

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du master

En

Génie électrique

Filière : Electrotechnique

Option : Electrotechnique Industrielle

Titre :

Modélisation et simulation de régleur en charge

(Cas d'un réseau MT)

Réalisé par :

❖ **Bennouba Tahir**

❖ **Bouricha Belkacem**

Encadré par :

❖ **BOT Youcef**

Année Universitaire 2020/2021

DÉDICACE

*Toutes mes reconnaissances aux
merveilleuses personnes ayant contribuées de
près ou de loin à la réalisation de ce modeste
travail*

*Aux plus précieuses perles que j'ai au monde,
mes très chers père et mère à qui je dois
amour et tendresse que dieu les gardes.*

A mes frères ;

A toute ma famille ;

A mes très chères amies.

Tahir et Belkacem

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. Y.BOT d'avoir accepté de nous encadrer et pour Les efforts qu'il est déployé, pour nous aider, conseiller. Encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions tous les membres du jury qui Ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

*Nous remercions tous les enseignants qui ont
Contribué à notre formation sans exception.*

Résumer

Ce travail traite l'impact du régleur en charge sur le réseau électrique, et en particulier de son profil de tension après son utilisation dans le réseau. Cela se fait en examinant le test du réseau de distribution moyenne tension. Le premier chapitre traite l'étude des réseaux électriques et leurs types, leurs structures, leurs niveaux de tension et le problème de la chute de tension. L'analyse de l'écoulement de puissance de la modélisation des composants du réseau électrique. Le deuxième chapitre contient une vision globale sur les changeurs de prises, ses caractéristiques, principe et désignation de chaque mode de fonctionnement de changeur de prises et en fin on a présente le mode d'inspection et la maintenance des changeurs de prises.

Dans le dernier chapitre, nous nous concentrons sur une simulation du réseau électrique sans régleur en charge et avec le régleur,

الملخص؛

يتناول هذا العمل تأثير معدل الحمل على شبكة الطاقة، ولا سيما الموجز الفولطي الخاص بها بعد استخدام المعدل في الشبكة. ويتم ذلك باستعراض اختبار نظام توزيع الفولت المتوسط. ويتناول الفصل الأول دراسة شبكات الكهرباء وأنواعها وهيكلها ومستويات الفولتية ومشكلة انخفاض الفولتية. ويحتوي الفصل الثاني على رؤية شاملة بشأن أجهزة تغيير المقبس، وخصائصه، ومبدأ وتعيين كل طريقة عمل لمغير المقبس، وفي نهاية الأمر، يتم عرض طريقة فحص وصيانة أجهزة تغيير المقبس

وفي الفصل الأخير، نركز على محاكاة الشبكة الكهربائية بدون معدل الحمل ومع المعدل.

Abstract

This work deals with the impact of the load adjuster on the power grid, and in particular their voltage profile after using the adjuster in the network. This is done by reviewing the Medium Voltage Distribution System test. The first chapter deals with the study of electricity networks, their types, structures, voltage levels and the problem of voltage drop. The analysis of the power flow and the modelling of the components of the electrical grid, the second chapter contains a global view on the OLTC, its characteristics, principle and designation of each mode of operation of OLTC and at the end the mode of inspection and maintenance of the OLTC is presented.

In the last chapter, we focus on a simulation of the electrical network without a OLTC and with it.

Table des matières

Introduction générale :

Chapre1 : Etude des réseaux électriques

I.1	Introduction	1
I.2	Définition d'un réseau électrique	1
I.3	Hiérarchisation du réseau électrique :	1
I.3.1	Production	2
I.3.2	Transport :	2
I.3.3	Répartition :	3
I.3.4	Distribution :	3
I.4	Les architectures de réseaux :	3
I.5	Topologies des réseaux électriques	4
I.5.1	Réseau maillé.....	4
I.5.2	Réseau bouclé	5
I.5.3	Réseau radial	5
I.5.4	Réseau arborescent.....	6
I.6	Ecoulement de puissance dans un réseau électrique :	6
I.6.1	Définition :	6
I.6.2	But de l'étude de l'écoulement de puissance.....	6
I.7	Modélisation d'un réseau électrique :	7
I.7.1	Modélisation de la machine synchrone :	7
I.7.2	Modélisation d'une ligne de transport	7
I.7.3	Modélisation Des Transformateurs :	9
I.7.4	Modélisation d'une charge :	9
I.7.5	Modélisation d'un élément shunt :	10
I.8	Classification des nœuds (Jeux de barres).....	12
I.8.1	Les jeux de barres de contrôle (control bus)	12
I.8.2	Les jeux de barres de charge (load bus) :	13

I.8.3	Le jeu de barres de référence (Slack bus) :.....	13
I.9	Equation de réseau électrique :	13
I.9.1	Les unités normalisées pu :.....	13
I.9.2	Choix des valeurs des base dans un réseau	13
I.9.3	Calcul de la matrice admittance :.....	14
I.10	Résolution du problème de l'écoulement de puissance.....	15
I.10.1	Méthode de Gauss-Seidel :.....	15
I.10.2	Méthode de gauss–Seidel de la matrice y :.....	15
I.10.3	Calcul d'écoulement de puissance :.....	15
I.10.3.a	Dans les nœuds PQ :.....	15
I.10.3.b.	Dans les nœuds PV :	16
I.10.3.c	Dans les nœuds Référence (Slack bus).....	16
I.10.4	Méthode de Newton-Raphson :	16
I.10.5	Les étapes de calcule.....	21
I.11	Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels :.....	23
I.11.1	Compensation de puissance réactive au poste source :.....	23
I.11.2	Les régleurs en charge :	23
I.11.3	Le réglage par la production décentralisée (PD).....	23
I.12	Conclusion :.....	23

II Chapitre 2 : Etude du changeur de prise

II.1	Introduction :.....	25
II.2	Histoire du changeur de prise :.....	25

II.3 Définition d'un changeur de prise :.....	25
II.4 Le but d'un changeur de prises :.....	26
II.5 Description fonctionnelle :	27
II.6 Structure :	27
II.7 Les Caractéristiques d'un changeur de prise :.....	28
II.7.1 Caractéristiques principales :.....	28
II.7.2 Caractéristiques techniques :.....	29
II.7.2.a La capacité de coupure assignée :.....	29
II.7.2.b Température ambiante :.....	30
II.7.2.c Niveau d'isolation :.....	30
II.8 Mode opératoire des changeurs de prises en charge et des changeurs de prise hors tension :	31
II.8.1 Changeurs de prises en charge et changeurs de prises hors tension pour transformateurs à huile :.....	31
II.8.2 Changeur de prises en charge pour transformateurs de type sec	31
II.9 Quatre caractéristiques de base du changeur de prises en charge du transformateur (OLTC) :.....	32
II.9.1 Sélecteur : :.....	32
II.9.2 Réacteur : :.....	32
II.9.3 Commutateur de vide : :.....	32
II.9.4 Commutateur de dérivation : :.....	32
II.9.5 Les exemples de séquence de changement de prise : :.....	32
II.10 Mode de fonctionnement des changeurs de prises en charge :.....	32
II.10.1 Principe de commutation des changeurs de prises en charge :.....	34

II.10.1.a Principe commutateur-sélecteur :.....	34
II.10.1.b Principe sélecteur en charge :.....	35
II.10.2 Circuit de base de l'enroulement de réglage fin :.....	35
II.10.3 Désignations des changeurs de prises en charge :.....	36
II.10.3.a Exemple de désignation du changeur de prises en charge :.....	36
II.10.3.b Domaine d'application :.....	36
II.11 Mode de fonctionnement du changeur de prises hors tension :.....	37
II.11.1 Principe de commutation du changeur de prises hors tension :.....	37
II.11.2 Désignations du changeur de prises hors tension :.....	37
II.12 Mode de fonctionnement de l'ARS (Advanced Retard Switch) :.....	39
II.12.1 Principe de commutation de l'ARS :.....	39
II.12.2 Désignations de l'ARS (Advanced Retard Switch) :.....	40
II.13 Précautions de sécurité :.....	40
II.13.1 Inspection :.....	41
II.13.2 Maintenance :	41
II.14 Conclusion :.....	42

Chapitre 03 : simulation d'un réseau MT par OPENDSS

III.1 Introduction :.....	44
III.2 Introduction au script OpenDSS :.....	44
III.3 Interface utilisateur :.....	45
III.3.1 Menus :.....	45
III.4 Déclaration des composants du réseau électrique dans OPENDSS :.....	50

III.4.1 Les lignes.....	50
III.4.2 Géométries des lignes	50
III.4.3 Line Code.....	51
III.4.4 Loads (Charges).....	51
III.4.5 Source :.....	52
III.4.6 Régulateur/Transformateur:.....	53
III.4.6 Banques de condensateurs:.....	54
III.5 Simulation d'un réseau électrique MT	55
III.5.1 Réseau test à 33 nœuds :.....	55
III.5.2 Simulation du réseau électrique MT sans régleur en charge :.....	57
III.5.3 Simulation d'un réseau électrique MT avec régleur en charge :.....	63
III.6 Conclusion :.....	68

