



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Technologies

DEPARTEMENT :

Electrotechnique

MEMOIRE DE
MASTER

Présenté par :

Ben ghouini Khadidja Belkais

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Electrotechnique.

OPTION : Réseaux Electriques.

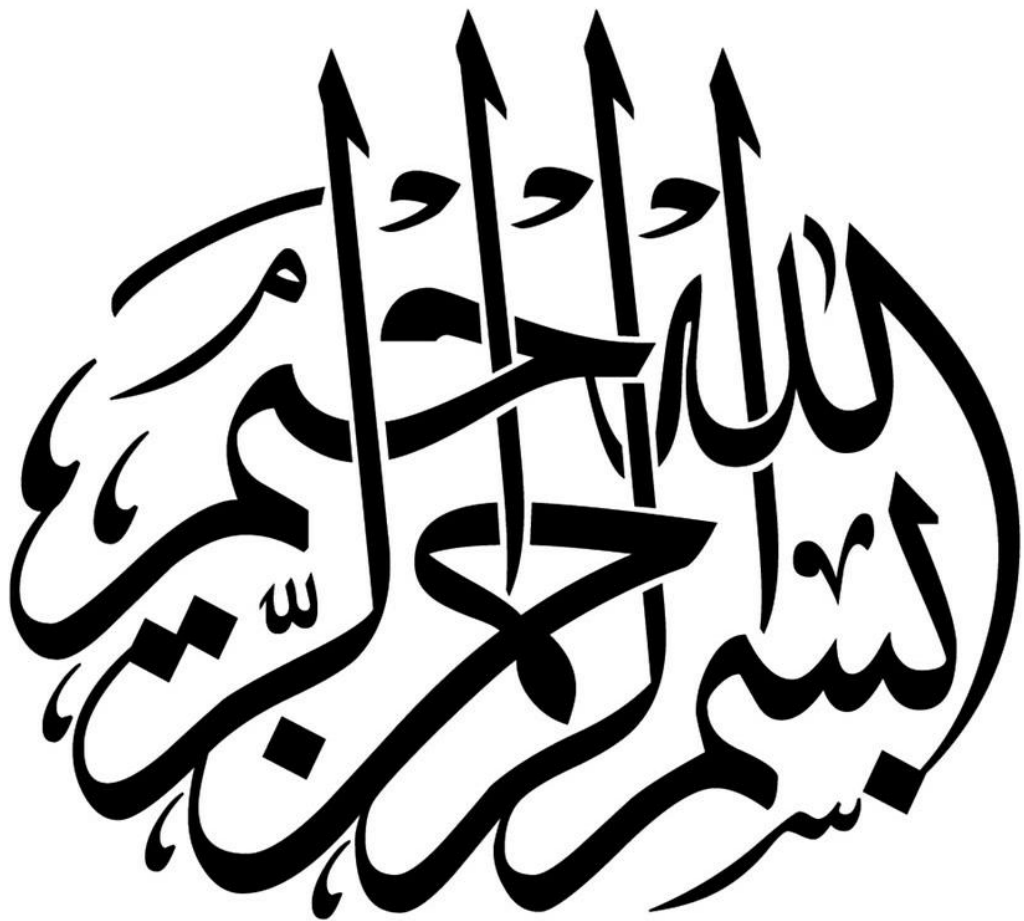
Thème

Etude de la stabilité statique d'un réseau électrique

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
OUI Atallah	MCA	Président
CHETTIH Saliha	Professeur	Examineur
DOUIDI Brahim	MAA	Encadreur

Promotion : 2022/2023



Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de master à:

A ma mère et mon père

Ma soeurs :Bouchra

A mes frères : Mohamed et Abd samed

A tous mes proches de la famille

et a tous mes chers amies et

collegue :Safa ;Samah ;Maria ;Fellah ;Mounir ;sohaib et yahya

Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire

Remerciement

***Je remercie Allah**, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de cette thèse.*

***Grand merci et respect** à mes très chers parents, à mes frères et mes sœurs pour leurs soutiens et encouragement.*

***Je tenais à remercier** mon encadreur **DOUIDI Brahim**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

***Je remercie aussi** les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter le jugement de mon travail.*

***Je remercie** tous mes amis et toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Résumé

ملخص :

مع زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية نسعى في وقتنا الحالي إلى تحسين استقرار الشبكات الكهربائية من خلال دمج الأنظمة المرنة ذات التيار المتناوب (FACTS)، هذه الأجهزة الحديثة فتحت آفاقاً جديدة لتطوير كفاءة الشبكات الكهربائية وتحسين استقرارها من خلال إجراءات دقيقة، مستمرة وسريعة على قيم المتغيرات الخاصة بالشبكة (الجهد، الممانعة، زاوية الطور، الاستطاعة، السعة...). نسعى في هذا العمل إلى تحليل وتحسين استقرار الشبكة الكهربائية وذلك بإقحام الأجهزة المرنة (FACTS) من أجل تحسين عند حدوث عطل ما على مستوى خط نقل كهربائي معين نختار المعاوذات الثابتة للطاقة المتفاعلة (SSSC) والمكثف الثابت (STATCOM) ومعرفة مدى تأثيرهما على الجهد وعلى الاستقرار للنظام، لذلك يجب اختيار نوع (FACTS) ومكانها المناسب من بين قضبان التجميع وتحديد دقيق لقيمها الخاصة على مستوى الشبكة، تم تطبيق هذه الدراسة على شبكة كهربائية IEEE 14 وذلك باستعمال برنامج PSAT.

الكلمات المفتاحية : الشبكات الكهربائية، الاستقرار الثابت، الجهد، المعوض الثابت للطاقة المتفاعلة (SSSC) المكثف الثابت (STATCOM)، الأنظمة المرنة ذات التيار المتناوب (FACTS).

RESUME

Avec l'augmentation de la demande d'énergie électrique, nous essayons actuellement d'améliorer la stabilité des réseaux électriques en intégrant les Systèmes de Transmission de Courant Alternatif Flexibles (FACTS). Ces dispositifs récents ont ouvert de nouveaux horizons pour développer plus efficacement des réseaux électriques et améliorer sa stabilité grâce à des procédures précises, continues et rapides sur les différents variables du réseau (tension, l'impédance, l'angle de phase, puissance et la capacité...). Nous ciblons par ce travail l'analyse et l'amélioration la stabilité des réseaux électriques en intégrant les dispositifs FACTS pour l'amélioration lorsqu'un défaut apparaît au niveau de la ligne de transport. Nous choisissons le compensateur statique de l'énergie réactive (SSSC) et le compensateur statique synchrone (STATCOM) pour découvrir l'étendue de leur impact sur la tension et de la stabilité du réseau électrique. Il est donc nécessaire de choisir le type de (FACTS) et son emplacement approprié parmi les jeux de barre et avec une détermination précise de ses propres valeurs de consigne au niveau du réseau. Cette étude a été appliquée à deux réseaux de test IEEE 14 jeux de barres en utilisant le programme PSAT.

Mots clés : Réseaux électriques, Stabilité statique, Tension, Compensateur statique (SSSC), Compensateur statique synchrone (STATCOM), Systèmes de Transmission de Courant Alternatif Flexibles (FACTS).

ABSTRACT :

With the increasing demand for electrical energy, we are Currently trying to improve the stability of electrical networks by integrating the Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). These recent devices have opened up new horizons for developing more effective electricity networks and improving their stability due to procedures precise, continuous and fast on the different variables of network (voltage, impedance, phase angle, power and capacity...). We are targeting through this work the analysis and improvement of the stability of electrical networks by integrating FACTS devices for the improvement of when a damage appears on the transmission line. We choose the Static Var Compensator (SSSC) and the Static Synchronous Compensator (STATCOM) to discover the extent of their impact on the voltage and stability of the power grid. It is therefore necessary to choose the type of (FACTS) and its appropriate location among the busbars and with a precise determination of its own set values at the network level. This study was applied to two IEEE 14 and IEEE 30 busbar test networks using the PSAT program.

Key words : Power grid, Static stability, Voltage, Static Var Compensator (SSSC), Static Synchronous Compensator (STATCOM), Flexible Alternatif Current Transmission Systems (FACTS)

Liste des Figures

Chapitre 1 Les lignes électriques dans les réseaux électriques

Figure (1.1)	Conducteurs câblés en Al et AC	6
Figure (1.2)	Conducteurs creux en C	6
Figure (1.3)	Les conducteurs aluminium massifs ronds ou sectoriels.	6
Figure (1.4)	Isolateur	7
Figure (1.5)	ligne de transmission avec tours en treillis autoportantes.	7
Figure (1.6)	ligne de transmission à double circuit avec tours treillis autoportantes	8
Figure (1.7)	Schéma en π d'une ligne électrique	9
Figure (1.8)	Champ magnétique interne d'un conducteur cylindrique solide	12
Figure (1.9)	Champ magnétique externe d'un conducteur cylindrique solide.	13
Figure (1.10)	Conducteurs cylindriques pleins	15
Figure (1.11)	Ligne monophasée à deux fils	17
Figure (1.12)	Ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal	19
Figure (1.13)	Ligne triphasée complètement transposée	20
Figure (1.14)	Ligne en faisceaux	21
Figure (1.15)	Configurations des conducteurs de faisceau	22
Figure (1.16)	Circuit des capacités d'une ligne monophasée à deux fils ((a) capacités ligne à ligne , (b) capacités ligne à neutre)	24
Figure (1.17)	Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal	25
Figure (1.18)	Ligne triphasée avec deux conducteurs par faisceau.	25

Chapitre 2 Modélisation des lignes électriques

Figure (2.1)	Lignes courtes	27
Figure (2.2)	La ligne de transmission représentée par un quadripôle	28
Figure (2.3)	Modèle en π de ligne moyenne	29
Figure (2.4)	Modèle en T de ligne moyenne	30
Figure (2.5)	Schéma d'une ligne longue	31
Figure (2.6)	Variation de la Tension $V(x)$ pour quatre cas	38
Figure (2.7)	La puissance active est maximale	40

Chapitre 3 Les performances des lignes aériennes

Figure (3.1)	Distorsion provoquée par un seul	49
--------------	----------------------------------	----

Chapitre 4 Résultats et Simulation

Figure (4.1)	Réseau teste model IEEE-14JB	51
Figure (4.2)	Tension aux niveaux des nœuds du model 14JB	53
Figure (4.3)	Tension de model 14 JB sous forme radar	53
Figure (4.4)	Réseau teste (model IEEE-14 JB) avec STATCOM	54
Figure (4.5)	Courbes des Tensions sans et avec STATCOM	55
Figure (4.6)	présentation de tensions sans et avec STATCOM	56
Figure (4.7)	Pertes des puissances actives sons et avec STATCOM du model IEEE-14JB	58
Figure (4.8)	Pertes des puissances réactives sons et avec STATCOM du model IEEE-14JB	58
Figure (4.9)	Réseau teste du model IEEE-14 JB avec un compensateur statique SSSC	59
Figure (4.10)	Tension sans et avec SSSC du model IEEE-14 JB	60
Figure (4.11)	Tension sans et avec SSSC du model IEEE-14 JB sous forme radar	61
Figure (4.12)	Pertes des puissances actives sans et avec SSSC du model IEEE-14JB	63
Figure (4.13)	Pertes puissances réactives sans et avec SSSC du model IEEE-14JB	63

Liste des tableaux

Tableau (1.1)	Les températures de certain conducteur	10
Tableau (1.2)	Valeurs du RMG selon le nombre de brins	17
Tableau (4.1)	Tableau des Tensions et Angles	52
Tableau (4.2)	Tableau des Tensions et Angles Nœuds Avec STATCOM	55
Tableau (4.3)	Résultats Du System IEEE 14 Nœuds Sans Et Avec STATCOM	57
Tableau (4.4)	Tableau des Tensions et Angles Nœuds Avec SSSC	60
Tableau (4.5)	résultats du system IEEE 14 nœuds sans et avec SSSC	62

Liste des Symboles

RMG: Rayon moyen géométrique

DMG: Distance moyenne géométrique

PSAT power system analysis Toolbox

THT Réseaux de Transport Très Haute Tension.

HT Réseaux de répartition sont à haute tension.

MT Réseaux moyenne tension.

MVA Méga-volt Ampère.

BT Réseaux bas tension.

HTA Réseaux haute tension A.

P Puissance active injectée ou soutirée.

Q Puissance réactive injectée ou soutirée.

V Module de la tension.

P_G Puissance générée.

FACT «de Flexible Alternative Current Transmission Systems».

SVC « static var compensator ».

IEEE « Institute of Electrical and Electronics Engineers ».

GUI «graphical user interface ».

PMU Unité de Mesure de Phase.

PV Jeux de barre de control.

PQ Nœuds de charge.

JB Jeux de barres.

$p.u$ La grandeur en unité relative (grandeur réduite).

X_c Condensateur de réactance.

X_L Bobine d'induction de réactance inductive.

SOMMAIRE

Rémerciements.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des Symboles.....	IV

Introduction Générale	2
------------------------------------	----------

Chapitre 1 Les lignes électriques dans les réseaux électriques

1.1 Introduction	4
1.2 Les types des ligne.....	4
1.3 Composantes d'une ligne	5
1.3.1 Conducteurs	5
1.3.2 Isolateurs	7
1.3.3 Les Supports	7
1.3.4 Les câbles de garde	8
1.4 Propriétés des lignes de transport.....	8
1.5 Les paramètres des lignes électriques.....	9
1.5.1 Les paramètres longitudinaux	10
1.5.2 Inductance de la ligne	11
1.6 Les paramètres transversaux	22
1.6.1 Conductance.....	22
1.6.2 La capacité de la ligne	23
1.6.3 Capacité d'une ligne monophasée.....	23
1.6.4 Capacité d'une ligne triphasée	24
1.6.5 Capacité des conducteurs en faisceaux.....	25
1.7 Conclusion	25

Chapitre 2 Modélisation des lignes électriques

2.1 Introduction	27
2.2 Modélisation des lignes aériennes.....	27
2.2.1 Modèle de lignes courtes	27
2.2.2 Modèle de lignes moyenne	29
2.3 Modèle de ligne longue.....	31
2.4 Ligne sans pertes	35
2.4.1 Ligne chargée par son impédance caractéristique	37

2.5	Limite de stabilité statique	39
2.6	Conclusion	40

Chapitre 3 Les performances des lignes aériennes

3.1	Introduction	42
3.2	L'utilité de transporter l'énergie électrique en haute tension	42
3.3	Les Paramètres des performances	43
3.3.1	Choix de la section des conducteurs aériens	43
3.3.2	Chute de tension dans une ligne aérienne	44
3.4	Évaluation de la performance des lignes électriques	45
3.4.1	Analyse de stabilité	45
3.4.2	Analyse des pertes de puissance	46
3.4.3	Analyse de la qualité de tension	46
3.5	Amélioration des performances des lignes électriques	47
3.5.1	Techniques de régulation de tension	47
3.5.2	Réduction des pertes de puissance	47
3.5.3	Renforcement de la stabilité	47
3.6	Avantages et Inconvénients des lignes électriques aériennes	48
3.6.1	Les avantages	48
3.6.2	Les Inconvénients	48
3.7	Conclusion	49

Chapitre 4 Résultats et Simulation

4.1	Introduction	50
4.2	Réseau d'application	51
4.2.1	Tension aux niveaux des nœuds sans utilisation des FACTS	52
4.2.2	réseau teste (model IEEE-14 JB) avec STATCOM	54
4.2.3	réseau teste (model IEEE-14 JB) avec SSSC	58
4.3	Conclusion	64

Conclusion Générale	67
----------------------------------	----

Annexe A	XI
-----------------------	----

Annexe B	XIII
-----------------------	------

Bibliographie	XIX
----------------------------	-----

Introduction Générale

Introduction générale

L'électricité occupe une place centrale parmi les autres formes d'énergie, car elle peut être facilement transportée, elle est inodore et permet des transferts avec un rendement élevé. De plus, elle est étroitement liée à l'ensemble des autres formes d'énergie existantes.

Les lignes jouent un rôle essentiel dans le réseau électrique en assurant la transmission de l'énergie sur de vastes territoires. Les transferts d'énergie suivent un schéma appelé "du haut en bas" : production, transport, distribution. On distingue trois types de lignes en fonction de leur longueur : longues, moyennes et courtes. Cependant, les calculs relatifs aux lignes sont souvent complexes et sujets aux erreurs, d'où la nécessité de recourir à des outils informatiques pour effectuer ces calculs.

Ainsi, des programmes ont été développés pour calculer les paramètres et les caractéristiques des différentes lignes électriques.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre aborde les aspects généraux des réseaux électriques, y compris leur architecture et leur fonctionnement. Il explore également l'exploitation des différents types de réseaux.

Le deuxième chapitre traite la modélisation des lignes électriques aériennes et présente les différents composants qui les constituent. Il fournit également une description théorique du calcul des paramètres des lignes électriques. De plus, il aborde les effets produits par les paramètres transversaux (R et L) et longitudinaux (C et G) tout au long de la ligne.

Le troisième chapitre est consacré aux performances des lignes électriques (lignes aériennes électriques), en mettant en évidence les avantages et les inconvénients ainsi les facteurs potentiels à prendre en compte pour le choix.

Le dernier chapitre sera consacré à la programmation sur Matlab /PSAT pour valider avec des simulations les résultats obtenus qui montrent l'amélioration nette qui rend les lignes plus performant lors de l'installation des systèmes FACTS que ce soit série ou shunt sur le plan tension aux niveaux des nœuds ou l'amélioration des pertes de puissances.

Finalement une conclusion générale achèvera notre présent mémoire.

Chapitre 1

Les lignes électriques dans les réseaux électriques

1.1 Introduction :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'électricité des centres de production vers les consommateurs.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Dans le réseau électrique la ligne joue un rôle très important dans la transmission de l'énergie électrique sur l'ensemble d'un territoire, elle représente dans le système électrique Ce que représente une veine dans un corps humain.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des lignes électriques à savoir les caractéristiques longitudinales et transversales et comment calculer ces caractéristiques.

1.2 Les types des lignes :

Elles peuvent être classées selon plusieurs critères :

- Suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau :

Lignes de grand transport ;

 Lignes d'interconnexion ;

 Lignes de répartition ;

 Lignes de distribution.

- Suivant la situation dans l'espace :

 Lignes aériennes.

 Lignes souterraines (câble)

a) Lignes de distribution BT :

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

b) Lignes de distribution MT :

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

c) Lignes de transport HT :

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

d) Lignes de transport THT :

Ce sont les lignes qui relient 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.

1.3 Composantes d'une ligne :

Une ligne de transport se compose de câbles conducteurs, d'isolateurs et de supports, les câbles de gardes.

1.3.1 Conducteurs

L'aluminium a remplacé le cuivre comme métal conducteur le plus courant pour la transmission aérienne. Bien qu'une plus grande section transversale en aluminium soit nécessaire pour obtenir la même perte que dans un conducteur en cuivre, l'aluminium a un coût inférieur et un poids plus léger. [1]

1.3.1.1 Types de conducteurs :

Ils existent trois types de conducteurs : câblés (toronnée), massif et conducteurs creux.[2]

a- Conducteur câblés (toronnée) :

Afin de donner aux conducteurs une souplesse suffisante, les câbles sont constitués habituellement de brins d'égales sections circulaires disposés en couches spirales dont le sens est alterné d'une couche à la suivante autour d'un brin central rectiligne.

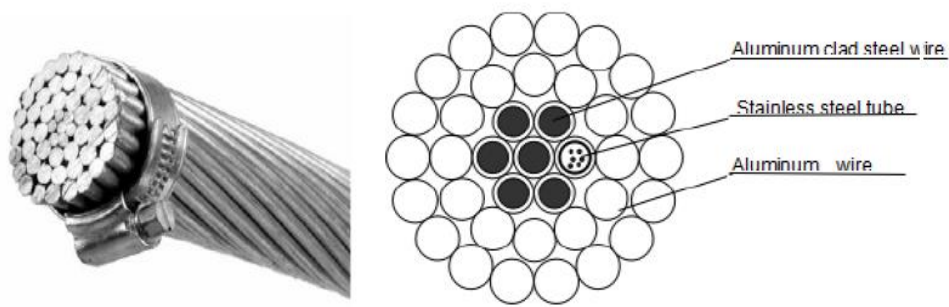


Figure (1.1) - Conducteurs câblés en Al et AC.

b- Conducteurs creux :

Avant 1940, des lignes à tensions égales à 220 kV en Europe et à 287 kV aux Etats-Unis d'Amérique ont été équipées de conducteurs creux. Cependant ces conducteurs creux sont très coûteux et ont été abandonnés dans la construction des lignes depuis 1950.

