variation ou fluctuation de la tension.....</b>	40
II.8.3.	<b>Variation ou fluctuation de la fréquence.....</b>	40
II.9.	<b>Creux de la tension et coupure.....</b>	42
II.9.1	<b>Origines.....</b>	42
II.10.2	<b>Définition.....</b>	42
II.9.3.	<b>Tableau de synthèse.....</b>	42
II.9.4	<b>Caractéristiques de la qualité de l'énergie électrique.....</b>	44

### **TROISIÈME CHAPITRE : Etude et Elaboration d'un réseau électrique**

III.1.	<b>Données initiales du réseau électrique.....</b>	46
III.2.	<b>Choix des niveaux de tension.....</b>	48
III.3.	<b>Choix des variantes de configuration du réseau électrique.....</b>	50
III.4.	<b>Fiabilité de fonctionnement.....</b>	50
III.5.	<b>Détermination des paramètres de différentes variantes.....</b>	51
III.6.	<b>Choix du model de schéma.....</b>	51
III.6.1	<b>Première variante.....</b>	53
III.6.2.	<b>Deuxième variante.....</b>	56
III.7.	<b>Comparaison des variantes.....</b>	60
III.7.1.	<b>Choix de sections des conducteurs.....</b>	60
III.7.2.	<b>Choix des types de réseau.....</b>	62
III.8.	<b>Détermination des paramètres de lignes.....</b>	63
III.9.	<b>Les pertes de puissances.....</b>	65

## QUATRIÈME CHAPITRE : Les harmoniques

IV.1.	<b>Introduction.....</b>	72
IV.2.	<b>Définitions.....</b>	72
IV.2.1.	<b>Composante fondamentale.....</b>	73
IV.2.2.	<b>Composante harmonique.....</b>	73
IV.2.3.	<b>Rang d'un harmonique.....</b>	73
IV.2.4.	<b>Valeur efficace d'un signal périodique.....</b>	73
IV.2.5.	<b>Taux de distorsion en tension et en courant.....</b>	74
IV.2.6.	<b>Taux individuel d'harmonique.....</b>	74
IV.2.7.	<b>Puissance apparente monophasée.....</b>	75
IV.2.8.	<b>Facteur de puissance.....</b>	75
IV.2.8.1	<b>Facteur de déphasage du fondamental.....</b>	75
IV.2.8.2	<b>Facteur de déformation.....</b>	76
IV.2.8.3	<b>Facteur de crête.....</b>	76
IV.3.	<b>Sources des harmoniques.....</b>	77
IV.3.1.	<b>Charges linéaires.....</b>	78
IV.3.2.	<b>Charges non linéaires.....</b>	78
VI.3.2.1	<b>Types de charges non linéaires.....</b>	78
VI.3.3.	<b>Les principaux responsables de la pollution harmonique.....</b>	79
IV.3.4.	<b>Impacts des harmoniques.....</b>	80
IV.3.4.1	<b>Impacts immédiats.....</b>	80
IV.3.4.2	<b>Impacts à moyen et long termes.....</b>	80
IV.3.5.	<b>Deux types de charges produisent des harmoniques.....</b>	81
IV.3.5.1	<b>Charges industrielles.....</b>	81

IV.3.5.2	<b>Charges domestiques.....</b>	<b>81</b>
IV.3.6.	<b>Déséquilibre de la tension.....</b>	<b>81</b>
IV.3.7.	<b>Nécessité de traiter les harmoniques.....</b>	<b>82</b>
IV.3.7.1.	<b>Avantages du traitement.....</b>	<b>83</b>
IV.3.7.2.	<b>Solution aux harmoniques.....</b>	<b>83</b>
IV.3.7.2.1	<b>Réduction des courants harmoniques générés.....</b>	<b>83</b>
IV.4.	<b>Filtre anti harmonique.....</b>	<b>83</b>
IV.4.1.	<b>Filtrage passif.....</b>	<b>83</b>
IV.4.2.	<b>Filtrage actif.....</b>	<b>84</b>
IV.4.2.1	<b>Avantages.....</b>	<b>85</b>
IV.4.2.2	<b>Inconvénients.....</b>	<b>85</b>
IV.4.3.	<b>Filtrage hybride.....</b>	<b>86</b>

## **CONCLUSION**

## **Introduction**

Une meilleure maîtrise des problèmes d'étude, d'élaboration et de gestion des systèmes d'énergie électrique est toujours tributaire de connaissances plus approfondies de leur hiérarchie structurelle et fonctionnelle, de leurs propriétés, de leur caractéristique et de diverses autres spécificités. Cette relation s'affirme encore d'autant plus déterminante sachant que les processus électromagnétiques interactifs qui caractérisent le fonctionnement des réseaux électriques sont en règle, généralement très complexes. Complexité due à la diversité des charges et de leurs caractéristiques, au déploiement des réseaux électriques et à leurs diverses configurations, aux différents états de leur fonctionnement et aux propriétés caractéristiques des régimes correspondants.

Dans un sens général, le traitement des réseaux électriques implique nécessairement la prise en charge des problèmes posés sous deux aspects essentiels ; un aspect lié à des considérations physiques ; desquelles on doit déduire les modèles d'éléments des réseaux, leurs paramètres physiques descriptifs, les lois et les propriétés physiques qui régissent leurs régimes.

Le fonctionnement du réseau électrique est considéré satisfaisant, si ses paramètres techniques (tensions et courants) s'inscrivent dans les plages admissibles dont il est tenu à les respecter contractuellement. Si ces paramètres présentent des dépassements par rapport aux limites admissibles, il est obligé de pallier à ces problèmes

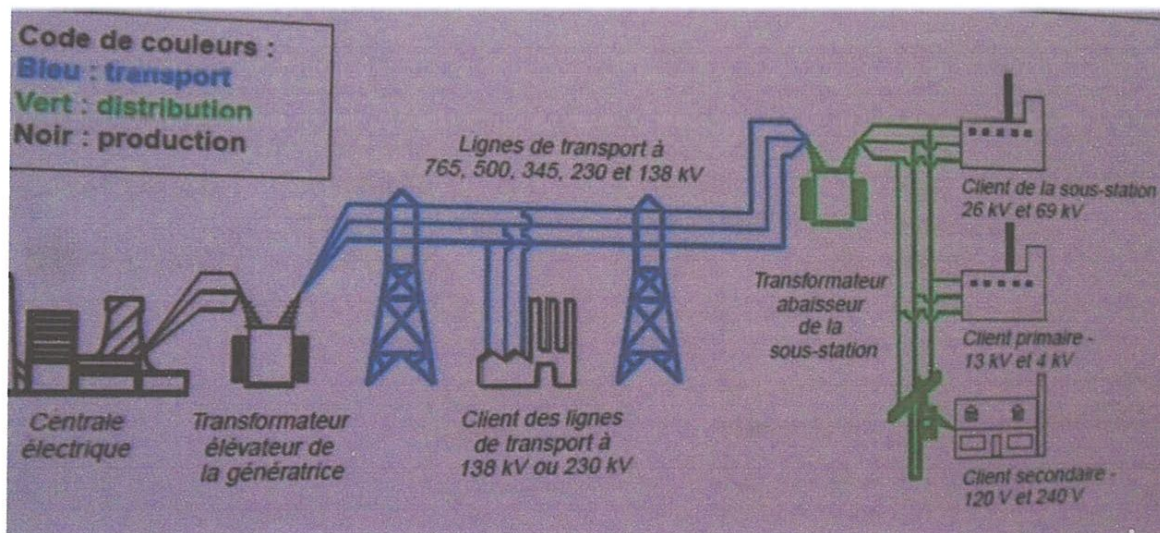


## I.1. Généralité sur les réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer de l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans les postes électriques, qui permettent de répartir et faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Il doit assurer la gestion dynamique de l'ensemble de production-transport-consommateur, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer une stabilité dans l'ensemble.

Le réseau de transport se divise en quatre niveaux de tensions de distribution : très haute tension, la haute tension, la moyenne tension et la basse tension. La structure des réseaux varie d'un pays à un autre, mais on peut la représenter d'une manière générale :



Fig(1.2) : structure de base d'un réseau d'énergie électrique.

### I.1.2. Acheminement de l'énergie électrique :

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble d'appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation d'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées. Ils ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques ... Avec les centres de consommation (villes, usines).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, voir très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final.

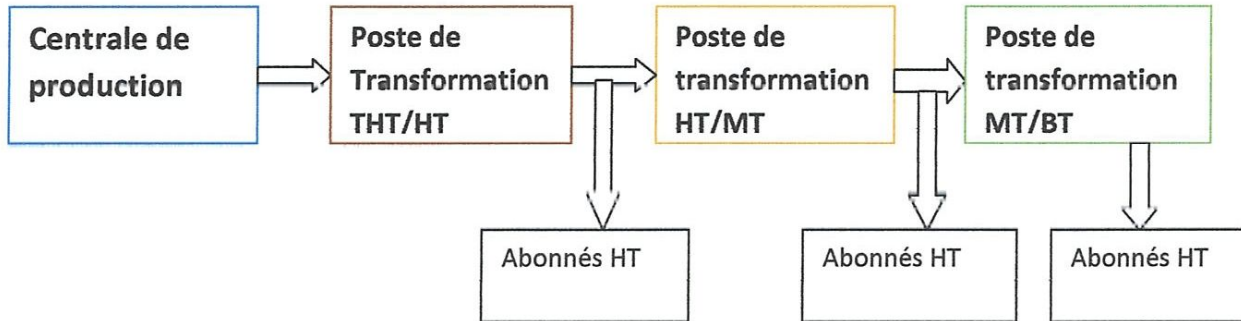


Fig1.1 : schéma d'un réseau électrique

### I.1.3. Niveaux de tension des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- ▶ Réseau de transport THT 220-800 KV
- ▶ Réseau de répartition HT 60-170 KV
- ▶ Réseau de distribution MT 5-36 KV
- ▶ Réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à un autre en fonction des paramètres comme : ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères techno-économique.

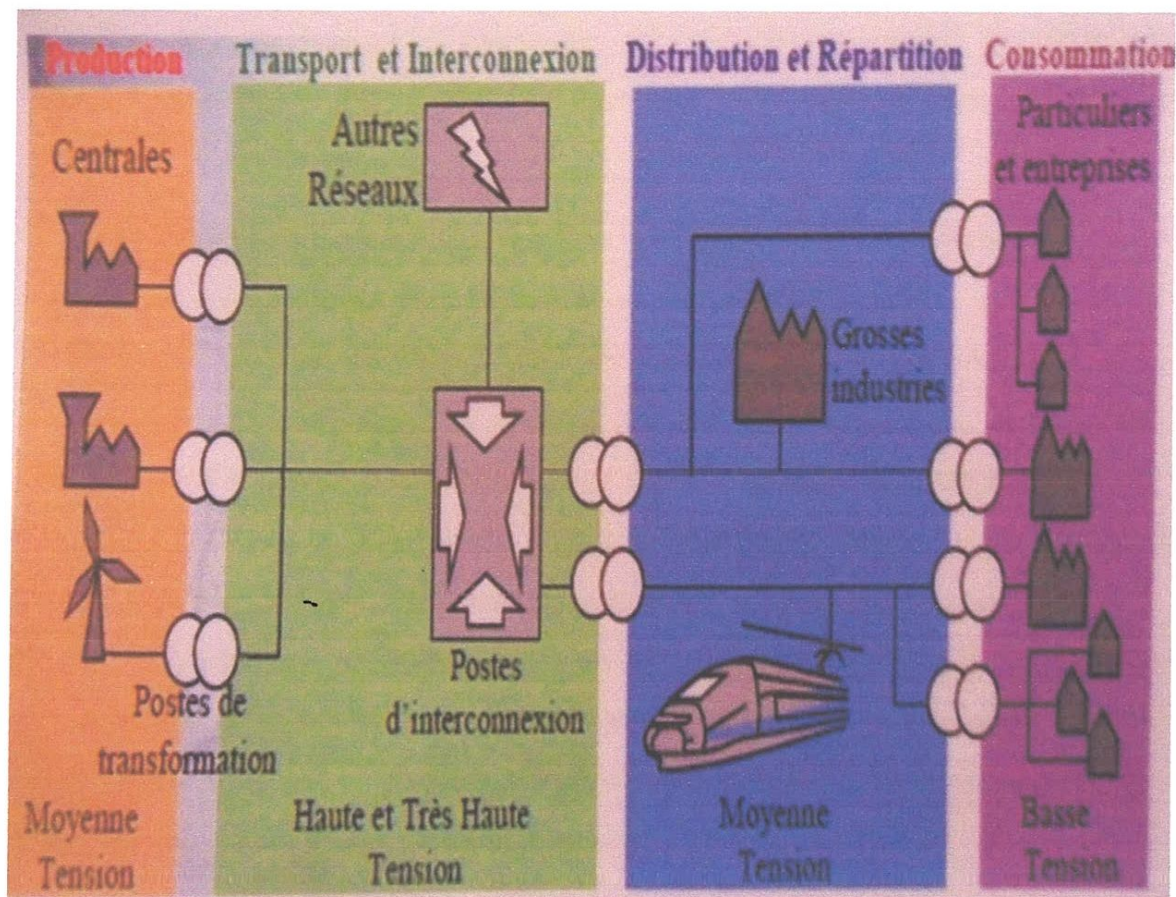


Fig (1.4) : structure de base d'un réseau d'énergie électrique

#### I.1.4. Description des réseaux électriques :

Un réseau électrique est un ensemble de circuits complexes interconnectés comme le montre le schéma de principe de la figure(1.4),il peut être subdivisé en quatre parties essentiels :

- ▶ La production d'énergie électrique
- ▶ Le transport et la répartition
- ▶ La distribution
- ▶ Les charges

### I.1.5. Structure des réseaux électriques

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci-dessous :

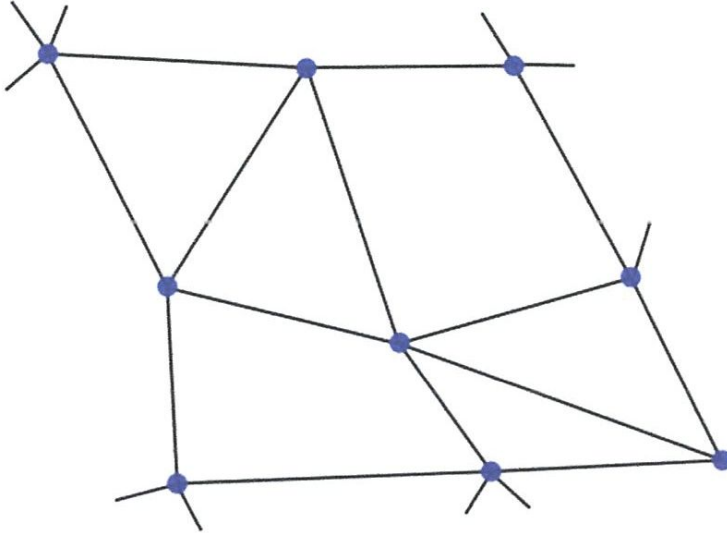


Fig 2.1 : structure arborescente (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval.

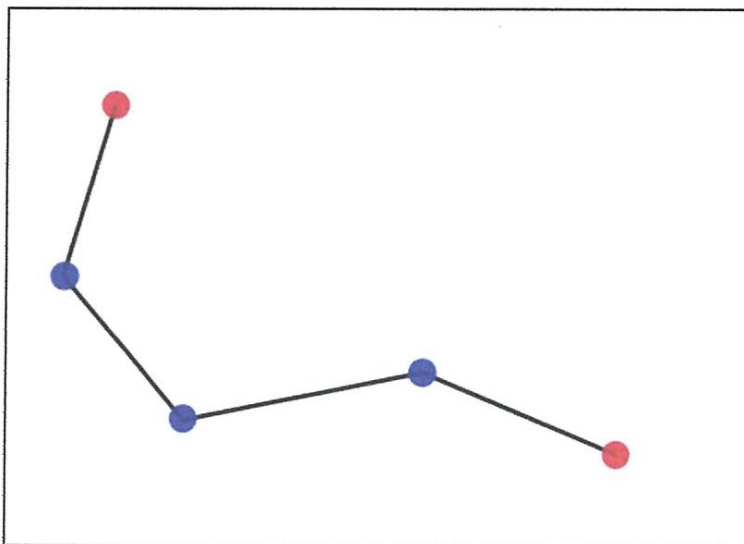


Fig 2.2 : : Structure radiale ou bouclée (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.

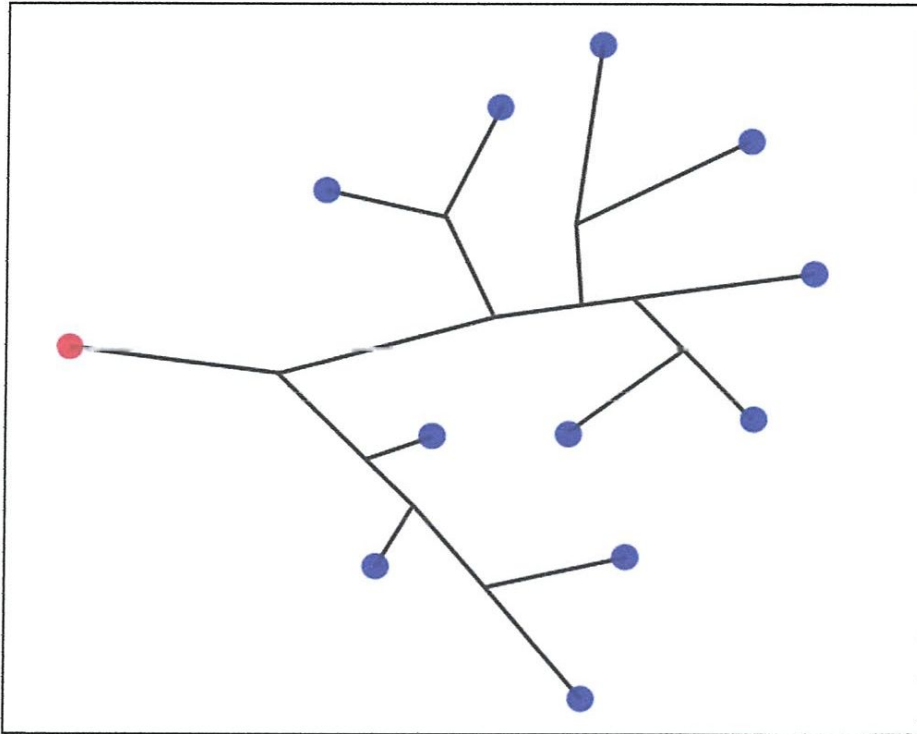


Fig 2.3: Structure arborescente (le poste rouge représente l'apport d'énergie) : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des consommateurs en aval.

Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution.

## I.2. Production de l'énergie électrique

### I.2.1. Alternateur

L'alternateur est l'un des composants majeurs pour la production de l'énergie électrique, une génératrice à courant alternatif triphasé et le plus connu sous une domination des génératrices synchrones.

Une génératrice synchrone est constituée de deux champs tournants en synchronisme, l'un est produit au niveau du **rotor** lorsqu'il est entraîné à une vitesse synchrone et est excité par un courant continu. L'autre champ est produit par des enroulements du **stator** lorsqu'ils sont parcourus par un courant triphasé.

Le courant continu nécessaire aux enroulements du rotor pour créer un champ magnétique est fourni par un système d'excitation. Ce système d'excitation permet de maintenir et de contrôler le transit d'énergie réactive, de ce fait la suppression de la commutation l'alternateur est en mesure de générer de grandes puissances à haute tension. Dans une centrale électrique la puissance des alternateurs varie de **50 MW à 1500 MW**.

### 1.2.2. Transformateur

Le transformateur un second composant essentiel pour la production de l'énergie électrique, il permet le transfert de puissance avec un rendement élevé d'un niveau de tension à un autre.

La puissance transmise au secondaire est à peu près celle du primaire, ainsi dans le transformateur élévateur toute élévation de la tension au secondaire s'accompagne d'une diminution dans ce même rapport du courant au secondaire ce qui entraîne une diminution des pertes de puissances dans la ligne électrique et rend possible l'acheminement de l'énergie électrique sur de grande distance.

Des contraintes d'isolation et d'autres liées à des problèmes techniques de conception ne permettent pas pour l'heure de générer au niveau de l'alternateur, des tensions supérieures à 30 KV ainsi donc aux extrémités réceptrices des lignes, un transformateur abaisseur est utilisé pour ramener la tension à un niveau admissible pour une bonne distribution et utilisation.

### 1.2.3 Réseaux de transport

Les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) (de 50 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs).

### I.2.3.1 Charge

Les charges sont à caractère industriel, commercial et résidentiel. Si de très grandes charges industrielles peuvent être directement alimentées par le réseau de transport, les petites charges le sont par le réseau primaire de distribution.

Les charges industrielles sont des charges composées ou les moteurs représentent la plus grande part. Ces charges composées sont fonction de la fréquence et de la tension et constituent la majeure partie de la charge totale d'un réseau électrique. Les charges à caractère commercial et résidentiel sont celles liées essentiellement à l'éclairage,

le chauffage et la climatisation. Elles sont indépendantes de la tension et de la fréquence et absorbent très peu d'énergie réactive.

La puissance active fournie à la charge s'exprime en kilowatts ou en mégawatts. L'amplitude de la puissance totale fournie, varie durant une journée et doit être à chaque instant, adaptée à la demande du consommateur.

### I.2.3.2. Illustration du report de charge

#### A) Réseau à l'état normal

Dans le réseau ci contre, l'électricité se répartit sur les lignes électriques en fonction de la localisation de la production, de la consommation et des impédances des ouvrages (lignes et transformateurs) selon les lois de Kirchhoff. Les lignes sont plus ou moins chargées selon le nombre de triangles :

- du vert à orange : intensité supportable par la ligne en régime permanent ;
  - rouge : l'intensité n'est pas supportable en régime continu, il faut réduire rapidement l'intensité sinon la ligne se mettra hors service sous l'effet des dispositifs de protection.
- Dans cet exemple, les lignes sont normalement chargées (couleur verte à jaune).

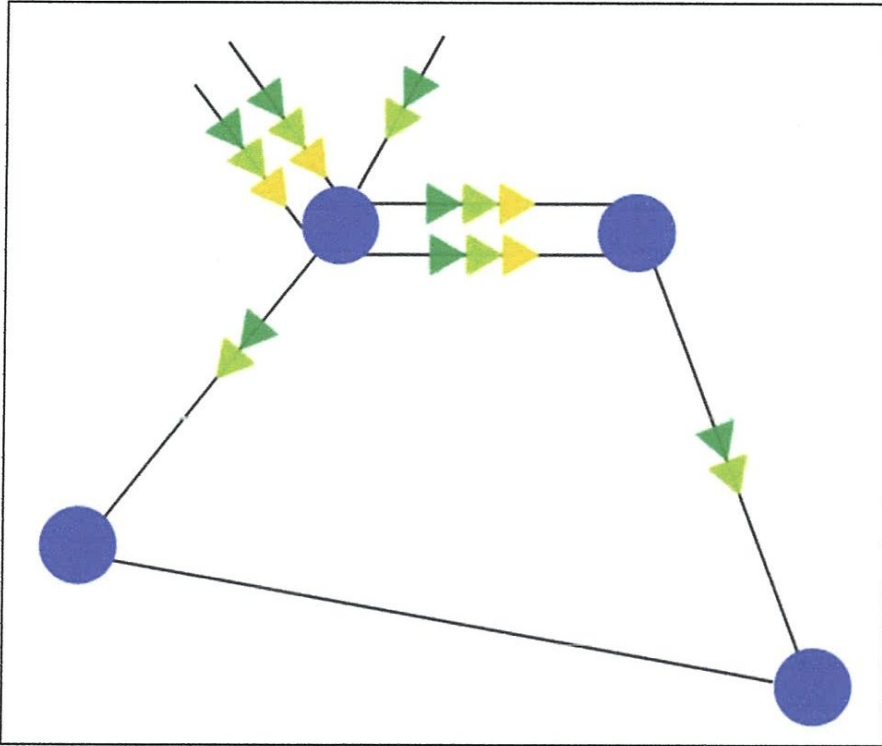


Figure 1.4 : Réseau à l'état normal.

### C) Coupure d'une ligne

#### **L'énergie se répartit différemment :**

Un incident s'est produit sur le réseau : une ligne a déclenché ; elle est donc hors service. Du fait de la structure maillée, l'énergie s'est répartie sur les lignes restantes en fonction de leur impédance, tout en assurant la continuité de l'alimentation électrique. Par contre une ligne est en surcharge : il faut donc agir rapidement pour ramener son intensité à une valeur acceptable.



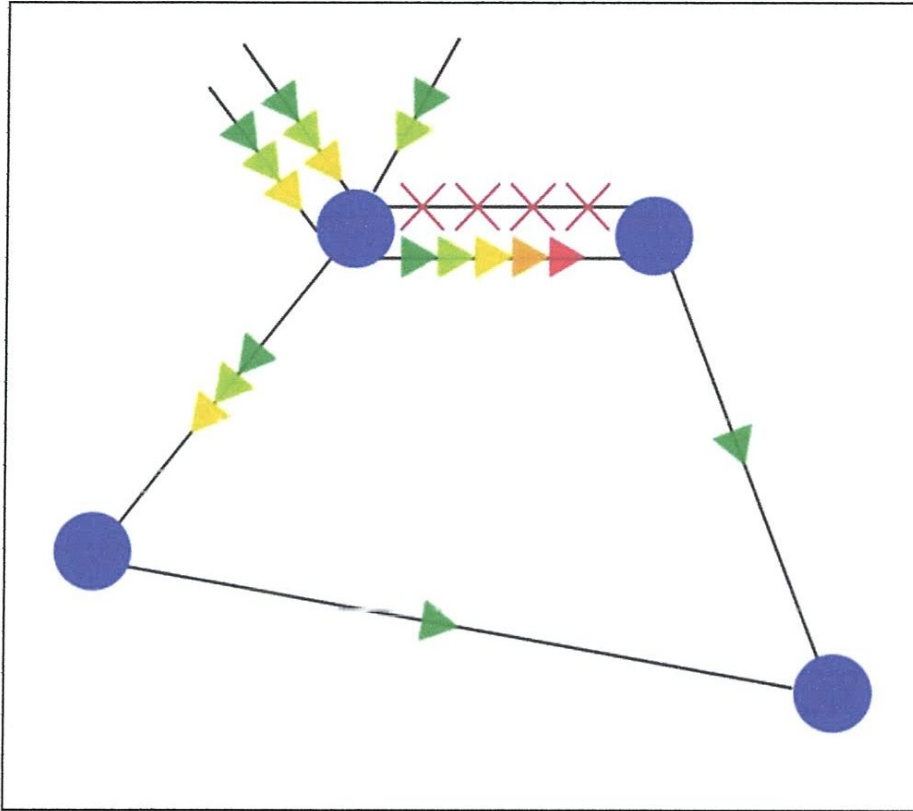


Fig 1.5 : Coupure d'une ligne : l'énergie se répartit différemment.

### C1) Sans correction

#### C1) L'incident s'aggrave, la zone va finir hors tension :

Si aucune action n'est menée dans les délais suffisants, la ligne en surcharge va déclencher à son tour : l'énergie va alors se répartir à nouveau pour alimenter la consommation appelée. Avec de moins en moins de lignes électriques pour acheminer la même puissance, les surcharges sur les lignes restantes deviennent très importantes et les délais de réaction vont être réduits d'autant. Dans cette situation une ligne est en très forte surcharge et va déclencher très rapidement, mettant ainsi les 3 postes qu'elle alimentait hors tension.

Un enchaînement de ce type est appelé une cascade de surcharge et est quasiment toujours impliqué dans les grands blackouts rencontrés au niveau mondial. Ceci illustre qu'à partir d'une situation de réseau a priori "normale", un événement bénin (par exemple un coup de foudre sur une ligne) peut rapidement avoir des conséquences non maîtrisables et de grande ampleur.

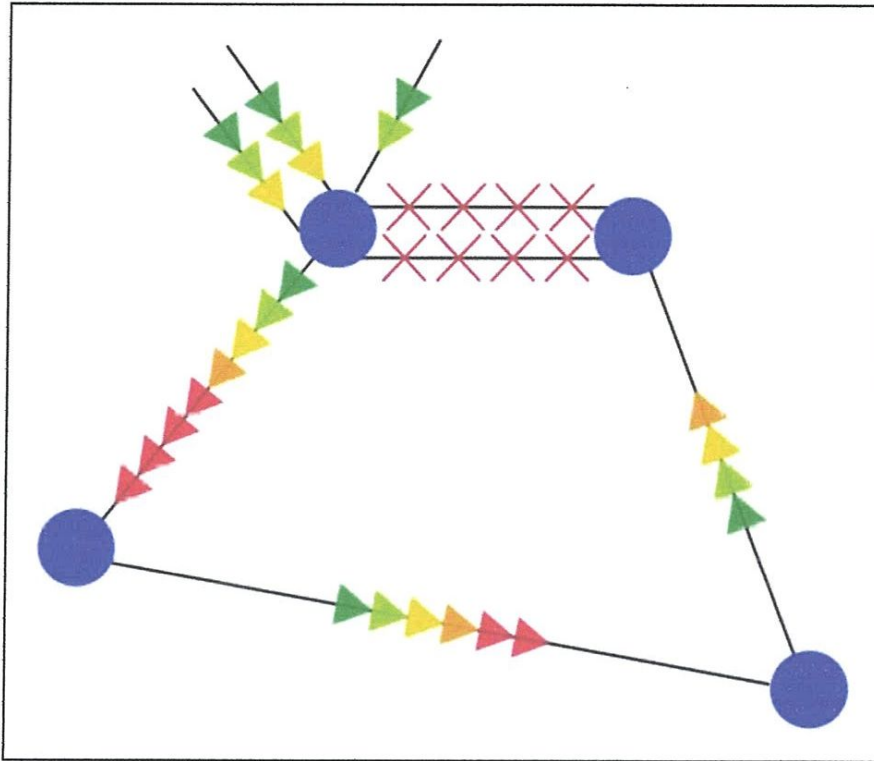


Figure 2.6 : Sans correction : l'incident s'aggrave, la zone va finir hors tension.

### C2) Correction : optimisation de la répartition de l'énergie entre les lignes par modification de la topologie du réseau

À la suite du déclenchement de la première ligne électrique, plusieurs moyens sont à disposition des dispatchers pour "lever" cette surcharge. Ici, le dispatcher a changé la topologie d'un poste pour y passer à 2 nœuds électriques : cela permet de répartir de manière différente l'énergie, et donc de mieux équilibrer l'intensité sur les lignes. On revient donc à une situation pérenne. D'autres solutions, plus contraignantes, auraient pu être adoptées pour lever la surcharge :

- Augmentation rapide de production dans la zone problématique afin de diminuer les apports d'énergie par les lignes ;
- Coupure volontaire ciblée de consommation (on parle alors de délestage) afin de conserver l'alimentation d'un maximum d'abonnés.

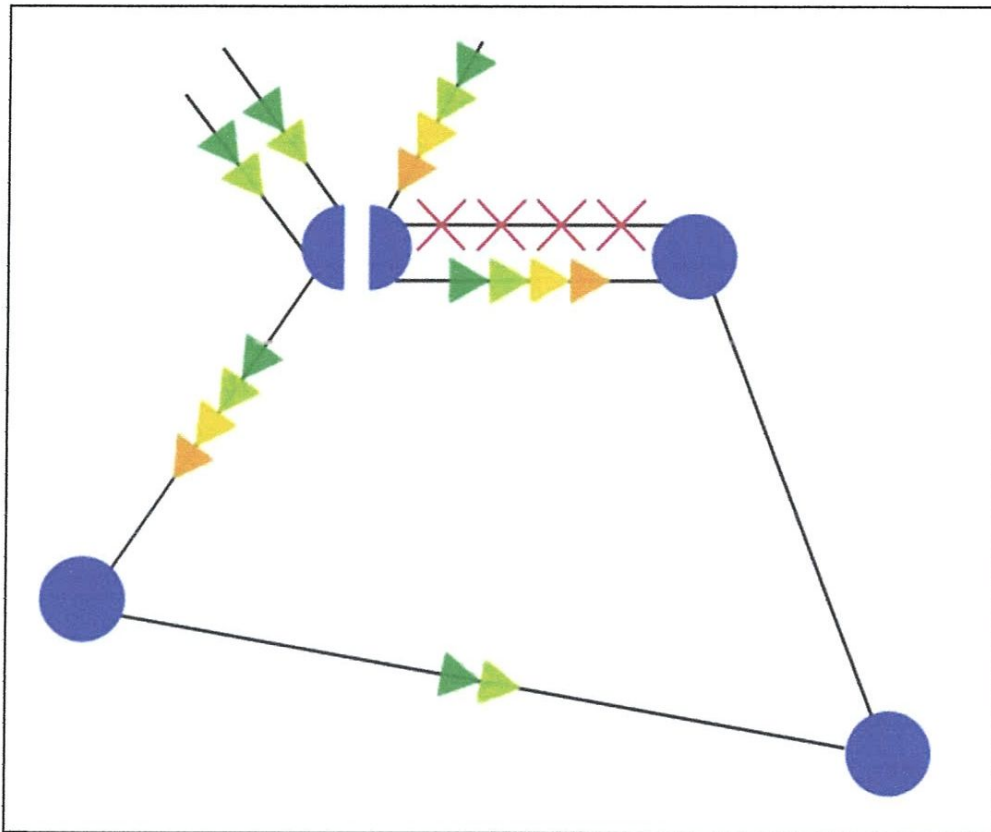


Figure 2.7: Optimisation de la répartition de l'énergie entre les lignes par modification de la topologie du réseau.

## I.2.4. Réseau de répartition

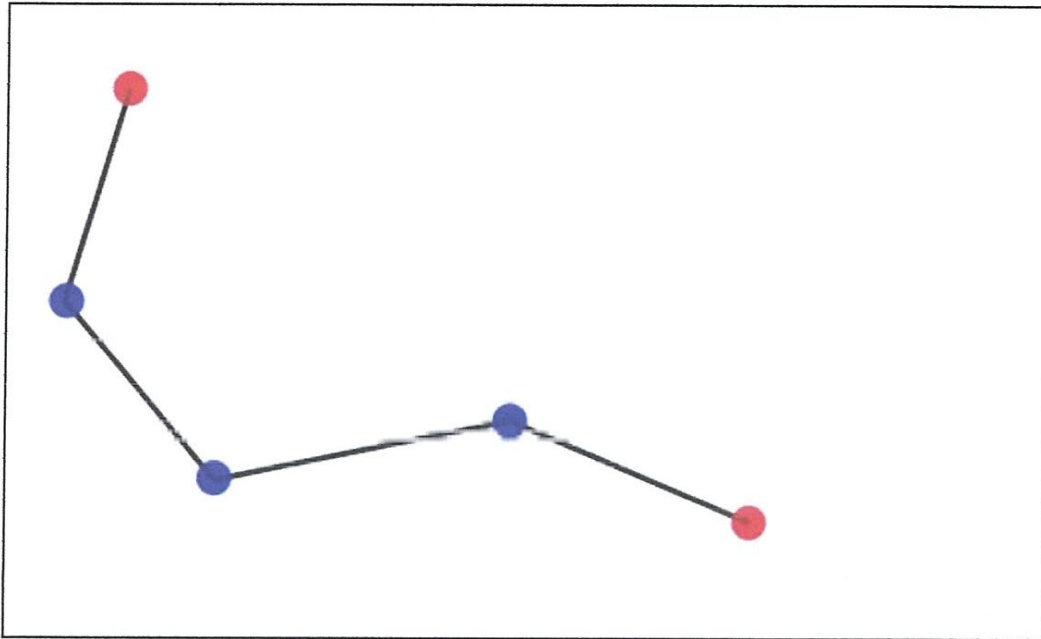


Figure 2.8 : Entre les 2 postes rouges, la structure est bouclée. Les réseaux de répartition ont souvent cette structure dans les régions faiblement consommatrices.