Liste des Figures :

Figure 2 : Vue globale du réseau électrique.....	2
Figure 3: Réseau maillé.....	5
Figure 4 : Réseau bouclé.....	5
Figure 5:Réseau radial.....	5
Figure 6:Réseau arborescent	6
Figure 7:Machine synchrone triphasé assimilée à deux enroulements en CC en quadrature	7
Figure 8 : Schéma équivalent d'une ligne de transport.....	8
Figure 9: Schéma équivalent d'une ligne triphasée	8
Figure 10: Transformateur sous forme un circuit équivalent en π	9
Figure 11: Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante.	10
Figure 12:Schéma équivalent d'une charge.	10
Figure 13::Élément shunt	11
Figure 14:Transformateur avec changeur de prises en charge, représentation schématique ...	27
Figure 15: Changeur de prises en charge OILTAP® R	28
Figure 16:: présenté la capacité de coupure assigne de changeur de prise en charge CZ.....	29
Figure 17: Illustration d'une opération de changement en charge.....	33
Figure 18 : Description de la séquence de changement de prise pour la figure 4.....	34

Figure 19: Principe de commutation des changeurs de prises en charge	34
Figure 20:: Séquence de changement de robinet du COMTAP® ARS	39
Figure 21: Schéma unifilaire du réseau test	55
Figure 22: variation de la charge de réseau	56
Figure 23: variation de tension (noeud 1)	57
Figure 24: chute de tension (noeud 1)	57
Figure 25: variation de tension (noeud 22)	58
Figure 26: :chute de tension(noeud 22)	58
Figure 27: variation de tension (noeud 18)	59
Figure 28: : chute de tension (noeud 18)	59
Figure 29: variation de tension (noeud 25)	60
Figure 30: : chute de tension (noeud 25)	60
Figure 31: variation de tension (noeud 33)	61
Figure 32: : chute de tension (noeud 33)	61
Figure 33: variation de tension avec régleur (noeud 1)	63
Figure 34: : chute de tension avec régleur (noeud 1)	63
Figure 35: variation de tension avec régleur (noeud 22)	64
Figure 36: chute de tension avec régleur (noeud 22)	64
Figure 37: variation de tension avec régleur (noeud 18)	65
Figure 38: chute de tension avec régleur (noeud 18)	65
Figure 39: variation de tension avec régleur (noeud 25)	66
Figure 40: chute de tension avec régleur (noeud 25)	66
Figure 41: variation de tension avec régleur (noeud 33)	67
Figure 42: chute de tension avec régleur (noeud 33)	67
Figure 43: position du régleur en charge	68

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les domaines de tension.	4
Tableau 2:différents paramètres du réseau	11
Tableau 3 :Niveau d'isolation	30
Tableau 4: Explication des désignations du changeur de prises hors tension	38
Tableau 5: Désignations de l'ARS (Advanced Retard Switch	40
Tableau 6: Propriétés de la géométrie de la ligne	51
Tableau 7 : Propriétés du code de ligne	51
Tableau 8 : Propriétés de la charge	52
Tableau 9 :Propriétés de la source de tension	53
Tableau 10 : Propriétés de régulateur	53
Tableau 11 :Propriétés des condensateurs	54

Les symboles :

Z_{ij} : L'impédance série

Y_{ij} : L'admittance shunt

R : résistance de la ligne

X : réactance de la ligne ;

G : conductance de la ligne ;

B : réactance capacitive de la ligne.

Z_T : L'impédance du transformateur ;

Y_T : L'admittance du transformateur.

V : Tension aux bornes de la charge ;

P, Q : puissances active et réactive consommées par la charge ;

Z : impédance de la charge.

I_{bas} : courant de bas.

Z_{bas} : impédance de bas.

I_{bus} : vecteur de courant .

Y_{bus} : matrice admittance.

V_{bus} : vecteur de tension.

Oltc : changeur de prises en charge.

PU : Système d'unité relative (PER UNIT).

P_{ip}, Q_{ip} : Puissances planifiées.

p_{ic}, Q_{ic} : Puissances calculées.

Introduction générale :

A nos jours la vie humaine ne peut se passer de l'électricité, elle serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour cela, il a fallu inventer et construire des centrales électriques, capable de produire de l'électricité en grande quantité.

Les réseaux électriques sont apparus vers la fin du 19eme siècle, pour assurer le transport et la distribution de l'énergie électrique, tout en respectant les trois normes principales à savoir la qualité de production, la sécurité de fonctionnement et l'économie. La répartition des charges (Load Flow) est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires d'un système de production et transport d'énergie électrique.

Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateur par l'intermédiaire d'un réseau de transport maillé, on doit déterminer la répartition des puissances fournies par ces centrales, à un instant donné, tout en respectant un ensemble de contrainte techniques et économiques.

La résolution du problème de répartition des charges, nous permet de déterminer les valeurs du Module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées ainsi que les pertes engendrées.

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de fonctionnement, en régime permanent, d'un system de puissance en procédant comme suit :

-Formulation d'un modèle mathématique approprié et la spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes relatives aux nœuds du système.

-La résolution numérique du système

Chapitre 1 :
Etude des réseaux
électriques

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition du réseau électrique et une formulation du problème d'écoulement de puissance dans ce réseau, où nous nous sommes familiarisés avec les types de réseaux électriques, leurs structures, leurs niveaux de tension et le problème de la chute de tension.

L'analyse de l'écoulement de puissance et la modélisation des composants du réseau électrique (générateur, ligne de transmission, charge électrique, l'élément shunt) et les classifications des jeux de barres.

Afin d'analyser le réseau électrique, il faut calculer l'écoulement de puissance dont le calcul doit passer par la résolution des équations différentielles non linéaires,

Les deux méthodes les plus utilisées dans le domaine de l'écoulement de puissance, sont la méthode de Gauss-Seidel et Newton-Raphson.

I.2 Définition d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension.

L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; d'une part, l'architecture du poste, et d'autre part l'architecture de la distribution. [1]

I.3 Hiérarchisation du réseau électrique :

La Figure.1 illustre une vue globale du réseau électrique. On distingue quatre niveaux : production, transport, répartition et distribution.

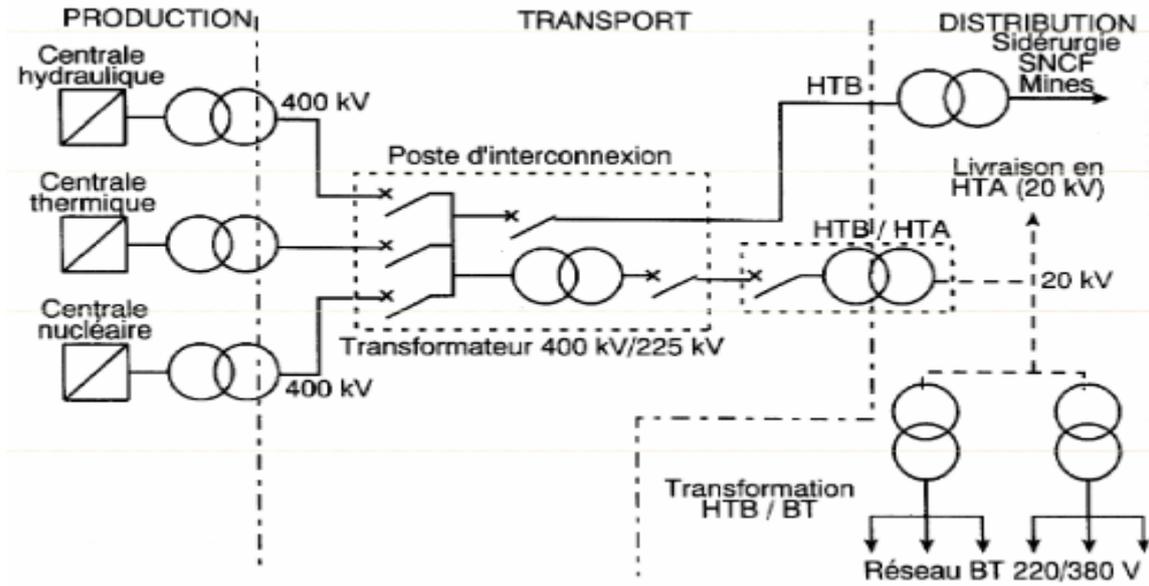


Figure2 : Vue globale du réseau électrique.

I.3.1 Production :

La production sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforment l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique. . .). Les sources primaires varient d'un pays à l'autre, exemple en Algérie, le gaz naturel couvre plus de 70% de la production, en France, 75% d'électricité est d'origine nucléaire. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance, par exemple, la centrale de Jijel en Algérie est composée de trois groupes 196 MW, celle de Cap Djent à Boumerdès 4 groupes de 168 MW. Par ailleurs, on trouve dans les pays industrialisés des puissances installées de plus en plus élevées pour répondre à la demande croissante en énergie électrique, exemple la centrale nucléaire de Gravelines en France 6 900 MW, la centrale hydroélectrique des Trois-Gorges en Chine 34 700 MW et 250 MW (devenue la plus grande centrale dans le monde en 2014).