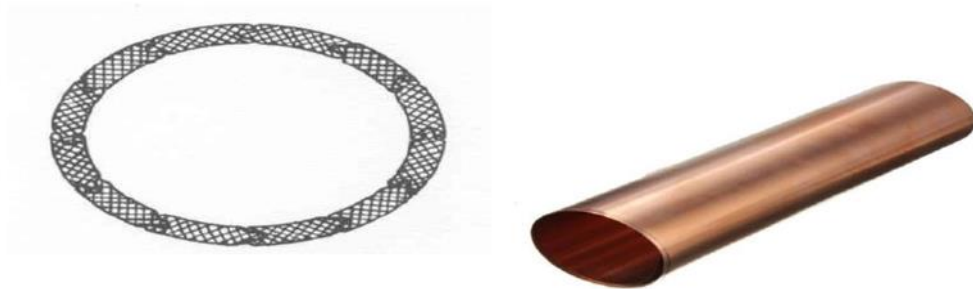


Figure (1.2) - Conducteurs creux en Cu.

c- Conducteur massif :



Figure (1.3) - Les conducteurs aluminium massifs ronds ou sectoriels.

1.3.2 Isolateurs :

Les isolateurs pour lignes de transmission supérieures à 69 kV sont généralement des isolateurs de type suspension, qui sont constitués d'une chaîne de disques en porcelaine, en verre trempé ou en polymère. Le disque standard (figure 1.4) a un 10 pouce. (0,254 m) de diamètre, 53 4 pouces (0,146 m) d'espacement entre les centres des disques adjacents et une résistance mécanique de 7500 kg. La ligne 765 kV de la figure II.1 a deux chaînes. [1]



Figure (1.4) - isolateur.

1.3.3 Les Supports :

Les supports ont pour but de maintenir les câbles des lignes aériennes à une certaine distance au-dessus du sol, ou au-dessus de certains obstacles. Les supports constituent les éléments indispensables à la tenue des câbles des lignes aériennes. Ils doivent pouvoir répondre aux différents besoins du réseau de transport en supportant un ou plusieurs circuits en tout point du territoire. De forme et d'importance très variées, les supports peuvent aller des simples poteaux en bois ou en béton, d'une douzaine de mètres en hauteur, aux pylônes treillis d'acier, de plus de 50 m de hauteur et ayant une masse pouvant atteindre, voire dépasser 100 tonnes.[3]



Figure (1.5) - ligne de transmission avec tours en treillis autoportantes. .



Figure (1.6) - ligne de transmission à double circuit avec tours treillis autoportantes.

1.3.4 Les câbles de garde :

Les câbles de gardes ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitent le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. [4]

1.4 Propriétés des lignes de transport :

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter une puissance active. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active.

En plus de ces exigences, une ligne de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes :

- a. La tension doit demeurer constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges entre zéro et la charge nominale.
- b. Les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement.
- c. Les pertes joules ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs.

1.5 Les paramètres des lignes électriques :

Une ligne de transmission électrique a quatre paramètres qui affectent sa capacité à remplir sa fonction dans le cadre d'un système d'alimentation : la résistance R, l'inductance L, la capacité C et la conductance G.

Les paramètres séries longitudinaux (R, L) et paramètres parallèles transversaux (C, G).[1]

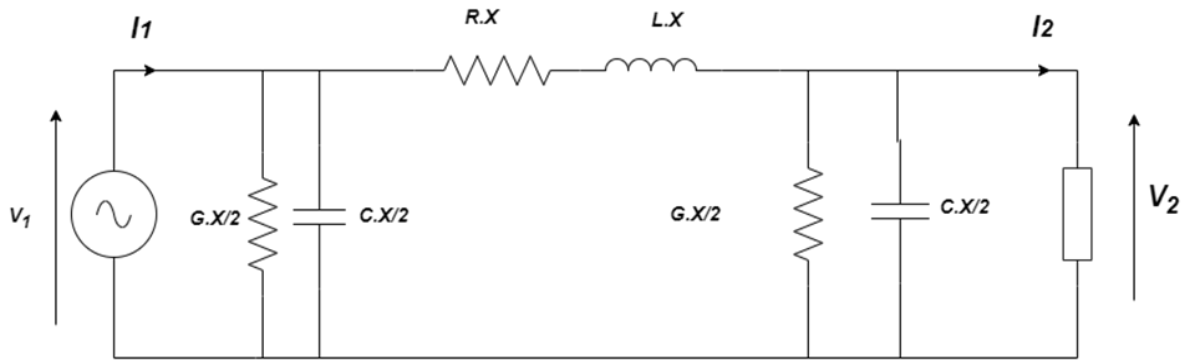


Figure (1.7) - Schéma en π d'une ligne électrique.

1.5.1 Les paramètres longitudinaux :

1.5.1.1 La résistance de la ligne :

La résistance en courant continu d'un conducteur à une température spécifiée T 20°C ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{ m/}$) est donnée par la formule :

$$R = \rho \cdot l / S \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1.01)$$

La résistivité dépend du métal conducteur. Le cuivre recuit est la norme internationale pour mesurer la résistivité ρ (ou la conductivité s). [5]

La résistance du conducteur dépend des facteurs suivants :

a. Effet de spirale du conducteur :

L'effet de spirale du conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à trois brins et de 2% environ pour les conducteurs à nombre de brins supérieur.

b. Effet de température :

La résistivité des métaux conducteurs varie linéairement sur les températures normales de fonctionnement selon :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_1}{T+t_2} \quad (1.02)$$

- t_1 et t_2 sont les températures en °C à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.
- R_1 et R_2 sont les résistances du conducteur respectivement aux températures t_1 et t_2 .
- T est une température paramétrique en °C liée à la nature du matériau du conducteur.

Tableau (1.1) - Les températures de certain conducteur

Matériau	Conductivité (%)	Température °C
Cuivre: recuit	100%	234.5
Cuivre étiré à chaud	97,3%	241.5
Aluminium étiré	61%	228.1

a. Fréquence (effet de peau) :

Ce phénomène appelle effet pelliculaire ou « effet kelvin », Est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée. En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur n'est pas uniforme à travers la section du conducteur. Le facteur de Kelvin est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$q = \pi \cdot d \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}}{\rho} \quad (1.03)$$

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz

ρ : résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)

d : Amplitude du courant - conducteurs magnétiques

1.5.2 Inductance de la ligne :

1.5.2.1 Définition :

L'inductance d'un circuit magnétique à perméabilité constante μ peut être obtenue en déterminant [1] :

- Intensité du champ magnétique H , d'après la loi d'Ampère
- Densité du flux magnétique B ($B = \mu H$)
- Liens de flux λ
- Inductance des liaisons de flux par ampère ($L = \lambda / I$)

$$\text{Loi de l'ampère} \quad \oint H \, dl = I$$

1.5.2.2 Inductance d'un conducteur

a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur :

Pour déterminer le champ magnétique à l'intérieur du conducteur, sélectionnez le cercle en pointillés de rayon $x < r$ illustré à la (figure 1.8) comme contour fermé pour la loi d'Ampère. En raison de la symétrie, H_x est constant le long du contour. De plus, il n'y a pas de composante radiale de, donc H_x est tangent au contour. C'est-à-dire que le conducteur a un champ magnétique concentrique. L'intégrale de H_x autour du contour sélectionné est [1] :

$$H_x (2\pi x) = I_x \quad \text{Pour } x < r$$

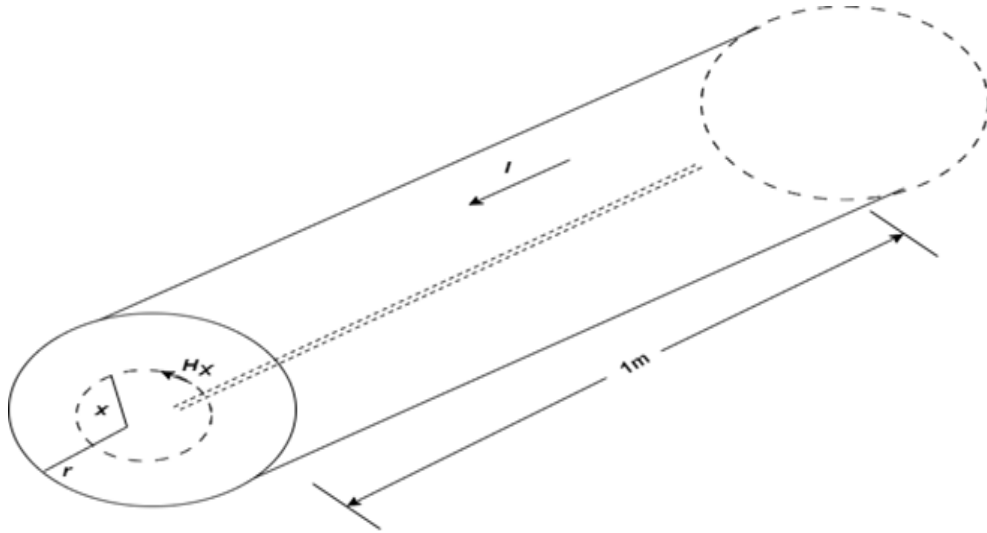


Figure (1.8) - Champ magnétique interne d'un conducteur cylindrique solide.

Où I_x est la partie du courant total entourée par le contour :

$$H_x = \frac{xI}{2\pi x^2} \quad (A/m) \quad (1.04)$$

Supposons maintenant une distribution uniforme du courant dans le conducteur, c'est-à-dire

$$I_x = \left(\frac{x}{r}\right)^2 I \quad \text{Pour } x < r \quad (1.05)$$

Utilisation de (05) dans (04)

$$H_x = \frac{xI}{2\pi x^2} \quad (A/m) \quad (1.06)$$

Pour un conducteur non magnétique, la densité de flux magnétique B_x est

$$B_x = \mu_0 H = \frac{\mu_0 x I}{2\pi x^2} \quad (Wb/m^2) \quad (1.07)$$

Le flux travers une section d'épaisseur dx et de longueur de 1 m est :

$$d\Phi = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot 1 \quad (Wb/m) \quad (1.08)$$

Le flux intérieur entoure seulement une partie du conducteur, donc comme le courant, il constitue une portion du flux total

$$d\lambda = \left(\frac{x}{r}\right)^2 d\Phi = \frac{\mu_0 x I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad (Wb - t/m) \quad (1.09)$$

L'intégration de $x = 0$ à $x = r$ détermine le flux λ à l'intérieur du conducteur

$$\lambda_{int} = \int_0^r d\lambda = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I \quad (Wb - t/m) \quad (1.10)$$

μ_0 : La permittivité du vide ou de l'air ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$)

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad (H/m) \quad (1.11)$$

b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur :

Pour déterminer le flux extérieur entre deux contours situés respectivement à la distance D_1 et D_2 du centre du conducteur, considérant un élément d'épaisseur dx entre D_1 et D_2 .

$$H_x(2x\pi) = I$$

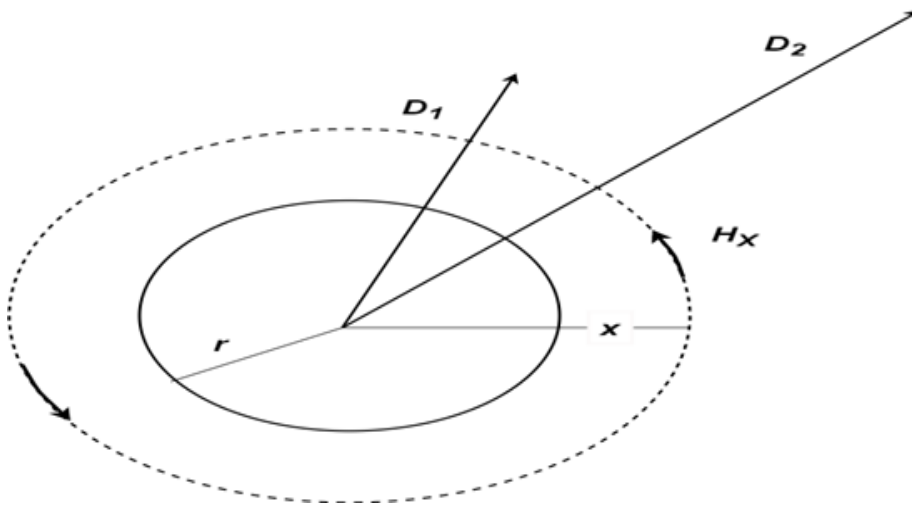


Figure (1.9)- Champ magnétique externe d'un conducteur cylindrique solide.

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad \left(\frac{A}{m}\right) \quad \text{Pour } x > r \quad (1.12)$$

$$B_x = \mu_0 H_x = (4\pi \times 10^{-7}) \frac{I}{2x\pi} = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{x} \quad (Wb/m^2) \quad (1.13)$$

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur dx et de longueur de 1m est :

$$d\Phi = B_x dx = 2 \times 10^{-7} I \frac{dx}{x} \quad (Wb/m) \quad (1.14)$$

$$d\lambda = d\Phi = 2 \times 10^{-7} I \frac{dx}{x} \quad (1.15)$$

Le flux crée entre deux contours D1 et D2 :

$$\lambda_{12} = \int_{D_1}^{D_2} d\lambda = d\phi = 2 \times 10^{-7} I \int_{D_1}^{D_2} \frac{dx}{x} \quad (1.16)$$

$$\lambda_{12} = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (Wb - t/m) \quad (1.17)$$

L'inductance externe L_{12} par unité de longueur due aux liaisons de flux entre D_1 et D_2 est alors

$$L_{12} = \frac{\lambda_{12}}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (H/m) \quad (1.18)$$

Le flux total λ_p reliant le conducteur au point externe P à la distance D ($D_1 = r$ à $D_2 = D$) est :

$$\lambda_p = \lambda_{int} + \lambda_{ext} \quad (1.19)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{2} \times 10^{-7} I + 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (1.20)$$

En Utilise $2 \ln e^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}$ dans :

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \left(\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right) \quad (1.21)$$

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{e^{-\frac{1}{4}} r}\right) \quad (1.22)$$

$$\lambda_p = 2 \times 10^{-7} I \ln\left(\frac{D}{r'}\right) \quad (Wb - t/m) \quad (1.23)$$

En posant :

$$r' = e^{-\frac{1}{4}} r = 0.7788 r$$

De plus, l'inductance totale L_p due aux liaisons de flux internes et externes jusqu'à la distance D est :

$$L_p = \frac{\lambda_p}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r'}\right) \quad (H/m) \quad (1.24)$$

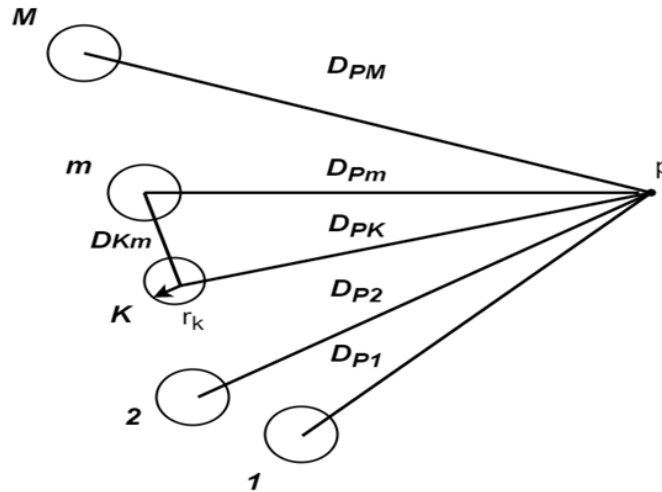


Figure (1.10) - Conducteurs cylindriques pleins.

1.5.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant :

En considérons le réseau de M conducteurs cylindriques solides illustré à la Figure Supposons que chaque conducteur m transporte un courant I_m . Supposons également que la somme des courants soit nulle, c'est-à-dire. [1]

$$I_1 + I_2 + \dots + I_m = \sum_{m=1}^M I_m = 0 \quad (1.25)$$

Le flux, qui entoure le conducteur k au point P due au, à courant, est partir

$$\lambda_{kpm} = 2 \times 10^{-7} I_k \ln\left(\frac{D_{pK}}{r'_k}\right) \quad (\text{Wb} - \text{t/m}) \quad (1.26)$$

Notez que λ_{kpm} inclut les flux internes et externes dues à I . Le flux, qui entoure le conducteur k à P en raison de I_m , est, à partir de

$$\lambda_{kpm} = 2 \times 10^{-7} I_m \ln\left(\frac{D_{pm}}{D_{km}}\right) \quad (1.27)$$

D'une manière générale, le flux total crée autour d'un conducteur k a un point p disant de D_{pk} du centre du conducteur k est :

$$\lambda_{kp} = \lambda_{kp1} + \lambda_{kp2} + \dots + \lambda_{kpm} \quad (1.28)$$

$$= 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{D_{pm}}{D_{km}}\right) \quad (1.29)$$

$D_{kk} = r'_k = e^{-\frac{1}{4}} r_k$ quand $m = k$ dans la sommation ci-dessus est séparé en deux sommations :

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{1}{D_{km}}\right) + 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln(D_{pm}) \quad (1.30)$$

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{1}{D_{km}}\right) + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln(D_{pm}) + I_M \ln(D_{PM}) \right] \quad (1.31)$$

De :

$$I_M = -(I_1 + I_2 + \dots + I_{M-1}) = -\sum_{m=1}^{M-1} I_m \quad (1.32)$$

En utilise :

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{1}{D_{km}}\right) + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln(D_{pm}) - \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln(D_{PM}) \right] \quad (1.33)$$

$$\lambda_{kp} = 2 \times 10^{-7} \left[\sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{1}{D_{km}}\right) + \sum_{m=1}^{M-1} I_m \ln\left(\frac{D_{pm}}{D_{PM}}\right) \right] \quad (1.34)$$

Soit maintenant λ_k égal au flux total reliant le conducteur k à l'infini. Autrement dit,

$$\lambda_k = \lim_{p \rightarrow \infty} \lambda_{kp} \quad (1.35)$$

Toutes les distances D_{pm} deviennent égales, les rapports D_{pm}/D_{PM} deviennent unitaires et $\left(\frac{D_{pm}}{D_{PM}}\right) \rightarrow 0$ Par conséquent, la deuxième somme de (32) devient nulle lorsque $P \rightarrow 0$, est

$$\lambda_k = 2 \times 10^{-7} \sum_{m=1}^M I_m \ln\left(\frac{1}{D_{km}}\right) \quad (\text{Wb} - \text{t/m}) \quad (1.36)$$

1.5.2.4 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés :

Pour les conducteurs toronnés, les valeurs de RMG peuvent être calculées à partir de la section utile S du conducteur et du nombre de brins

Tableau (1.2) - Valeurs du RMG selon le nombre de brins [6].