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région.

Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées. Contrairement aux réseaux de transport qui sont toujours bouclés (afin de pouvoir assurer un secours immédiat en N-1), les réseaux de répartition peuvent être exploités bouclés ou débouclés selon les transits sur le réseau (débouclé signifie qu'un disjoncteur est ouvert sur l'artère, limitant ainsi les capacités de secours en N-1). Les problèmes de report de charge se posent également pour le réseau de répartition, sa conduite est donc assurée en coordination avec celle du réseau de transport et nécessite également des moyens de simulation en temps réel.

### **I.2.5. Réseau de distribution**

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 3 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (anciennement BT devenu BTB de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

Contrairement aux réseaux de transport et répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

#### **I.2.5.1 Réseau à moyenne tension (MT)**

Les réseaux à moyenne tension (MT) ont de façon très majoritaire une structure arborescente, qui autorise des protections simples et peu coûteuses : à partir d'un poste source (lui-même alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère (ou ossature) sur laquelle sont reliées directement des branches de dérivation au bout desquelles se trouvent les postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension (BT) sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entraînera forcément la coupure des abonnés alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent.

#### **I.2.5.2. Ossatures des réseaux à moyenne tension**

Les ossatures des réseaux à moyenne tension (MT) européens ne sont constituées que des 3 phases, alors qu'en Amérique du Nord le fil de neutre est également distribué (3 phases + 1 neutre). Les dérivations MT quant à elles peuvent être constituées de 1 fil (cas de l'Australie où le retour de courant s'effectue par la terre) à 4 fils (cas des États-Unis), ou encore systématiquement 3 fils (les 3 phases) comme le réseau français.

#### **I.2.5.3. Réseaux à moyenne tension aériens**

Les réseaux aériens à moyenne tension sont majoritaires en zone rurale, où la structure arborescente prédomine largement. Par contre en zone urbaine les contraintes d'encombrement, d'esthétique et de sécurité conduisent à une utilisation massive des câbles souterrains.

#### I.2.5.4. Réseaux souterrains

Les réseaux souterrains étant soumis potentiellement à de longues indisponibilités en cas d'avarie (plusieurs dizaines d'heures), il est fait appel à des structures en double dérivation ou à des structures radiales débouclées munies d'appareils automatiques de réalimentation, permettant une meilleure sécurité d'alimentation.

#### I.2.6. Réseaux à basse tension

Les réseaux de basse tension résultent de la structure des réseaux MT : en Amérique du Nord les réseaux monophasés sont courants (1 neutre + 1 phase), tandis qu'en Europe la distribution triphasée avec fil de neutre est très majoritaire (1 neutre + 3 phases). La structure arborescente est là aussi de loin la plus répandue, car elle est à la fois simple, bon marché, et permet une exploitation facile.

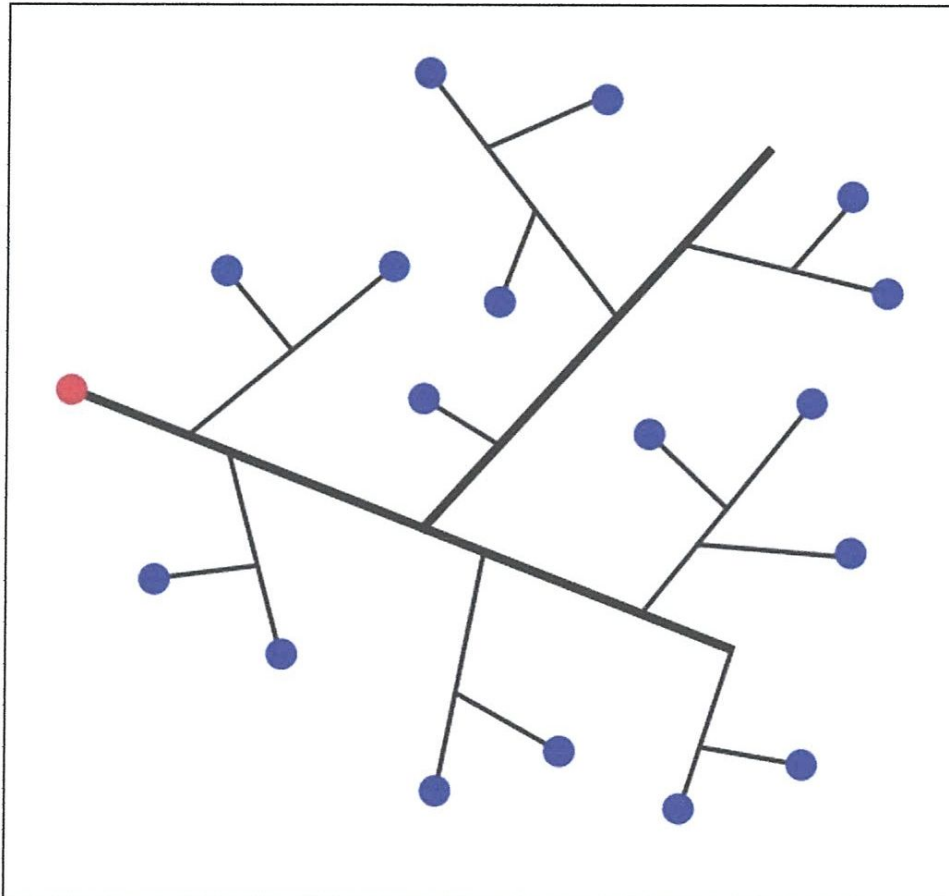


Fig 2.9 : Réseau de distribution généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste source (en rouge), l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation HT(A)/BT(B).

### I.3. Matériels utilisés dans les réseaux électriques

Le réseau électrique est constitué non seulement de matériel haute tension (dit matériel de puissance), mais également de nombreuses fonctions périphériques telles que la télé-conduite ou le système de protection.

### I.4. Matériels de puissance

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barre qui relie les départs lignes et les départs transformateurs.

### I.5. Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terna.

Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes : en France jamais plus de 4, rarement plus de 2, mais d'autre pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporter à leur pylône jusqu'à 8 ternes.

Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Ils supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur.

Le genre ou le type de ligne à utilisée est imposé par les facteurs suivants :

La puissance active à transporter, la distance de transport, le coût, l'esthétique, l'encombrement et la facilité d'installation. Nous distinguons quatre types de ligne : ligne de distribution à basse ; ligne de distribution à moyenne tension, ligne de transport à haute tension et une ligne de transport à très haute tension.

#### I.5.1. Lignes de distribution basse tension (BT)

Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.

### I.5.2. Lignes de distribution à moyenne tension (MT)

Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.

### I.5.3. Lignes de transport à haute tension (HT)

Ce sont les lignes qui relient les postes de transformation principaux aux centrales de génération.

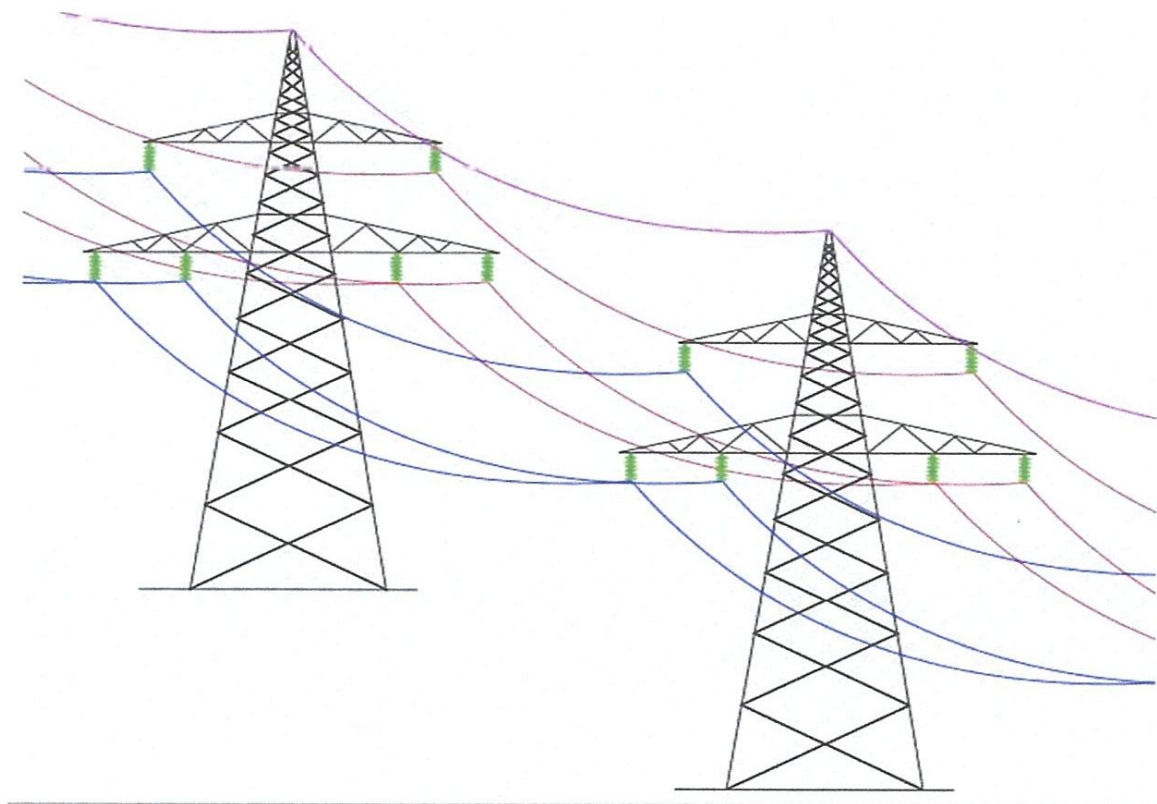


Fig 1.3 : Ligne de transport HT, câble violet est le câble de garde, des pylônes supportent 2 ternes, chacune constitué des 3 phases, chaque phase est supporté par un isolateur.



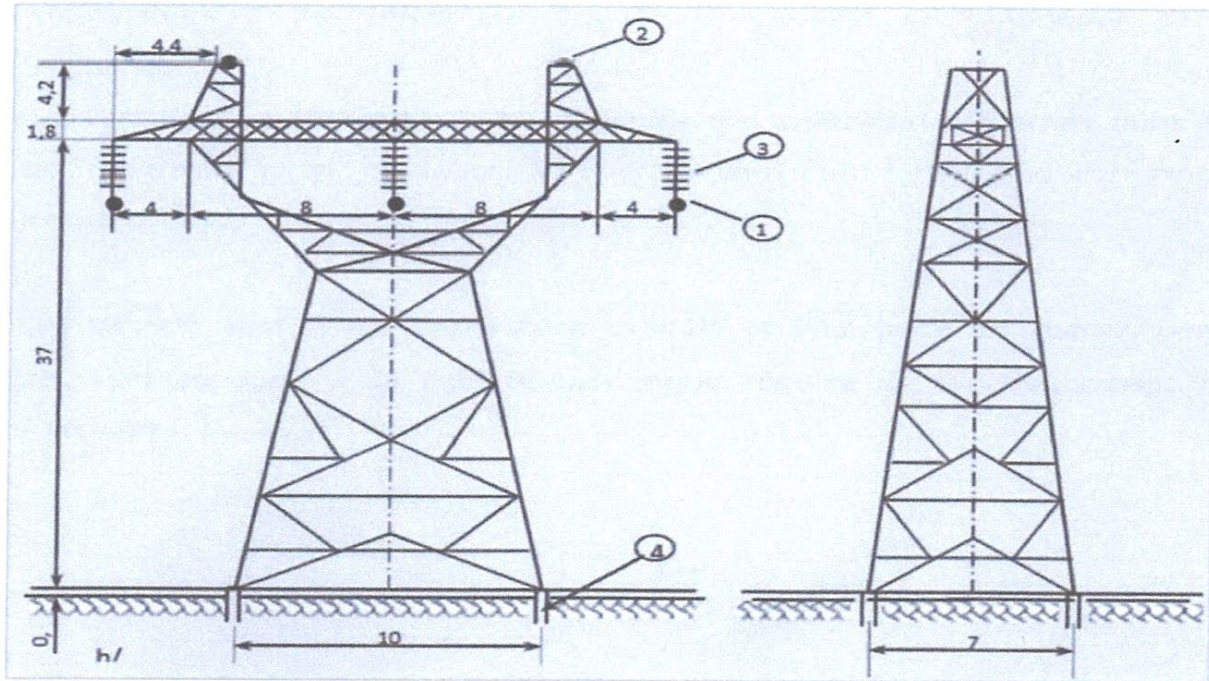
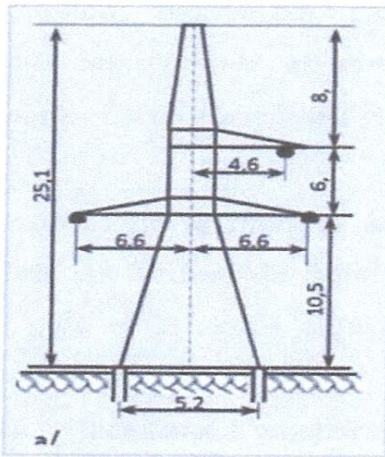


Fig. (1.5). Modèles de pylône de dimensions (m) réelles; a. UN = 220 kV, b. UN= 500 kV, 1. Conducteur (phase), 2. Fil de garde, 3. Isolateur, 4. Fondations (mise à la terre)

#### 1.5.4. Lignes de transport à très haute tension (THT)

Les lignes de transport à très haute tension, sont des lignes qui permettent de relier les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 KV.

### **I.5.5. Types de lignes :**

#### **I.5.5.1. Lignes souterraines :**

Les lignes souterraines sont utilisées dans quelques cas particuliers : transport sous-marin, franchissement de sites protégés, alimentation de grandes villes, de métropoles ou autres zones à forte densité de population. Les lignes souterraines sont plus répandues en basse et moyenne tension, moins en haute tension du fait des coûts prohibitifs.

#### **I.5.5.2. Lignes aériennes :**

La notion de ligne, comme prédéfini, renferme en soit un ensemble d'aspects relatifs aux éléments constitutifs, aux grandeurs descriptives et aux effets interactifs impliqués. En effet, on distingue les aspects:

Mécanique, relatif à la construction de la ligne;

Electrodynamique, relatif aux interactions entre parties conductrices de la ligne

Electrique. Electromagnétique, relatif aux processus de transmission de l'énergie pour lequel le conducteur (phase) est l'élément essentiel d'échange mutuel, relatif aux interactions avec l'environnement...

Pour analyser le processus de transfert de l'énergie électrique la ligne est considérée dans son aspect électromagnétique et peut être représentée par le schéma unifilaire électrique puisque, par construction, les phases sont considérées symétriques et équilibrées.

### **I.5.6. Composants d'une ligne aérienne :**

Une ligne aérienne est un élément du réseau électrique destiné à transporter l'énergie électrique entre deux ou plusieurs de ses nœuds. La notion de ligne est générale, aussi bien dans son utilisation que dans sa construction. Elle est utilisée pour le transport, l'alimentation et la distribution de l'énergie électrique ; ainsi que pour l'interconnexion des réseaux régionaux et inter territoriaux.

Par ligne aérienne (ou en câble) on sous-entend une installation qui intègre dans sa construction un ensemble de composants.

En effet, une ligne aérienne est composée essentiellement par les éléments suivants: conducteur, isolateur (sous forme de guirlande), Fil de garde (protection contre la foudre), les pylônes et leur fondation, autres éléments comme poteaux intermédiaires, moyens de fixation et de suspension, installation de protection contre la foudre...

Le fonctionnement de la ligne est conditionné par des interactions électromagnétiques diverses, qui se trouvent à l'origine de tous les changements de son comportement et de ses paramètres. De ce fait, l'impact de ces interactions détermine, de manière fondamentale, aussi bien les caractéristiques du régime que ceux de construction.

La détermination des paramètres de construction doit obéir à des considérations non seulement d'ordre technique et économique mais aussi à des considérations de sécurité préventive ; ayant trait à l'être humain et à l'environnement en général.

Le niveau nominal de la tension utilisée est un facteur important dans le choix du dimensionnement de la ligne.

Les paramètres essentiels de dimensionnement sont .

- La hauteur H du pylône,
- Les distances D et d entre l'axe du pylône et le conducteur et l'entre conducteurs,
- La longueur de la guirlande d'isolation,
- La portée p entre l'axe du pylône et celui de la guirlande d'isolation,
- La hauteur h entre le point le plus bas du conducteur et la terre.

U, kV	6 ÷ 10	35	110	220
h, m	6 ÷ 7	6 ÷ 7	6 ÷ 7	7 ÷ 8
a, m	0,8 ÷ 1	3 ÷ 3,5	4 ÷ 4,5	5 ÷ 7

Les lignes aériennes, dont la somme des longueurs pour un réseau donné se compte par centaines et milliers de kilomètres, subissent des efforts énormes de forces diverses ; auxquelles elles doivent nécessairement résister. Les poids énormes, qui se comptent également par centaines et milliers de tonnes, suspendus et soutenus par les pylônes et poteaux, posent un vrai problème pour l'analyse des comportements mécaniques des lignes. En effet, on distingue les efforts suivants :

Le poids de la matière suspendue engendre le long du tracé de la ligne des effets de flexion, de flambage, de cisaillement, d'étirage, de fatigue...