I.3.2 Transport :

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau

de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV.[1]

I.3.3 Répartition :

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT (MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des tensions de 60 et 30 kV.[2]

I.3.4 Distribution :

C'est le réseau qui nous est familier puisqu'il s'agit de la tension 400V/230V. La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique.

La puissance à ce niveau est acheminée avec deux topologies suivant la localisation des charges :

- Les réseaux urbains : la puissance transite par voie souterraine, ce type de réseau est caractérisé par une forte densité de charge, la topologie de ces réseaux sont réparties en trois groupes : les réseaux en dérivation multiples, les réseaux en coupure d'artère et les réseaux fortement bouclés.
- Les réseaux ruraux : la puissance est acheminée par voie aérienne, ils sont caractérisés par une faible densité de charge et un faible maillage avec des boucles entre les postes sources. [3]

I.4 Les architectures de réseaux :

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus ou moins complexe suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Nous allons identifier les différents postes de livraison HTB et HTA, et la structure des réseaux HTA et BT.

La nouvelle norme en vigueur en Algérie UTE C 18-510 définit les domaines de tension alternative comme suit :

-HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV

-HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV

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

Les notations de la norme CEI 38 seront parfois utilisées dans ce document avec les définitions suivantes :

- HT → pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V

Les valeurs normalisées sont : 45 kV - 66 kV - 110 kV - 132 kV - 150 kV - 220 kV

- MT → pour une tension composée comprise entre 1000 V et 35 kV

Les valeurs normalisées sont : 3,3 kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV

- BT → pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V

Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz) [4]

Domaines de tension		Valeur de la tension nominale	
		En courant alternatif	En courant continu lisse
TBT		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
BT	Plus de distribution BTA/BTB	$50V < U_n < 1000V$	$120V < U_n < 1.5KV$
HT	HTA	$1KV < U_n \leq 50KV$	$1.5KV < U_n \leq 75KV$
	HTB	$50KV < U_n$	$75KV < U_n$

Tableau 1 : Les domaines de tension.

I.5 Topologies des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau de fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation.

I.5.1 Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. [5]

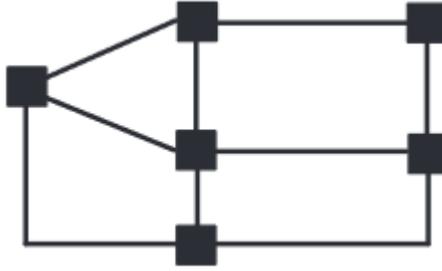


Figure 1 : Réseau maillé.

I.5.2 Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés. [5]

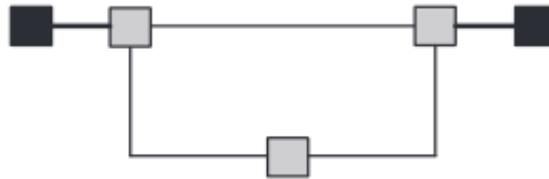


Figure 2 : Réseau bouclé.

I.5.3 Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité. [5]



Figure 3: Réseau radial

I.5.4 Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT [5]

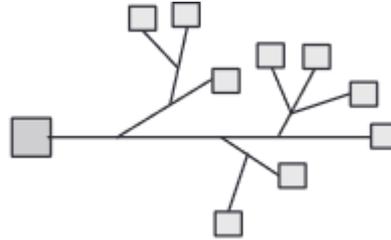


Figure 4:Réseau arborescent

I.6 Ecoulement de puissance dans un réseau électrique :

I.6.1 Définition :

L'étude de l'écoulement de puissance (load flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal et anormal afin d'assurer une exploitation efficace, c'est-à-dire conforme aux normes techniques. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux.[6]

I.6.2 But de l'étude de l'écoulement de puissance

Le but de l'étude de l'écoulement de puissance est résumé dans les points suivants :

- Assurer l'équilibre entre la production et la demande d'énergie électrique (L'amélioration de dépense de l'électricité, production d'énergie selon de besoin)
- Ne pas dépasser les valeurs limites (la stabilité théorique, selon la durée d'utilisation)
- Il faut conserver les tensions de jeu de barre entre les limites théoriques en utilisant le contrôle de puissance.
- Planification de réseau (à partir de calcul de la charge). Augmenter la sécurité de fonctionnement des réseaux par une bonne stratégie d'EP avant les perturbations [6]

I.7 Modélisation d'un réseau électrique :

I.7.1 Modélisation de la machine synchrone :

Les différentes machines ne sont pas indépendantes entre elles, mais reliées par un réseau d'énergie électrique. Celui-ci correspond à un ensemble de lignes, de transformateurs, de machines, de charges, de jeux de barres, de dispositifs de régulation, etc. La machine synchrone représente l'élément essentiel dans l'étude de la stabilité des systèmes d'énergie électriques. La mesure des paramètres de cette dernière reste un sujet très important et nombreuses études sont en cours afin de mieux cerner les propriétés de ces machines dans les réseaux électriques.

Le problème de la modélisation de ces machines comporte deux aspects :

- Le premier, est le choix du modèle de la machine synchrone ;
- Le deuxième, consiste à déterminer les paramètres à introduire dans le modèle (modèle de Park, 2ème ordre, 3ème ordre).

La Figure 7 montre une représentation d'une machine synchrone à trois phases avec amortisseurs

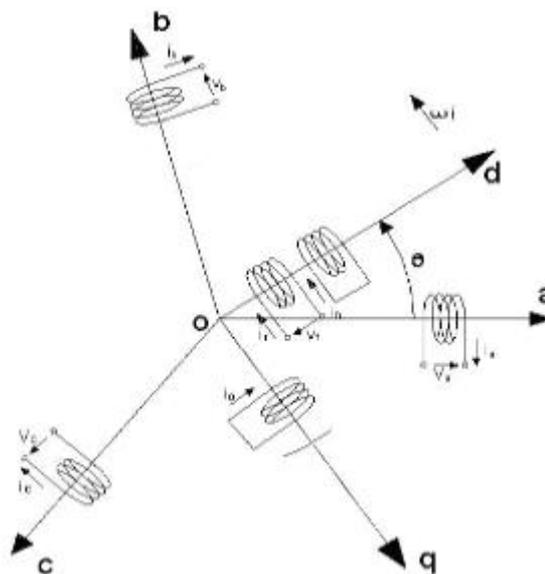
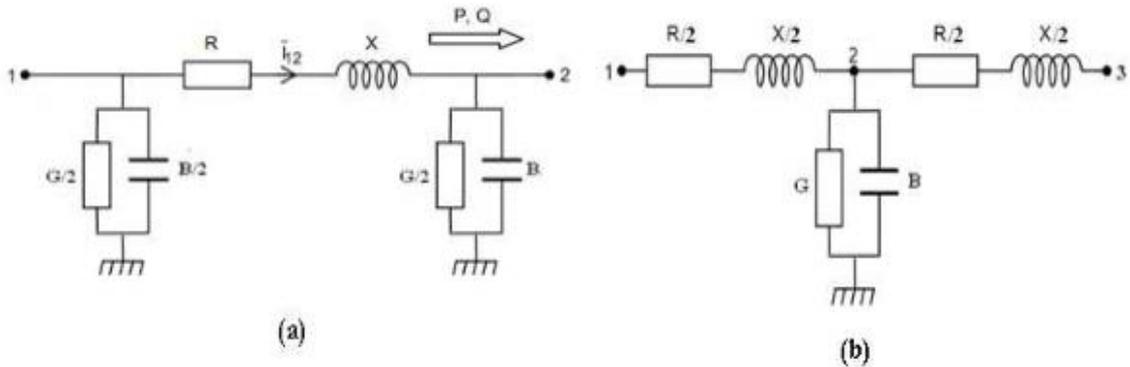


Figure 5: Machine synchrone triphasée assimilée à deux enroulements en CC en quadrature

I.7.2 Modélisation d'une ligne de transport

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation. Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents

[7]. Le modèle d'une ligne de transport est donné par des quadripôles symétriques représentés par la Figure 8 (a, b) [8] [9]



(a) : Modèle en π .

(b) : Modèle en T.

Figure 6 : Schéma équivalent d'une ligne de transport

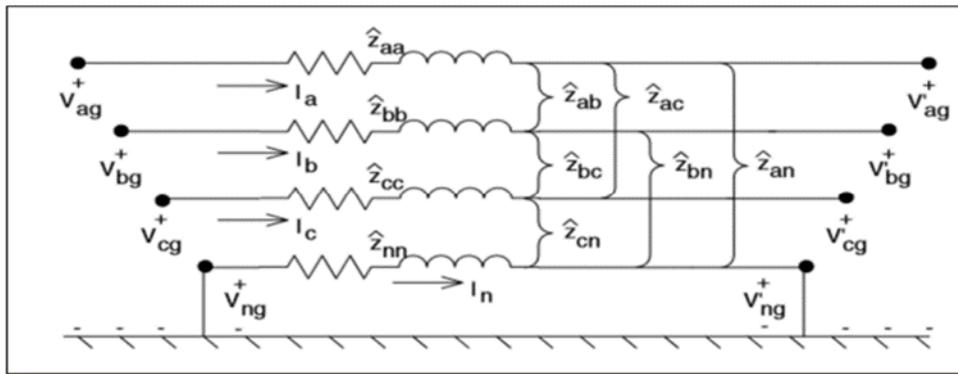


Figure 7: Schéma équivalent d'une ligne triphasée

. Dont l'impédance série de la ligne « Ij » est :

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} \quad (1.1)$$

Et l'admittance shunt par rapport à la terre est : $\frac{Y_{ij}}{2}$

Où :

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (1.2)$$

Où

R : résistance de la ligne

X : réactance de la ligne ;

G : conductance de la ligne ;

B : réactance capacitive de la ligne.