Type	$g_{11} \text{RMG}$
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3brins sans âme centrale	$0.4750S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{\frac{1}{2}}$

1.5.2.5 Inductance ligne monophasée à deux fils et ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal :

a. ligne monophasée à deux fils :

Les résultats de la section précédente sont utilisés ici pour déterminer les inductances de deux lignes de transmission relativement simples : une ligne monophasée à deux fils et une ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal. On considère une ligne monophasée à deux fils composée de deux conducteurs cylindriques solides x et y. Le conducteur x de rayon r_x transporte le courant de phaseur $I_x = I$. Le conducteur y de rayon r_y transporte le courant de retour $I_y = -I$. Puisque la somme des deux courants est nulle, est valide, à partir de laquelle le flux total reliant le conducteur x est :

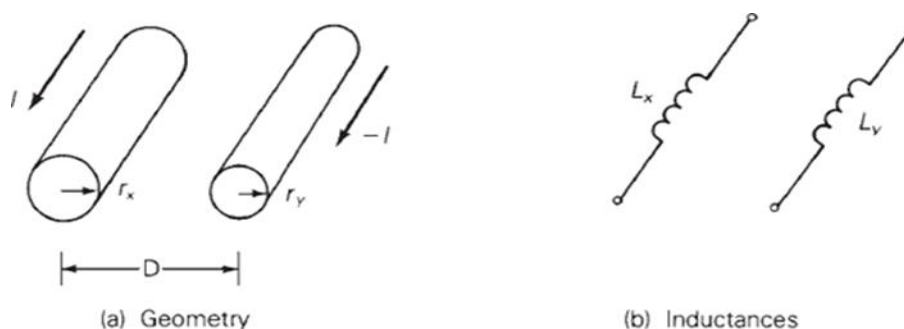


Figure (1.11) -Ligne monophasée à deux fils.

$$\lambda_x = 2 \times 10^{-7} (I_x \ln \frac{1}{D_{xx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{xy}}) \quad (1.37)$$

$$= 2 \times 10^{-7} I \ln(\frac{D}{r'_x}) \quad (Wb - t/m) \quad (1.38)$$

Où :

$$r'_x = e^{-\frac{1}{4}} r = 0.7788 r_x \quad (1.39)$$

$$L_x = \frac{\lambda_x}{I_x} = \frac{\lambda_x}{I} = 2 \times 10^{-7} I \ln(\frac{D}{r'_x}) \quad (H/m) \quad (1.40)$$

De même, le flux total du conducteur y est :

$$\lambda_y = 2 \times 10^{-7} (I_x \ln \frac{1}{D_{yx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{yy}}) \quad (1.41)$$

$$= 2 \times 10^{-7} I \ln(\frac{D}{r'_y}) \quad (Wb - t/m) \quad (1.42)$$

Et :

$$L_y = \frac{\lambda_y}{I_y} = \frac{\lambda_y}{-I} = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'_y} \quad (H/m) \quad (1.43)$$

L'inductance totale du circuit monophasé, également appelée inductance de boucle, est

$$L = L_x + L_y = 2 \times 10^{-7} (\ln(\frac{D}{r'_x}) + \ln(\frac{D}{r'_y})) \quad (1.44)$$

$$= 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r'_y r'_x}} \quad (H/m) \quad (1.45)$$

Egalement si $r'_x = r'_y = r'$ l'inductance totale et :

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln(\frac{D}{r'}) \quad (H/m) \quad (1.46)$$

b. Inductance des lignes triphasées :

Disposition triangle équilatéral (espacements égaux) :

Les inductances de la ligne monophasée à deux fils sont illustrées à Figure (1.12) (b), (a) montre une ligne triphasée à trois fils composée de trois conducteurs cylindriques pleins a, b, c, chacun avec un rayon r, et avec un espacement de phase D'égal entre deux conducteurs quelconques. Pour déterminer l'inductance, supposons des courants de séquence

positive équilibrés, I_c qui satisfont $I_a + I_b + I_c = 0$.est valide et le flux total reliant la phase d'un conducteur est :

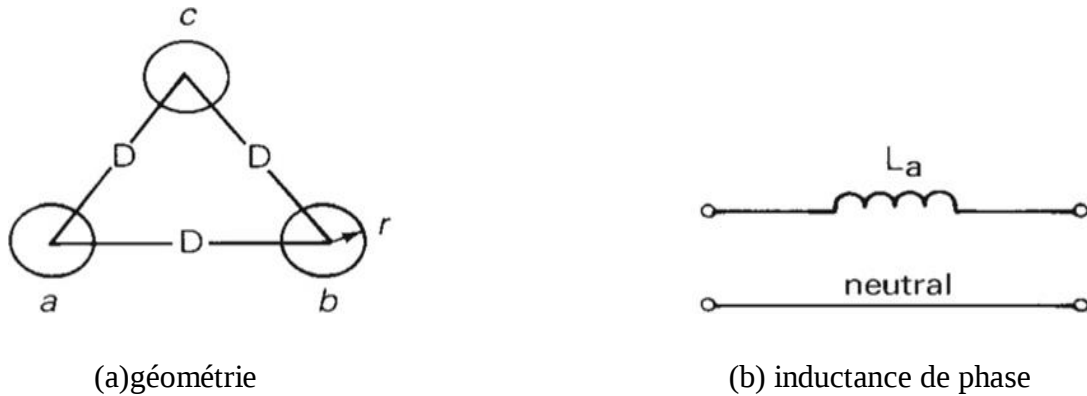


Figure (1.12) - Ligne triphasée à trois fils avec un espacement de phases égal.

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D}) \quad (1.47)$$

$$= 2 \times 10^{-7} \left[I_a \ln \frac{1}{r'} + (I_b + I_c) \ln \frac{1}{D} \right] \quad (1.48)$$

Utilise $(I_b + I_c) = -I_a$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \frac{1}{r'} - I_a \ln \frac{1}{D}) \quad (1.49)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln \frac{D}{r'}) \quad (Wb - t/m) \quad (1.50)$$

L'inductance de phase a donc et :

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (H/m) \quad (1.51)$$

En raison de la symétrie, le même résultat est obtenu pour $L_b = \lambda_b / I_b$ et pour $L_c = \lambda_c / I_c$. Cependant, une seule phase doit être considérée pour un fonctionnement triphasé équilibré de cette ligne, car les liaisons de flux de chaque phase ont des amplitudes égales et un déplacement de 120° . Inductance de phase est illustrée à la figure

Disposition quelconque :

Si les conducteurs des phases de la ligne ne sont pas régulièrement espacés, les capacités et les inductances des phases sont différentes. Ce problème peut être résolu par la transposition de la ligne.

La transposition de la ligne est la permutation des conducteurs de phase à des intervalles réguliers le long de la ligne telle que chaque conducteur occupera sa position originale.

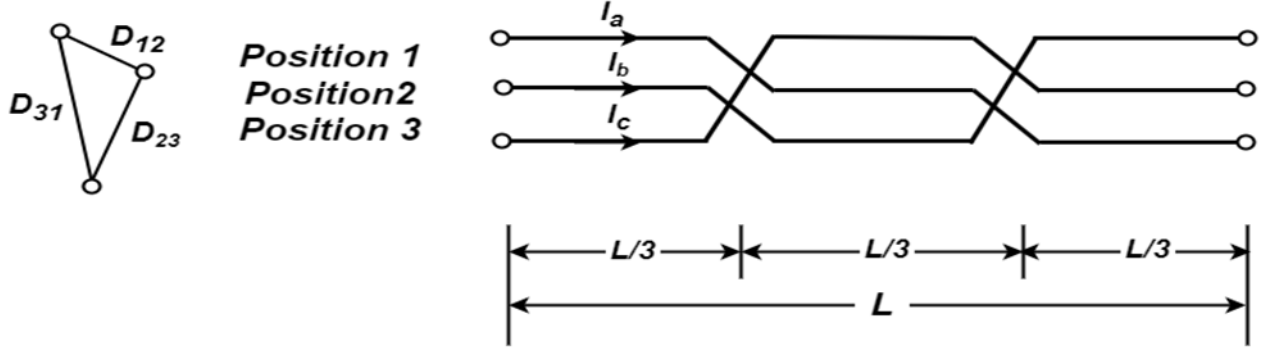


Figure (1.13) - Ligne triphasée complètement transposée

La figure (1.14) montre une ligne triphasée complètement transposée. La ligne est transposée à deux endroits de sorte que chaque phase occupe chaque position pour un tiers de la longueur de ligne. Les positions des conducteurs sont notées 1, 2, 3 avec les distances D_{12} , D_{23} , D_{31} entre les positions. Les conducteurs sont identiques, chacun avec RMG noté D_S . Pour calculer l'inductance de cette ligne, supposons des courants de séquence positive équilibrés, I_a , I_b , I_c pour lesquels $I_a + I_b + I_c = 0$. Encore une fois, est valide, et le flux total reliant la phase d'un conducteur pendant qu'elle est dans la position 1 est :

$$\begin{cases} \lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{31}} \right) \\ \lambda_b = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \\ \lambda_c = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \end{cases} \quad (1.52)$$

La moyenne des liaisons de flux ci-dessus est :

$$\lambda_a = \frac{\lambda_{a1} + \lambda_{a2} + \lambda_{a3}}{3} \quad (1.53)$$

$$= \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left[3 I_a \ln \frac{1}{D_S} + I_b \ln \frac{1}{D_{12} + D_{23} + D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12} + D_{23} + D_{31}} \right] \quad (1.54)$$

Comme : $I_b + I_c = -I_a$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}{D_S} \quad (Wb - t/m) \quad (1.55)$$

Et l'inductance moyenne de la phase à est :

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}}{D_S} \quad (H/m) \quad (1.56)$$

L'inductance linéique d'une phase de la ligne est :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad (1.57)$$

On a donc

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_S} \quad (H/m) \quad (1.58)$$

Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux :

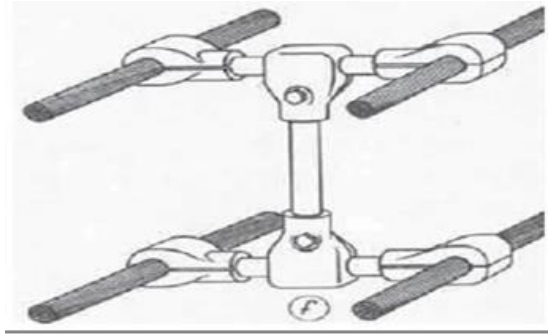


Figure (1.15) - Ligne en faisceaux

Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est

$$L' = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{ed}}{G_{11}} \quad (1.59)$$

$$G_{11} = \sqrt[n]{n g_{11} r_T^{n-1}} \quad (1.60)$$

G_{11} : Rayon moyen géométrique du faisceau. g_{11} : Rayon moyen géométrique d'une corde.

n : Nombre de corde dans un faisceau.

r_T : Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

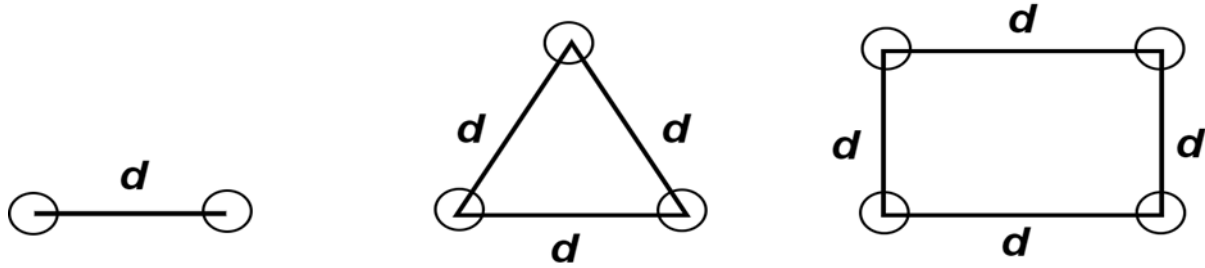


Figure (1.16) - Configurations des conducteurs de faisceau.

Deux conducteurs :

$$D_{SL} = \sqrt[4]{(D_s \times d)^2} = \sqrt{D_s d} \quad (1.61)$$

Trois conducteurs

$$D_{SL} = \sqrt[9]{(D_s \times d \times d)^3} = \sqrt[3]{D_s d^2} \quad (1.62)$$

Quatre conducteurs :

$$D_{SL} = \sqrt[16]{(D_s \times d \times d \times d \sqrt{2})^4} = 1.091 \sqrt[4]{D_s d^3} \quad (1.63)$$

L'inductance est alors :

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sl}} \quad (H/m) \quad (1.64)$$

L'inductance est alors :

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sl}} \quad (H/m) \quad (1.64)$$

1.6 Les paramètres transversaux :

1.6.1 Conductance

Le terme G , en effet, dû aux courants superficiels au long des chaînes d'isolateurs et à l'effet couronne des conducteurs est, par temps sec, G est inférieur à $0.005 \text{ C}\omega$; ce n'est que sous très forte pluie, lorsque les courants superficiels et les pertes par effet couronne sont les plus élevés, que G peut atteindre $0.1 \text{ C}\omega$ [1]. Ces conditions étant particulièrement rares, il est donc généralement admis de négliger la conductance transversale G des lignes.

1.6.2 La capacité de la ligne :

Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique C' de la ligne. Pour son calcul, le fait qu'un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie (loi de Faraday) [1].

1.6.3 Capacité d'une ligne monophasée :

Nous considérons d'abord la ligne monophasée à deux fils illustrée à Figure (1.11).

En utilisant

$$D_{xy} = D_{yx} = D, D_{xx} = r_x \text{ et } D_{yy} = r_y$$

$$V_{xy} = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \quad (1.65)$$

Pour une longueur de ligne de 1 mètre, la capacité entre les conducteurs est :

$$C_{xy} = \frac{q}{V_{xy}} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (1.66)$$

Et si $r_x = r_y = r$

$$C_{xy} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (1.67)$$

Si la ligne à deux fils est alimentée par un transformateur avec une prise centrale mise à la terre alors la tension entre chaque conducteur et la terre est :

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2} \quad (1.68)$$

$$C_n = C_{xn} = C_{yn} = \frac{q}{V_{xn}} = 2C_{xy} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (1.69)$$

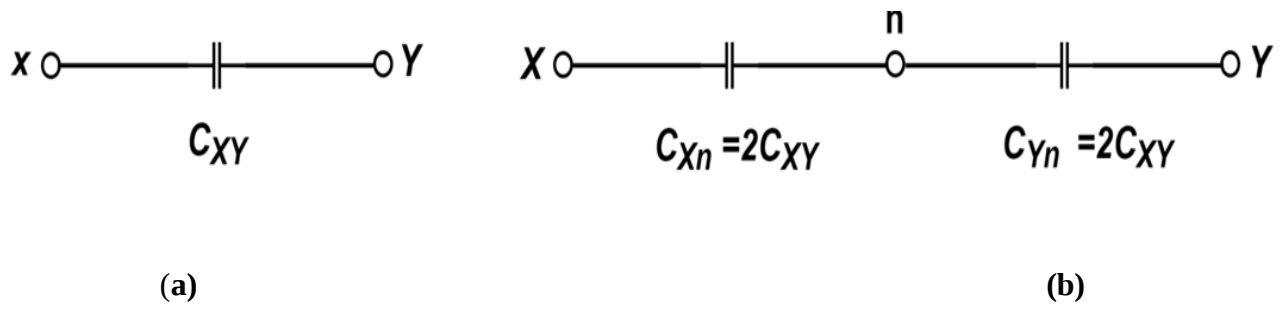


Figure (1.17) - Circuit des capacités d'une ligne monophasée à deux fils ((a) capacités ligne à ligne , (b) capacités ligne à neutre)

1.6.4 Capacité d'une ligne triphasée :

La ligne triphasée avec un espacement de phase égale illustré nous négligerons ici l'effet de la terre et des conducteurs neutres. Pour déterminer la capacité de séquence positive, supposons des charges des séquences positive q_a, q_b, q_c tel que [1]

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (1.70)$$

On a: $D_{aa} = D_{bb} = r$, et $D_{ab} = D_{ba} = D_{ca} = D_{cb} = D$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \quad (1.71)$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \quad (1.72)$$

$$V_{an} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\pi\epsilon} \right) \left[2q_a \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D} \right] \quad (1.73)$$

$$C_{an} = \frac{q_a}{v_{an}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (F/m) \quad (1.74)$$

En raison de la symétrie, le même résultat est obtenu pour $C_{bn} = q_b / v_{ab}$. Pour un fonctionnement triphasé équilibré, cependant, une seule phase doit être prise en compte. Une représentation du circuit de la capacité au neutre est illustrée à la Figure (1.17).

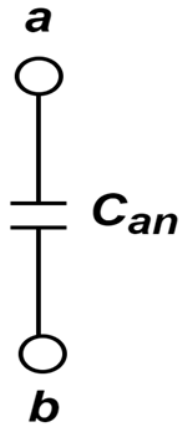


Figure (1.18) - Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal

1.6.5 Capacité des conducteurs en faisceaux :

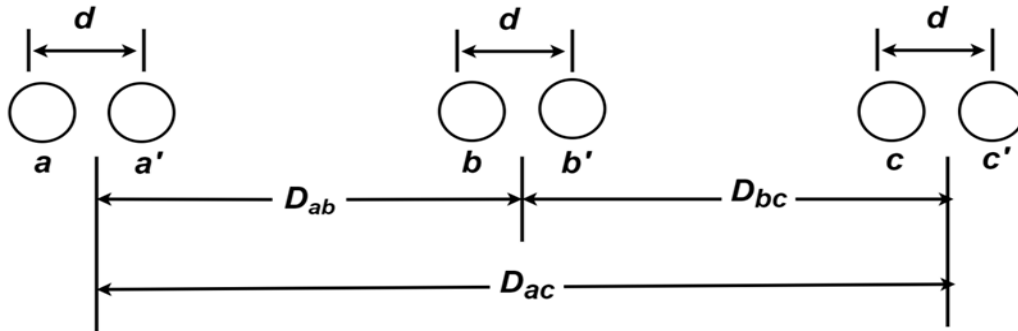


Figure (1.19) - Ligne triphasée avec deux conducteurs par faisceau.

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{ab}}{\sqrt{rd}} + q_a \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \quad (1.75)$$

$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{sc}}\right)} \quad (\text{F/m}) \quad (1.76)$$

1.7 Conclusion

Les lignes électriques assurent la fonction transport de l'énergie sur les longues distances, dans ce chapitre nous avons présenté le calcul des paramètres des lignes électriques et aussi on a fait une description de la ligne de transmission et la présentation des caractéristiques longitudinale (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs) de cette dernière.

Chapitre 2
Modélisation des lignes
électriques

2.1 Introduction

Le chapitre suivant porte sur la modélisation des lignes électriques, qui sont essentielle pour analyser et simuler le comportement des systèmes d'alimentation électrique. Différents modèles sont utilisés pour représenter les lignes, en fonction de leur longueur et de leurs caractéristiques électriques. Les modèles de lignes courtes et de lignes moyennes, tels que le modèle nominal, le modèle pi et le modèle nominal en T, permettent de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de ces lignes. Les modèles de lignes longues prennent en compte les pertes et les réactances distribuées le long de la ligne. Il existe également le concept de ligne sans pertes, utilisé dans des situations spécifiques. Enfin, l'analyse des limites de stabilité statique est cruciale pour garantir un fonctionnement fiable du réseau. La modélisation des lignes électriques permet d'optimiser les performances du réseau, d'identifier les problèmes potentiels et de guider les décisions de conception et de planification du réseau électrique.

2.2 Modélisation des lignes aériennes :

2.2.1 Modèle de lignes courtes :

On appelle une ligne courte une ligne de longueur inférieure à 80 Km son schéma équivalent est représenté dans la figure.1.

Dans le modèle de ligne courte l'impédance shunt est négligée donc :

$$Z = (r + j\omega L) l = R + jX \quad (2.1)$$

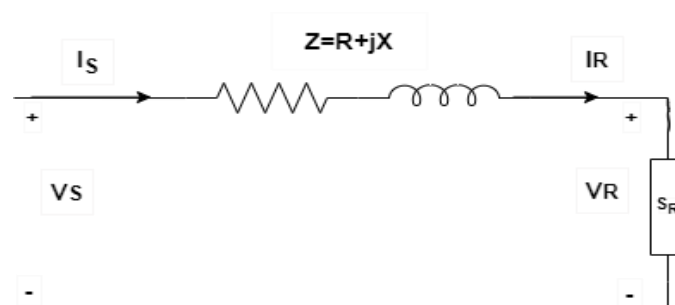


Figure (2.1) - Lignes courtes

Si une charge triphasée de puissance apparent S_R est connectée à la fin de la ligne de transmission, le courant traversant la charge pour les trois phases est donné par :

$$I_R = \frac{S_R^*}{3V_R^*} \quad (2.2)$$

Et la tension de source :

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.3)$$

Dans la figure.1 on a :

$$I_S = I_R \quad (2.4)$$

La ligne de transmission peut être représentée par un quadripôle comme indiqué dans la figure.2.