### I.6.2.1. Poste électrique à haute tension

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités :

- l'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension : cela permet de répartir l'énergie sur les différentes lignes issues du poste ;
- la transformation de l'énergie : les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre.

De plus, les postes électriques assurent des fonctions stratégiques :

- assurer la protection du réseau : un système complexe de protection permet qu'un défaut sur un seul ouvrage n'entraîne pas la mise hors tension de nombreux ouvrages, ce qui risquerait de mettre une vaste zone hors tension. Cette protection est assurée par des capteurs qui fournissent une image de la tension et du courant à des relais de protection, lesquels élaborent des ordres de déclenchement à destination des disjoncteurs ;
- permettre l'exploitation normale du réseau : présence de plusieurs jeux de barre et de couplage afin de pouvoir prendre différents schéma électriques ;
- assurer la surveillance du réseau : la tension du réseau et l'intensité dans les lignes sont surveillées dans les postes électriques, via des transformateurs de mesure, de tension et de courant.

### I.6.2.2 Matériels de surveillance et de commande

### I.6.2.3 Protection des réseaux électriques

Tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour déconnecter le système de production en cas de défaut sur la ligne. L'objectif est de protéger les 3 constituants d'un système électrique :

- Les organes de production (alternateur)
- Les composants des réseaux de transport et de distribution (lignes aériennes et souterraines, transformateurs, jeux de barre)
- Les organes de consommation (abonnés finaux).

### I.6.3. Phénomènes dans les réseaux électriques

Un réseau électrique est un système composé de différents éléments constituant un support physique d'interaction mutuelle et de transmission de l'énergie électrique. Le fonctionnement de système dans le temps et dans l'espace est le résultat de toutes les interactions, conformément aux lois de l'électricité.

Celles-ci sont décrites par des équations qui mettent en relations des paramètres fondamentaux descriptifs et quantitatifs des processus énergétiques, tels primaires comme les tensions, les impédances, le temps et secondaires comme les différents d'onde et autres caractéristiques.

Le fonctionnement d'un système d'énergie électrique est caractérisé par différentes perturbations (ou phénomènes) qui peuvent être classées, par différents paramètres. En fonction de l'aspect temporelle des réactions du système, on distingue plusieurs comportements suivants:

La discontinuité : Une suspension momentanée de l'alimentation,

Dynamique rapide : Des variations brusques et importantes des régimes au niveau des centrales et des consommateurs et au niveau de la structure de réseau (perturbation forte),

Dynamique lente : des variations lentes des régimes, suite aux variations des graphiques de charge (perturbation faible), stationnaire : régime stable, permanent.

L'électromagnétique conduit : influence de la propagation des ondes électromagnétiques le long de la ligne.

Electromagnétique rayonné : Une manifestation du rayonnement, les effets de ces événements (perturbations) se représentent de manière diverses aussi bien sur le réseau que sur les processus ; interruption et coupure de la fourniture d'énergie électrique, creux et variation de tension, courants transitoires, harmonique, Courts-circuits, oscillations électromécanique, surtension de manœuvre, de commutation, d'arc et de rétablissement, surtension de foudre, couplage entre courant fort et courant faible.

Ces effets listés se manifestent quantitativement en fonction de la nature des réseaux et des exigences d'exploitations.

#### **I.6.4. Composants des réseaux électriques**

Les réseaux comportent des nœuds électriques où se raccordent les ouvrages : ce sont les postes électriques.

Dans un poste, les ouvrages sont connectés à un jeu de barres. Suivant sa fonction dans le réseau, un poste peut comporter un ou plusieurs jeux de barres. Le raccordement des ouvrages aux jeux de barres se fait au moyen de sectionneurs ; l'établissement ainsi que l'interruption du courant sont réalisés par l'intermédiaire de disjoncteurs.

Enfin, des transformateurs de mesure, transformateurs de courant et transformateurs de tension, équipent les différents ouvrages ; leur rôle est de réduire les courants et tensions réels des réseaux à des valeurs utilisables par les protections.

Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et des incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement des installations :

- Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations atmosphériques (foudre, tempêtes etc.) Certaines régions, régions montagneuses par exemple, sont beaucoup plus exposées que d'autres à la foudre ; selon les niveaux de tension, celle-ci est responsable de 60 à plus de 80 % des défauts.
- Les câbles souterrains sont exposés aux agressions extérieures (d'engins mécaniques de terrassement par exemple) qui entraînent systématiquement des défauts permanents.
- Les matériels de réseaux et de postes comportent des isolants (solides, liquides ou gaz) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre parties sous tension et masse.

## II.1. Introduction

L'énergie électrique est très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. En effet, dans un réseau électrique les seules énergies stockées sont l'énergie cinétique et l'énergie des condensateurs, toutes formes de charges très sensibles aux perturbations engendrent des pertes sur l'alimentation et peut causer l'interruption des différents processus de production, les consommateurs deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et une meilleure qualité, les entreprises de production et de distribution d'énergie électrique doivent s'assurer d'un bon approvisionnement régulier à cette demande afin de prouver une fiabilité dans leurs service.

D'autre part plus le réseau électrique plus chargé devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats crée beaucoup de problèmes peuvent survenir sur le réseau tel que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau etc...

De ce fait le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploiter. Les critères écologiques sont devenus incontournables : le choix et consommation de matières (impact minimum sur l'environnement) et d'énergie (recherche du meilleur rendement).

## II.2 Définitions

### II.2.1 Energie électrique

C'est la puissance électrique multipliée par le temps :

$$W = P \times t$$

W : énergie électrique, en joules (J)

P : puissance électrique, en watts (W)    t : temps, en secondes (s).

## II.2.2 Système d'énergie

C'est l'ensemble des chaînes de transformations énergétiques dans toutes ses formes et dans un cycle fermé.

## II.2.3 Système d'énergie électrique

C'est un sous ensemble des systèmes énergétiques. Il a pour objectif de traiter l'aspect électrique et de mettre en évidence les composantes de :

- Traitement de l'énergie primaire
- Transformation en énergie électrique
- Transport jusqu'à sa consommation

## II.3 Nature et exploitation des réseaux électriques

Certains paramètres propres à l'installation électrique du système étudié vont orienter et déterminer les calculs nécessaires à effectuer.

### II.3.1. Types de sources

- puissance de court-circuit,
- régulations de vitesse et de tension,
- pollution harmonique,
- normale/secours ;

### II.3.2. Types de récepteurs

- puissances (active/réactive, installée/absorbée),
- caractéristiques de fonctionnement (mise en service, sensibilité aux perturbations),
- déséquilibre des phases,
- pollueurs harmoniques,
- impératifs du système électrique suivant les charges (normales / essentielles / vitales) ;



### II.3.2. Schéma du réseau

- niveau(x) de tension,
- structure (radiale, boucle, alimentations double/simple, jeux de barres double/simple),
- configurations (normale/secours, redondance),
- schémas des liaisons à la terre,
- longueurs des liaisons,
- compensation de réactif,
- type des appareils de manœuvre,
- contraintes de maintenance ;

### II.3.3 Normes et usages locaux

C'est à partir de cette analyse que se dégagent les types d'étude apportant une solution quantitative aux problèmes à résoudre.

### II.4 Calculs nécessaires

L'objectif des calculs est d'analyser et prévoir les réactions du système aux diverses sollicitations ; leur portée touche l'élaboration de l'architecture, les choix des caractéristiques des matériels et les règles d'exploitation.

Dans les chapitres suivants sont développés les aspects de :

- sûreté de fonctionnement,
- régime permanent,
- court-circuit,
- protection,
- stabilité,
- harmoniques,
- surtensions,
- compatibilité électromagnétique -CEM-,

## II.5. Choix stratégiques de l'onde électrique

Les réseaux électriques actuels utilisent un courant alternatif triphasé sinusoïdal. Ce choix décisif découle d'un ensemble de raisons que nous présentons ici.

### II.5.1. Grandeurs électriques importantes

Les grands réseaux électriques nécessitent la surveillance constante de certains paramètres afin de maintenir le réseau, ainsi que les installations de production et de consommation qui y sont raccordées, dans les domaines d'utilisation prévus. Les principales grandeurs à surveiller sont la fréquence, la tension, l'intensité dans les ouvrages, et la puissance de court-circuit.

### II.5.2. Surveillance de la tension

Un grand réseau électrique possède de multiples niveaux de tension. Chaque niveau de tension est conçu pour une plage d'utilisation bien spécifique. Des tensions légèrement trop élevées conduisent à une usure prématurée du matériel, puis si elles sont franchement trop élevées à un « claquage » de l'isolant (cas des câbles souterrains, des câbles domestiques, ou des isolateurs des lignes électriques). Les surtensions très élevées (par exemple causées par la foudre) sur des conducteurs « nus » (c'est-à-dire sans isolant, ce qui est le cas des lignes électriques) peuvent conduire à des amorçages avec des objets proches, par exemple des arbres.

Bien que les plages d'utilisation des matériels spécifient une marge de 5 à 10 % par rapport à la tension nominale, les grands opérateurs de réseaux privilégient actuellement une exploitation plutôt en tension haute car cela limite les pertes joules dans le réseau.

### II.5.3. Nécessité de transporter l'électricité à une tension élevée

De la sortie de la centrale électrique au compteur de l'utilisateur final, l'électricité doit transiter sur un réseau électrique. Ces réseaux possèdent souvent la même structure d'un pays à l'autre, car le transport de fortes puissances sur de longues distances impose la minimisation de l'effet Joule.

Le transport d'électricité entraîne des pertes dues à l'effet Joule, qui dépendent de l'intensité  $I$ , de la tension  $U$  et de la résistance  $R$  de la ligne. Pour du courant triphasé on obtient :

$$P_{\text{Pertes Joule}} = RI^2 = R \frac{P^2_{\text{électrique}}}{3.U^2}$$

#### II.5.4. Courant alternatif ou continu

Le transport de puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées. Il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre ; or ils ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Les changements de tension sur un système à courant continu n'est pas aussi efficace (plus de pertes) qu'en alternatif (transformateur). Le gain de l'élévation de tension serait contrebalancé par les pertes plus importantes lors des phases d'abaissement de la tension. De plus la coupure des courants dans les disjoncteurs est facilitée par le passage répétitif à zéro du courant alternatif. Ce dernier entraîne quand même des contraintes d'utilisation, notamment les 2 suivantes :

- l'existence d'effets inductifs et capacitifs dans les lignes électriques qu'il faut compenser afin d'en limiter les effets sur la tension ;
- la création d'un effet de peau qui concentre le courant à la périphérie des câbles électriques, augmentant ainsi les pertes Joules et nécessitant dans certains cas des dispositions particulières.

Le courant alternatif s'est imposé dans presque tous les réseaux, mais le courant continu reste encore intéressant pour certains projets particuliers où le recours à des stations de conversion onéreuses est nécessaire (exemple des interconnexions sous-marines ou celles de très longues distances où il limite la perte en ligne).

## II.6. Les phénomènes électriques dans les réseaux

Un réseau électrique est un système composé de différents objets (composants, matériels et équipements électriques) qui s'influencent mutuellement.

Le fonctionnement du système dans le temps et dans l'espace est le résultat de toutes ces interactions, conformément aux lois de l'électricité.

Celles-ci sont décrites par un ensemble d'équations qui relient entre elles les grandeurs de tensions, courants, impédances, temps. La classification des phénomènes électriques selon le critère des temps de réaction du système (constantes de temps) définit des comportements typiques qui sont à traiter spécifiquement :

- En discontinu : suspension momentanée d'alimentation,
- Dynamique lente : évolution habituelle des régimes de marche,
- Stationnaire : régime stable permanent,
- Dynamique rapide : influence du régime variable des machines tournantes,
- Electromagnétique conduit : influence de la propagation filaire des ondes,
- Electromagnétique rayonné : manifestation du rayonnement.

✓ Les principaux événements associés à ces classes de phénomènes auront des effets infinis très divers sur le réseau :

- Interruption et coupure de la fourniture d'énergie électrique,
- Creux et variations de tension,
- Courants transitoires,
- Harmoniques,
- Courts-circuits,
- Oscillations électromécaniques,
- Surtensions de manœuvre, de commutation, d'arc et de transitoire de rétablissement,
- Surtension de foudre,
- Couplage entre courant fort et courant faible.

Les effets listés se manifestent quantitativement en fonction de la nature des réseaux et des exigences d'exploitation.

Pour une même puissance électrique transmise par la ligne et à résistance égale, les pertes par effet Joule diminuent donc comme le carré de la tension : elles sont divisées par quatre quand la tension double. Ainsi, une ligne d'une centaine de km avec une résistance de  $10 \Omega$  sur laquelle circule 400 MW entraînerait environ 4 MW de perte Joules si elle était exploitée à 200 kV, mais seulement 1 MW si elle était exploitée à 400 kV.

L'enjeu de ces pertes peut se mesurer aux montants d'énergie très importants que cela représente .

Les coûts de construction d'une ligne à 400 kV, 20 kV ou 230 V sont cependant très différents. Il faut donc trouver un optimum technico-économique entre les différents niveaux de tension, au vu du gain espéré (relatif à la diminution des pertes par effet Joule). On arrive ainsi à une structure multicouches des réseaux électriques, avec les réseaux transportant de grandes quantités d'énergie exploités à des tensions de plusieurs centaines de kilovolts, et la tension diminuant au fur et à mesure que les puissances transportées décroissent

## II.7. Problématiques de l'intensité

L'intensité est un paramètre particulièrement important à surveiller car elle peut entraîner la destruction de matériel coûteux (les transformateurs et les câbles), ou bien mettre en danger la sécurité des biens et des personnes (cas des lignes aériennes). (Intensité Maximale Admissible en Permanence) est l'intensité maximale à laquelle un ouvrage peut être exploité sans limitation de durée. Afin de faciliter l'exploitation des réseaux électriques, certains ouvrages peuvent être exploités à une intensité supérieure à intensité maximale admissible en permanence, mais pendant une durée limitée. De plus, certains ouvrages sont munis de protections particulières qui les mettent en sécurité si l'intensité dépasse une certaine valeur pendant une durée définie.

Le problème créé par une intensité trop élevée (c'est-à-dire une puissance transmise élevée) est un échauffement par effet Joule important. La conséquence de cet échauffement se manifeste de différente manière selon les ouvrages considérés :

- pour **les câbles électriques** (présence d'une gaine isolante) : la chaleur produite par le câble doit être évacuée par l'intermédiaire de l'isolant électrique, qui est souvent mauvais conducteur de chaleur. De plus, les câbles étant souvent souterrains, cette chaleur s'évacue d'autant plus mal : en cas d'intensité trop élevée, le risque est la destruction physique du câble par surchauffe.
- pour **les transformateurs** : les enroulements des transformateurs sont en général immergés dans un bain d'huile qui joue le rôle d'isolant électrique mais également de

fluide caloporteur aéroréfrigérant. En cas d'intensité trop élevée, l'huile ne peut plus évacuer assez de chaleur et les enroulements risquent de se détériorer par surchauffe.

- pour les lignes électriques aériennes (absence de gaine isolante) : les conducteurs s'échauffant par effet Joule, ils vont aussi s'allonger par le phénomène de dilatation thermique ; la ligne électrique étant maintenue à chaque extrémité par un pylône, cet allongement va se matérialiser par une réduction de la hauteur entre la ligne et le sol, ce qui conduit à un amorçage (arc électrique créant un court-circuit) au vu des tensions importantes utilisées dans ces réseaux. Heureusement des protections sont installées sur les lignes pour éviter de tels amorçages qui sont bien sûr extrêmement dangereux

### II.7.1. Intensité de court-circuit

### II.7.2. Courant de court-circuit

L'intensité de court-circuit (abrégée  $I_{cc}$ ) est une grandeur théorique qui correspond au courant que l'on pourrait mesurer en un point du réseau si ce point était relié directement à la terre. Elle est égale au courant circulant dans un ouvrage lors d'un défaut triphasé franc à la terre (c'est-à-dire qui relie directement les 3 phases à la terre). L' $I_{cc}$  est fournie principalement par les groupes de production.

Elle est élevée dans les nœuds du réseau que sont les postes électriques (sur le réseau 400 kV européen, les valeurs sont de l'ordre de 30 à 50 kA). L' $I_{cc}$  devient de plus en plus faible au fur et à mesure que les niveaux de tension décroissent et que l'on s'éloigne des postes électriques.

Les matériels utilisés dans les postes électriques sont conçus pour résister à une valeur maximale d' $I_{cc}$  : au-delà, il y a un risque de casse de matériel en cas de court-circuit (causé par la foudre, le givre, une rupture de matériel...) Les bris de cette nature sont notamment causés par des phénomènes électrodynamiques puissants qui ont lieu lorsque des conducteurs sont soumis à des courants exceptionnellement forts.

Un réseau électrique a cependant tout intérêt à avoir une  $I_{cc}$  élevée. En effet, cela permet l'amortissement des perturbations émises par les grandes industries (problème des flickers), ainsi qu'une réduction des chutes de tension lors des courts circuits sur le réseau. Pour le consommateur, le courant de court circuit correspond à l'intensité maximum que peut fournir le réseau : une  $I_{cc}$  suffisante est donc indispensable au démarrage des gros moteurs électriques. De manière générale, une  $I_{cc}$  élevée maintient une bonne qualité de l'onde électrique fournie aux consommateurs.

### II.7.3. Conséquences des défauts:

Les effets néfastes des courts-circuits sont surtout à redouter sur les réseaux HT sur lesquels débitent des groupes générateurs de forte puissance.

Les courts-circuits, surtout lorsqu'ils sont polyphasés et proches des centrales, entraînent une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur ; s'ils ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent conduire à la perte de stabilité de groupes générateurs et à des fonctionnements hors synchronisme préjudiciables aux matériels.