I.7.3 Modélisation Des Transformateurs :

Un transformateur inséré dans une liaison électrique quelconque d'un réseau donne la possibilité de réguler la tension en un point donné de celui-ci. Le changement du rapport de transformation entraîne une variation de la tension au secondaire et par conséquent, une influence sur l'écoulement de puissance.

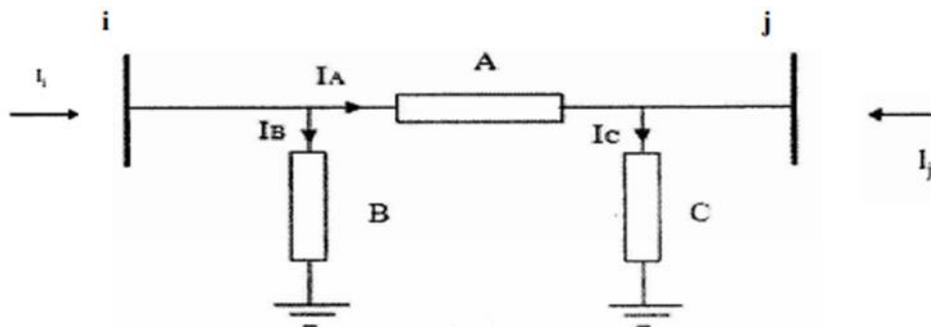


Figure 8: Transformateur sous forme un circuit équivalent en π

Donc le transformateur peut être considéré comme une ligne, tel que :

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (1.3)$$

$$Y_T = \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R_T + jX_T} \quad (1.4)$$

Avec :

Z_T : L'impédance du transformateur ;

Y_T : L'admittance du transformateur.

I.7.4 Modélisation d'une charge :

Souvent la charge électrique est modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station, en particulier un système de distribution ; ainsi, ces impédances de charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charge (figure 10), donc le niveau de tension de l'impédance est maintenu

approximativement constant. Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes.[10]

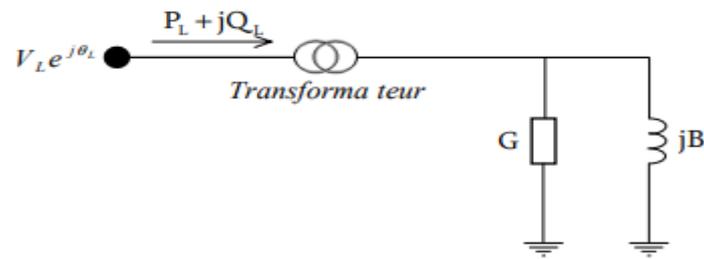


Figure 9: Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante.

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une impédance Z :

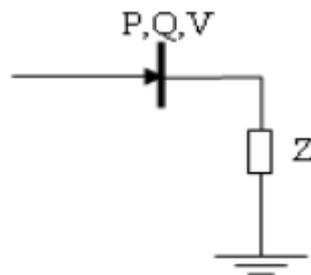


Figure 10: Schéma équivalent d'une charge.

L'admittance équivalente de charge est calculée après avoir déterminé les données nécessaires de l'étude de l'écoulement de puissance :

$$Z = Y^{-1} = \left(\frac{P - jQ}{V^2} \right) \quad (1.5)$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la charge ;

P, Q : puissances active et réactive consommées par la charge ;

Z : impédance de la charge.

1.7.5 Modélisation d'un élément shunt :

Dans la plupart des cas, des éléments shunt (batterie de condensateur ou réactance) sont insérés dans le réseau électrique pour fournir ou absorber de la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension :[11]

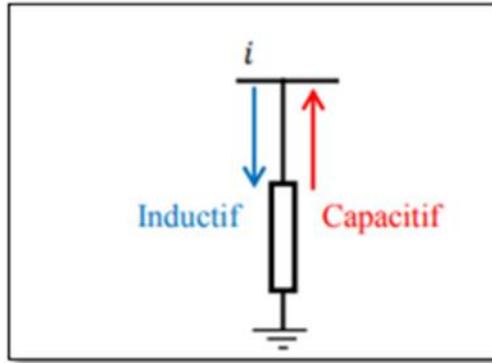


Figure 11: Élément shunt

Et on aura la matrice d'admittance suivante :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -Y_{sh} & 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Composants	Symbole	Représentation	Observation
Générateurs	 Nœud i	P_{G_i}, Q_{G_i} 	Puissance active et réactive générées
Lignes du réseau	 Nœud i Nœud j		
Transformateurs avec régleur en charge (taps)	 Nœud i Nœud j $t_{ij} = 1$ Y_{ij}		
La charge	 Nœud i P_c, Q_c		Les puissances actives et réactives sont fixes

Tableau 2: différents paramètres du réseau

I.8 Classification des nœuds (Jeux de barres)

À chaque jeu de barre (nœud), sont définis les 4 paramètres :

P : puissance active injectée ou soutirée

Q : puissance réactive injectée ou soutirée

V : module de la tension

Δ : déphasage de la tension.

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en

Trois catégories :

I.8.1 Les jeux de barres de contrôle (control bus) :

Appelés aussi les jeux de barres (P V), pour ce type de jeux de barre, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.[12]

I.8.2 Les jeux de barres de charge (load bus) :

Appelés aussi les jeux de barres (P Q), pour ce type de jeux de barre, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension

I.8.3 Le jeu de barres de référence (Slack bus) :

Ce jeu de barres connu aussi par le jeu de barres balancier ou bilan, est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barre est identifié par le jeu de barres n° 1, dont le module et la phase de tensions sont toujours spécifiés ($V_1 = 1pu$ et $\delta_1 = 0$). Donc, les puissances P_1 et Q_1 sont inconnues, du fait que P_{G1} et Q_{G1} ne sont pas spécifiées d'avance. Par conséquent, les équations d'équilibres des puissances pour le jeu de barres de référence ne sont pas

explicitement incluses dans la formulation du problème de l'écoulement de puissance
Cependant P_1 et Q_1 peuvent être calculées après avoir obtenu la solution du problème[12]

I.9 Equation de réseau électrique :

I.9.1 Les unités relatives pu :

Les problèmes des réseaux électriques peuvent être résolus moyennant la méthode des circuits qui présente l'avantage d'être une méthode analytique exacte, mais qui s'avère trop lourde (trop d'équations à résoudre) quand le réseau dépasse une certaine taille

Méthode d'analyse des réseaux électriques Les ingénieurs ont mis en pratique une méthode simple qui permet d'aboutir à la même résolution avec le moins d'erreurs possibles : la méthode des unités normalisées (unités réduites) [13]

I.9.2 Choix des valeurs des base dans un réseau

Si on considère les puissances, les tensions, les courants et les impédances d'un réseau $\sim 1\phi$ ou 3ϕ , quatre valeurs de base peuvent être définies, soit

- Une puissance de base (apparent)
- Une tension de base
- Un courant de base
- Une impédance (ou admittance) de base

Parmi ces quatre valeurs de base, seulement deux sont indépendantes. En effet, si on en choisit deux, les deux autres peuvent être déduites. Habituellement, on choisit la puissance et la tension comme valeurs de base. Par conséquent : [13]

- Le courant, en monophasé, est :

$$I_{bas} = \frac{S_{bas1}}{V_{bas}} \quad (1.7)$$

- Le courant, en triphasé, est :

$$I_{bas} = \frac{S_{bas3}}{\sqrt{3} U_{bas}} \quad (1.8)$$

- L'impédance de base est donc :

$$Z_{bas} = \frac{V_{bas}}{I_{bas}} \quad (1.9)$$

A partir de là, on peut écrire :

$$Pu = \frac{\text{reelle}}{\text{base}}$$

$$\text{C'est-à-dire : } I_{pu} = \frac{I_{réel}}{I_{bas}} \quad ; \quad V_{pu} = \frac{V_{réel}}{V_{bas}} \quad ; \quad Z_{PU} = \frac{Z_{réel}}{Z_{bas}} \quad (1.10)$$

I.9.3 Calcul de la matrice admittance :

$$I_{BUS} = Y_{BUS} * V_{BUS} \quad (1.11)$$

Où :

I_{BUS} : Vecteur des courants des jeux de barres.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

*

Y_{BUS} : La matrice admittance du réseau électrique donnée par :

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n Y_{1i} & -Y_{12} \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & \sum_{i=0}^n Y_{2i} \dots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} \dots & \sum_{i=0}^n Y_{ni} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