Et les équations peuvent être représentées par les paramètres chaines de quadripôle (ABCD)



. Figure (2.2) - La ligne de transmission représentée par un quadripôle

$$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases} \quad (2.5)$$

On peut écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Par comparaison, on a :

$$\begin{cases} A = 1 & B = Z \\ C = 0 & D = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.2 Modèle de lignes moyenne :

Les lignes moyennes sont caractérisées par une longueur comprise entre 80 et 250 Km. Tel que Z est l'impédance série totale de la ligne donnée par l'équation ;

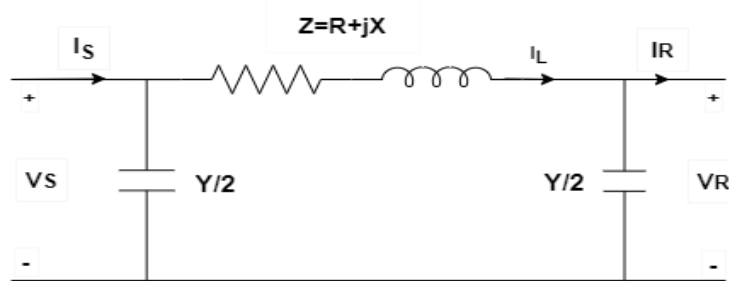
$$Z = (r + j\omega L) l = R + jX \quad (2.8)$$

Et Y est l'admittance totale de la ligne donnée par :

$$Y = (j\omega C) l \quad (2.9)$$

a) Le modèle nominal en π :

Le schéma modèle nominal π est obtenu comme suit :



. Figure (2.3) - Modèle en π de ligne moyenne

Le courant dans l'impédance série est

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (2.10)$$

Et la tension

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (2.11)$$

On remplace- I_L on obtient :

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R \quad (2.12)$$

Par la loi de Kirchhoff :

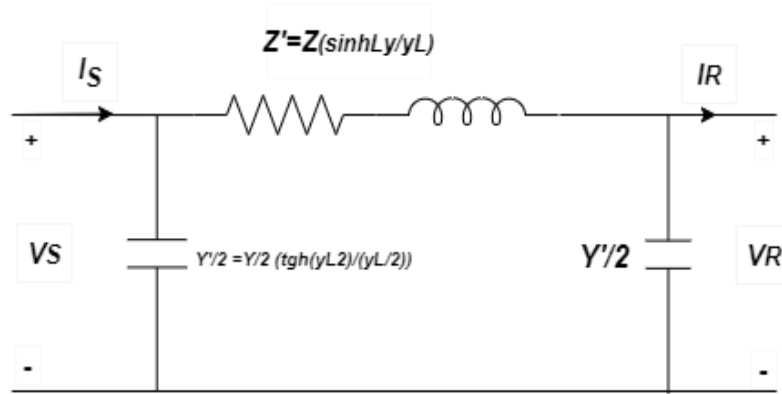
$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \quad (2.13)$$

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R \quad (2.14)$$

Donc

$$\begin{cases} A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & B = Z \\ C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{cases} \quad (2.15)$$

b) Le modèle nominal en T :



. Figure (2.4) - Modèle en T de ligne moyenne

$$\begin{cases} V_s = \frac{Z}{2} I_s + \frac{I_s - I_r}{y} \\ V_r = -\frac{Z}{2} I_r + \frac{I_s - I_r}{Y} \end{cases} \quad (2.16)$$

On peut récrire l'équation comme :

$$\begin{cases} V_s = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) I_s - \frac{I_r}{Y} \quad \dots (1) \\ V_r = -\left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) I_r + \frac{I_s}{Y} \quad \dots (2) \end{cases} \quad (2.17)$$

Déterminer I_s dans l'équation (2)

$$I_s = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_r + V_r Y \quad (2.18)$$

On remplace le courant I_s dans relation (1)

$$V_s = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right) \left(V_r Y + I_r \left(\frac{YZ}{2} + 1\right)\right) - I_r \frac{1}{Y} \quad (2.19)$$

$$\Rightarrow V_s = \left(\frac{YZ}{2} + 1\right) V_r + I_r Z \left(\frac{YZ}{4} + 1\right) \quad (2.20)$$

Donc

$$\begin{cases} A = \frac{ZY}{2} + 1 & B = Z \left(\frac{ZY}{4} + 1 \right) \\ C = Y & D = \frac{ZY}{2} + 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

2.3 Modèle de ligne longue :

On appelle une ligne longue une ligne de longueur supérieure à 250 Km, son schéma équivalent est représenté dans la figure(2.5)

$$V(x + \Delta x) = V(x) + Z\Delta x I(x) \quad (2.22)$$

Divisez sur Δx

$$\frac{V(x+\Delta x) - V(x)}{\Delta x} = zI(x) \quad (2.23)$$

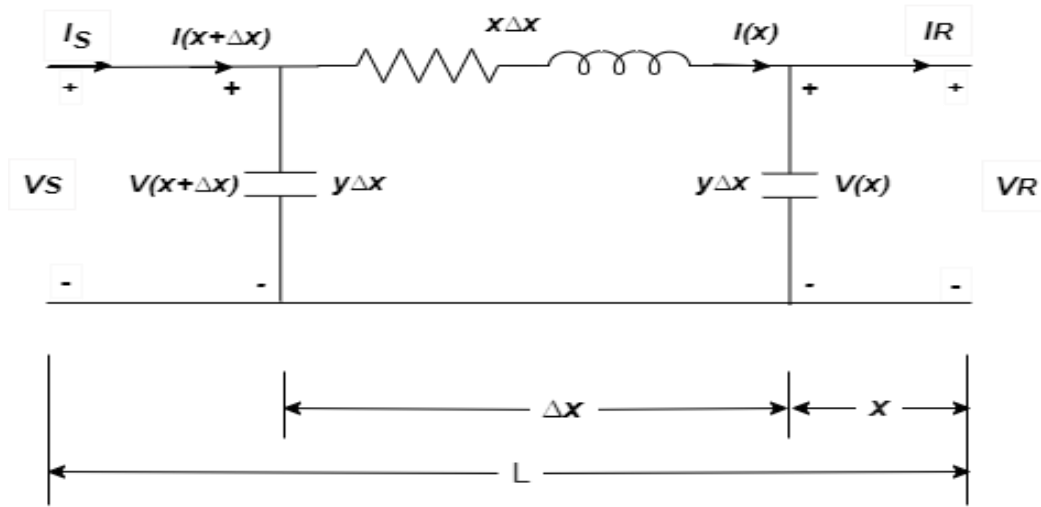


Figure (2.5) - Schéma d'une ligne longue

Si $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dV(x)}{dx} = zI(x) \quad (2.24)$$

Aussi, de la loi de Kirchhoff :

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y\Delta x V(x + \Delta x) \quad (2.25)$$

Donc

$$\frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = yV(x + \Delta x) \quad (2.26)$$

Si $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (2.27)$$

Si on dérive l'équation précédente, on a :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = z \frac{dI(x)}{dx} = zyV(x) \quad (2.28)$$

On pose :

$$\gamma^2 = zy \quad (2.29)$$

Où γ est appelée la constante de propagation

Donc, on a une équation de deuxième ordre de forme :

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad (2.30)$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.31)$$

Tel que

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \quad (2.32)$$

Où :

α : Coefficient linéique d'affaiblissement, il caractérise l'affaiblissement de l'onde incidente (appelé aussi constante d'atténuation)

β : Coefficient linéique de phase de l'onde incidente

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.33)$$

$$= \sqrt{\frac{\gamma}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.34)$$

On pose

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (2.35)$$

Où :

Z_C : est appelée l'impédance caractéristique de la ligne.

$Y_C = \sqrt{y/z}$ est appelée admittance caractéristique de la ligne.

Donc :

$$I(x) = \frac{1}{z_x} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (2.36)$$

Pour les conditions initiales $I(0)=I_R$ et $V(0)=V_R$, on trouve les constants A_1 et A_2 :

$$\begin{cases} A_1 = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} \\ A_2 = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} \end{cases} \quad (2.37)$$

On remplace A_1 et A_2 dans les équations:

$$\begin{cases} V(x) = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma x} \\ I(x) = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} e^{-\gamma x} \end{cases} \quad (2.38)$$

Donc :

$$\begin{cases} V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_R + Z_C \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_R \\ I(x) = \frac{1}{Z_C} \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} V_R + \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} I_R \end{cases} \quad (2.39)$$

On a

$$\begin{cases} \sinh(\gamma) = \frac{e^{\gamma} - e^{-\gamma}}{2} \\ \cosh(\gamma) = \frac{e^{\gamma} + e^{-\gamma}}{2} \end{cases} \quad (2.40)$$

L'équation devient

$$\begin{cases} V(x) = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x \\ I(x) = V_R \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma x + I_R \cosh \gamma x \end{cases} \quad (2.41)$$

Donc

$$\begin{cases} V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \\ I_S = V_R \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l + I_R \cosh \gamma l \end{cases} \quad (2.42)$$

La forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

On

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_C \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Donc

$$\begin{cases} A = \cosh \gamma l & B = Z_C \sinh \gamma l \\ C = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & D = \cosh \gamma l \end{cases} \quad (2.45)$$

L'équivalent exact d'un circuit d'une longue ligne peut être établi en utilisant la notation "T" ou "π". Les paramètres du circuit équivalent peuvent être facilement déterminés en le comparant à ceux qui se rapportent à une ligne de moyennes.

D'après le schéma en π, nous avons:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \hat{Y} \cdot Z/2 & \hat{Z} \\ \hat{Y} \cdot (1 + \hat{Y} \cdot \hat{Z}/4) & 1 + \hat{Y} \cdot Z/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Pour avoir l'équivalence exacte :

$$\hat{Z} = Z_C \cdot \sinh \gamma l = \sqrt{z/y} \sinh \gamma l \quad (2.47)$$

$$= \sqrt{z/y} \frac{1}{l} \frac{\sqrt{z}}{\sqrt{y}} \sinh \gamma l = \frac{zl}{l\sqrt{zy}} \sinh \gamma l = Z \frac{\sinh \gamma l}{l\gamma} \quad (2.48)$$

On doit multiplier l'impédance Z par K_1 pour obtenir le paramètre Z' du circuit équivalent.

$$1 + (\dot{Y} \cdot \dot{Z})/2 = \cos h\gamma l \quad (2.49)$$

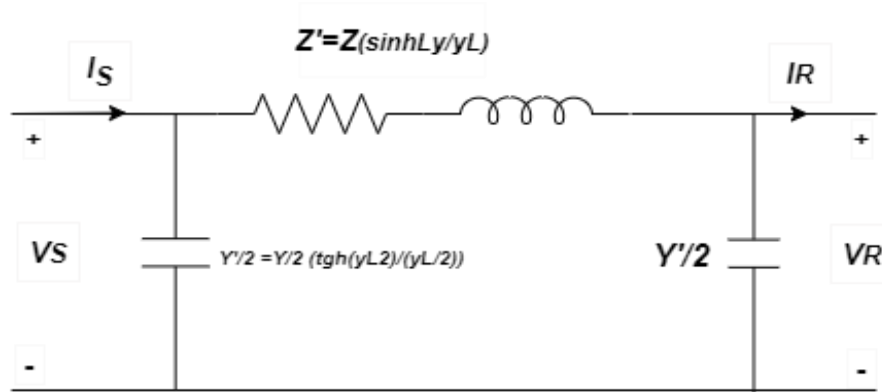
$$\Rightarrow 1 + (\dot{Y} \cdot Z_c \sin \gamma l h)/2 = \cos \gamma l \quad (2.50)$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{Y}}{2} = \frac{\cos h\gamma l - 1}{Z_c \sin h\gamma l} = \frac{1}{Z_c} \cdot \tanh(\gamma l/2) \quad (2.51)$$

$$= \frac{\sqrt{y} \sqrt{y} l}{\sqrt{z} \sqrt{y} l} - \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \gamma l \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\gamma l} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (2.52)$$

Pour obtenir Y' le paramètre de circuit équivalent, multipliez l'admission Y par K_2 , où

$$K_2 = \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (2.53)$$



2.4 Ligne sans pertes:

Pour une ligne sans pertes $r = g = 0$ et

$$Z = (j\omega l) \quad (2.54)$$

$$Y = (j\omega c) \quad (2.55)$$

L'impédance caractéristique sera

$$Z_c = \sqrt{z/y} = \sqrt{\frac{j\omega l}{j\omega c}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \Omega \quad (2.56)$$

Et

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} = \sqrt{(j\omega l)(j\omega c)} \quad (2.57)$$

$$= j\omega\sqrt{LC} = j\beta \quad \text{m}^{-1} \quad (2.58)$$

donc $\beta = \omega\sqrt{LC}$

Les paramètres ABCD de la ligne seront :

$$\begin{cases} A = \cos \gamma l & B = Z_c \sin \gamma l \\ C = \frac{1}{Z_c} \sin \gamma h & D = \cos \gamma l \end{cases} \quad (2.59)$$

$$A(x) = D(x) = \cosh(\gamma x) = \cosh(j\beta x) = \frac{e^{j\beta x} + e^{-j\beta x}}{2} =$$

$$\frac{\cos(\beta x) + j \sin(\beta x) + \cos(-\beta x) + j \sin(-\beta x)}{2} = \cos(\beta x) \quad (2.60)$$

$$B(x) = Z_c \sinh(\gamma x) = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{e^{j\beta x} - e^{-j\beta x}}{2} =$$

$$j \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\cos(\beta x) + j \sin(\beta x) - \cos(-\beta x) - j \sin(-\beta x)}{2} = j \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\beta x) \quad \Omega \quad (2.61)$$

$$C(x) = \frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} = j \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\beta x) \quad \Omega^{-1}$$

Circuit équivalent en π sera :

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) = j \sqrt{L/C} \sin(\beta l) = (j\omega L l) \frac{\sin(\beta l)}{\beta l} = j\hat{X} \quad \text{et}$$

$$\frac{\hat{Y}}{2} = \frac{Y \tanh(\gamma l/2)}{2 \gamma l/2} = \frac{Y \tanh(j\beta l/2)}{2 j\beta l/2} = \frac{Y \sinh(j\beta l/2)}{2 (j\beta l/2) \cosh(j\beta l/2)}$$

$$= \frac{Y}{2} \frac{j \sin(\beta l/2)}{(j\beta l/2) \cos(\beta l/2)} = \frac{j\omega C L \tan(\beta l/2)}{2 (\beta l/2)} = \frac{j\omega C l}{2} \quad S \quad (2.62)$$

Longueur d'onde :

La distance nécessaire pour le courant lorsque la tension change sa déviation de deux radians ou 360° est connue sous le nom de longueur d'onde.

Pour une ligne sans pertes :

$$V(x) = V_R A(x) + I_R(x) \quad (2.63)$$

$$V(x) = V_R \cos(\beta x) + j I_R Z_c \sin(\beta x) \quad (2.64)$$

Et

$$I(x) = V_R C(x) + I_R D(x) \quad (2.65)$$

$$I(x) = V_R \frac{j \sin(\beta x)}{Z_C} + I_R \cos(\beta x) \quad (2.66)$$

Puisque $V(x)$ et $I(x)$ modifient leurs déplacements de 2π rad si $x = \lambda$, la longueur de l'onde est donnée par les deux équations suivantes :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \quad (2.67)$$

Et la vitesse de propagation de la tension est :

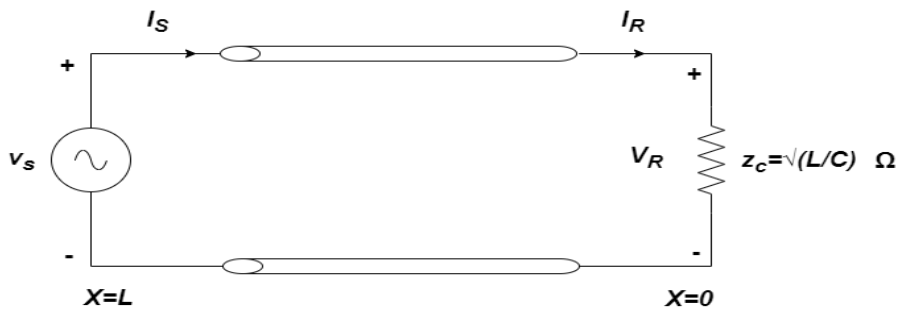
$$v = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.68)$$

Pour la plupart des lignes aériennes $v \approx 3 \times 10^8$ m/s et pour $f = 50$ Hz

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{LC}} = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ Km} \quad (2.69)$$

2.4.1 Ligne chargée par son impédance caractéristique :

Si une charge résistive connectée au bout de la ligne sans pertes est égale à l'impédance caractéristique de la ligne $Z_c = \sqrt{L/C}$, l'amplitude de la tension est constante à tous points x de la ligne.



$$V(x) = V_R A(x) + I_R B(x) \quad \text{et} \quad I_R = \frac{V_R}{Z_C} \quad (2.70)$$

$$V(x) = V_R \cos(\beta x) + j \frac{V_R}{Z_C} Z_C \sin(\beta x) \quad (2.71)$$

$$V(x) = V_R \cos(\beta x) + jV_R \sin(\beta x) \quad (2.72)$$

$$V(x) = V_R(\cos(\beta x) + j\sin(\beta x)) = V_R e^{j\beta x} \quad (2.73)$$

$$\|V(x)\| = \|V_R\| \quad (2.74)$$

La même chose pour le courant

$$I(x) = V_R \frac{j \sin(\beta x)}{Z_C} + I_R \cos(\beta x) \quad (2.75)$$

$$I(x) = V_R \frac{j \sin(\beta x)}{Z_C} + \frac{V_R}{Z_C} \cos(\beta x) \quad (2.76)$$

$$I(x) = \frac{V_R}{Z_C} (\cos(\beta x) + \sin(\beta x)) \quad (2.77)$$

$$I(x) = \frac{V_R}{Z_C} e^{j\beta x} \quad (2.78)$$

La puissance délivrée par la source dans le point x de la ligne monophasée est :

$$S(x) = V(x) \times I(x)^* = V_R e^{j\beta x} \times \frac{V_R}{Z_C} e^{-j\beta x} = \frac{V_R^2}{Z_C} \quad (2.79)$$

Donc la puissance délivrée est constante le long de la ligne et elle est seulement active (la puissance réactive est nulle).

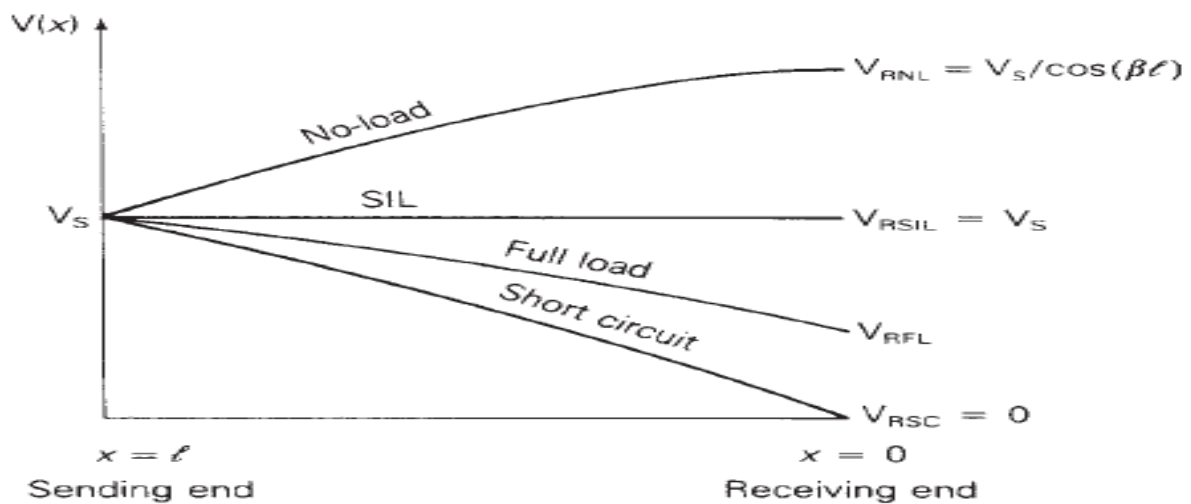


Figure (2.6) -Variation de la Tension $V(x)$ pour quatre cas

Profile de la tension :

1- (No-Load), Ligne ouverte $I_{RNL} = 0$ et $V_{NL}(x) = V_{RNL} \cos(\beta x) \Rightarrow V_{RNL} = V_S / \cos(\beta l)$

2- (SIL) la ligne chargée par son impédance caractéristique

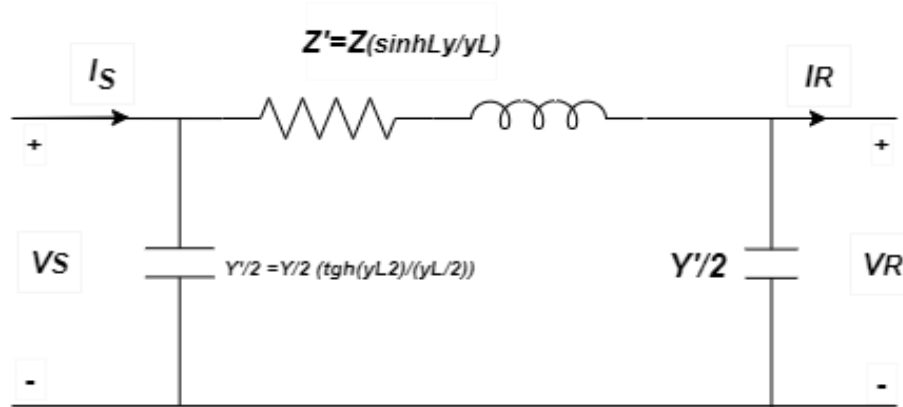
3- (Short circuit) Court-Circuit $V_{RSC} = 0$ et $V_{SC}(x) = I_{RSC} Z_C \sin(\beta l)$, la tension diminue de V_S à $V_{RSC} = 0$

4- (Full-load), Charge Maximale, la tension dépend de spécification du courant maximal.