Le temps d'élimination des courts-circuits est dans l'ordre de 100 à 150 ms sont en général considérés comme des valeurs à ne pas dépasser sur les réseaux HT.

### II.7.4. Tenue des matériels

Les courts-circuits provoquent des surintensités violentes qui, dans le cas de défauts triphasés, peuvent dépasser **20 à 30** fois le courant de service normal. Ces surintensités amènent deux types de contraintes :

- Des contraintes thermiques dues au dégagement de chaleur par effet Joule dans les conducteurs ;
  
- Des contraintes mécaniques dues aux efforts électrodynamiques ; ceux-ci entraînent notamment le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs ; ces efforts, s'ils dépassent les limites admises lors de la construction, sont souvent à l'origine d'avaries graves. De plus, l'arc électrique consécutif à un court-circuit met en jeu un important dégagement local d'énergie pouvant provoquer des dégâts importants aux matériels et même être dangereux pour le personnel travaillant à proximité. C'est le cas, par exemple, des matériels sous enveloppe métallique sur lesquels les courts-circuits internes sont susceptibles d'entraîner le percement des enveloppes.

### II.7.5. Qualité de la fourniture

Dans la plupart des cas, les courts-circuits se traduisent pour les utilisateurs par des chutes de tension dont l'amplitude et la durée sont fonction de différents facteurs tels que nature de court-circuit, structure du réseau affecté, mode d'exploitation du réseau, mode de mise à la terre du neutre, performances des protections, etc.

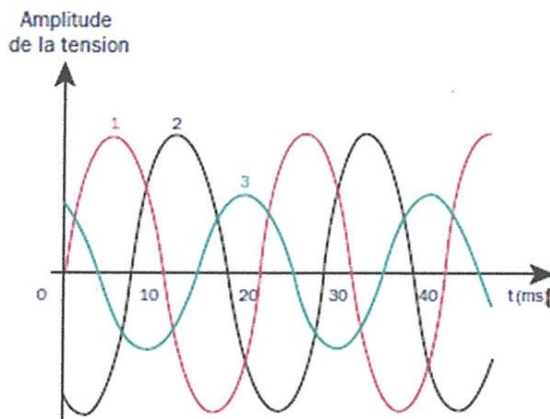
Ces perturbations peuvent aller du creux de tension ou de la microcoupure jusqu'à l'interruption complète de fourniture.

## II.8. Dégradation de la tension

### II.8.1 Généralité :

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le la qualité de fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées:

- ▶ Basse fréquence < (9 kHz)
- ▶ haute fréquence > (9kHz)
- ▶ décharges électrostatiques



La mesure de la qualité d'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) sont :

- Variations et fluctuations de tension
- Variations ou fluctuations de la fréquence



- creux de tension et coupures
- les harmoniques
- déséquilibres de tension
- les surtensions.

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations. Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

### II.8.2. Variations et fluctuations de tension :

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale.

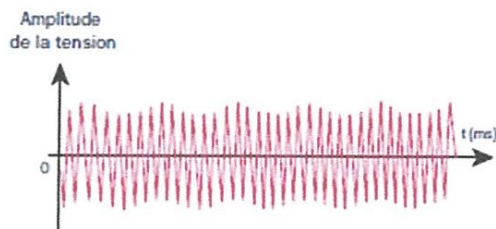


Figure 3 : variations rapides de tension

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc.

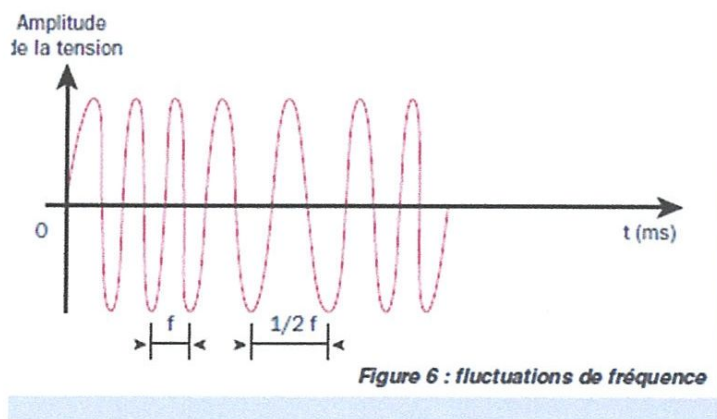
Les fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (Flicker), gênant pour les consommateurs.

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cyclique ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les tours à arc, les laminoirs.

### II.8.3. Variations ou fluctuations de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans les conditions normales de fonctionnement la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50\text{Hz} \pm 1\%$ .



## II.9. Creux de la tension et coupures

### II.9.1. Origine

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude,

d' autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source et de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- Des défauts de surintensité sur le réseaux de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle même,
- la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.
- Enclenchement des appareils de protection.

### II.9.2. Définition

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseaux d'énergie électrique, a une valeur comprise entre 90 % et 10 % d'une tension de référence suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseaux (10 ms a 50 Hz) et une minute.

La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée pour les réseaux MT et HT. Une tension de référence glissante, égale a la tension avant perturbation, peut aussi être utilisée sur les réseaux MT et HT équipés de système de réglage (régleur en charge) de la tension en friction de la charge. Ceci permet d'étudier (à l'aide de mesures simultanées dans chaque réseaux) le transfert des creux entre les différents niveaux de tension.

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont donnés :

- sa profondeur :  $\Delta U$  ou son amplitude  $U$ ,
- sa durée  $\Delta T$ , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90%.

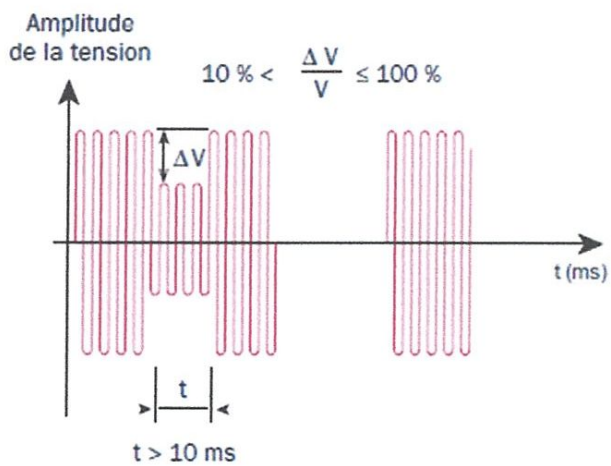


Figure 1 : les creux de tension

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieures 90 %. Elles sont caractérisées par un seul paramètre (la durée). Les coupures brèves sont de durée inférieure à 3 minutes.

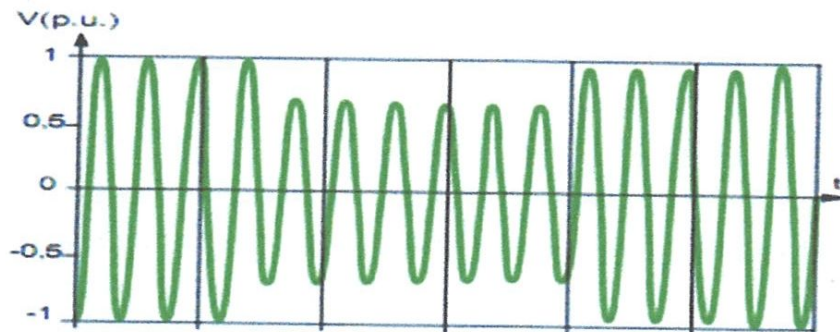


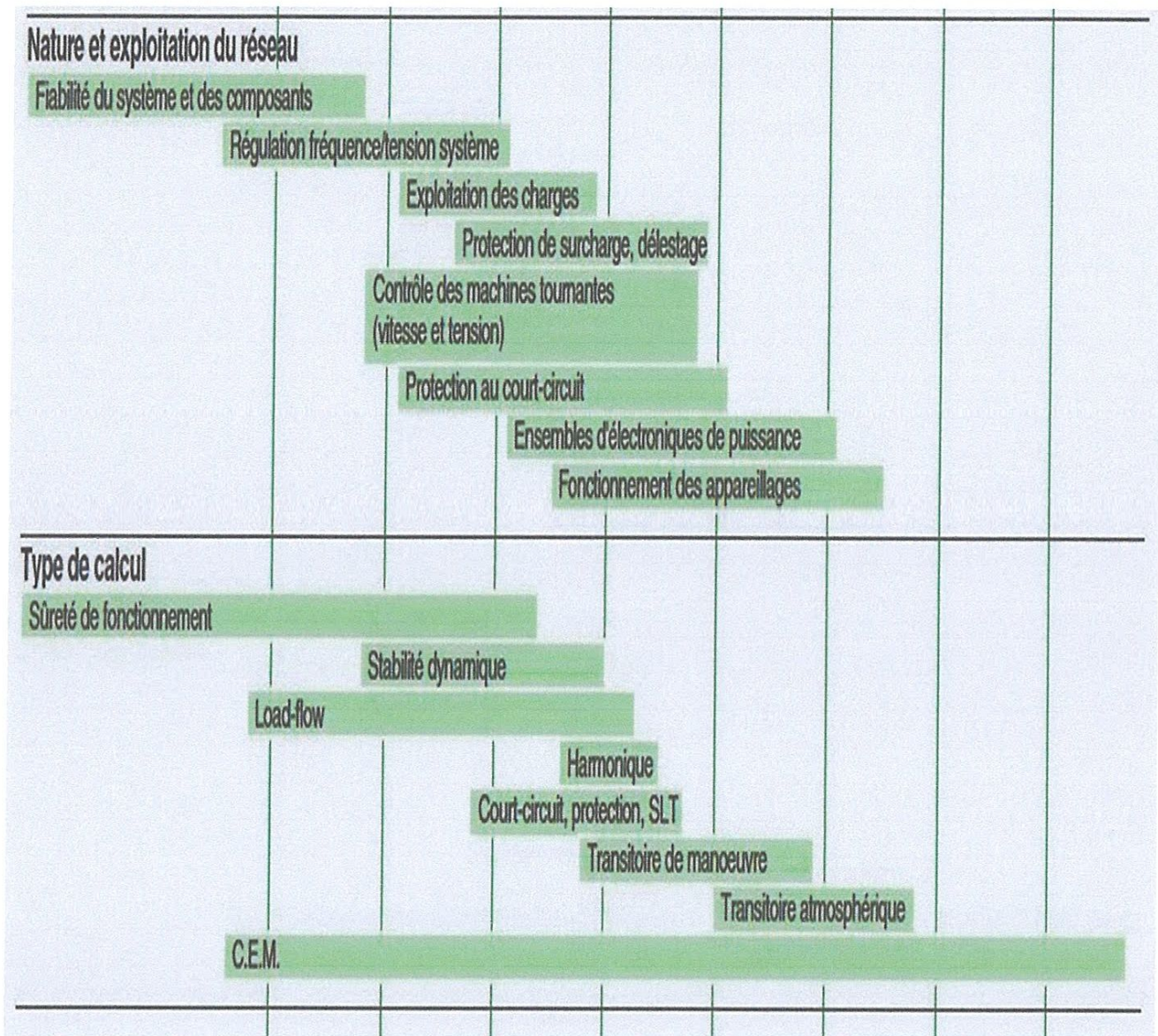
Fig. 2 : paramètres caractéristiques d'un creux de tension.

### II.9.3. Tableau de synthèse

Le tableau de synthèse, est un tableau qui résume sur une double échelle temps / fréquence, les informations développées aux paragraphes précédents :

- classes de phénomènes,
- évènements électriques,
- exploitation et nature des réseaux,
- types de calcul.

Temps	110 s	11 s	10,1 s	110 ms	11 ms	10,1 ms	10,01 ms	11 $\mu$ s
Fréquence	10,1 Hz	11 Hz	110 Hz	1100 Hz	11 kHz	110 kHz	1100 kHz	11 MHz
<b>Classe de phénomènes</b>								
Discontinu	Dynamique lente			Dynamique rapide		Electromagnétique rayonné		
			Stationnaire	Electromagnétique conduit				
<b>Evènements électriques</b>								
Interruptions de fourniture, coupures	Creux, variation tension			Courants transitoires		Surtensions de manœuvre, de commutation, d'arc TTR		
		Oscillations électromécaniques	Harmoniques, flicker		Surtensions de foudre			
		Court-circuit	Couplages courants forts/faibles					



#### II.9.4. Caractéristiques de la qualité de l'énergie électrique :

Pour le bon fonctionnement des appareils, matériels, instruments.

Le consommateur de l'énergie électrique exige d'avoir une alimentation en énergie dans des conditions bien déterminées, pour la réalisation des gains de productivité (économique de fonctionnement ou réduction des coûts d'exploitations) il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie.

Le bon fonctionnement n'est assuré que par une meilleure qualité d'énergie électrique pour la satisfaction des besoins des clients.

Pour rappel la tension possède quatre caractéristiques principales, qui définissent la qualité d'énergie électrique soit :

- Déviation de la tension
- déviation de la fréquence
- taux de distorsion des harmoniques
- symétrie de la tension.

# TROISIEME CHAPITRE

## Etude et Elaboration d'un Réseau



### III. Elaboration d'un réseau électrique

#### III.1. Données initiales du réseau

Il s'agit de recueillir le maximum de données qui vont permettre de concevoir le réseau et définir les matériels, identifier les problèmes, aux besoins de satisfaire des contraintes imposées. Le choix des paramètres permet de dimensionner les équipements à partir des résultats de calculs effectués.

Le réseau à élaborer doit assurer l'interconnexion de quatre (4) centres de consommation, ces derniers sont représentés par les charges de puissance **S1**, **S2**, **S3**, **S4**.

La tension  $U_N$  et les puissances  $S_i$  permettent de réaliser des calculs dans une procédure simple. Ayant une tension et une puissance de charge, on peut calculer branche après branche en allant progressivement de  $k=n$  jusqu'à  $k=i$ . Puisque le schéma équivalent est le même pour toutes les branches, il suffit d'écrire la procédure pour une branche.

Ce travail consiste à déterminer le schéma le plus adéquat pour l'alimentation des 4 centres de charges à partir d'une source donnée. Les conditions du choix de ce schéma doivent se conformer à des critères technico-économiques.

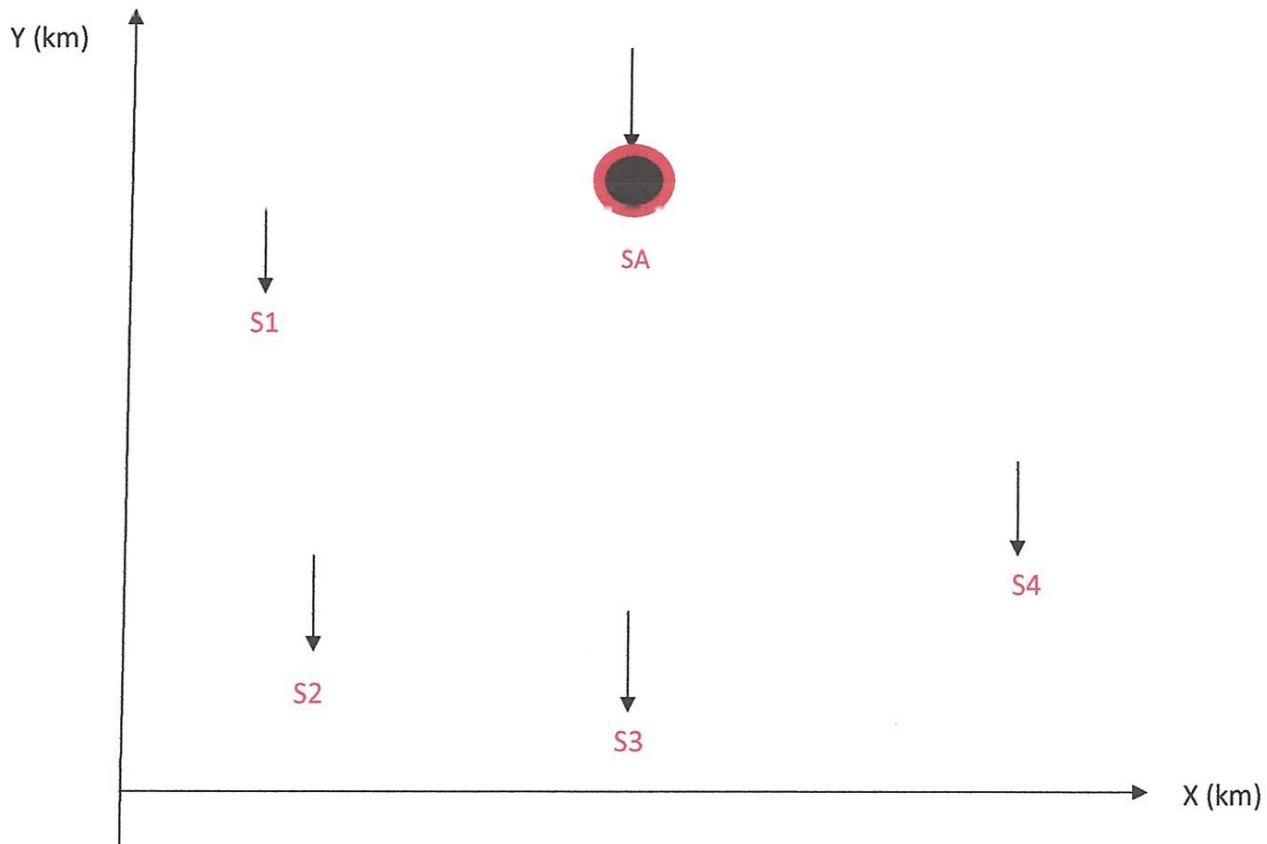
Dans ce cas, il peut être nécessaire d'installés un poste local dans le lieu le plus adéquat, défini comme centre de « gravité » des charges.