- V_{BUS} : Vecteur des tensions des jeux de barres :

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

- Y_{BUS} : L'admittance de jeux de barres :

$$Y_{BUS} = \frac{1}{Z_{BUS}} \quad (1.15)$$

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} \quad i \neq j \quad (1.16)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad i \neq j \quad (1.17)$$

$$Y_{ii} = y_{i0} + \sum_{i=1}^n -y_{ij} \quad i=j \quad (1.18)$$

I.10 Résolution du problème de l'écoulement de puissance

I.10.1 Méthode de Gauss-Seidel :

La méthode itérative de Gauss-Seidel est la plus simple parmi les méthodes itératives Utilisées dans l'E.P. Elle est facile à programmer, pour cela, elle est recommandée Pour les petits systèmes électro-énergétiques où la simplicité du programme est plus Importante que les coûts des calculs. [14]

Cette méthode utilisant la matrice admittance, consiste à supposer initialement des tensions pour tous les nœuds excepté le nœud balancier ou la tension est spécifiée et maintenue constante

I.10.2 Méthode de gauss–Seidel de la matrice y :

L'équation nodale du courant au nième nœud devient :[15]

$$I_i = Y_{i1} * V_1 + Y_{i2} * V_2 + \dots + Y_{ij} * V_j = \sum_{i=1}^n Y_{ij} * V_j \quad (1.19)$$

$$S_i = P_i - jQ_i = V_i^* * I_i \quad (1.20)$$

$$I_i = \frac{1}{V_i^*} (p_i - jQ_i) \quad (1.21)$$

Elimination de I_i de l'équation (1.19) et (1.21) donne :

$$Y_{i1} * V_1 + Y_{i2} * V_2 + \dots + Y_{ij} * V_j = \frac{1}{V_i^*} (p_i - jQ_i) \quad (1.22)$$

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{p_i - jQ_i}{V_i^*} - Y_{i1} * V_1 + Y_{i2} * V_2 + \dots + Y_{ij} * V_j \right] \quad (1.23)$$

La tension du $n^{ième}$ nœud dans l'itération (k+1) peut être écrire

$$V^{k+1}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{p_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j \neq i}^n Y_{ij} * V^{(r)}_j \right] \quad (1.24)$$

I.10.3 Calcul d'écoulement de puissance :

I.10.3.a Dans les nœuds PQ :

Une formule générale pour déterminer la tension complexe (l'amplitude $|v|$ et la phase $|\theta_i|$) du nœud i peut être développée en substituant l'équation

$$V^{k+1}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{p_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j \neq i}^n Y_{ij} * V^{(r)}_j \right]$$

Il faut noter que le nœud 1 est choisi comme nœud balancier dont l'amplitude et la phase de tension sont connues. Cela explique pourquoi on commence les calculs pour $i = 2$.

Le processus itératif est obtenu quand l'expression suivante est satisfaite :

$$\text{Max}|V^{K+1}_i - V^K_i| \leq \varepsilon \quad (1.25)$$

I.10.3.b Dans les nœuds PV :

Si le nœud est un nœud de génération, la puissance réelle et l'amplitude de tension sont connus, et il reste à déterminer la puissance réactive et la phase de tension au début de chaque itération

Aussi, pour le générateur du nœud i , on :

$$I_i = \frac{p_i - jQ_i}{V^*_i} = Y_{i1} * V_1 + Y_{i2} * V_2 + \dots + Y_{ij} * V_j$$

D'où, on tire :

$$p_i - jQ_i = V^{K*}_i [\sum_{j=1}^n Y_{ij} * V^K_j]$$

En prenant la partie imaginaire de l'équation (II.15), on obtient la puissance réactive du nœud de génération i :

$$Q_i = -I_m [V^{K*}_i [\sum_{j=1}^n Y_{ij} * V^K_j]] \quad (1.26)$$

I.10.3.c Dans les nœuds Référence (Slack bus)

Dans ce nœud, il est calculé la puissance active (P) et la puissance réactive (Q) par l'équation suivant :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V^*_i} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ij}V_j$$

$$P_i - jQ_i = V^*_i (Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ij}V_j) \quad (1.27)$$

I.10.4 Méthode de Newton-Raphson :

En utilisant la Méthode de Newton Raphson on peut résoudre le problème d'écoulement de puissance.

D'après la relation précédente du courant nodal (1.19)

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad i = 1.2 \dots n$$

On a

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| [\theta_{ij} + \delta_j] \quad (1.28)$$

La puissance complexe à i bus est

$$P_i - JQ_i = I_i V_i^* \quad (1.29)$$

On remplace la relation (1.28) dans (1.29)

$$P_i - JQ_i = |V_i| [-\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| [\theta_{ij} + \delta_j] \quad (1.30)$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire de l'équation (1.30) on aura les équations (1.31) et (1.32) des puissances actives et réactives au jeu de barres i

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = 1.2 \dots n \quad (1.31)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = 1.2 \dots n \quad (1.32)$$

Après développement de Pi et Qi en série de TAYLOR autour de la première approximation

$$P_i = P_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)}$$

$$Q_i = Q_i^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta |V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta |V_n|^{(0)} \quad (1.33)$$

A partir de la relation de

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Avec

$$\Delta P_i^{(0)} = P_i - P_i^{(0)} \quad (1.34)$$

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_i - Q_i^{(0)} \quad (1.35)$$

Les deux systèmes d'équation (1.33),(1.34) et(1.35) donnent

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta |V_2|^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

Le système peut être écrire comme suit

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

Donc

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

On rappelle que

$$\Delta \delta_i^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (1.39)$$

$$\Delta |V_i^{(k)}| = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (1.40)$$

L'adaptation (1.38) avec (1.39) et (1.40) donne

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V_i|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ |V_i|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_i^{(k)} \\ \Delta |V_i^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

En remplaçant l'équation (1.38) dans l'équation (1.40), on obtient

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V_i|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ |V_i|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

Enfin on obtient

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

J_1, J_2, J_3 et J_4 Sont les sous-matrices de Jacobéenne

À partir des équations (1.31) et (1.32), on peut déterminer les sous-matrices de Jacobéenne J_i et les éléments de J.

Sous matrice J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i \neq j \quad (1.44)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = j \quad (1.45)$$

Sous matrice J_2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i \neq j \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) \quad i = j \quad (1.47)$$

Sous matrice J_3

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i \neq j \quad (1.48)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = j \quad (1.49)$$

Sous matrice J_4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i \neq j \quad (1.50)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij}) \quad i = j \quad (1.51)$$

I.10.5 Les étapes de calcul :

- **Etape 1 :**

Introduction des données du réseau ;

Détermination de la matrice admittance ;

Les puissances actives et réactives des charges du réseau sont données dans le tableau de planification.

- **Etape 2 :**

Calcul des puissances actives et réactives, à l'exception du nœud de référence.

- **Etape 3 :**

Puisque les valeurs des puissances planifiées sont données par le tableau de planification, on peut calculer les variations de puissance telles que :

$$\Delta P_i^{(0)} = P_{ip} - P_{ic}^{(0)} \quad (1.52)$$

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_{ip} - Q_{ic}^{(0)} \quad (1.53)$$

Où :

(e) numéro d'itération,

P_{ip}, Q_{ic} Puissances planifiées.

p_{ic}, Q_{ic} Puissances calculées.

4eme Etape :

On détermine la variation maximale pour les variations des puissances $\text{Max}\Delta_{P_{ip}}$ et $\text{Max}\Delta_{P_{ic}}$

- **Etape 5 :**

On procède à un test de convergence pour le max de variations des puissances. Si une de ces deux valeurs est supérieure à une certaine tolérance (ϵ) on passe au calcul du jacobien (J).

- **Etape 6 :**

On se retrouve avec un système d'équations non linéaires dont la résolution est faite par la matrice inverse. Les corrections sur les composantes des tensions sont déterminées pour chaque nœud.