2.5 Limite de stabilité statique :

Considérant le circuit équivalent pour calculer la puissance active fournie par la ligne Pas de pertes.

Sachant que les amplitudes des tensions V_S et V_R sont constantes et sont séparées par un Anglais δ



Par la loi des mailles, le courant I_R est :

$$I_R = \frac{V_S - V_R}{Z'} - \frac{Y'}{2} V_R = \frac{|V_S|e^{j\delta} - V_R}{Z'} - \frac{j\omega C l}{2} V_R \quad (2.80)$$

La puissance apparente de la charge pour une ligne monophasée est :

$$S_R = V_R I_R^* = V_R \left(\frac{V_S - V_R}{jX'} - \frac{Y'}{2} V_R \right)^* = V_R \frac{|V_S|e^{-j\delta} - V_R}{-jX'} + \frac{j\omega C l}{2} V_R^2 \quad (2.81)$$

$$= \frac{jV_R|V_S| \cos(\delta) + V_R|V_S| \sin(\delta) - jV_R^2}{X'} + \frac{j\omega C l}{2} V_R^2 \quad (2.82)$$

la puissance active délivrée est :

$$P = P_R = P_S = \text{Re}(S_R) = \frac{V_R|V_S| \sin(\delta)}{X'} \quad W \quad (2.83)$$

La puissance active est maximale pour $\delta = 90^\circ$

$$P_{\max} = \frac{V_R|V_S|}{X'} \quad W$$

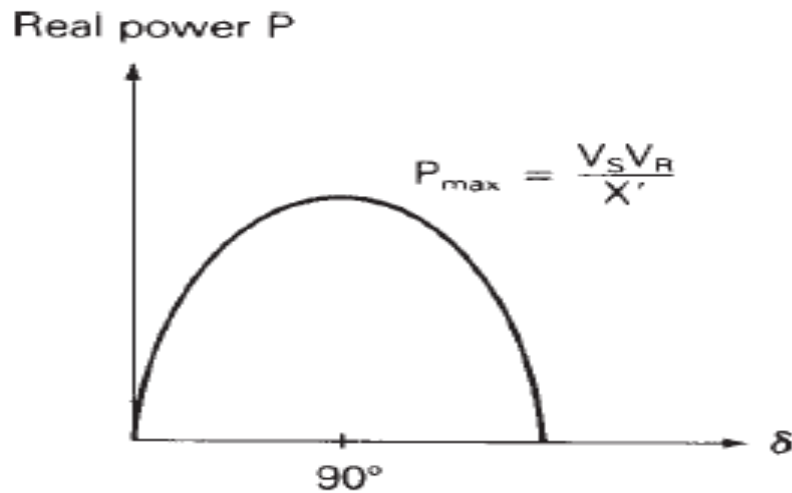


Figure (2.7)- La puissance active est maximale

2.6 Conclusion :

La modélisation des lignes électriques constitue un outil précieux pour comprendre, analyser et améliorer les performances des systèmes d'alimentation électrique. Elle contribue à assurer un fonctionnement fiable et efficace du réseau en prenant en compte les caractéristiques spécifiques des lignes et les limites de stabilité. Les professionnels du domaine électrique peuvent ainsi utiliser ces modèles pour optimiser la conception et la gestion des réseaux électriques. Dans le chapitre prochain on entamera les performances des lignes électriques aériennes.

Chapitre 3

Les performances des lignes aériennes

3.1 Introduction :

Le chapitre suivant se concentre sur l'analyse des performances des lignes électriques aériennes. Dans ce chapitre, nous examinerons les différents aspects qui influencent ces performances, tels que le choix de la tension, la section des conducteurs, la chute de tension, le contrôle de la tension et l'analyse de stabilité. Nous explorerons les avantages et les inconvénients du transport de l'énergie électrique en haute tension, en mettant l'accent sur les spécificités des lignes aériennes. De plus, nous discuterons des méthodes pour optimiser les performances de ces lignes, en tenant compte des facteurs environnementaux, économiques et techniques. En comprenant ces éléments clés, nous pourrions mieux appréhender les défis et les opportunités associés à la gestion efficace et fiable des lignes électriques aériennes.

3.2 L'utilité de transporter l'énergie électrique en haute tension :

Le transport de l'énergie électrique en haute tension présente plusieurs avantages et est largement utilisé dans les réseaux électriques à grande échelle. Voici quelques-unes des principales raisons pour lesquelles l'énergie électrique est transportée en haute tension: [8][9]

- a) **1. Réduction des pertes d'énergie :** Lorsque l'énergie électrique est transportée sur de longues distances, les pertes d'énergie dues à la résistance des conducteurs sont inévitables. Cependant, en augmentant la tension de transport, on réduit le courant électrique nécessaire pour une puissance donnée, conformément à la loi d'Ohm. Une réduction du courant entraîne une réduction proportionnelle des pertes d'énergie selon la formule $\Delta P_{\text{Perte}} = I^2 \times R$. Ainsi, en utilisant des tensions élevées, on peut minimiser les pertes d'énergie pendant le transport.
- b) **Économies de coût :** L'utilisation de tensions élevées pour le transport de l'énergie électrique permet d'économiser des coûts en réduisant les pertes d'énergie mentionnées précédemment. Moins d'énergie perdue signifie moins de production d'électricité nécessaire pour compenser ces pertes, ce qui permet de réduire les coûts de génération. De plus, le dimensionnement des conducteurs pour une tension plus élevée est plus économique, car des courants plus faibles peuvent être transportés à travers des conducteurs de taille plus petite.
- c) **Augmentation de la capacité du réseau :** En augmentant la tension de transport, on peut augmenter la capacité de charge du réseau électrique. Une tension plus élevée

permet de transporter plus de puissance à travers les mêmes lignes de transmission, ce qui signifie que le réseau peut répondre à une demande croissante d'électricité sans nécessiter d'expansion majeure des infrastructures.

- d) **Intégration des sources d'énergie renouvelable éloignées** : Les sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie éolienne et solaire, sont souvent situées dans des régions éloignées des centres de consommation d'électricité. Le transport de l'énergie électrique en haute tension permet d'acheminer efficacement cette énergie produite à partir de sources renouvelables vers les zones où elle est nécessaire, en minimisant les pertes d'énergie sur le chemin.
- e) **Fiabilité du réseau** : Les systèmes électriques à haute tension sont conçus pour être plus robustes et résistants aux perturbations. Les lignes de transmission à haute tension sont généralement isolées et protégées contre les conditions météorologiques défavorables et les dommages causés par des événements tels que les chutes d'arbres. Cela permet de maintenir un niveau élevé de fiabilité du réseau électrique et de réduire les interruptions d'alimentation.[8][9]

3.3 Les Paramètres des performances

3.3.1 Choix de la section des conducteurs aériens :

Le choix de la section des conducteurs aériens dans un système de transmission d'électricité dépend de plusieurs facteurs, notamment la charge électrique à transporter, la distance de transmission, les contraintes environnementales et les normes réglementaires. Voici quelques considérations importantes pour choisir la section des conducteurs aériens :

-  **Capacité de transport de courant** : La section des conducteurs doit être dimensionnée pour transporter en toute sécurité le courant électrique requis pour la charge prévue. Une section plus grande permet de transporter davantage de courant sans surchauffe du conducteur. Les normes et réglementations spécifiques établissent des limites pour la densité de courant admissible, qui détermine la taille minimale des conducteurs.
-  **Chute de tension** : Une section de conducteur appropriée permet de minimiser les pertes par effet Joule et les chutes de tension sur la ligne de transmission. Des pertes d'énergie excessives peuvent entraîner une inefficacité du système et une baisse de tension inacceptable à la charge. Le dimensionnement des conducteurs doit donc

prendre en compte les pertes d'énergie admissibles et la chute de tension maximale autorisée.

✚ **Contraintes mécaniques** : Les conducteurs aériens sont soumis à des forces mécaniques, notamment le poids du conducteur lui-même, le vent, la tension de ligne et les contraintes dues à la dilatation thermique. La section des conducteurs doit être choisie de manière à résister à ces forces et à éviter les ruptures ou les déformations excessives.

✚ **Coût** : Le coût des matériaux utilisés pour les conducteurs augmente généralement avec la section. Il est donc important de trouver un équilibre entre les exigences de capacité de transport et les coûts associés à une section plus grande. L'optimisation économique consiste à choisir la section la plus petite possible tout en respectant les autres critères importants.

✚ **Conditions environnementales** : Les conditions climatiques, telles que la température, la neige, la glace et les conditions corrosives, peuvent influencer le choix de la section des conducteurs. Par exemple, dans les régions où la glace et la neige peuvent s'accumuler sur les conducteurs, une section plus grande peut être nécessaire pour éviter les surcharges mécaniques.[8][9]

3.3.2 Chute de tension dans une ligne aérienne :

La chute de tension dans une ligne aérienne se produit en raison de la résistance des conducteurs et de l'impédance réactive de la ligne. Lorsqu'un courant électrique circule à travers les conducteurs, une partie de la tension est perdue en raison de la résistance des conducteurs, conformément à la loi d'Ohm.

De plus, la présence d'impédance réactive dans la ligne, due principalement à l'inductance des conducteurs, entraîne une diminution supplémentaire de la tension. L'impédance réactive produit une différence de phase entre la tension et le courant, ce qui se traduit par une chute de tension dans la ligne.

La chute de tension est proportionnelle à la longueur de la ligne, à la valeur du courant qui y circule et à la résistance et à l'impédance de la ligne. Plus la ligne est longue, plus la chute de tension est importante. De même, plus le courant est élevé, plus la chute de tension sera importante en raison de l'effet Joule causé par la résistance des conducteurs.

La chute de tension doit être prise en compte lors de la conception et de l'exploitation d'un système électrique. Une chute de tension excessive peut entraîner des problèmes tels qu'une

alimentation électrique insuffisante, une mauvaise performance des appareils électriques et une réduction de l'efficacité du système.

Pour minimiser la chute de tension, plusieurs mesures peuvent être prises, notamment :

✚ **Utiliser des conducteurs de plus grande section** : Des conducteurs de plus grande section réduisent la résistance des conducteurs et, par conséquent, la chute de tension due à l'effet Joule.

Utiliser des matériaux conducteurs à faible résistance : Les conducteurs en cuivre ont une résistance plus faible que les conducteurs en aluminium, ce qui réduit la chute de tension.

✚ **Réduire la longueur de la ligne** : En raccourcissant la distance de transmission, on réduit la chute de tension.

✚ **Utiliser des transformateurs de tension** : Les transformateurs de tension peuvent être utilisés pour augmenter la tension dans une ligne de transmission, réduisant ainsi le courant et la chute de tension associée.

✚ **Compenser la chute de tension** : Dans certaines situations, il peut être nécessaire d'utiliser des dispositifs de compensation de la tension, tels que les régulateurs de tension ou les dispositifs STATCOM (compensateur statique synchrone), pour maintenir la tension à des niveaux acceptables. [8][9]

$$\Delta u = \mp 10\%$$

3.4 Évaluation de la performance des lignes électriques

L'évaluation de la performance des lignes aériennes électriques implique une analyse approfondie de différents aspects. Voici les éléments clés à prendre en compte :

3.4.1 Analyse de stabilité :

a) Facteurs de stabilité :

✚ La configuration physique de la ligne : Cela comprend la hauteur des pylônes, la distance entre les conducteurs, la géométrie des isolateurs, etc. Ces facteurs affectent la stabilité mécanique des lignes aériennes électriques.

✚ La résistance des conducteurs : La résistance des conducteurs a un impact sur la stabilité thermique de la ligne et les pertes de puissance.

- ✚ L'inductance et la capacité de la ligne : Ces paramètres influencent la réponse de la ligne aux variations de tension et de courant.

b) Limites de stabilité :

- ✚ La tension maximale admissible : Les lignes aériennes électriques ont des limites de tension spécifiées pour éviter les problèmes de sécurité et de qualité d'alimentation.
- ✚ La charge maximale admissible : Les lignes aériennes ont une capacité de charge maximale, au-delà de laquelle leur stabilité peut être compromise. .[11]

3.4.2 Analyse des pertes de puissance :

a)-Calcul des pertes ohmiques :

Les pertes ohmiques sont causées par la résistance des conducteurs de la ligne aérienne. Des calculs précis permettent d'estimer ces pertes en fonction des courants traversant la ligne et des caractéristiques des conducteurs.

b)- Pertes par effet Joule :

Les pertes par effet Joule résultent des courants qui traversent la ligne aérienne et génèrent de la chaleur due à la résistance des conducteurs. Ces pertes peuvent avoir un impact sur l'efficacité énergétique du système. [11]

3.4.3 Analyse de la qualité de tension :

a) Fluctuations de tension : Les fluctuations de tension se réfèrent aux variations rapides et aléatoires de la tension dans une ligne électrique. L'évaluation de la qualité de tension implique la mesure des écarts par rapport à la tension nominale et l'analyse des variations de tension à court terme, telles que les creux, les pics et les variations brèves.

b) Facteur de crête : *Le facteur de crête est une mesure du rapport entre la valeur maximale de crête de la tension et la valeur efficace. Il indique l'amplitude des variations de tension dans une ligne électrique. Un facteur de crête élevé peut indiquer des problèmes de qualité de tension et peut nécessiter des mesures correctives.*

c) Harmoniques : Les harmoniques sont des composantes de fréquence non linéaires présentes dans la tension ou le courant d'une ligne électrique. L'évaluation des harmoniques implique l'analyse de la distorsion harmonique totale (DHT) et l'identification des fréquences harmoniques présentes dans le système. Les harmoniques

peuvent causer des problèmes de qualité de tension et d'interférences avec d'autres équipements électriques sensibles. .[11]

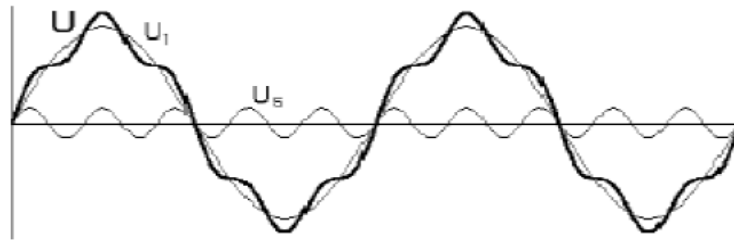


Figure (3.1)- Distorsion provoquée par un seul harmonique ($h=5$).

3.5 Amélioration des performances des lignes électriques

L'amélioration de la performance des lignes électriques peut être réalisée en mettant en œuvre différentes techniques et mesures. Voici quelques domaines clés d'amélioration :

3.5.1 Techniques de régulation de tension :

- a) **Transformateurs de puissance** : Les transformateurs de puissance peuvent être utilisés pour ajuster la tension sur les lignes électriques, en augmentant ou en diminuant la tension en fonction des besoins du système.
- b) **Compensation réactive** : La compensation réactive consiste à ajouter des dispositifs tels que des condensateurs ou des bobines en série ou en parallèle avec la ligne électrique pour compenser les pertes et les chutes de tension on améliorant ainsi la qualité de tension et l'efficacité du système.[10]

3.5.2 Réduction des pertes de puissance :

- a) **Optimisation de la charge** : Une meilleure gestion de la charge électrique permet de réduire les pertes de puissance en ajustant la répartition de la charge sur les différentes lignes électriques, en évitant les surcharges et les déséquilibres.
- b) **Techniques de transport d'énergie** : L'utilisation de techniques telles que le transport d'énergie en courant continu (HVDC) peut réduire les pertes de puissance lors du transport à longue distance, offrant une meilleure efficacité énergétique.[10]

3.5.3 Renforcement de la stabilité :

a)- **Contrôle de la fréquence** : Le contrôle de la fréquence vise à maintenir une fréquence stable sur les lignes électriques, ce qui est essentiel pour garantir la synchronisation et le bon fonctionnement des équipements électriques.

b)- **Contrôle de la tension** : Le contrôle de la tension est crucial pour maintenir une tension stable et dans les limites acceptables sur les lignes électriques, en utilisant des dispositifs de régulation de la tension tels que les régulateurs automatiques de tension (AVR) ou les dispositifs de compensation de puissance réactive.

3.6 Avantages et Inconvénients des lignes électriques aériennes :

3.6.1 Les Avantage :

- a) **Coût initial réduit** : Les lignes électriques aériennes ont généralement un coût initial inférieur par rapport aux systèmes souterrains. Les pylônes sont moins coûteux à installer que les câbles souterrains, ce qui les rend plus économiques pour les projets de grande envergure.
- b) **Facilité de maintenance** : Les lignes aériennes offrent un accès plus facile pour l'entretien, la réparation et l'inspection. Les techniciens peuvent accéder rapidement aux lignes et aux équipements, ce qui permet une maintenance plus efficace.
- c) **Dissipation de la chaleur** : Les lignes aériennes permettent une meilleure dissipation de la chaleur générée par le transport de l'énergie électrique. L'air ambiant peut aider à refroidir les conducteurs, évitant ainsi les problèmes de surchauffe.
- d) **Flexibilité et évolutivité** : Les lignes électriques aériennes offrent une plus grande flexibilité et évolutivité en termes de modification de la capacité de transport de l'énergie. Il est relativement plus simple d'ajouter de nouveaux conducteurs ou de modifier les configurations existantes pour répondre à l'évolution des besoins en électricité.

3.6.2 Les Inconvénients:

- e) **Vulnérabilité aux intempéries** : Les lignes aériennes sont plus exposées aux intempéries, tels que les tempêtes de vent, la neige et la glace. Ces conditions peuvent endommager les conducteurs, les pylônes ou les isolateurs, entraînant des pannes de courant et des interruptions du service.

- f) Impacts visuels et environnementaux :** Les lignes aériennes peuvent être considérées comme peu esthétiques, surtout dans les zones urbaines et les paysages naturels. De plus, elles peuvent perturber les habitats fauniques et la migration des oiseaux.
- g) Sensibilité aux interférences électromagnétiques :** Les lignes électriques aériennes peuvent être sensibles aux interférences électromagnétiques provenant d'autres équipements ou de lignes de communication voisines, ce qui peut affecter la qualité du signal.
- h) Restrictions de zonage :** Dans certaines régions, il peut y avoir des restrictions de zonage qui limitent l'installation de nouvelles lignes aériennes pour des raisons esthétiques ou de sécurité.
- i) Risques pour la sécurité publique :** Les lignes aériennes présentent un risque potentiel pour la sécurité publique, notamment en cas de chute de conducteurs ou de contacts accidentels avec des équipements électriques.

3.7 Conclusion :

Le transport de l'énergie électrique en haute tension présente des avantages significatifs tels que la réduction des pertes d'énergie, les économies de coûts, l'augmentation de la capacité du réseau, l'intégration des sources d'énergie renouvelable et la fiabilité du réseau. La chute de tension dans une ligne aérienne est principalement causée par la résistance des conducteurs et l'impédance réactive de la ligne, mais elle peut être réduite en utilisant des conducteurs de plus grande section, des matériaux conducteurs à faible résistance, des transformateurs de tension et d'autres techniques de compensation. Le contrôle de la tension et l'optimisation des performances de la ligne peuvent être réalisés grâce à des méthodes telles que la régulation automatique de la tension, les compensateurs d'énergie réactive, le contrôle de la puissance réactive, la planification et l'optimisation de la topologie, la gestion de la charge, ainsi que la surveillance et le diagnostic avancés. Cependant, il est important de tenir compte des avantages et des inconvénients des lignes électriques aériennes, qui peuvent varier selon les conditions locales, la densité de population et les considérations environnementales. Dans certains cas, l'utilisation de lignes souterraines peut être préférable, surtout dans les zones densément peuplées ou sensibles sur le plan environnemental.

Chapitre 4

Résultats et Simulation

Introduction :

Pour la validation de notre travail nous avons utilisé comme modèle d'étude un réseau IEEE 14générateurs on utilisons PSAT (voir ANNEX 'A , B') sous environnement Matlab.

4.2 Réseau d'application :

Dans ce cas nous allons faire nos analyses sur un réseau constitué de 14 jeux de barres. Nous avons choisi ce réseau parce qu'il est réel et approuvé par le IEEE (**réseau teste model IEEE-14JB**), c'est Un modèle standard applicable pour des différentes études.