$S_i$ (MVA)	$P_i$ (KW)	$Q_i$ (MVAR)	$X_i$ (Km)	$Y_i$ (Km)
<b>S 1</b>	80	60	15	69
<b>S 2</b>	50	50	20	28
<b>S 3</b>	60	40	60	22
<b>S 4</b>	60	50	130	40

Tableau (3.1) : Données initiales du réseau à étudier.

Ce lieu est généralement déterminé dans une étape préliminaire à partir de l'équilibre des moments électriques de toutes les charges en interaction. La procédure consiste donc à représenter les charges par leurs coordonnées dans un repère orthogonal;

Ensuite à partir d'un plan d'implantation réel des charges et en utilisant une échelle convenable, on représente le plan des charges comme sur la figure (3.1), cette figure où la source  $SA$ , est donc donnée par des coordonnées  $(X_I, Y_I)$ . Pour plus de possibilités, il est nécessaire de considérer le cas d'une installation d'un poste local dans le centre des charges.



Fig(3.1) : Plan de charge

Le centre des charges peut être déterminé par la notion des moments électriques comme suit :

$$X_s = \frac{\sum P_i X_i}{\sum P_i} = \frac{P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}$$

$$= \frac{(80.15) + (50.20) + (60.60) + (60.130)}{80+50+60+60} = 54,4 \text{ km}$$

$$Y_s = \frac{\sum P_i Y_i}{\sum P_i} = \frac{P_1 Y_1 + P_2 Y_2 + P_3 Y_3 + P_4 Y_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}$$

$$= \frac{(80.69) + (50.28) + (60.22) + (60.40)}{80+50+60+60} = 42,56 \text{ km}$$

L'application numérique donne :

$$X_s = 54,4 \text{ Km}$$

$$Y_s = 42,56 \text{ Km}$$

On détermine ainsi le lieu du poste local (SA) du centre des charges de coordonnées  $(X_i, Y_i)$ , mais pour rendre commode la formation des variantes du schéma, le lieu a été déplacé de manière plus convenable.

### III.2. Choix des niveaux de tension

Le niveau de la tension d'alimentation dépend de :

- La puissance à transmettre et de la longueur,
- La puissance de court circuit minimal requise,
- Des perturbations générées et tolérées par l'installation,

Pour une longueur et une puissance données, la tension ne doit pas être inférieure à une valeur déterminée.

Le choix de la tension nominale est effectué à partir d'une analyse technoeconomique, le choix de la tension peut être déterminé par les expressions dans lesquelles on tient compte de ces derniers critères qui sont :

Pour :  $L \leq 250 \text{ km}$  ;  $P \leq 60 \text{ MW}$   $\implies$

$$U = 4,34 \cdot \sqrt{L(\text{km}) + 0,016 \cdot P(\text{kw})}$$

Pour :  $L \leq 1000 \text{ km}$  ;  $P > 60 \text{ MW}$   $\implies$

$$U = \sqrt{P(\text{kw}) \cdot [0,1 + 0,015 \cdot \sqrt{L(\text{km})}]}$$

Comme dans les expressions du calcul de la tension nominale nous devrions utiliser une longueur qui est la plus grande distance de chaque charge par rapport au centre des charges « SA », cette longueur est déterminée en utilisant l'expression suivante :

$$L = \sqrt{(X4 - X1)^2 + (Y1 - Y4)^2}$$

$$\underline{A.N} : \sqrt{(130 - 15)^2 + (69 - 40)^2} = 118,60 \text{ km}$$

Avec :  $P_1 = 80 \text{ MW}$

$$U = 4,34 \cdot \sqrt{118,60 + 0,016 \cdot 80000} = 162 \text{ Kv} \quad U_N \geq U$$

$$U = \sqrt{80 \cdot 10^3 [0,1 + 0,015 \cdot \sqrt{118,60}]} = 145,15 \text{ kv} \quad U_N \geq U$$

	<b>LA1</b>	<b>LA2</b>	<b>LA3</b>	<b>LA4</b>
<b>P(MW)</b>	80	50	60	60
<b>L (Km)</b>	50	95	135	185
<b>U(KV)</b>	<b>158,27</b>	<b>129,83</b>	<b>143,61</b>	<b>146,85</b>

Tableau 3.2 : Résultats des valeurs de tensions calculées entre les nœuds.

### III.3. Choix des variantes de configuration du réseau

Le choix de la configuration du réseau de transport doit répondre essentiellement aux conditions suivantes :

- Dépense réduites minimales (critère technico-économique).
- Continuité du service des récepteurs en cas d'incidents au niveau du réseau.

Exemple : (coupure de ligne, court-circuit...).

### III.4. Fiabilité de fonctionnement

Une procédure, généralement usitée, consiste à déterminer un certain nombre de variantes équivalentes du point de vue continuité de service et fiabilité ; ensuite à opérer une analyse comparative par rapport aux dépenses, réduites minimales (critère technico-économique) pour arrêter le choix final du modèle à élaborer. Cette procédure se particularise par sa simplicité et donne des résultats largement satisfaisants.

Il existe d'autres méthodes de détermination de la configuration optimale du réseau et d'autres conditions complémentaires pour renforcer sa fiabilité. Dans le souci de rechercher le modèle, éventuellement le plus adéquat, on se propose d'étudier et de comparer des deux possibilités offertes :

- Le réseau régional est alimenté à partir du réseau de transport passant à proximité de la région, (source SA).

- Le réseau en question est alimenté à partir d'une source locale (SB), installée au centre des charges; laquelle est alimentée par la source «A». Dans cette deuxième possibilité, il est nécessaire d'adjoindre et de soumettre à l'analyse comparative l'étude du réseau de liaison entre les deux sources.

### III.5. Détermination des paramètres de différentes variantes

Du fait que le réseau est au stade de l'étude les paramètres du système sont à choisir à partir du choix de la section; laquelle doit être déterminée à partir des puissances de circulation dans les lignes. Dans ces conditions, il est d'usage que la puissance de ligne soit calculée en supposant que dans cette première étape d'étude, la tension des nœuds est en moyenne égale à la tension nominale et que toutes les branches ont la même section et sont données simplement par leurs longueurs.

Ces conditions font également que les pertes de puissance respectives des lignes ne sont prises en compte qu'après la détermination des paramètres de lignes.

### III.6. Choix du modèle de schéma

Pour le choix du modèle de schéma on peut présenter 2 types de modèle suivant :

- Réseau régional qui est alimenté directement du  $P_i$
- Réseau inter-régional qui est alimenté à partir du  $P_i$ , mais par l'intermédiaire d'un poste installé dans le centre des charges du réseau.

On a proposé à l'étude, des calculs et comparaisons de variantes.

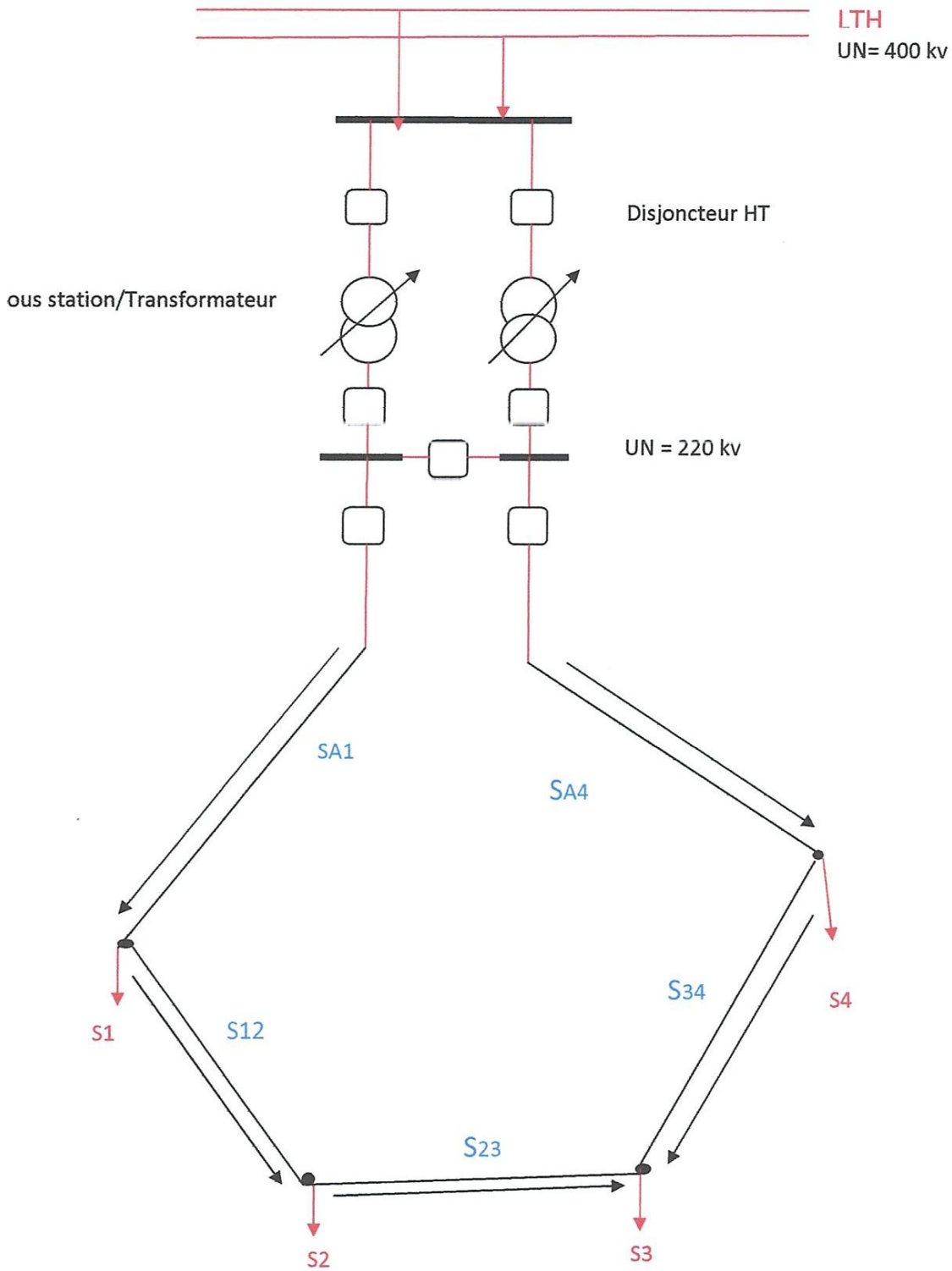


Fig 3.2 : Schéma de principe

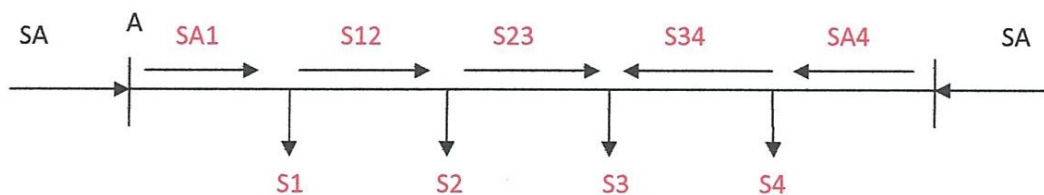
$L_{A1}$	$L_{12}$	$L_{23}$	$L_{34}$	$L_{A4}$	$L_{A3}$
50	45	40	50	45	70

Tableau(3.3) : Distance entre différents nœuds

On procède de la même manière que pour définir les coordonnées des autres charges :  
S2, S3, S4.

### III.6.1. Première variante

Le schéma de calcul de la première variante peut être comme une ligne magistrale alimentée des deux extrémités, pour ce calcul on donne un sens positif arbitraire de la circulation des puissances de ligne ainsi que leurs désignations.



$$SA1 = \sum_{i=1}^n \frac{S_i Z_{iA'}}{Z_{AA'}} \quad SA'4 = \sum_{i=1}^n \frac{S_i Z_{iA}}{Z_{AA'}}$$



L'application de ces formules pour le cas considéré donne :

$$S_{A1} = \frac{S_1 Z_{1A'} S_2 Z_{2A'} S_3 Z_{3A'} S_4 Z_{4A'}}{Z_{AA'}}$$

Comme  $r_0 + jx_0 = c^{ste}$ , l'expression peut être écrite pour les longueurs :

$$S_{A1} = \frac{S_1 L_{1A'} S_2 L_{2A'} S_3 L_{3A'} S_4 L_{4A'}}{L_{AA'}}$$

$$S_{A1} = \frac{(90 + j80)180 + (60 + j40)135 + (80 + j60)95 + (80 + j70)45}{230}$$

$$= (62,60 + j46,95) + (29,34 + j29,34) + (24,78 + j16,52) + (11,73 + j9,782) = 128,45 + j102,59 \text{ MVA}$$

$$S_{A1} = \mathbf{128,45 + j102,59 \text{ MVA}}$$

Analogiquement, on détermine  $S_{A'4}$  comme suit :

$$S_{A4} = \frac{(90 + j80)50 + (60 + j40)95 + (80 + j60)135 + (80 + j70)185}{230}$$

$$= (17,39 + j13,04) + (20,65 + j20,65) + (35,21 + j23,47) + (48,26 + j40,21) = 121,51 + j97,37$$

$$S_{A4} = \mathbf{121,51 \text{ MVA}}$$

Conformément à la loi des nœuds on peut déterminer de manière simple les autres puissances de ligne comme :

$$S_{A1} = \mathbf{128,45 + j102,59 \quad (MVA)}$$

$$S_{A4} = \mathbf{121,51 + j97,37 \quad (MVA)}$$

$$S_{12} = S_{A1} - S_1 = 48,45 + j42,59 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{23} = S_{12} - S_2 = -1,55 - j7,41 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{34} = S_{23} - S_3 = -61,55 - j47,41 \quad (\text{MVA})$$

Les résultats de calculs permettent de représenter le schéma en tenant compte du sens réel des puissances de ligne. On définit ainsi la section des puissances actives, réactives et apparentes localisée dans le nœud (3 trois), ce nœud renseigne sur le lieu où la tension est la plus basse.

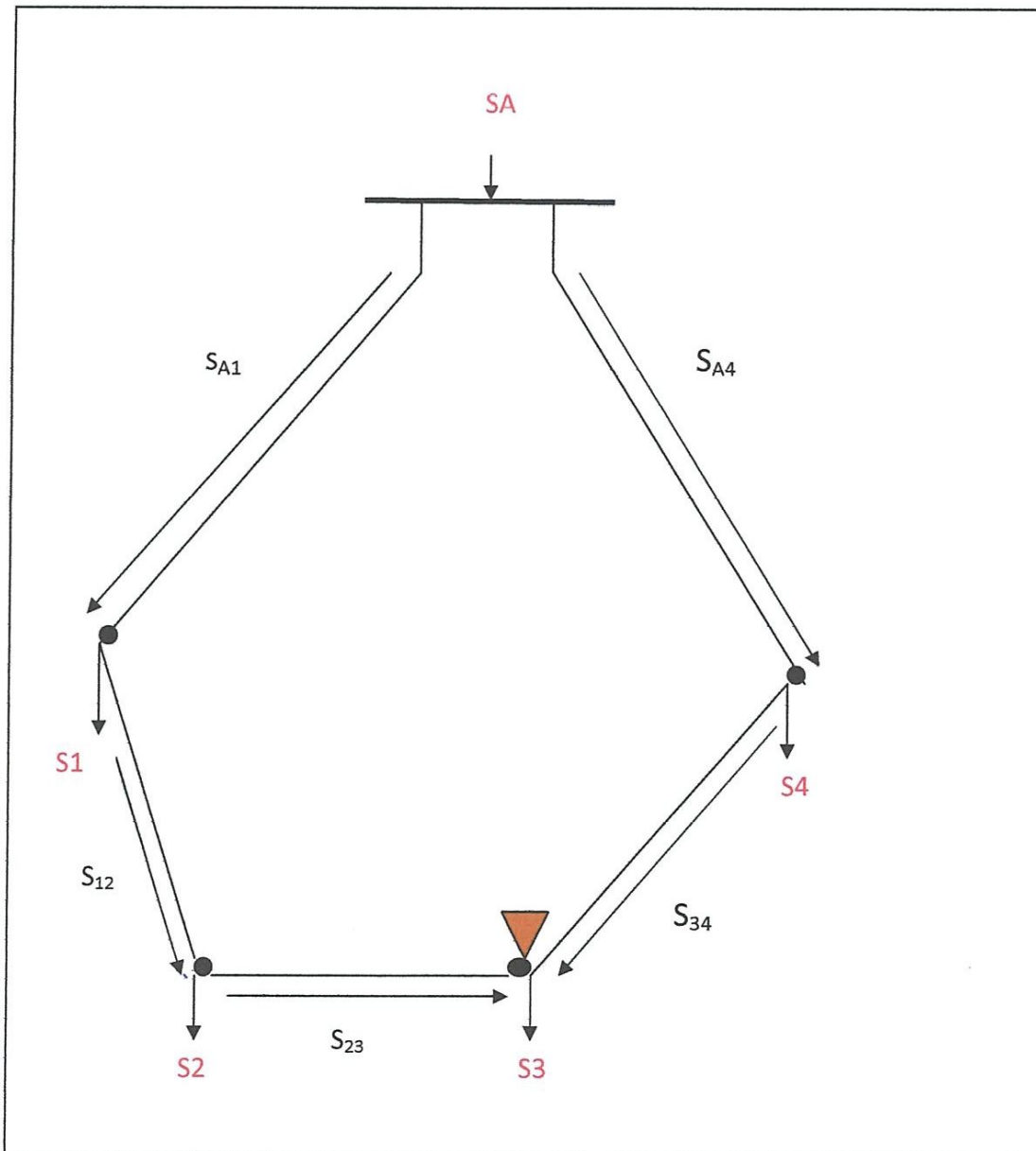


Fig 3.3 : schéma de principe avec identification du lieu où la tension est la plus basse.