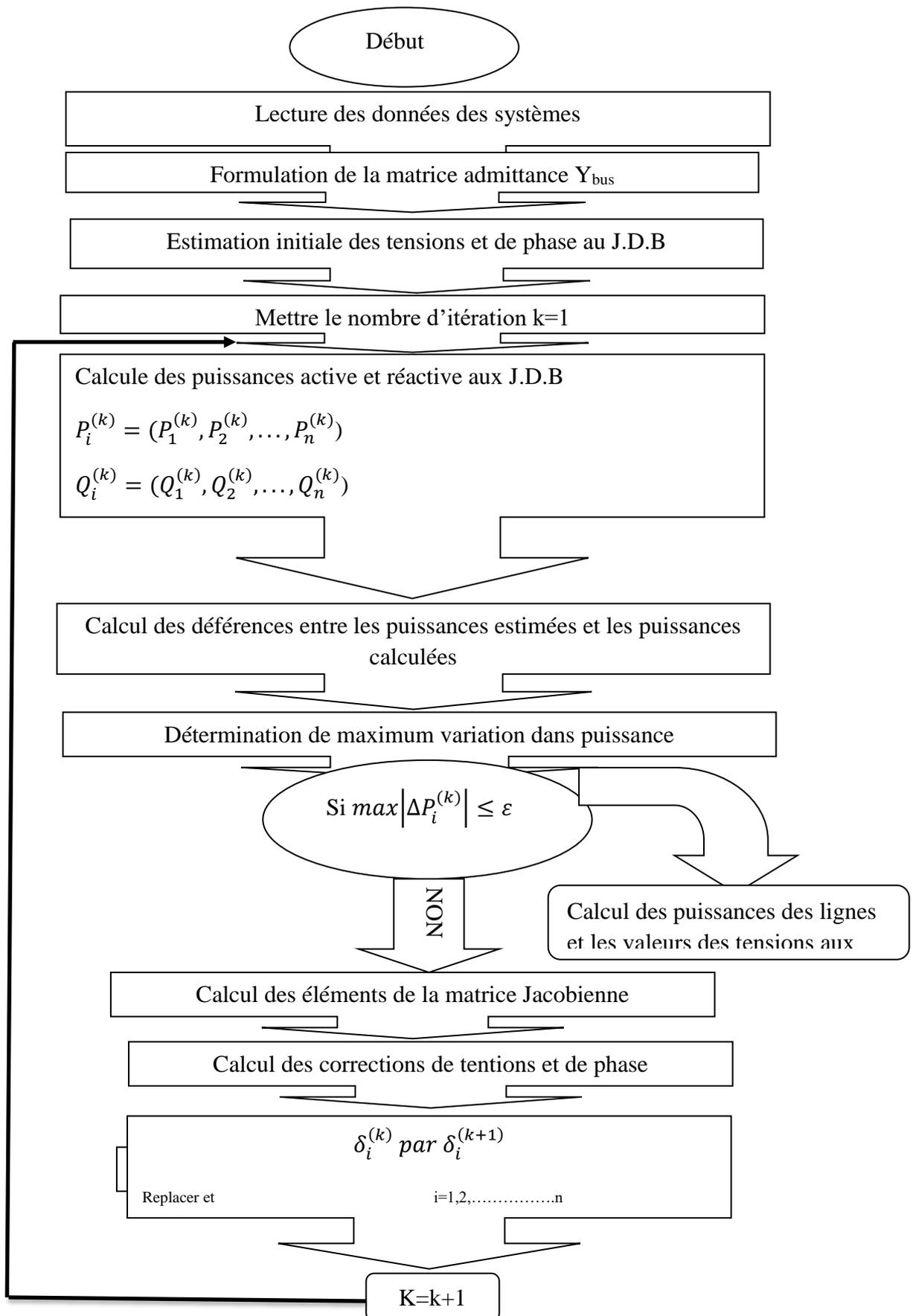
- **Etape 7 :**

Les corrections sur les tensions sont utilisées pour déterminer les nouvelles estimations des tensions nodales comme suit :

$$\Delta\delta_i^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)}$$
$$\Delta|V_i^{(k)}| = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)}$$

- **Etape 8 :**

Les nouvelles valeurs de sont remplacées dans les formules des puissances et on revient à l'étape (3) pour refaire le processus itératif. La fin du processus itératif se fait lorsque les variations des puissances à savoir : et deviennent inférieures à la précision.[12]



I.11 Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels :

Le réglage de la tension du réseau de distribution n'est pas réglementaire, il dépend de la structure du réseau et de sa gestion ; cependant, il existe de nombreuses techniques d'ajustement de tension [12].

I.11.1 Compensation de puissance réactive au poste source :

Les réseaux ont différentes manières de compenser l'énergie réactive dans les stations sources. Il permet de réduire la puissance de transit réactive sur les transformateurs et empêche ainsi le plan de tension de se dégrader inutilement.

I.11.2 Les régleurs en charge :

Le réglage de la charge est équipé en modifiant le taux de transformation par pas de 1% au niveau des transformateurs de la sous-station source. Cela permet d'ajuster la tension des jeux de barres MT en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de tension en amont .

Le réglage de la tension MT peut être effectué avec ou sans composition. Le compoundage est une technique qui prend en compte, en mesurant le courant dans le transformateur (et donc l'état de charge moyen du réseau), la tension chute dans le réseau aval. Ceci permet de maintenir la tension en un point du réseau différent de la station source [3].

I.11.3 Le réglage par la production décentralisée (PD) :

L'une des techniques actuellement utilisées pour le contrôle de tension d'une part et pour augmenter la capacité de puissance d'autre part est le travail de ce thème. La fabrication décentralisée d'électricité (PD) peut être soit conventionnelle (turbines à combustion, micro turbines à combustion, moteurs diesel, cogénération, etc.) soit renouvelable par installation à petite échelle liée à des systèmes électriques à basse tension (hydraulique, solaire photovoltaïque, éoliennes, etc.) [8].

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions, les niveaux, les architectures et les topologies des réseaux électriques. Nous avons aussi présenté la modélisation des composants d'un réseau électrique (machines, lignes, transformateur, charge), et les méthodes de résolution des problèmes de l'écoulement des puissances (Newton-Raphson, Gauss-Seidel) et en fin les techniques de réglage des tensions.

Chapitre 2 :

Etude du changeur de prise

II.1 Introduction :

Dans un circuit électrique, une chute de tension se produit normalement lorsqu'un courant traverse le câble. Elle est liée à la résistance ou à l'impédance du flux de courant avec des éléments passifs dans les circuits, y compris les câbles, les contacts et les connecteurs affectant le niveau de chute de tension. Plus le circuit ou la longueur du câble sont longs, plus la perte de tension est importante. La méthode à suivre pour réparer une chute de tension électrique dépend de la nature du problème, dans ce chapitre on va fait appel au régleur en charge pour résoudre ce problème.[16]

II.2 Histoire du changeur de prise :

Le premier changeur de prise est réactif. L'émergence du premier bureau de change Les charges résistives remontent à 1926, lorsque le Dr Bernhard Jansen a déposé 474 brevets 613 du changeur de prises résistif, décrivant le principe de fonctionnement encore en usage a Notre jour. Soucieux d'industrialiser son invention, il en confie la fabrication à Maschinenfabrik Reinhausen (fabricant de machines de Rheinhausen MR) à Ratisbonne.

Si les premiers ont été installés en 1929, ils ne l'ont été que dans les années 1950 Dominait les marchés britannique et américain dans les années 1980. D'aujourd'hui Les changeurs de prises résistifs représentent la majorité dans presque tous les pays. Si bien sûr Dans le même temps, des améliorations technologiques ont été apportées, et la principale innovation est apparue en 2000 Lorsque MR a introduit le premier changeur de prises utilisant un disjoncteur à vide, il a évité L'huile se salit et provoque des délais plus longs entre les entretiens importants. [17]

Le RC d'aujourd'hui est très fiable, et une fois le calendrier de maintenance respecté, sa durée de vie est en fait équivalente à la durée de vie d'un transformateur.

II.3 Définition d'un changeur de prise :

Le changeur de prises est un appareil permettant au transformateur de faire varier son rapport de transformation en jouant sur la valeur de l'inductance de ses enroulements (au primaire ou au secondaire). Cela permet de régler le niveau de tension du réseau électrique (Elles permettent donc de garder la tension secondaire à sa valeur nominale même si la tension appliquée au primaire est plus faible que la tension nominale).Il est situé en général sur le côté du transformateur et dispose d'une cuve d'huile séparée. Les arcs électriques se produisant lors de la commutation des prises décomposent en effet l'huile et nuisent aux

propriétés diélectriques de celle-ci, il est donc nécessaire de ne pas la mélanger avec l'huile saine. [18]

Le régleur en charge peut être commandé automatiquement par l'action d'un régulateur de tension ou manuellement par l'action de l'exploitant en fonction des orientations du centre de conduite.