Réseau teste :

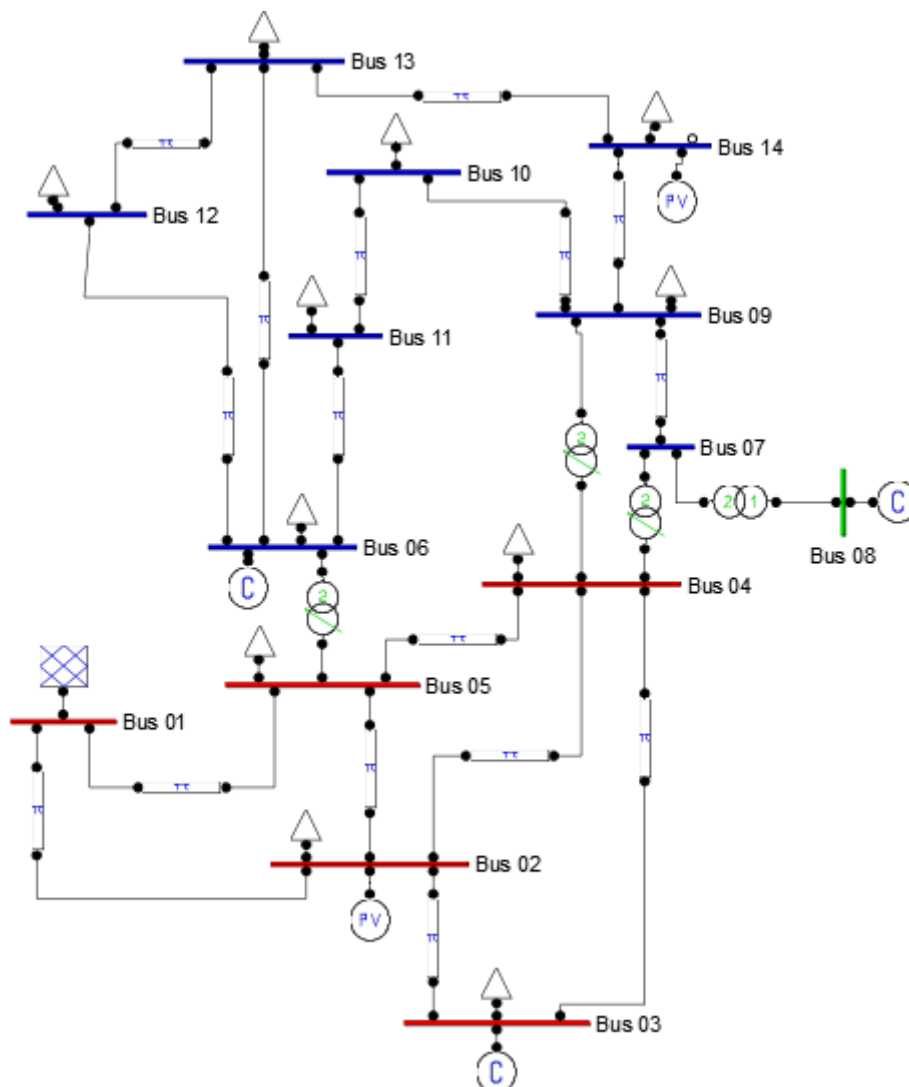


Figure (4.1) : Réseau Teste Model IEEE-14JB

L'exécution de la simulation sous PSAT nous permet d'avoir les valeurs des tensions ainsi que les pertes de puissances.

4.2.1 Tension aux niveaux des nœuds sans utilisation des FACTS :

Valeurs des tensions et angles aux niveaux des nœuds.

Tableau (4.1) - Tableau des Tensions et Angles

Bus (A-Z)	V_m (p.u)	δ (rad)
Bus 01	1.06	0
Bus 02	1.045	-0.65698
Bus 03	1.01	-1.5286
Bus 04	0.69289	-1.2603
Bus05	0.67532	-1.0766
Bus 06	1.07	-1.8942
Bus 07	0.79138	-1.6786
Bus 08	1.09	-1.6786
Bus 09	0.69726	-1.8975
Bus 10	0.72065	-1.9318
Bus 11	0.87511	-1.9191
Bus 12	0.97628	-1.9636
Bus 13	0.9259	-1.9646
Bus 14	0.68148	-2.0695

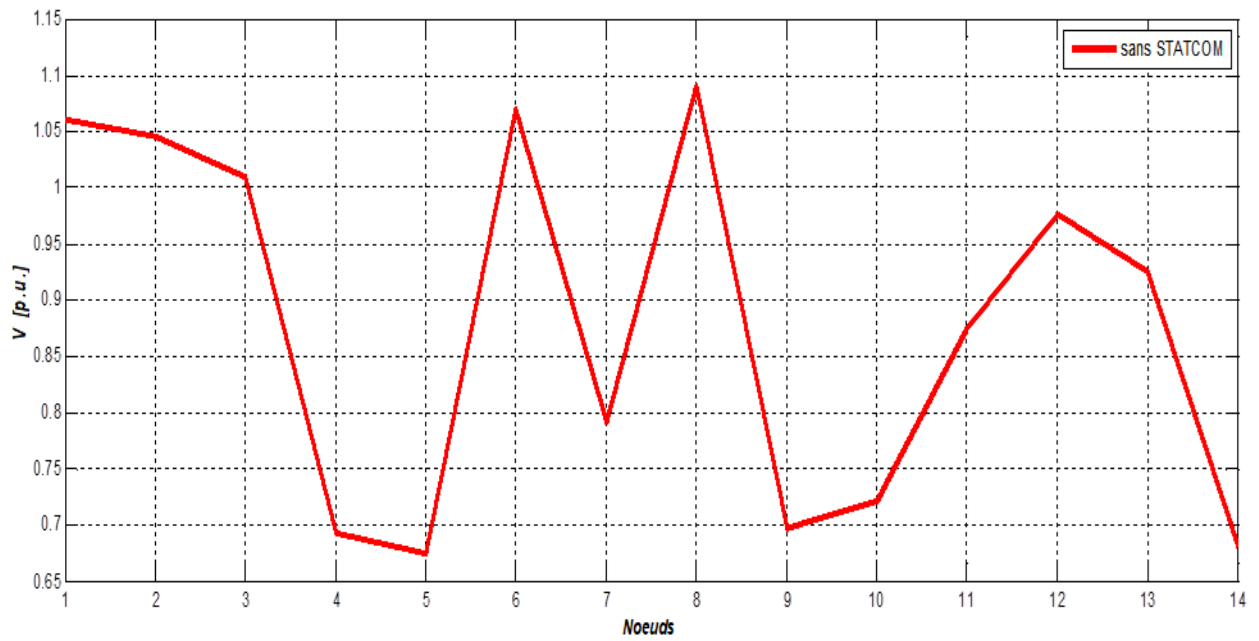


Figure (4.2) : Tension aux niveaux des nœuds du Model 14JB

Tension sous forme radar :

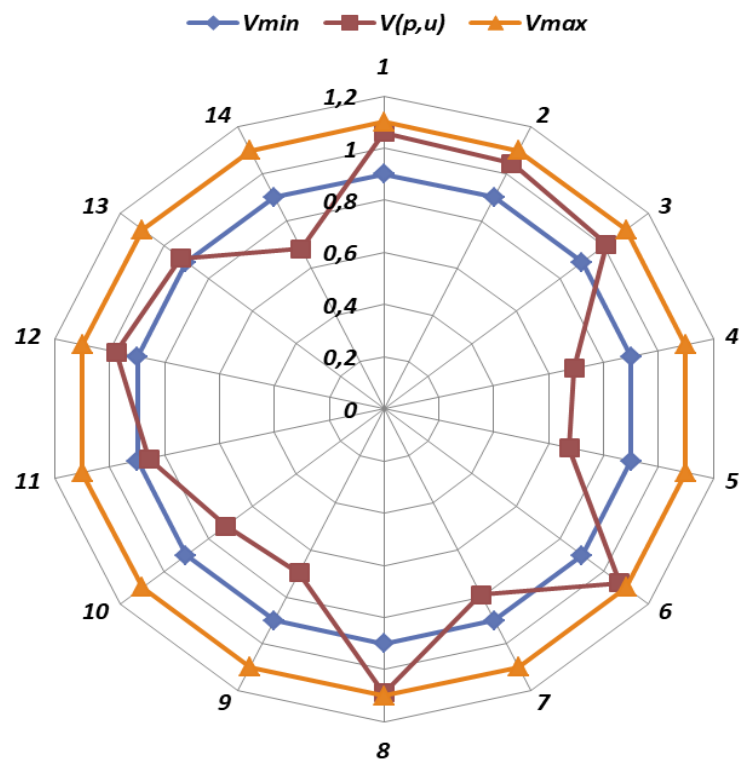


Figure (4.3) : Tension De Model 14 JB Sous Forme Radar.

Les deux figures nous montrent la défaillance des tensions aux niveaux des nœuds de tensions, pour l'amélioration de cette dernière nous allons utiliser deux types de FACTS shunt (voir Annexe 'B') et série pour maintenir les tensions dans une plage acceptable ainsi pour minimiser les pertes

4.2.2 Cas 1 :

Réglage des tensions aux niveaux des jeux de barres (model IEEE-14JB) avec l'application des systèmes FACTS (voir Annexe B) pour l'amélioration des défaillances sur le plan tension et puissances.

Dans ce cas, nous l'utiliserons les systèmes FACTS sous PSAT, la figure suivante notre réseau test avec l'application d'un STATCOM.

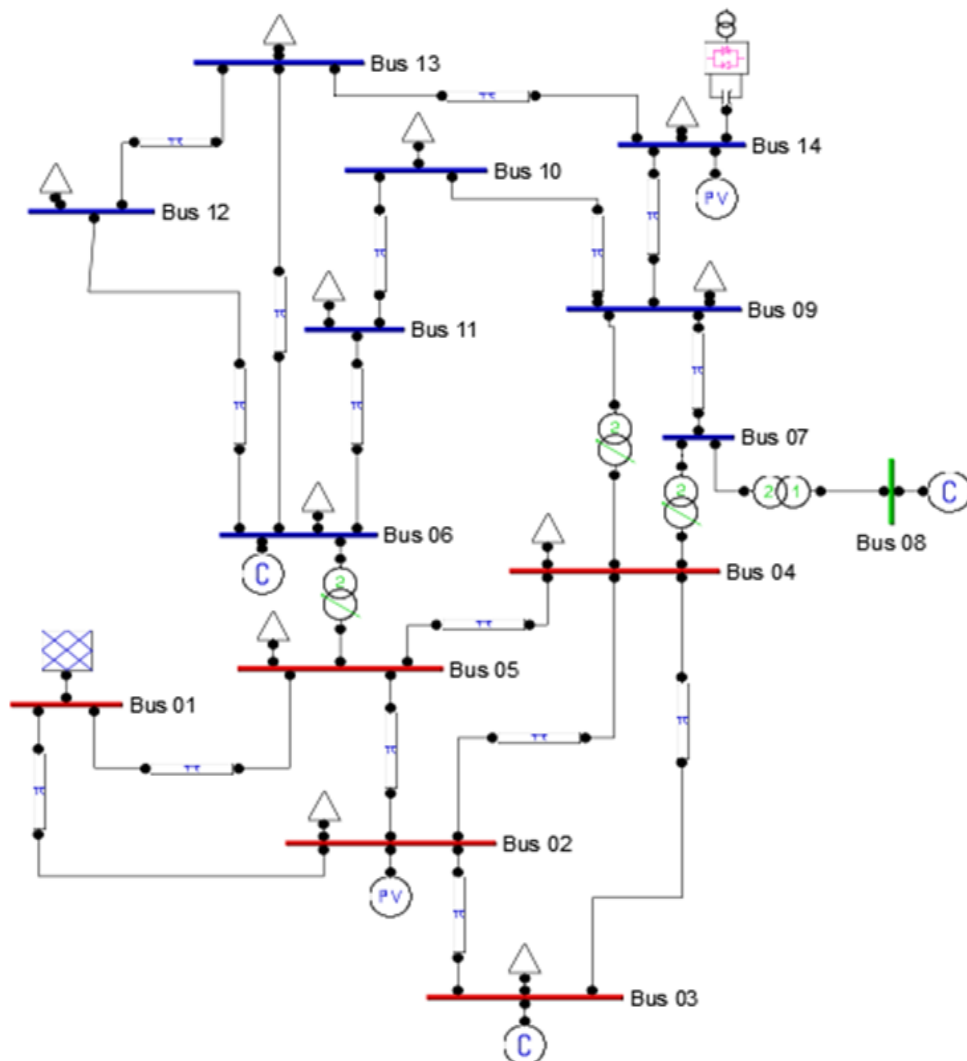


Figure (4.4) - réseau teste (model IEEE-14 JB) avec STATCOM

a- Tension aux niveaux des nœuds avec STATCOM :

L'emplacement du STATCOM au niveau du JB 14 n'a pas amélioré la tension a ce jeux de barre seulement mais il a participé a amélioré l'ensemble des tensions du réseau aux niveaux des nœuds Figure (4.5, 4.6).

Tableau (4.2) Tableau des Tensions et Angles Nœuds Avec STATCOM

Nœuds (A-Z)	V_m (p.u)	δ (rad)
01	1.06	0
02	1.045	-0.13164
03	1.01	-0.33541
04	0.99844	-0.26688
05	1.003	-0.22827
06	1.07	-0.37263
07	1.0416	-0.34487
08	1.09	-0.34487
09	1.0248	-0.38572
10	1.0217	-0.39068
11	1.0404	-0.38469
12	1.0506	-0.39535
13	1.0453	-0.39935
14	1.0377	-0.43134

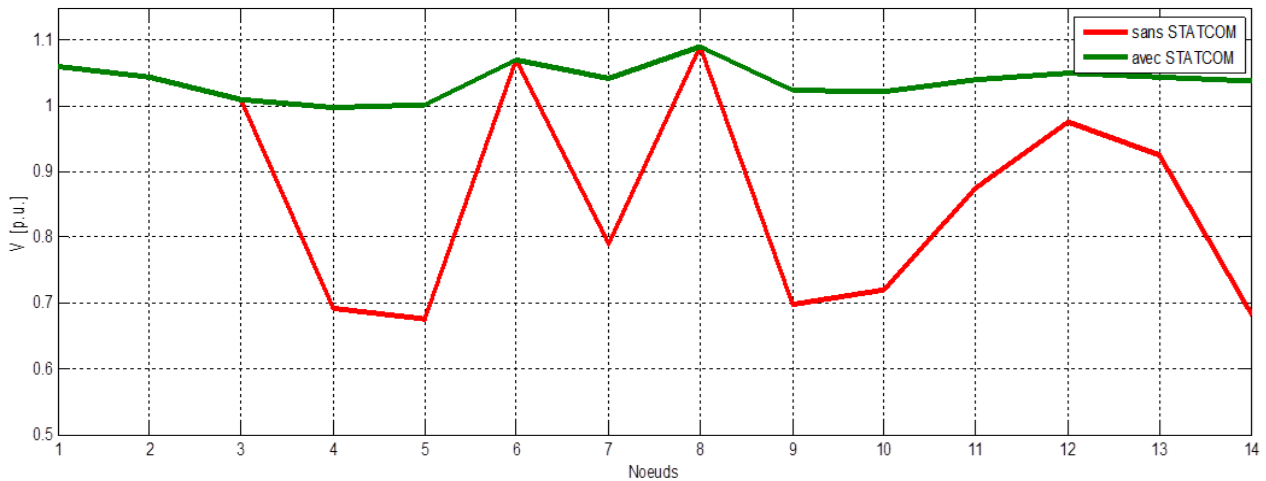


Figure (4.5) - Courbes des Tensions sans et avec STATCOM.

b- Présentation des tensions sous orme radar sans et avec STATCOM :

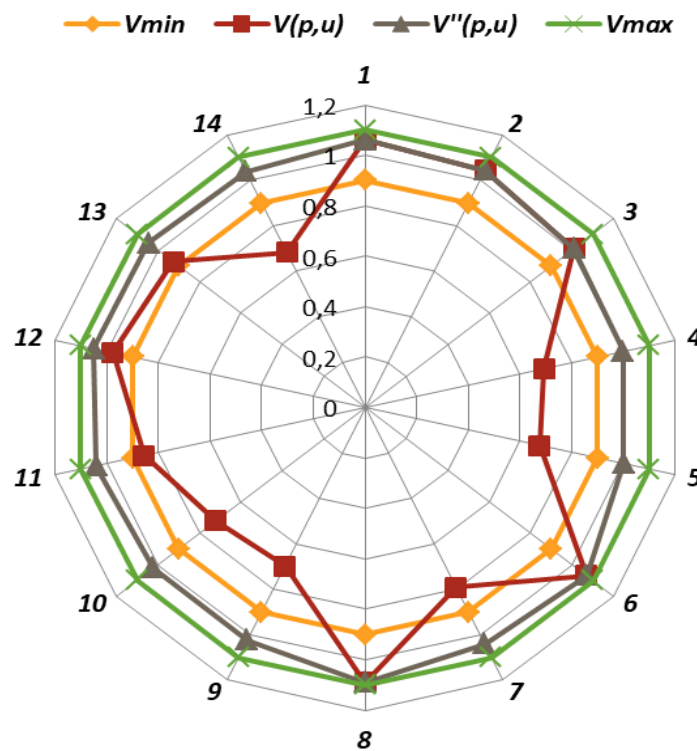


Figure (4.6) - présentation de tensions sans et avec STATCOM.

Ici, nous remarquons que les valeurs des tensions s'améliorent lors de l'application du STATCOM, comme la montre la figure ci-dessus. L'application du STATCOM à bien assurer le contrôle des tensions.

c- Pertes des puissances du réseau test sans et avec utilisation des

FACTS :

Les deux tableaux suivants présentent les valeurs de puissance actives et réactives qui transitent dans le réseau pour les deux cas.

c-1- Tableau des pertes de puissances actives et réactive sans et avec STATCOM :

Tableau (4.3) - Résultats Du System IEEE 14 Nœuds sans et avec STATCOM

Nœuds	Sans STATCOM		Avec STATCOM	
	P (I) (p.u)	Q (I) (p.u)	P (I) (p.u)	Q (I) (p.u)
1	15.0309	2.9967	3.4557	-0.26946
2	0.27211	11.306	0.26397	0.72066
3	-3.7304	4.6252	-1.3588	0.34609
4	-1.8929	-0.1584	-0.68948	-0.0577
5	-0.30096	-0.06336	-0.10963	-0.02308
6	-0.44352	4.2044	-0.16155	0.02237
7	0	0	0	0
8	0	1.8478	0	0.29943
9	-1.1682	-0.65737	-0.42552	-0.23944
10	-0.3564	-0.22968	-0.12982	-0.08366
11	-0.1386	-0.07128	-0.05049	-0.02596
12	-0.24165	-0.06336	-0.08799	-0.02308
13	-0.5346	-0.22968	-0.19473	-0.08366
14	-0.59004	-0.198	-0.21492	0.1355

c-2-Les pertes des puissances (P, Q) sans et avec STATCOM :

Nous présentant ici les courbes représentatives des pertes de puissances active et réactive

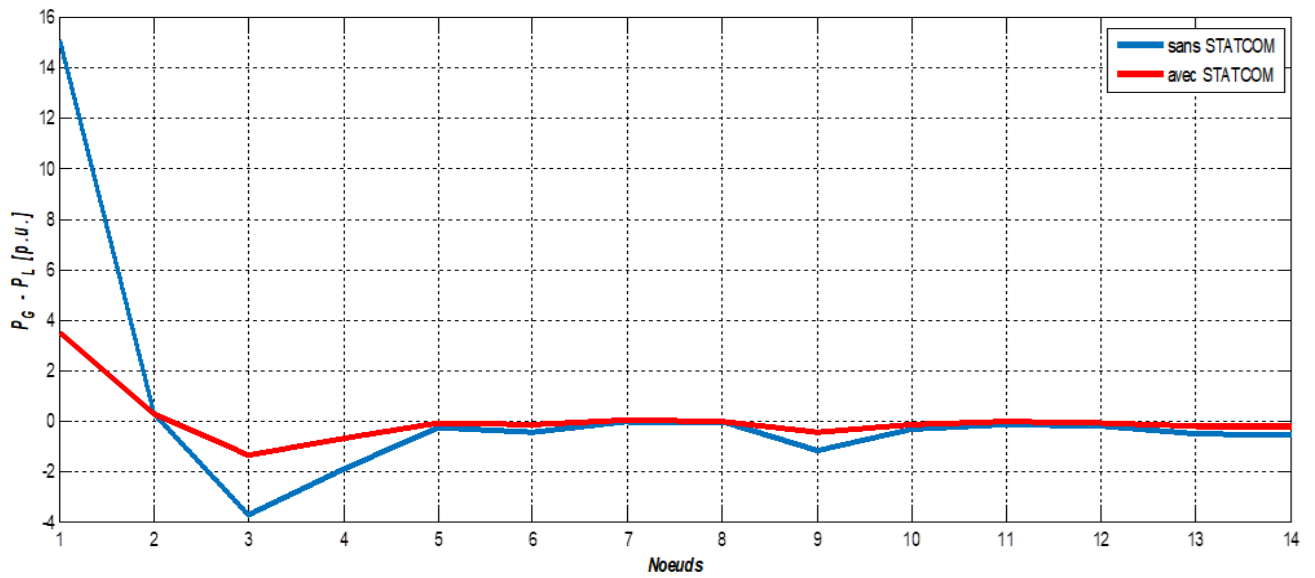


Figure (4.7) - Pertes de puissances actives sans et avec STATCOM du model IEEE-14JB