**Deuxième variante:**

on se propose d'utiliser la méthode des puissances de contour. Pour déterminer le nombre de contour indépendants on doit déterminer d'abord le nombre de lignes (NL) et nombre de nœuds ( $N_N$ ).

Pour chaque contour choisi on donne une inconnue à déterminer ; soit  $S_x$  et  $S_y$ . Les autres puissances de ligne s'expriment (voir le schéma).

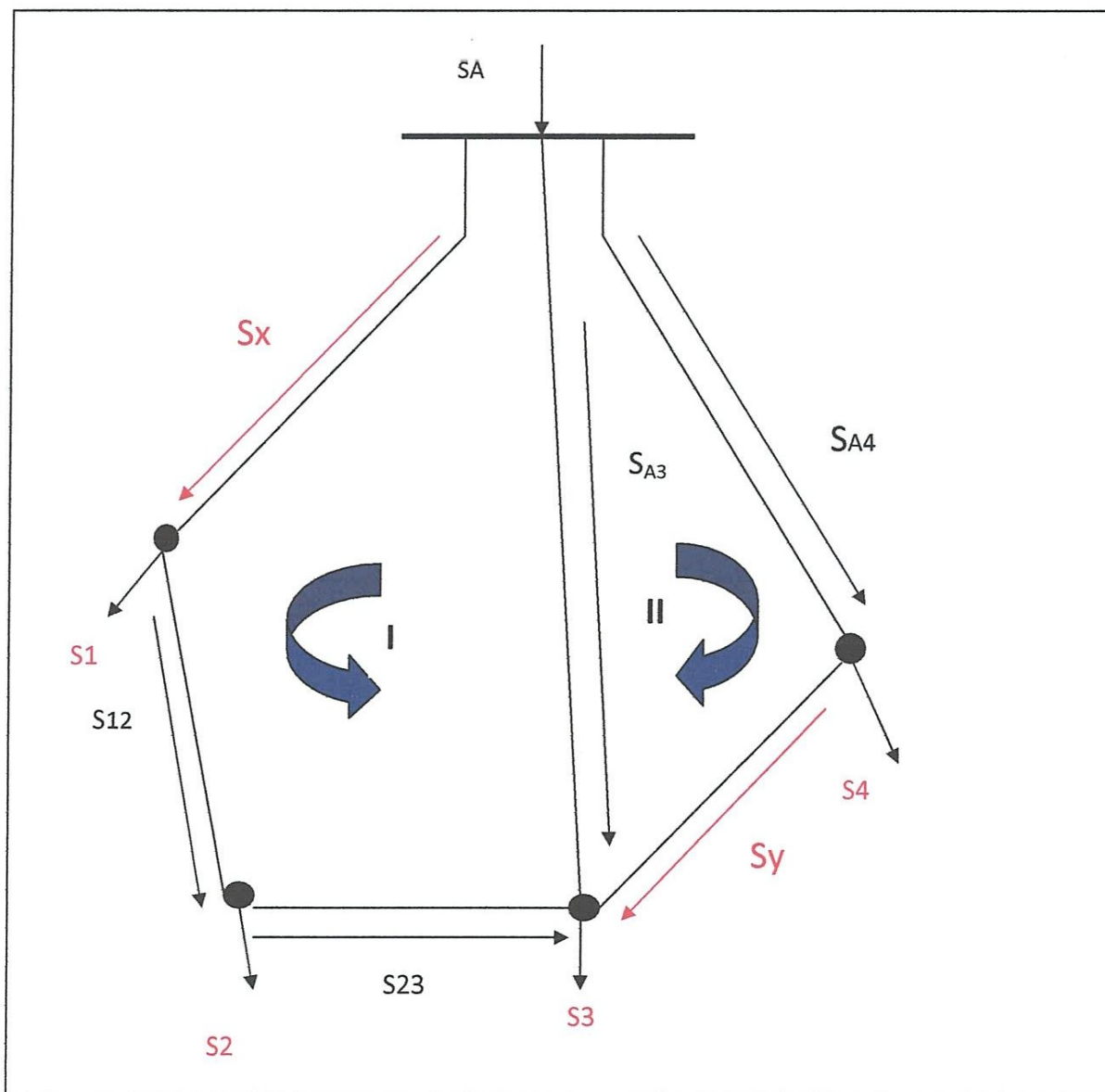


Figure 3.4 :

$$N_C = N_L - N_N$$

$$N_L = 3, N_N = 1$$

$$\Rightarrow N_C = 2$$

$$S_{12} = S_X - S_1 \quad (1)$$

$$S_{23} = S_X - S_1 - S_2 \quad (2)$$

$$S_{A4} = S_Y + S_3 \quad (3)$$

$$S_{A3} = S_1 + S_2 + S_3 - S_X - S_Y \quad (4)$$

Pour chaque contour on définit une équation :

$$\text{Contour I: } S_X L_{A1} + S_{12} L_{12} + S_{23} L_{23} - S_{A3} L_{A3} = 0 \quad (5)$$

$$\text{Contour II: } S_{A4} L_{A4} + S_Y L_{34} - S_{A3} L_{A3} = 0 \quad (6)$$

on remplace (1), (2) et (4) dans (5)

$$\text{On a : } (S_X - S_1) L_{12} + S_X L_{A1} + (S_X - S_1 - S_2) L_{23} - (S_1 + S_2 + S_3 - S_Y - S_X) L_{A3} = 0$$

$$\Rightarrow S_X (L_{A1} + L_{12} + L_{23} + L_{A3}) + S_Y L_{A3} - S_1 (L_{12} + L_{23} + L_{A3}) - S_2 (L_{23} + L_{A3}) - S_3 L_{A3} = 0$$

$$205 S_X + 70 S_Y - (80 + j 60) 155 - (50 + j 50) 110 - (60 + j 40) 70 = 0$$

$$205 S_X + 70 S_Y = \mathbf{22100 + j 17600} \quad (7)$$

On remplace (3), (2) et (4) dans (6)

$$\text{On a : } (S_Y + S_4) L_{A4} + S_Y L_{34} - (S_1 + S_2 + S_3 - S_Y - S_X) L_{A3} = 0$$

$$\Rightarrow S_X L_{A3} + S_Y (L_{A3} + L_{A4} + L_{34}) - (S_1 + S_2 + S_3) L_{A3} + S_4 L_{A4} = 0$$

$$70 S_X + 165 S_Y - 70 (80 + j 60) - 70 (50 + j 50) - 70 (60 + j 40) + 45(60 + j 50) = 0$$

$$70 S_X + 165 S_Y = \mathbf{16000 + j 12750} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 205 S_X + (70) S_Y = 22100 + j 17600 \\ 70 S_X + 165 S_Y = 16600 + j 12750 \\ S_X + (0,3414) S_Y = 107,804 + j 85,853 \\ S_X + (2,3571) S_Y = 237,142 + j 182,142 \end{cases}$$

$$\boxed{S_X - \frac{\Delta x}{\Delta} ; S_Y - \frac{\Delta y}{\Delta}}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0,3414 \\ 1 & 2,3571 \end{vmatrix} = 1 \times 2,3571 - 1 \times 0,3414 = \mathbf{2,0157}$$

$$\Delta x = \begin{vmatrix} 107,804 + j 85,853 & 0,3414 \\ 237,142 + j 182,142 & 2,3571 \end{vmatrix}$$

$$= (107,804 + j 85,853) 2,3571 - (237,142 + j 182,142) 0,3414$$

$$= 107,804 \times 2,3571 - 237,142 \times 0,3414 + j 85,853 \times 2,3571 - 182,142 \times 0,3414$$

$$= \mathbf{173,1446 + j 140,1809}$$

$$\Delta y = \begin{vmatrix} 1 & 107,804 + j 85,853 \\ 1 & 237,142 + j 182,142 \end{vmatrix}$$

$$= (237,142 + j 182,142) - (107,804 + j 85,853)$$

$$= (237,142 - 107,804) + j (182,142 - 85,853) = \mathbf{129,338 + j 96,289}$$

$$S_x = \frac{173,1446 + j 140,1809}{2,0157} = \frac{173,1446}{2,0157} + j \frac{140,1809}{2,0157} = \mathbf{85,898 + j 69,544}$$

$$S_y = \frac{129,338 + j 96,289}{2,0157} = \frac{129,338}{2,0157} + j \frac{96,289}{2,0157} = \mathbf{64,165 + j 47,769}$$

Les grandeurs  $S_x$  et  $S_y$  permettent de calculer toutes les autres puissances de ligne :

$$S_{12} = S_x - S_1 = 85,898 + j 69,544 - 80 + j 60 = \mathbf{5,898 + j 9,544} \quad \text{MVA}$$

$$S_{23} = S_x - S_1 - S_2 = 85,898 + j 69,544 - 80 + j 60 - 50 + j 50 = \mathbf{55,898 + j 59,544} \quad \text{MVA}$$

$$S_{A4} = S_y + S_4 = 64,165 + j 47,769 + 60 + j 50 = \mathbf{124,165 + j 97,769} \quad \text{MVA}$$

$$\begin{aligned} S_{A3} &= S_1 + S_2 + S_3 - S_x - S_y \\ &= (80 + j 60 + 50 + j 50 + 60 + j 40) - 85,898 + j 69,544 - 64,165 + j 47,769 \\ &= \mathbf{39,937 + j 32,687} \quad \text{MVA} \end{aligned}$$

### III.7. Comparaison des variantes

#### III.7.1. Choix des sections des conducteurs

Les choix de la section des conducteurs doit être fait conformément à un critère techno-économique. Pour cela on doit développer une analyse technoeconomique basée sur les dépenses réduites annuelles ( $D_r$ ) pour laquelle on doit rechercher le minimum ( $D_r = \min$ ).

La section économique calculée à partir de  $D_r$  doit répondre aux conditions limites admissibles concernant les effets suivants :

- > Echauffement
- > Effet couronne.
- > Chute de tension admissible (pertes de tension).

On peut faire le choix la section des conducteurs d'après la densité économique du courant selon la formule suivante :

$$F = \frac{I_{\max}}{j_{\text{éco}}}$$

D'où :  $I_{\max}$  : courant de ligne correspondante ou régime maximal de charge définie

par :

$$I_{\max} = \frac{S}{\sqrt{3} U_n}$$

$J_{\text{éco}}$  : densité économique ( $A/mm^2$ )

$F$  : section du conducteur ( $mm^2$ ).

✓ Application numérique de Calculs des courants max de la 1ère variante :

$$I_{\max_{A1}} = \frac{SA_4}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(128,45)^2 + (102,59)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{431,413 \text{ (A)}}$$

$$\Rightarrow F = \mathbf{500 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{12}} = \frac{S_{12}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(48,45)^2 + (42,59)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{169,290 \text{ (A)}}$$

$$\Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{23}} = \frac{S_{23}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(-1;55)^2 + (-7,41)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{19,016 \text{ (A)}}$$

$$\Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{34}} = \frac{\sqrt{(-61,55)^2 + (-47,41)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{203,009 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{A4}} = \frac{\sqrt{(121,51)^2 + (97,37)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{408,633 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{500 \text{ mm}^2}$$



✓ Application numérique de Calculs des courants max de la 2ème variante :

$$I_{\max_{12}} = \frac{\sqrt{(5,898)^2 + (9,544)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{29,443 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{23}} = \frac{\sqrt{(55,898)^2 + (59,544)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{214,330 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{A4}} = \frac{\sqrt{(124,165)^2 + (97,769)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{414,741 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{500 \text{ mm}^2}$$

$$I_{\max_{A3}} = \frac{\sqrt{(39,937)^2 + (32,687)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = \mathbf{135,436 \text{ (A)}} \quad \Rightarrow F = \mathbf{240 \text{ mm}^2}$$

La valeur de la densité économique doit être déterminée conformément au minimum des dépenses réduites du réseau.

Cette dernière dépend de plusieurs facteurs.

- Le temps d'utilisation de la charge maximale T max.

### III.7.2. Choix du type du réseau électrique

Pour un réseau de transport amant le graphique de charge est plus rempli que celui d'un réseau de distribution.

Ces considérations permettent de choisir  $J = 1 \text{ A/m m}^2$ , ainsi que le calcul des puissances de ligne qui permettent de choisir les sections des conducteurs de toutes les variantes.

Ainsi les calculs des puissances de lignes permettent de choisir les sections des conducteurs de toutes les variantes :

<b>Première variante</b>				
<b>Lignes</b>	<b>S (MVA)</b>	<b>I(A)</b>	<b>F (m m<sup>2</sup>)</b>	<b>Type</b>
<b>A - 1</b>	128,45 + j 102,59	431,413	500	ACO-500
<b>1 - 2</b>	48,45 + j 42,59	169,290	240	ACO-240
<b>2 - 3</b>	- 1,55 - j 7,41	19,016	240	ACO-240
<b>3 - 4</b>	-61,55 - j 47,41	203,89	240	ACO-240
<b>A -4</b>	121,51 + j 97,37	408,633	500	ACO-500
<b>Deuxième variante</b>				
<b>1 - 2</b>	5,898 + j 9,544	29,443	240	ACO-240
<b>2 - 3</b>	55,898 + j 59,544	214,330	240	ACO-240
<b>4 - A</b>	124,165 + j 97,769	414,741	500	ACO-500
<b>A - 3</b>	39,937 + j 32,687	135,436	240	ACO-240

Tableau 3.3:

### III.8. Détermination des paramètres des lignes :

D'après le tableau de résultats du choix des sections et à l'aide des abaques des paramètres Linéiques normalisés, on obtient le tableau suivant :

Première variante									
Lignes	L (km)	Types	n	$r_0$ ( $\Omega$ /km)	$x_0$ ( $\Omega$ /km)	$b_0 \cdot 10^{-6}$ ( $\Omega^{-1}$ /km)	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	b ( $\Omega^{-1}$ )
A - 1	50	ACO-500	1	0,065	0,410	2,79	3,25	20,05	457,56
1 - 2	45	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	5,85	19,35	329,84
2 - 3	40	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	5,2	17,2	329,84
3 - 4	50	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	6,5	21,5	329,84
4 -A	45	ACO-500	1	0,065	0,410	2,79	2,92	18,45	457,56

Deuxième variante									
Lignes	L (km)	Types	n	$r_0$ ( $\Omega$ /km)	$x_0$ ( $\Omega$ /km)	$b_0 \cdot 10^{-6}$ ( $\Omega^{-1}$ /km)	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	b ( $\Omega^{-1}$ )
1 - 2	45	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	5,85	19,35	436,24
2 - 3	40	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	5,2	17,2	436,24
4 - A	45	ACO-500	1	0,065	0,410	2,79	2,92	18,45	83,70
3 - A	70	ACO-240	1	0,130	0,430	2,66	9,1	30,1	436,24

### III.9. Pertes de puissances

Les pertes de puissances dans les lignes peuvent être calculées à partir de formule comme suit :

$$\Delta S = \frac{S^2}{UN^2} (r + jx) = \frac{S^2}{UN^2} r + j \frac{S^2}{UN^2} x \quad (\text{MVA})$$

✓ Application numérique de calculs des pertes de puissances de la 1<sup>ère</sup> variante :

$$\Delta S_{A1} = \frac{(S_{A1})^2}{UN2} r_{A1} + j \frac{(S_{A1})^2}{UN2} x_{A1}$$

$$S_{A1} = \sqrt{(128,45)^2 + (102,59)^2} = 164,3901 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_0 \times l$  et  $x=x_0 \times l$

$$\Rightarrow r_{A1} = r_0 \times l_{A1} = 0,065 \times 50 = 3,25 \text{ } (\Omega)$$

$$x_{A1} = x_0 \times l_{A1} = 0,410 \times 50 = 20,05 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{A1} = \frac{(164,3901)^2}{220^2} 3,25 + j \frac{(164,3901)^2}{220^2} 20,5 = 1,8146 + j 11,4461 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{12} = \frac{(S_{12})^2}{UN2} r_{12} + j \frac{(S_{12})^2}{UN2} x_{12}$$

$$S_{12} = \sqrt{(48,45)^2 + (42,59)^2} = 64,508 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_0 \times l$  et  $x=x_0 \times l$

$$\Rightarrow r_{12} = r_0 \times l_{12} = 0,130 \times 45 = 5,85 \text{ } (\Omega)$$

$$x_{12} = x_0 \times l_{12} = 0,430 \times 45 = 19,35 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{12} = \frac{(64,508)^2}{220^2} 5,85 + j \frac{(64,508)^2}{220^2} 19,35 = 0,5029 + j 1,6636 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{23} = \frac{(S_{23})^2}{UN^2} r_{23} + j \frac{(S_{23})^2}{UN^2} X_{23}$$

$$S_{23} = \sqrt{(-1,55)^2 + (-7,41)^2} = 7,5703 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_{0x}$  l et  $x=x_{0x}$  l

$$\Rightarrow r_{23} = r_0 \times l_{23} = 0,130 \times 40 = 5,2 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{23} = x_0 \times l_{23} = 0,430 \times 40 = 17,2 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{23} = \frac{(7,5703)^2}{220^2} 5,2 + j \frac{(7,5703)^2}{220^2} 17,2 = 0,0061 + j 0,0203 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{34} = \frac{(S_{34})^2}{UN^2} r_{34} + j \frac{(S_{34})^2}{UN^2} X_{34}$$

$$S_{34} = \sqrt{(-61,55)^2 + (-47,41)^2} = 77,6924 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_{0x}$  l et  $x=x_{0x}$  l

$$\Rightarrow r_{34} = r_0 \times l_{34} = 0,130 \times 50 = 6,5 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{34} = x_0 \times l_{34} = 0,430 \times 50 = 21,5 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{34} = \frac{(77,6924)^2}{220^2} 6,5 + j \frac{(77,6924)^2}{220^2} 21,5 = 0,8106 + j 2,6813 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{A4} = \frac{(S_{A4})^2}{UN^2} r_{A4} + j \frac{(S_{A4})^2}{UN^2} X_{A4}$$

$$S_{A4} = \sqrt{(121,51)^2 + (97,37)^2} = 155,7099 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r = r_0 \times l$  et  $x = x_0 \times l$

$$\Rightarrow r_{A4} = r_0 \times l_{A4} = 0,065 \times 45 = 2,92 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{A4} = x_0 \times l_{A4} = 0,410 \times 45 = 18,45 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{A4} = \frac{(155,7099)^2}{220^2} 2,925 + j \frac{(155,7099)^2}{220^2} 18,45 = 1,4652 + j 9,2423 \text{ (MVA)}$$