II.4 Le but d'un changeur de prises :

Presque tous les transformateurs permettent la régulation de tension ; utilisez un système mécanique : un régulateur, qui ajuste le rapport de transformation en ajoutant ou en réduisant plusieurs spires de régulation en série avec le nombre de spires de l'enroulement haute tension

Ce réglage peut se faire sous charge, ce qui est courant pour les gros équipements, et peut également se faire à vide. Les régulateurs en charge sont plus compliqués que les interrupteurs de mise hors tension, mais ils peuvent stabiliser le réseau en maintenant une tension constante [19]

Un changeur de prises est utilisé pour contrôler la tension de sortie d'un transformateur. Pour ce faire, il ajuste le nombre de tours d'un enroulement, ce qui affecte le rapport de transformation du transformateur. Les changeurs de prises en charge (OLTC) et les changeurs de prises hors charge sont les deux types de changeurs de prises de transformateur (DETC). Il convient de noter que les changeurs de prises ne sont pas disponibles sur tous les transformateurs.[20]

II.5 Description fonctionnelle :

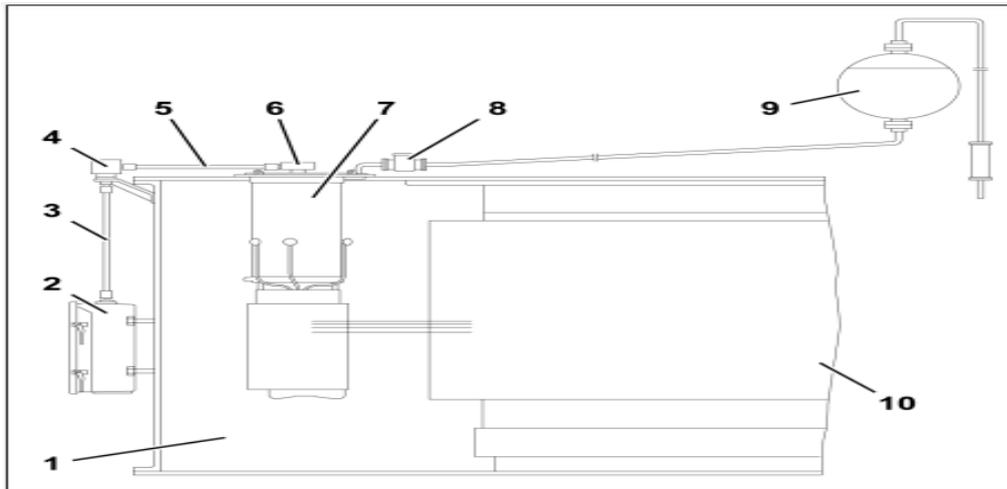


Figure 12: Transformateur avec changeur de prises en charge, représentation schématique

1. Cuve du transformateur
2. Mécanisme d'entraînement
3. Arbre d'entraînement vertical
4. Renvoi d'angle
5. Arbre d'entraînement horizontal
6. Réducteur supérieur
7. Changeur de prises en charge
8. Relais de protection RS
9. Conservateur d'huile
10. Partie active du transformateur

II.6 Structure :

Le changeur de prises en charge est composé de la tête du changeur de prises en charge, d'un récipient d'huile avec corps insérable intégré et du sélecteur fixé au-dessous (avec présélecteur disponible sur demande) [21]

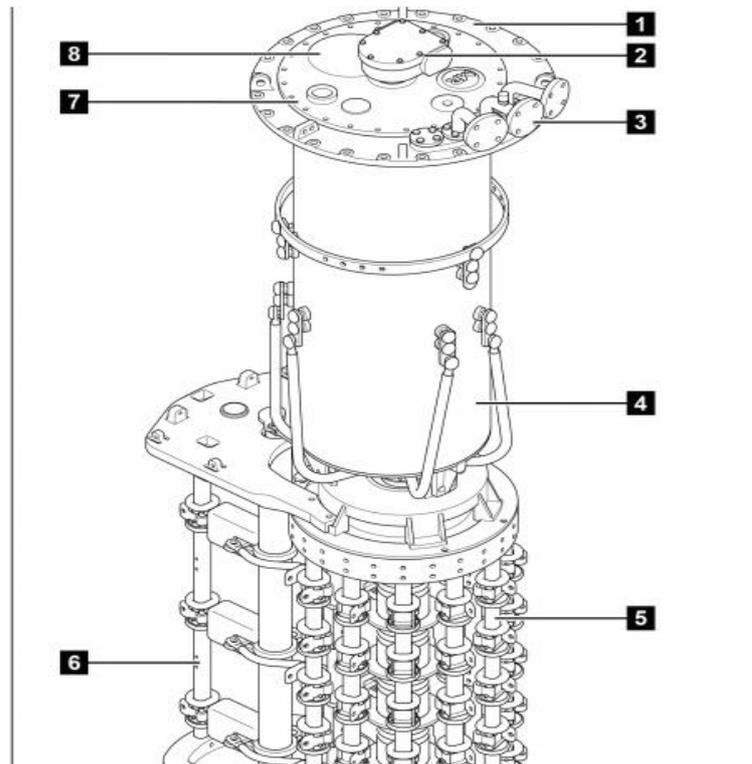


Figure 13: Changeur de prises en charge OILTAP® R

1. Tête du changeur de prises en charge
2. Réducteur supérieur
3. Coude
4. Récipient d'huile
5. Sélecteur de prises
6. Présélecteur (en option)
7. Couvercle de la tête du changeur de prises en charge
8. Disque de rupture

II.7 Les Caractéristiques d'un changeur de prise :

II.7.1 Caractéristiques principales :

- Cuve hermétique à remplissage intégral sous vide.
- Diélectrique liquide exempt de PCB Disponible en version huile végétale (ester naturel).

- Mode de refroidissement ONAN.
- Enroulement en cuivre en en aluminium selon les puissances.
- Circuit magnétique en tôle fer-silicium à cristaux orientés.
- Puissance : de 250 kVA à 630 kVA.
- Fréquence : 50 Hz.
- Tension assignée primaire : 15 ou 20 kV (autre tension, nous consulter).
- Tension assignée secondaire : 410 V (autre tension, nous consulter).
- Réglage automatique de la tension (en charge) dans une plage pouvant atteindre +/-10% avec 9 positions.

II.7.2 Caractéristiques techniques :

II.7.2.a La capacité de coupure assignée :

Le pouvoir de coupure assigné du changeur de prises dépend de la structure du circuit du changeur de prises et du pouvoir de coupure de l'ampoule à vide. Le pouvoir de coupure nominal du CZ 500 est indiqué dans la figure ci-dessous :

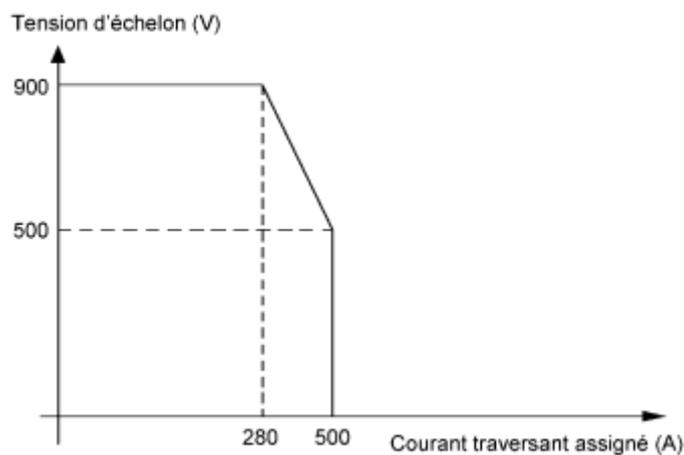


Figure 14:: présenté la capacité de coupure assigne de changeur de prise en charge CZ

Selon les exigences de la norme IEC60214-1 (2003), le pouvoir de coupure d'un changeur de prises en charge fait référence au pouvoir de coupure maximal d'un changeur de prises en charge qui peut commuter des charges sans danger. Sa valeur est le double du produit du courant nominal et de la tension de pas relative [22].

II.7.2.b Température ambiante :

La plage de température ambiante pour une utilisation normale est de -25 à $+65$ °C. L'utilisateur doit prendre des mesures pour éviter la condensation sur le changeur de prises en charge [22]

II.7.2.c Niveau d'isolation :

Le niveau d'isolement du changeur de prises dépend du niveau d'isolement à la terre et du niveau d'isolement interne. Le niveau d'isolation au sol de CZ est conçu selon 35 kV, et le niveau d'isolation interne est conçu pour répondre aux exigences d'isolation des composants de transformateur de type sec. Les valeurs sont les suivantes :

Niveau d'isolation	Tension de tenue assignée par tension appliqué à fréquence industrielle par source séparée (kV/50Hz, 1min)	Tension de tenue assignée au choc de Foudre (kV, 1.2/50 μ s)
Isolation à la terre	85	200
Entre la prise en service et la prise présélectionnée	5	20
Au travers de l'enroulement des prises	20	80

Tableau 3 : Niveau d'isolation

Remarque : Si le transformateur est encapsulé dans une armoire montée à la terre, il est nécessaire de réserver un écart suffisant entre l'armoire et les parties sous tension du changeur de prises.[22]

II.8 Mode opératoire des changeurs de prises en charge et des changeurs de prise hors tension :

Le changeur de prises en charge et le changeur de prises sans excitation sont utilisés pour la régulation de tension des transformateurs. Le réglage de la tension s'effectue par étapes en modifiant le rapport de transformation. À cette fin, le transformateur est équipé d'un enroulement de réglage fin, La sortie est connectée au sélecteur du changeur de prises en charge, ARS ou au changeur de prises hors excitation.

Utilisez ensuite le changeur de prises en charge pour régler en continu la tension du transformateur en charge. D'autre part, le transformateur doit être complètement hors tension afin d'ajuster la tension avec un changeur de prises sans tension.

Un changeur de prises en charge qui fonctionne selon le principe de la commutation rapide de résistance. Principalement liés à des sujets tels que le changeur de prises en charge, l'ARS et le changeur de prises hors excitation du transformateur à huile.[23]

II.8.1 Changeurs de prises en charge et changeurs de prises hors tension pour transformateurs à huile :

La plupart des changeurs de prises en charge et des changeurs de prises hors tension sont conçus pour être intégrés dans la cuve du transformateur, de sorte que les bornes de sortie de l'enroulement de réglage fin au niveau du sélecteur ou de l'interrupteur de charge puissent être court-circuitées.