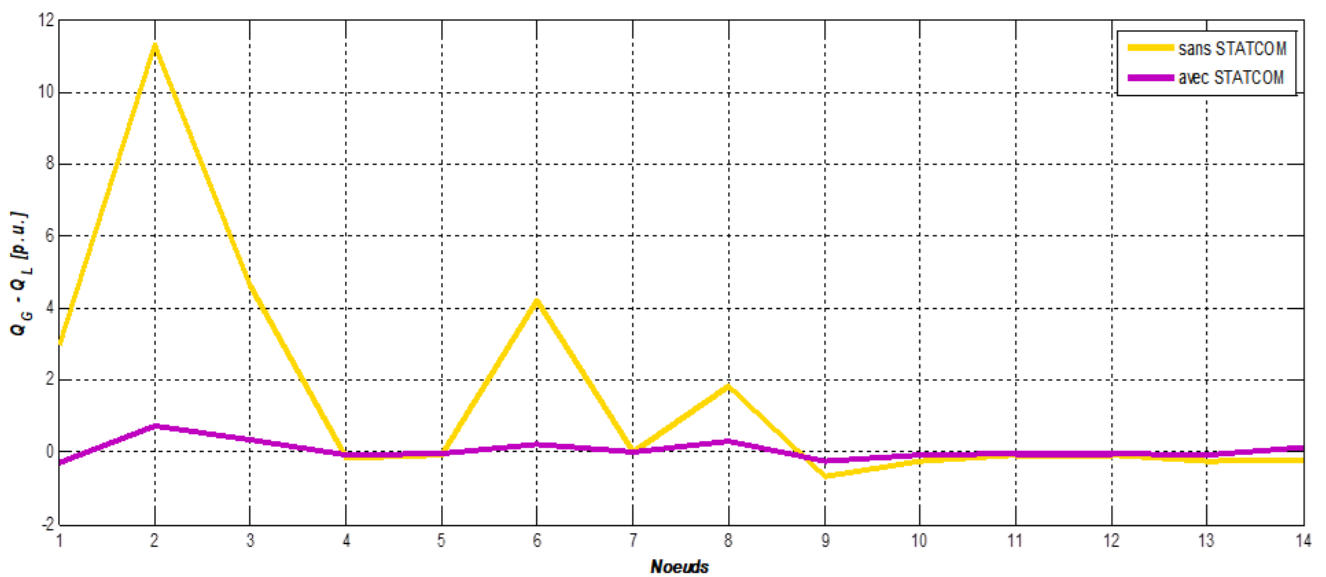


Figure (4.8) - Profile des pertes de puissances réactives sans et avec STATCOM de model IEEE-14JB.

4.2.3 Cas 2 :

Réglage de tension et pertes des puissances active et réactive au niveau dU jeux de barres (model IEEE-14JB) avec le système FACTS série (SSSC).

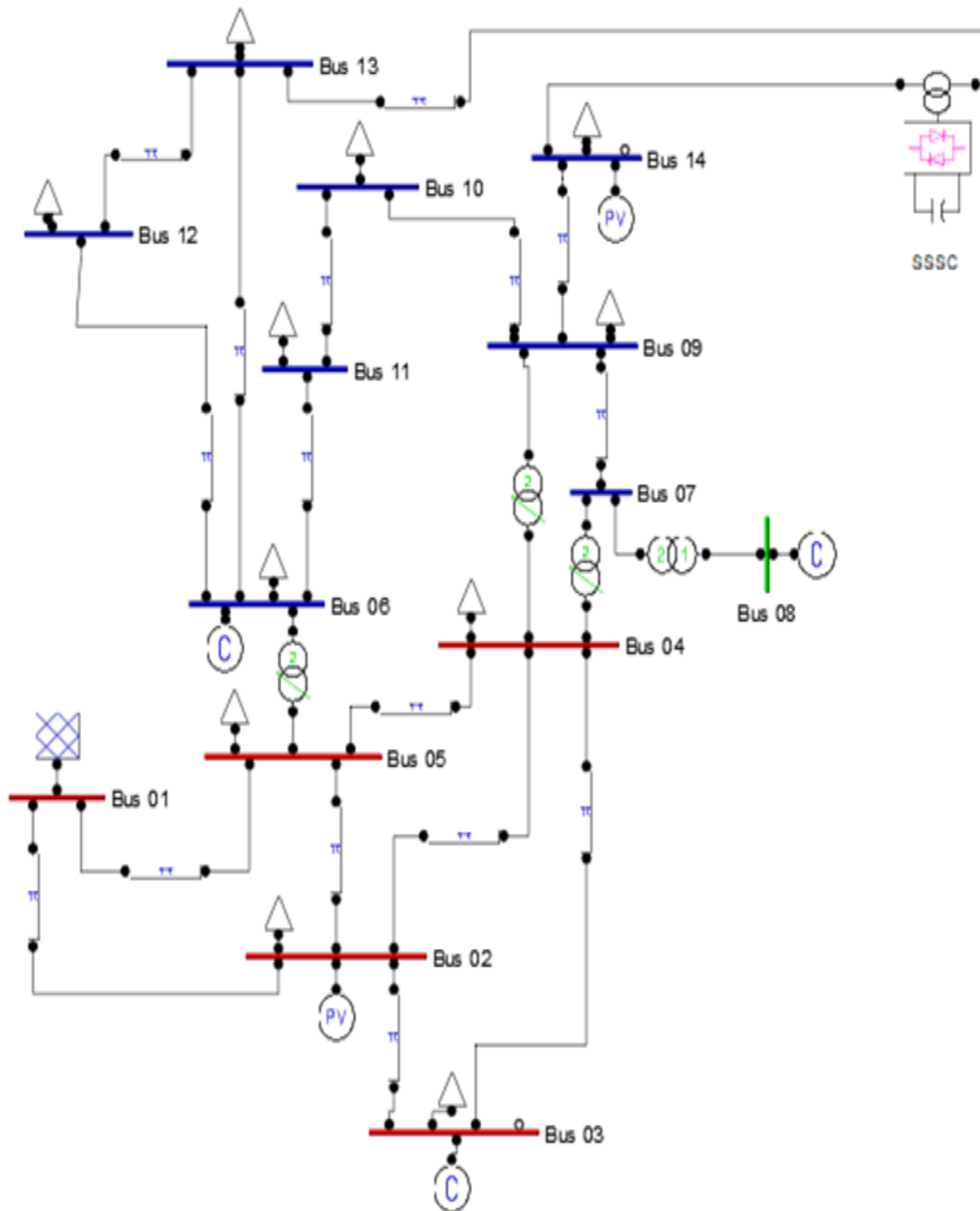


Figure (4.9) – Réseau Teste du model IEEE-14 JB avec un compensateur statique SSSC

a-Tension aux niveaux des nœuds avec SSSC :

L'emplacement du SSSC au niveau du JB 14 n'a pas amélioré la tension a ce jeux de barre seulement mais il a participé a amélioré l'ensemble des tensions du réseau, comme présente dans la figure (4.1).

Tableau (4.4) - Tableau des Tensions et Angles Nœuds Avec SSSC

Nœuds	V_m (p.u)	δ (rad)
1	1.06	0
2	1.045	0.00158
3	1.01	0.00695
4	1.0357	0.00102
5	1.0361	9e-05
6	1.07	-0.01363
7	1.069	0.00536
8	1.09	0.00536
9	1.0612	0.00761
10	1.0628	0.00382
11	1.0665	-0.00469
12	1.0589	-0.01565
13	1.0478	-0.0131
14	1.04	0.04216

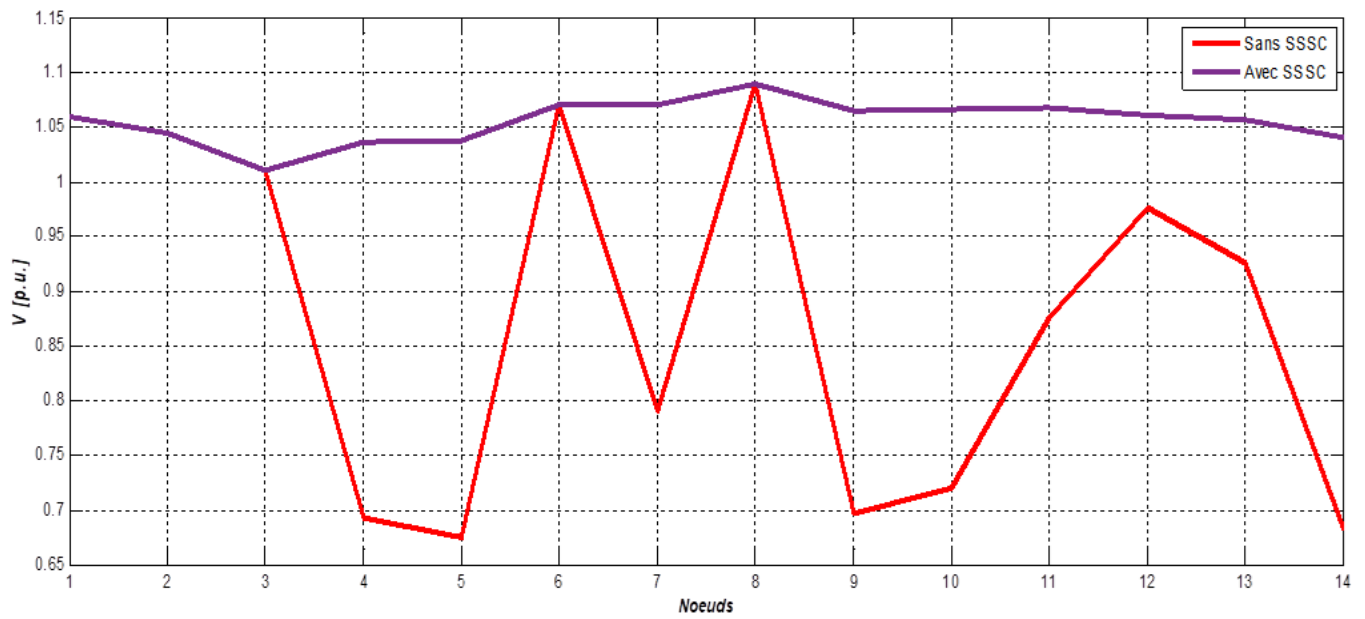


Figure (4.10) - Tension sans et avec SSSC du model IEEE-14 JB

b - La tension sous forme radar sans et avec SSSC :

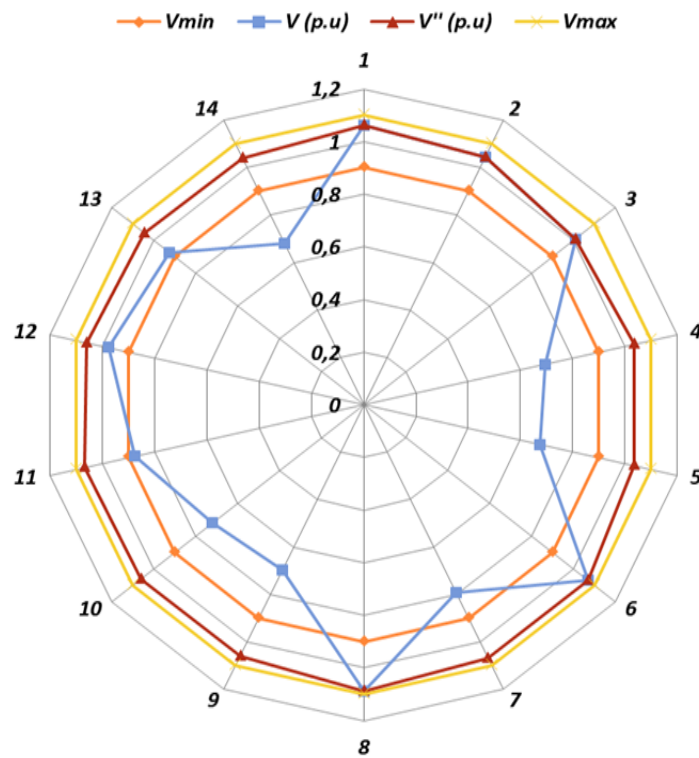


Figure (4.11) - Tension sans et avec SSSC du model IEEE-14 JB sous forme radar.

Ici, nous observons que les valeurs de tension ont complètement changé, changeant le diagramme de tension. Le diagramme dans (V) représente le schéma de tension précédant le SSSC, tandis que le diagramme en (V'') représente les diagrammes de tension suivant le SSSC. C'est ce que fait le système FACTS : il régule la répartition des charges dans tout le réseau, améliorant ainsi la capacité de transit et réduisant les pertes.

c-Tableau des pertes des puissances actives et réactive sans et avec SSSC:

Tableau (4.5) - résultats du system IEEE 14 nœuds sans et avec SSSC

Nœuds	Sans SSSC		Avec SSSC	
	P (I) (p.u)	Q (I) (p.u)	P (I) (p.u)	Q (I) (p.u)
1	15.0309	2.9967	2.3248	-0.15258
2	0.27211	11.306	0.183	0.35161
3	-3.7304	4.6252	-0.942	0.07783
4	-1.8929	-0.1584	-0.478	-0.04
5	-0.30096	-0.06336	-0.076	-0.016
6	-0.44352	4.2044	-0.112	0.12073
7	0	0	0	0
8	0	1.8478	0	0.23226
9	-1.1682	-0.65737	-0.295	-0.166
10	-0.3564	-0.22968	-0.09	-0.058
11	-0.1386	-0.07128	-0.035	-0.018
12	-0.24165	-0.06336	-0.061	-0.016
13	-0.5346	-0.22968	-0.135	-0.058
14	-0.59004	-0.198	-0.149	0.01196

c-2-Les pertes des puissances (P, Q) sans et avec SSSC :

Nous présentent ici les courbes représentatives des pertes de puissances active et réactive

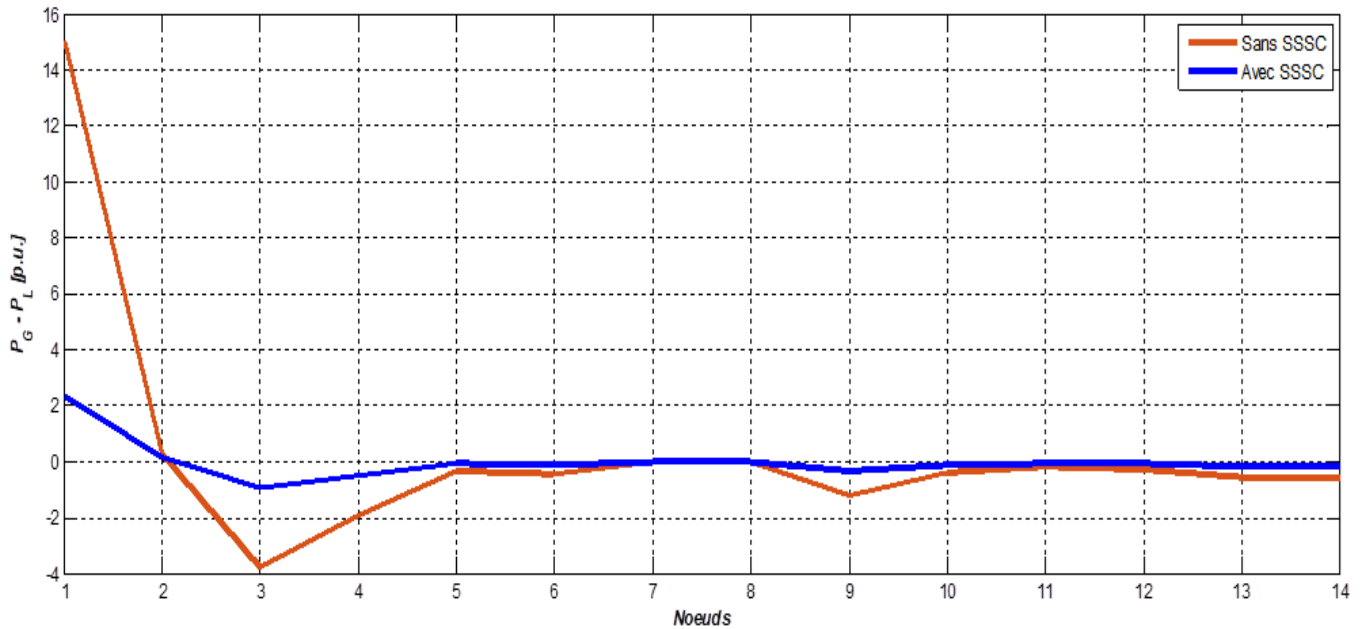
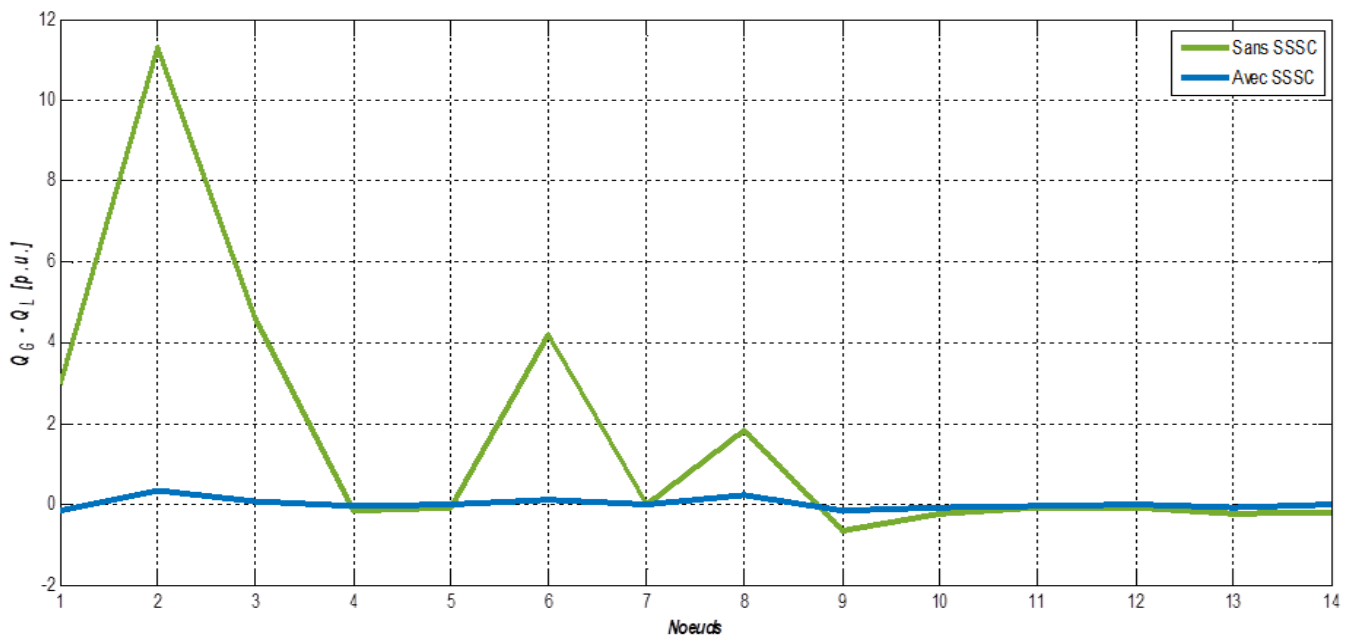


Figure (4.12) - Pertes des puissances actives sans et avec SSSC du model IEEE-14JB.



. Figure (4.13) – Pertes puissances réactives sans et avec SSSC du model IEEE-14JB.

5. Conclusion :

D'après les résultats obtenus nous avons constaté que malgré le bon choix de la ligne il est nécessaire d 'injecter un compensateur statique dans le réseau électrique pour le maintien des tensions dans leurs normes ainsi un bon écoulement de puissance qui est confirmée par la minimisation des pertes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude des performances des lignes électriques, ou on a fait une simulation MATLAB - (logiciel PSAT), d'un réseau test (IEEE 14 nœuds), puis un réglage par le dispositif STATCOM et SSSC. Les résultats d'écoulement de puissance ont été améliorés (tension, les angles et les pertes des puissances active et réactive)

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les lignes électriques, l'architecture et l'exploitation des différents types des lignes.