✓ Application numérique de calculs des pertes de puissances de la 2ème variante :

$$\Delta S_{12} = \frac{(S_{12})^2}{UN^2} r_{12} + j \frac{(S_{12})^2}{UN^2} X_{12}$$

$$S_{12} = \sqrt{(5,898)^2 + (9,544)^2} = 11,2193 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r = r_0 \times l$  et  $x = x_0 \times l$

$$\Rightarrow r_{12} = r_0 \times l_{12} = 0,130 \times 45 = 5,85 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{12} = x_0 \times l_{12} = 0,430 \times 45 = 19,35 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{12} = \frac{(11,2193)^2}{220^2} 5,85 + j \frac{(11,2193)^2}{220^2} 19,35 = 0,0152 + j 0,0503 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{23} = \frac{(S_{23})^2}{UN^2} r_{23} + j \frac{(S_{23})^2}{UN^2} X_{23}$$

$$S_{23} = \sqrt{(55,898)^2 + (59,544)^2} = 81,6705 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_{0x}$  | et  $x=x_{0x}$  |

$$\Rightarrow r_{23} = r_0 \times l_{23} = 0,130 \times 40 = 5,2 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{23} = x_0 \times l_{23} = 0,430 \times 40 = 17,2 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{23} = \frac{(81,6705)^2}{220^2} 5,2 + j \frac{(81,6705)^2}{220^2} 17,2 = 0,7166 + j 2,3703 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{A4} = \frac{(S_{A4})^2}{UN^2} r_{A4} + j \frac{(S_{A4})^2}{UN^2} X_{A4}$$

$$S_{A4} = \sqrt{(124,165)^2 + (97,769)^2} = 158,037 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r=r_{0x}$  | et  $x=x_{0x}$  |

$$\Rightarrow r_{A4} = r_0 \times l_{A4} = 0,065 \times 45 = 2,92 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{A4} = x_0 \times l_{A4} = 0,410 \times 45 = 18,45 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{A4} = \frac{(158,037)^2}{220^2} 2,925 + j \frac{(158,037)^2}{220^2} 18,45 = 1,5093 + j 9,5206 \text{ (MVA)}$$

$$\Delta S_{A3} = \frac{(S_{A3})^2}{UN^2} r_{A3} + j \frac{(S_{A3})^2}{UN^2} X_{A3}$$

$$S_{A3} = \sqrt{(39,937)^2 + (32,687)^2} = 51,608 \text{ (MVA)}$$

Avec :  $r = r_0 \times I$  et  $X = X_0 \times I$

$$\Rightarrow r_{A3} = r_0 \times I_{A3} = 0,130 \times 70 = 9,1 \text{ } (\Omega)$$

$$X_{A3} = X_0 \times I_{A3} = 0,130 \times 70 = 30,1 \text{ } (\Omega)$$

$$\Delta S_{A3} = \frac{(51,608)^2}{220^2} 9,1 + j \frac{(51,608)^2}{220^2} 30,1 = 0,500 + j 1,656 \text{ (MVA)}$$

$$\Rightarrow \Delta p = \frac{S^2}{UN^2} r \quad , \quad \Delta Q = \frac{S^2}{UN^2} X$$



Première variante							
lignes	n	S(MVA)	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	$\Delta_P$ (MW)	$\Delta_Q$ (MVAR)	$\Delta_S$ (MVA)
A - 1	1	164,3901	3,25	20,05	1,8146	11,4461	1,8146+ j 11,4461
1 - 2	1	64,508	5,85	19,35	0,5029	1,6636	0,5059+ j 1,6636
2 - 3	1	7,5703	5,2	17,2	0,0061	0,0203	0,0061+ j 0,0203
3 - 4	1	77,6924	6,5	21,5	0,8106	2,6813	0,8106+ j 2,6813
4 -A	1	155,7099	2,92	18,45	1,4652	9,2423	1,4652+ j 9,2423
Total	1				4,6024	25,0536	4,6024+ j 25,0536
Deuxième variante							
lignes	n	S(MVA)	r ( $\Omega$ )	x ( $\Omega$ )	$\Delta_P$ (MW)	$\Delta_Q$ (MVAR)	$\Delta_S$ (MVA)
1 - 2	1	40,2565	5,85	19,35	0,0152	0,0503	0,0152+ j 0,0503
2 - 3	1	30,6315	5,2	17,2	0,7166	2,3703	0,7166+ j 2,3703
4 - A	1	142,6287	2,92	18,45	1,5093	9,5206	1,5093+ j 9,5206
3 - A	1	37,3852	9,1	30,1	0,500	1,656	0,500 + j 1,656
Total	1				2,7411	13,5972	2,7411+ j 13,5972

Tableau 3.6 :

# QUATRIEME CHAPITRE

## LES HARMONIQUES

---

## IV. Harmoniques

### IV.1. Introduction

En théorie, les tensions et courants des distributions électriques triphasées devraient être des sinusoïdes, parfaitement équilibrées (valeurs des courants et des tensions égales dans chacune phase), ayant des facteurs de puissance unitaires, avec un décalage de 120 degrés entre chaque phase.

En pratique, la nature même des charges utilisées engendre des distorsions des formes d'onde de courants et de tensions et des déséquilibres entre phases. Au cours des deux dernières décennies, la situation s'est dégradée et on mesure sur les distributions électriques actuelles des formes d'ondes de courants et de tensions déformées qui ne peuvent être considérées, même en régime permanent, comme des régimes sinusoïdaux équilibrés.

Les récepteurs non linéaires tels que les fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs, absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation.

La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension. Celles-ci peuvent perturber les appareils électriques du réseau, alors l'objet de ce chapitre est de savoir détecter l'existence des perturbations dues aux harmoniques et de déterminer la façon de réduire ces perturbations à un niveau acceptable.

### IV.2. Définitions:

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale, qui provoquent une déformation ou distorsion de l'onde sinusoïdale.

Une tension déformée  $v(t)$  de période  $T$  ( $T=20\text{ms}$  à  $f=50\text{Hz}$ ) peut donc s'écrire de manière suivante :

$$V(t)=V_0 + \sum_{p=1}^{\infty} V_p \sqrt{2} \sin(p \omega t + \phi_p) \text{ avec } \omega=\frac{2\pi}{T}$$

$V_0$  : Amplitude de la composante continue, généralement nulle et considérée comme telle par la suite,

$\Phi_p$  : phase de  $V_p$  à l'instant initial ( $t=0$ ).

De façon identique, un courant déformé  $i(t)$  de période  $T$  peut s'écrire :

$$I(t)=I_0+\sum_{p=1}^{\infty} I_p \sqrt{2} \sin(p \omega t + \phi_p)$$

- $I_0$  : Amplitude de la composante continue, généralement nulle et considérée comme telle par la suite,
- $\phi_p$  : phase de  $I_n$  à l'instant initial ( $t=0$ ).

#### IV.2.1. Composante fondamentale ou Fondamental

$V_1$  est la composante fondamentale du signal  $v(t)$ , c'est-à-dire la valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à celle du réseau d'alimentation.

#### IV.2.2. Composante harmonique ou Harmonique

$V_p$  pour  $p > 2$  est la composante harmonique de rang  $p$  du signal  $v(t)$ , c'est-à-dire la valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à  $p$  fois celle du réseau d'alimentation.

#### IV.2.3. Rang d'un harmonique

Un nombre entier égal au rapport entre la fréquence de l'harmonique et la fréquence du fondamental.

$P$  est donc le rang de l'harmonique

Par exemple :  $V_3$  est l'harmonique de tension de rang 3 ou harmonique 3.

#### IV.2.4. Valeur efficace d'un signal périodique

La valeur efficace du signal  $v(t)$  est par définition :

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

#### IV.2.5. Taux de distorsion

Le taux de distorsion est caractérisé au niveau de la pollution du réseau.

Taux de distorsion suivant la norme CEI 61000-2-2 :

$$\text{- Taux de distorsion en tension : } \tau_V(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} V_{2p}^2}}{V_1}$$

$$\text{- Taux de distorsion en courant : } \tau_I(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} I_{2p}^2}}{I_1}$$

Le taux de distorsion défini par la norme CEI représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental (signal non déformé). Cette valeur caractérise bien le niveau de pollution apporté en réseau.

#### IV.2.6. Taux individuel d'harmonique

Le taux de l'harmonique de rang  $p$  est :

$$V_P(\%) = 100 \frac{V_p}{V_1}$$

$$I_P(\%) = 100 \frac{I_p}{I_1}$$

#### IV.2.7. Puissance apparente monophasée

$$S = V_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

La puissance réactive définie pour les régimes purement sinusoïdaux n'a pas de sens pour un signal non sinusoïdal.

#### IV.2.8. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de composante fondamentale :

$$F_P = \frac{P}{S}$$

##### IV.2.8.1. Facteur de déphasage du fondamental

Les facteurs de déphasage sont le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de composante fondamentale :

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

Il peut aussi être défini par le cosinus du déphasage entre les composantes fondamentales de courant et de tension :  $\varphi_1 = \text{déphasage}(V_1, I_1)$

**Remarque :**

On suppose que la référence de temps est  $U_1$ , on prend donc  $\varphi_1 = 0$ .

**IV.2.8.2 Facteur de déformation**

Il caractérise le lien entre le facteur de puissance et le facteur de déphasage :

$$F_d = \frac{F_p}{\cos\varphi_1}$$

**IV.2.8.3 Facteur de crête**

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace du courant :

$$F_c = \frac{\hat{i}}{i_{\text{eff}}}$$

Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à  $\sqrt{2}$ .

Pour un signal non sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à  $\sqrt{2}$ .

Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence de valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace.

Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protections, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.

### IV.3. Source des harmoniques:

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente. Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge.

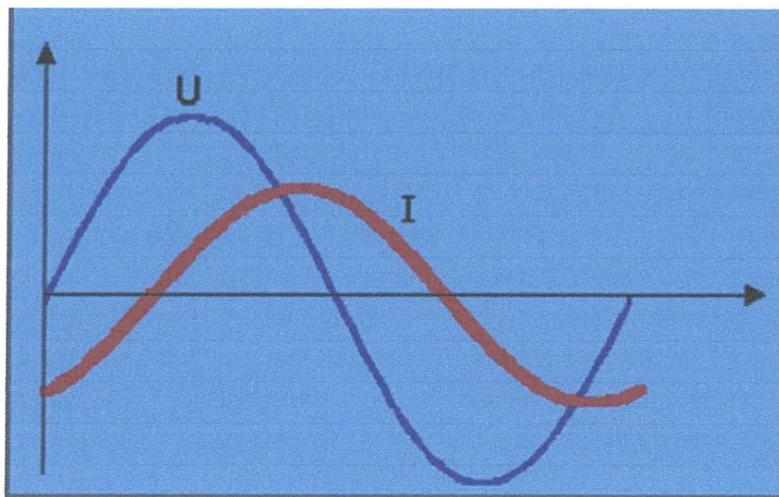
Les tensions et les courants harmoniques ajoutés et superposés à l'onde fondamentale provoquent sur les récepteurs:

- des effets instantanés
- des effets à terme dus aux échauffements.

Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source. L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donné un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion en tension.

#### IV.3.1. Charges linéaires

Une charge est dite "linéaire" lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur ne génère pas d'harmonique.





entraînant une pollution électrique ayant des effets néfastes sur la qualité de puissance fournie.

2- Le responsable de la pollution harmonique n'étant pas les centrales électriques, ni le réseau national de distribution électrique.

3- Les consommateurs sont les principaux responsables de cette pollution dans le réseau de distribution de l'électricité qui subit les effets générés par les charges polluantes.

#### IV.3.4. **Impacts des harmoniques**

##### IV.3.4.1. **Impacts immédiats** (pertes par effets joules)

- Dégradation du facteur de puissance ;
- Réduction de la puissance des moteurs (couple négatif) ;
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs ;
- Augmentation du bruit dans les moteurs ;
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs ;
- Surdimensionnement des câbles ;
- Réduction de la capacité du réseau ;
- Mauvais fonctionnement des contacteurs ;
- Perturbation des systèmes électroniques ;

##### IV.3.4.2. **Impacts à moyen et long terme**

- Réduction de la durée de vie des moteurs
- Détérioration des batteries de condensateurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillesse accélérée des isolants et des diélectriques
- Pertes Fer, pertes créées par le champ magnétique + pertes dues aux courants de Foucault.

### IV.3.5. Deux types de charges produisent les harmoniques

#### IV.3.5.1. Charges industrielles

- Equipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage.
- Les charges utilisant l'arc électrique sont :

Fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les manèges de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

#### IV.3.5.2. Charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage

Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage sont :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes. De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes.

#### IV.3.6. Déséquilibres de la tension

Le déséquilibre d'un système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude ou déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres.

Le déséquilibre d'un système triphasé de tension est essentiellement dû aux charges monophasés ou déséquilibrés raccordés sur le réseau. Les conséquences sont l'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, (existence de couple inverse conduit à la dégradation prématurée des machines).

### IV.3.7. Nécessité de traiter les harmoniques

1- Pour les producteurs et distributeurs d'électricité, il ya plusieurs raisons dont :

- Les courants harmoniques génèrent des pertes sur le réseau de distribution et un manque à gagner compte tenu du fait que les compteurs électriques actuellement installés ne comptabilisent que les courants fondamentaux à 50 HZ et ne comptabilisent pas les courants harmoniques.
- Les producteurs et distributeurs d'électricité ont le devoir de fournir une électricité non polluée, donc ils ont la responsabilité de protéger l'intégrité et la fiabilité de leur réseau de distribution contre les effets néfastes de cette pollution.
- Ils ont également le devoir de fournir une qualité de puissance à leurs clients sans perturbations et sans pollution harmonique.
- Le traitement des harmoniques permet de réduire les puissances apparentes et réactives, ils pourront par conséquent distribuer des KVA et des KVAR aux nouveaux abonnés sans investir dans de nouveaux moyens de production entraînant ainsi des économies d'énergie.

2- Pour les consommateurs dans les secteurs industriels et tertiaires:

La responsabilité de la pollution harmonique incombe à la présence des charges polluantes chez les consommateurs qui sont donc les principaux pollueurs.

#### IV.3.7.1. Avantages du traitement

- Protection des équipements électriques contre les effets néfastes des courants harmoniques.
- Amélioration du nouveau facteur déterminant pour l'instauration des pénalités et des bonifications.
- Economies d'énergie électriques dues aux réductions des différents types de pertes et réduction des couts de maintenance.
- Etre conforme aux normes et standards internationaux qui sont en cours d'élaboration au Maghreb.

## Conclusion

A partir du travail de mémoire de fin de cycle réalisé, portant sur les harmoniques et la qualité des réseaux électrique, on peut conclure qu'il nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine d'électrotechnique et plus précisément dans les réseaux électriques et connaître les différentes méthodes d'élaboration et calculs technico-économique des réseaux électriques. Il nous a permis aussi, d'avoir une meilleure conscience des risques induits par les coupures d'énergie électrique, aider à faire des choix de base de conception pour limiter les effets néfastes des défauts. Cet enrichissement des critères aide à la décision afin de choisir entre plusieurs solutions, à la prévoyance des situations dégradées d'exploitation et d'en quantifier la probabilité.

L'utilisation de toutes techniques de prévention et moyens mis en œuvre permet d'avoir une bonne qualité d'énergie garantie en exploitation normale stable qui résulte d'une bonne conception globale du système ainsi que de l'équilibre entre la production et consommation d'énergie.

L'étude sur la conception d'architecture optimale du réseau nous permet de répondre aux besoins en fourniture d'énergie des récepteurs de l'installation selon les impératifs de continuité imposés par les consommateurs.

L'étude de l'identification des situations anormales d'exploitation nous permet d'éviter des accidents humains, des destructions de matériels ou la perte d'alimentation de consommateurs, de déterminer les mesures à prendre, assurant ainsi la protection des personnes, des matériels et la disponibilité de l'énergie.

# BIBLIOGRAPHIE

## • Livres

- [1] Les réseaux électriques (PH ,D ,Mr BOUNAYA Kamel), Pages :  
Eléments de description et d'analyse de base Ouvrage 2010
- [2] Les réseaux électriques industriels 1 (Christophe Prévé) p :  
Ouvrage 2005
- [3] Les réseaux électriques industriels 2 (Christophe Prévé) p :  
Ouvrage 2005
- [4] Distribution de l'énergie électrique (NA'IHAN, Henri Ney) p :  
Ouvrage 2000
- [5] Méthodes d'analyses des R.E (Jean Claude Sabonnard) p :

## • Articles

- [6] Mémoire de fin d'étude master 2012 « contrôle l'écoulement de la puissance active et réactive » (Brahmia & Chaib)
- [7] Mémoire de fin d'étude ingénieur 2009 « Elaboration et choix d'un R.E »  
(Oumar Niono)
- [8] Cours d'analyses des R.E (Dr Bounaya Kamel)

## • Internet

- URL : [www.sndl.cerist.dz](http://www.sndl.cerist.dz)
- [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org) (les Harmoniques) Edition 2007
- qualité d'un système d'énergie électrique
- Stabilité d'un réseau électrique
- wikipedia.com
- Google.com
- Ancarta 2012