Dans le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents types de lignes de transport de l'énergie électrique utilisant le modèle en π , en T, Ligne sans pertes, Limite de stabilité statique.

Le troisième chapitre consacré aux performances lignes aériennes avec les différents composants qui les constituent

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation Matlab- (logiciel PSAT)- pour calculer : les tensions, les angles et les pertes des puissances active et réactive.

Enfin, nous jugeons que ce travail est loin d'être achevé et il peut être poursuivi dans plusieurs directions.

- Utiliser l'OPF en optimisant les pertes actives
- Utiliser d'autres outils de calculs tel que le MATPOWER
- Voir l'effet d'autres dispositifs FACTS, "UPFC" sur le profil de tension et les pertes de systèmes de puissance plus complexe

ANNEXE

ANNEXE A

PSAT

1. Domaines d'études qui intéressent PSAT :

PSAT est une boîte à outils Matlab pour l'analyse et le contrôle des systèmes électriques. La version de ligne de commande de PSAT est également compatible avec Octave. PSAT inclut l'alimentation flux, flux continu de puissance, flux optimal de puissance, analyse de la stabilité des petits signaux et la simulation temporelle. Toutes les opérations peuvent être évaluées au moyen de graphiques. Les interfaces utilisateur (GUI) et une bibliothèque Simulink fournissent un outil convivial pour la conception du réseau.

PSAT coré est la routine de flux de puissance, qui prend également en charge la variable d'état initialisation. Une fois que le flux de puissance a été résolu, d'autres flux statiques et/ou dynamiques une analyse peut être effectuée. Ces routines sont [12] :

- ✚ Maintien du flux de puissance.
- ✚ De l'écoulement de puissance optimal.
- ✚ Analyse de la stabilité des petits signaux.
- ✚ Simulations du domaine temporel.
- ✚ Emplacement de l'unité de mesure de phase (PMU).

Afin d'effectuer une analyse précise du système d'alimentation, PSAT on prend en charge divers modèles de composants statiques et dynamiques, comme suit [13]

- ✚ Données de flux de puissance : Barres de bus, lignes de transmission et transformateurs, bus mous, PV générateurs, charges de puissance constantes et admittances de shunt.
- ✚ Données CPF et OPF : Offres et limites d'alimentation électrique, réserves de puissance du générateur, données de rampe du générateur et offres et limites de demande de puissance.
- ✚ Opérations de commutation : défauts de la ligne de transmission et disjoncteurs de la ligne de transmission.
- ✚ Mesures : fréquence bus et unités de mesure de phaseur (PMU)
- ✚ Charges : Charges dépendantes de la tension, charges dépendantes de la fréquence, ZIP (impédance, courant constant et puissance constante), charges de récupération exponentielles les charges thermostatées, les charges de Jimma et les charges mixtes.
- ✚ Machines : Machines synchrones (ordre dynamique de 2 à 8) et induction

Moteurs (ordre dynamique de 1 à 5).

- ✚ Contrôles : Régulateurs de turbine, Régulateurs automatiques de tension, Stabilisateur de système d'alimentation, Limiteurs de surexcitation, Régulation de tension secondaire (zone centrale Contrôleurs et contrôleurs de cluster), et une boucle de contrôle de stabilisation supplémentaire pour les SVC.
- ✚ Transformateurs de régulation : Changeur de prises de charge avec régulateurs de tension ou de puissance réactive et transformateurs déphaseurs.
- ✚ **FACTS** : Compensateurs Statiques Var, Condensateurs Série À Thyristor Contrôlé, Compensateurs Série Source Synchrone Statique, Contrôleurs de débit de Puissance unifiés, et systèmes de transmission à courant continu à haute tension.
- ✚ **Eoliennes** : Modèles d'éoliennes, Éolienne à vitesse constante avec cage d'écureuil moteur à induction, éolienne à vitesse variable avec générateur à induction à double alimentation, et éolienne à vitesse variable avec générateur synchrone à entraînement direct.
- ✚ Autres Modèles : Arbre dynamique de machine synchrone, résonance sous-synchrone Modèle, et pile à combustible à oxyde solide.

Outre les routines et les modèles mathématiques, PSAT comprend une variété d'utilitaires, comme suit [12]

- ✚ Éditeur de diagramme de réseau unifilaire (bibliothèque Simulink).
- ✚ GUI pour les paramètres de système et de routine.
- ✚ Construction et installation de modèles définis par l'utilisateur.
- ✚ GUI pour le traçage des résultats.
- ✚ Filtres pour convertir des données vers et à partir d'autres formats.
- ✚ Journaux de commandes

Enfin, PSAT comprend des passerelles vers les programmes GAMS et UWPFLOW, qui capacité PSAT très étendue d'optimisation et de puissance de continuité analyse de flux.

2. PSAT par rapport à autres boîtes à outils de Matlab

Le tableau suivant présente une comparaison approximative entre PSAT et d'autres méthodes basées sur MATLAB progiciels pour l'analyse de systèmes électriques. (Educational Simulation Tool (EST) ; MatEMTP ; Matpower ; Power System Toolbox (PST) ; Power Analysis Toolbox (PAT) ; Sim Power Systems (SPS) ; Voltage Stability Toolbox (VST)).

Package	PF	CPF	OPF	SSSA	TDS	EMT	GUI	CAD
PSAT	X	X	X	X	X		X	X
PAT	X			X	X			X
PST	X	X		X	X			X
SPS	X			X	X	X	X	X
VST	X	X		X	X		X	
EST	X			X	X			X
MatEMTP					X	X	X	X
Matpower	X		X					

Tableau01 : comparaison approximative entre PSAT et d'autres méthodes basées sur MATLAB.

Les caractéristiques illustrées dans le tableau sont [13] :

- (PF) : de l'écoulement de puissance (power flow).
- (CPF-VS) : l'analyse d'écoulement de puissance et/ou de la stabilité de la tension (continuation power flow and/or voltage stability analysis).
- (OPF) : l'écoulement de puissance optimal (optimal power flow).
- (SSSA) : l'analyse de la stabilité des petits signaux (Small signal stability analysis).
- (TDS) : la simulation du domaine temporel (time domain simulation).
- (GUI) : l'interface utilisateur graphique (graphical user interface).
- (CAD) : la construction des réseaux (graphical network construction).

3.Mise en route et interface utilisateur graphique principale de PSAT

Toutes les procédures implémentées dans PSAT peuvent être lancée à partir de cette fenêtre au moyen de menus, boutons et/ou raccourcis (voir la figure 1).

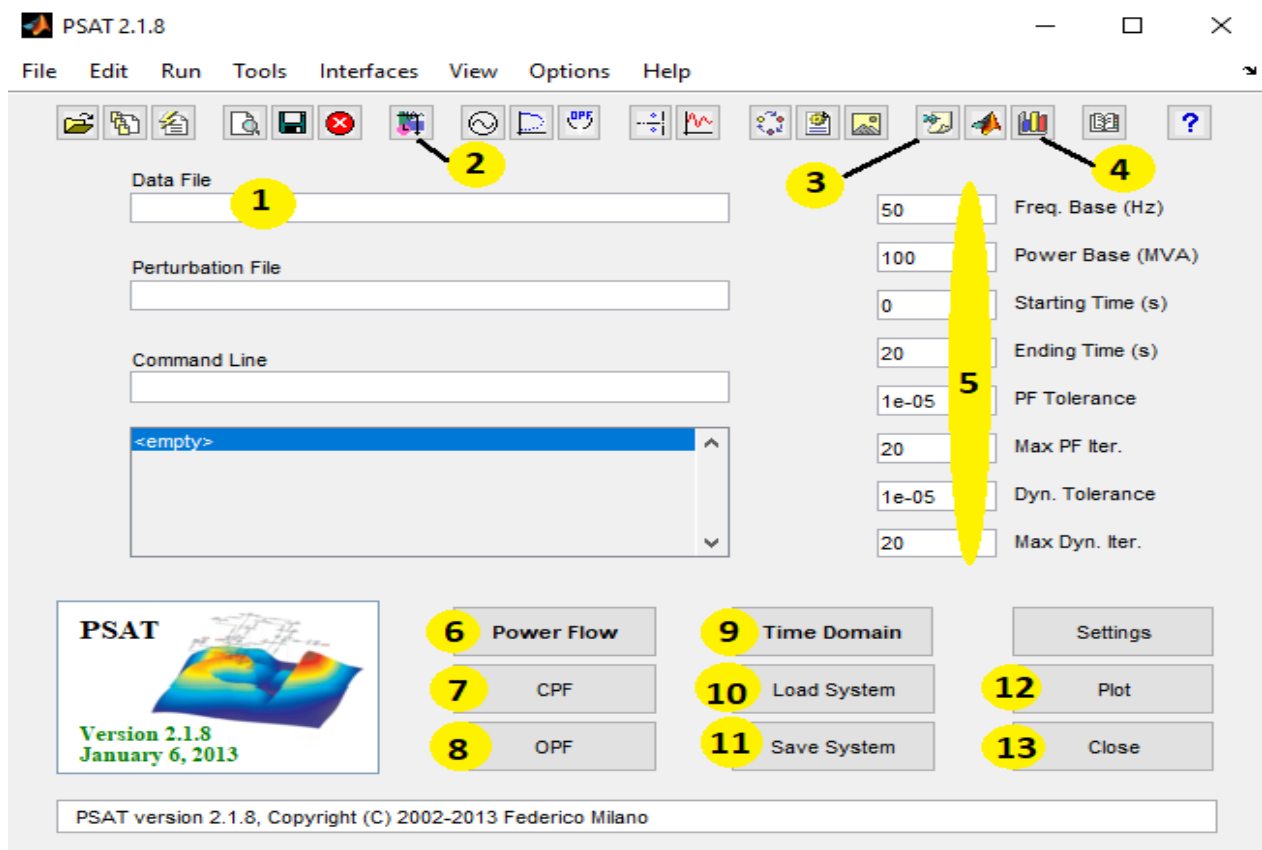


Figure01: l'interface graphique principale de PSAT

Légende :

- 1/ ici, nous allons trouver les caractéristiques de conversion de format de données (DFC), (voir figure 1).
- 2/ PSAT bibliothèque Simulink pour créer votre diagramme.
- 3/ le rapport statique.
- 4/ les outils de traçage.
- 5/ les paramètres de Simulink (la fréquence, valeur de base de la puissance, le temps de démarrage/fin de simulation, la tolérance d'écoulement de puissance, etc.).
- 6/ quand nous cliquons sur ce bouton, PSAT nous montrera la courbe de l'écoulement de puissance à gauche en bas de la fenêtre de figure (1).
- 7/ L'analyse d'écoulement de puissance.
- 8/ L'écoulement de puissance optimal (optimal power flow).
- 9/ Dynamique Simulation, quand nous cliquons sur ce bouton, PSAT nous montrera la courbe à gauche en bas de la fenêtre de figure (1) et le rapport dans la commande fenetre de Matlab.
- 10/ Ce bouton est pour lever un système pour l'analyser par PSAT.
- 11/ Si nous voulons sauvegarder un système existant dans PSAT.
- 12/ Ceci pour tracer n'importe quel courbe que nous voulons voir.

4. de conversion de format de données (DFC)

Pour assurer la portabilité et promouvoir les contributions, PSAT est fourni avec une variété d'outils, tels qu'un ensemble de fonctions de conversion de format de données (DFC) et la capacité de définir des modèles définis par l'utilisateur (UDMS).

L'ensemble des fonctions DFC permet de convertir des fichiers de données en et à partir de formats couramment utilisés dans l'analyse des systèmes d'alimentation. Ceci comprennent : Formats IEEE, EPRI, PTI, PSAP, PSS/E, CYME, MatPower et PST. [13]

Sur PSAT, une interface graphique facile à utiliser (voir figure 2).

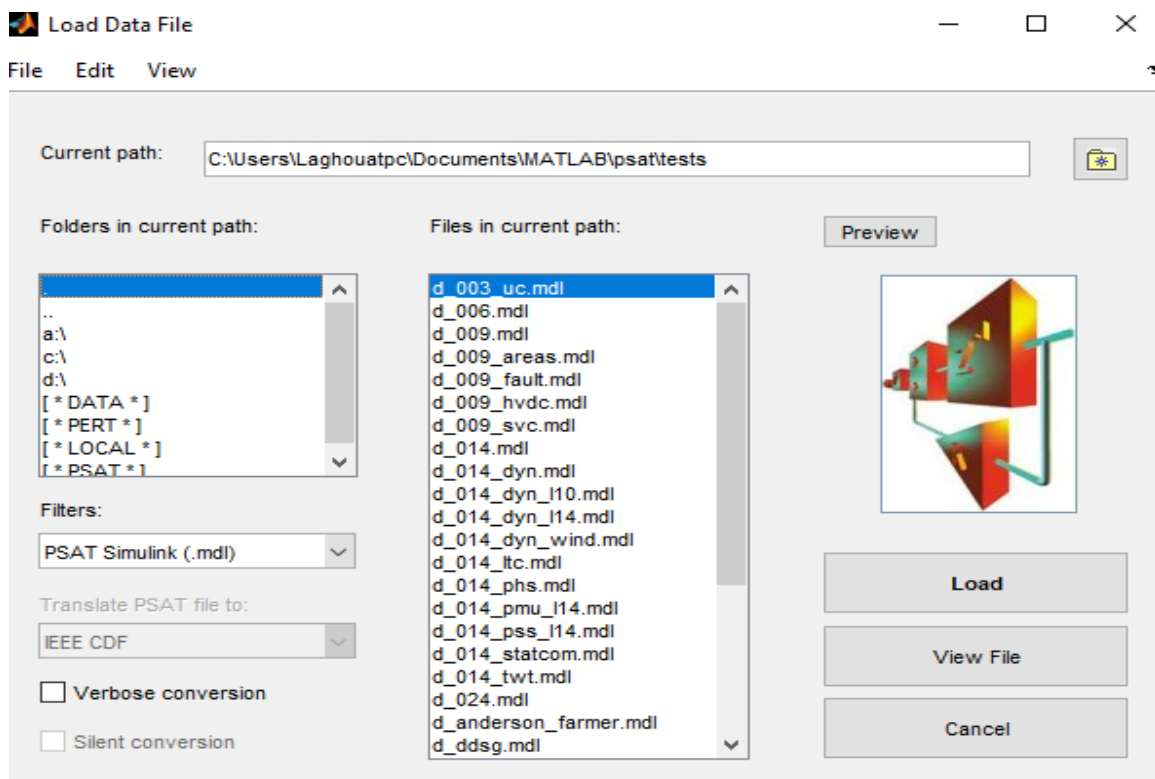


Figure02 : des exemples de réseaux électriques fournis par le logiciel.

Légende:

- 1/ puisque nous sommes intéressés par les réseaux électriques, cliquez ici et choisissez (**PSAT Simulink (.mdl)**). (Voir figure 2).
- 2/ ici nous cliquons deux fois et recherchons le dossier [***PSAT***] puis recherchez le dossier (tests) nous verrons certains fichiers apparaître au milieu de l'interface (voir figure 4), ce sont des exemples de réseaux électriques fournis par le logiciel.
- 3/ ce bouton est pour voir le fichier avant le télécharger pour l'analyse.
- 4/ ce bouton est pour télécharger le fichier pour fait l'analyse

ANNEXE B

FACTS

I-Nécessité d'utilisation des FACTS :

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent de la puissance apparente. Cette puissance se décompose en deux formes:

> **La puissance active:** est la puissance utilisée et transformée en énergie mécanique (travail), chimique, radiante, en chaleur.

> **La puissance réactive:** se transforme en champs magnétiques ou en champ électrique. Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation du générateur dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants comme les condensateurs et les compensateurs synchrones (machines synchrones surexcitées marchent à vide).

Aussi ces réseaux électriques de taille importante seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport aux nouveaux systèmes FACTS.

2.Présentation générale des FACTS:

D'après l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), FACTS qui est l'abréviation de «Flexible Alternating Current Transmission Systems» est défini comme suit:« Les systèmes de transmission en courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes électriques ».

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques.

3. Flexibilité de Transmission de l'énergie:

L'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire.

4. Classification des dispositifs de contrôle de puissance dans les réseaux:

On peut classer 3 types principaux selon le niveau de technologie :

- Par commande conventionnelle (électromécanique)
- Par dispositifs FACTS à base des thyristors
- Par dispositifs FACTS à base des convertisseurs de tension.

On peut remarquer que les dispositifs sont classés selon le mode de connexion avec le réseau en trois classes:

*Dispositifs shunts

*Dispositifs séries

*Dispositifs série-shunt

On remarque que pour chaque dispositif on a un de chaque type.

5. Les principaux dispositifs FACTS :

a- Dispositifs séries:

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable.

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance (X) de la ligne est diminuée, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus ou moins fournie.

TCSC (Thyristor controlled series capacitor):

Le compensateur série commandé par thyristor TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur.

TSSC (Thyristor Switched Série Capacitor):

Le compensateur série commuté par thyristor TSSC est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. La différence entre le (TSSC) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de "90" soit de "180".

TCSR (Thyristor Controlled Série Reactor):

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable.

TSSR (Thyristor Switched Série Reactor):

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de "90" soit de "180".

SSSC (Static Synchronous Série Compensator)

Le compensateur série synchrone (Static Synchronous Série Compensator) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport.

Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamique Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants.

6. Dispositifs shunts (parallèles) :

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds.

TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor):

Dans le TCR (RCT: Réactance Commandées par Thyristors), le circuit est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Il sert à absorber l'excès de puissance réactive dans le réseau.

TSC (Thyristor Switched Capacitor):

Dans le TSC (CCT: Condensateurs Commandés par Thyristor), le circuit est composé d'un condensateur placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle.

SVC (Statice Var Compensator)

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique de puissance réactive) (CSPR).

Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut branche un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance réactive. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique.

TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor):

Ce type de compensateur TCBR (résistance de freinage contrôlée par thyristors); connecté en parallèle et utilisée pour améliorer la stabilité du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de la présence des perturbations.

7. Avantages des systèmes FACTS:

- Possibilité de contrôle du flux de puissance pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- L'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquent réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité d'énergie

8Inconvénient des systèmes FACTS:

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- Les performances requises.
- La puissance de l'installation.
- Le niveau de tension du système.
- La technologie du semi-conducteur utilisé.

Les références

- [1] **HADDAD Lyazid HAMI Khodir** « Modélisation des paramètres des lignes électriques », thèse de Master académique de Université 8 Mai 1945 – Guelma, Année 2020.
- [2] **Pierre HAUTEFEUILLE & Yves PROCHERON** « Lignes aériennes » Techniques de l'Ingénieur D640a_6_1973
- [3] **J-F DIDIER LAURENT**, « *Lignes aériennes : matériels – Supports* », Techniques de l'Ingénieur D 4 424
- [4] **P. LAGONOTTE**, « Les Lignes et Les Câbles Electriques », Cours Université de Poitiers, France, 2008.
- [5] **Pierre ESCANÉ&Jean-Marie ESCANÉ** « Réseaux électriques linéaires à constantes réparties » Techniques de l'Ingénieur D 1 100
- [6] **HADDAD Lyazid HAMI Khodir** « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées », thèse de Master II d'états de Université Abderrahmane mira – BEJAÏA, Anne 2015.
- [7] **N.Lahaçani AOUZELLAG**, «Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 03 Novembre 2011
- [8] **Cahier technique n° 203**, «Choix de base des réseaux MT de distribution publique Didier FULCHIRON», <http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/produits/services/cahiers-techniques/cahiers-techniques.page>
- [9] **Thèse de doctorat**, «Valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel (Martin HENNEBEL)», <http://tel.archives-ouvertes.fr/>.
- [10] **Câbles de transport d'énergie** (Christian GLAIZE)
- [11] **Daniel J. Sullivan** « Improvements in voltage control and dynamic performance of Power transmission système using Statice Var Compensators (SVC) » mémoire de Master, université de Pittsburgh, Pennsylvania, USA 5 Avril 2006.
- [12] **Dali Ali Ismail Dali Ali Ahmed Ramzi** «Analyse des réseaux électrique par le logiciel PSAT » MÉMOIRE DE MASTER Université Mohamed Khider de Biskra 2022

[13] Federico Milano « Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0 β 1, July 9, 2006, Copyright c 2003 - 2006 Federico Milano».

[14] Federico Milano «Quick Reference Manual for PSAT version 2.1.2, June 26, 2008, Copyright c 2003 - 2008 Federico Milano».