Le changeur de prises en charge est entraîné par un moteur. L'entraînement du moteur est relié mécaniquement à la tête du changeur de prises en charge via l'arbre d'entraînement. Le changeur de prises hors excitation peut être actionné par un entraînement par moteur ou par une opération manuelle.[23]

II.8.2 Changeur de prises en charge pour transformateurs de type sec :

Le changeur de prises en charge VACUTAP® VT® peut être utilisé pour le réglage sans interruption de la tension des transformateurs de type sec.

Le changeur de prises en charge VACUTAP® VT® est fixé sur l'élément actif du transformateur de type sec et est conçu comme module monophasé pour une affectation directe à une colonne du transformateur. Un entraînement à moteur a été prévu pour l'actionnement

mécanique. Les modules monophasés peuvent facilement être accouplés à un système triphasé.[23]

II.9 Quatre caractéristiques de base du changeur de prises en charge du transformateur (OLTC) :

II.9.1 Sélecteur :

Ces interrupteurs sélectionnent les positions physiques des prises sur les enroulements du transformateur. En raison de leur structure, ils ne peuvent et ne doivent pas générer ou interrompre le courant de charge.[24]

II.9.2 Réacteur :

Le courant de charge ne doit jamais être interrompu pendant un changement de prise. Par conséquent, à chaque changement de prise, il y a un intervalle où deux prises de tension sont étendues. Des réacteurs (inductances) sont utilisés dans le circuit pour augmenter l'impédance du circuit sélecteur et pour limiter la quantité de courant en circulation due à cette différence de tension. Dans des conditions de charge normales, un courant de charge égal circule dans les deux moitiés des enroulements du réacteur et les flux s'équilibrent, ne générant aucun flux résultant dans le cœur. [24]

II.9.3 Commutateur de vide :

Cet appareil remplit la fonction d'un disjoncteur, en mettant sous et hors tension pendant la séquence de changement de prise [24].

II.9.4 Commutateur de dérivation :

L'interrupteur fonctionne pendant la séquence de changement de prise, mais il n'allume ou n'éteint pas le courant de charge, bien qu'il le fasse avant de déconnecter chaque connexion. [24]

II.9.5 Les exemples de séquence de changement de prise :

Effectuez plusieurs étapes dans l'ordre pour effectuer l'opération de commutation. La figure ci-dessous montre le principe de commutation d'un OLTC avec commutateur de dérivation et sélecteur de prise. Les contacts x et v sont appelés contacts principaux et sont les deux états possibles du commutateur de dérivation, tandis que V et H sont les deux bras de sélection, qui sélectionnent l'un des contacts de prise numérotés pour sélectionner le nombre de tours de

l'enroulement de régulation. Il y a aussi deux contacts auxiliaires, y et u, chacun avec une résistance. En considérant la figure 17, la séquence de réglage de l'enroulement de la prise 6 à la prise 5 est la suivante :[25]

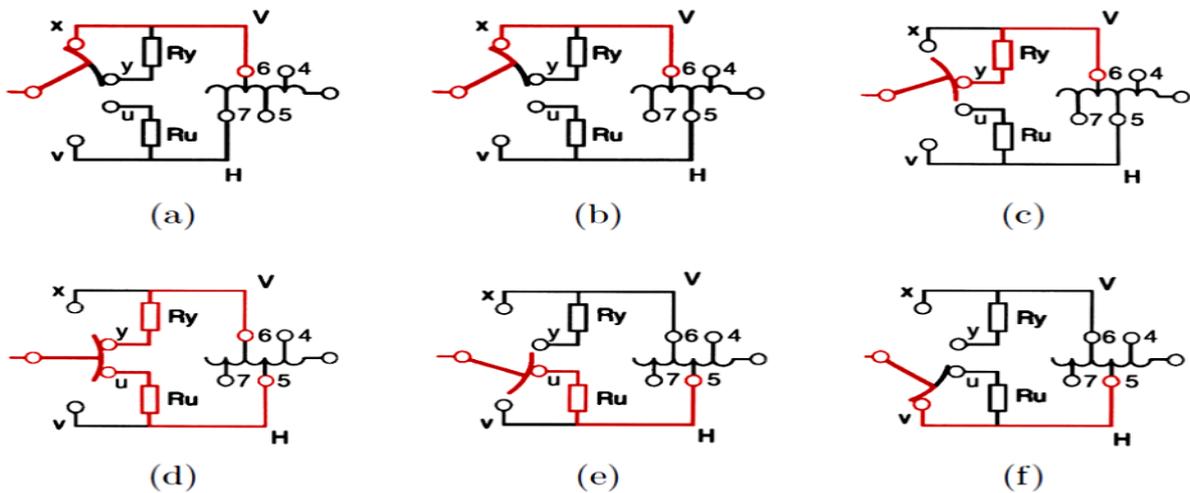


Figure 15: Illustration d'une opération de changement en charge

Non	Détails du fonctionnement du changeur de prise
(a)	L'état initial. Le courant de charge passe par x et V vers la prise 6. Le bras du sélecteur H est actuellement hors charge
(b)	Le bras sélecteur H étant hors charge, il peut être actionné de la prise 7 à la prise 5.
(c)	Le commutateur de dérivation commence à se déplacer du contact principal x vers le contact principal v. Le courant de charge passe maintenant par le contact auxiliaire y et sa résistance.
(d)	Dans cet état de transition, le courant de charge est transféré du contact auxiliaire y au contact auxiliaire u. Un courant de circulation est présent entre ces contacts, mais son ampleur est limitée par les résistances. Le courant passe maintenant par la prise
(e)	Le contact auxiliaire y s'est ouvert et le courant de charge passe maintenant uniquement par le contact auxiliaire u et la prise 5.

(f)	L'état final est atteint. Le courant de charge passe maintenant par v et H jusqu'à la prise 5. Le bras du sélecteur V est hors charge et est disponible pour faire un pas de plus vers la position de prise 4 si cela est nécessaire. Comme on peut le voir, le sélecteur de prises fonctionne toujours hors charge, contrairement au commutateur de dérivation.
-----	--

Figure 16 : Description de la séquence de changement de prise pour la figure 17

II.10 Mode de fonctionnement des changeurs de prises en charge :

II.10.1 principe de commutation des changeurs de prises en charge :

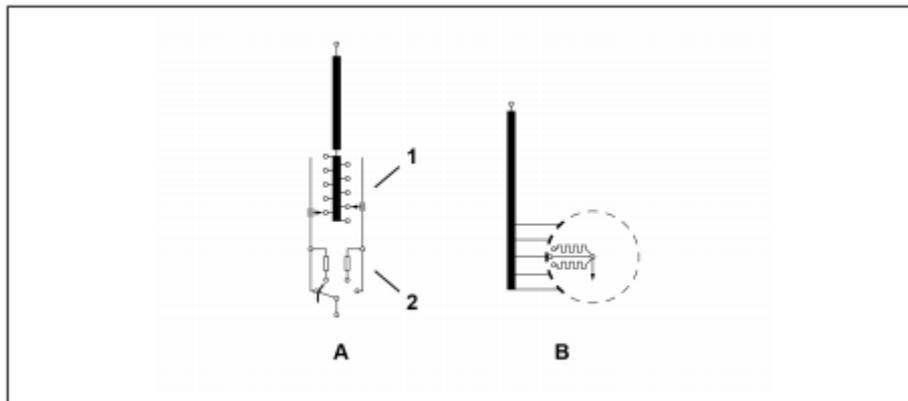


Figure 17: Principe de commutation des changeurs de prises en charge

A. Principe commutateur sélecteur

B. Principe sélecteur en charge

1. Sélecteur

2. Commutateur

II.10.1.a Principe commutateur-sélecteur :

Le changeur de prises en charge qui fonctionne selon le principe de commutation se compose d'un interrupteur et d'un sélecteur

Le sélecteur permet de présélectionner la prise à activer du côté non courant de l'interrupteur. La prise obtient alors le courant de fonctionnement en allumant la charge suivante

C'est la raison pour laquelle les fonctions du commutateur et du sélecteur sont synchronisées tout au long du changement de prise [23]

II.10.1.b Principe sélecteur en charge :

Le changeur de prises en charge, qui fonctionne selon le principe du sélecteur en charge, combine les caractéristiques de l'interrupteur et du sélecteur. Il suffit d'une opération pour passer d'une prise à l'autre

Différence entre les sélecteurs en charge classiques et les sélecteurs en charge équipés de la technologie de commutation à vide :

Dans le cas d'un sélecteur en charge conventionnel, la commutation en charge est effectuée par les mêmes contacts utilisés pour sélectionner la prise requise

Pour les sélecteurs en charge équipés de la technologie de commutation sous vide, la commutation en charge s'effectue via un contact séparé (unité de commutation sous vide).[23]

II.10.2 Circuit de base de l'enroulement de réglage fin :

La figure suivante montre le circuit de base commun aux enroulements de réglage fin. Vous trouverez les circuits de base possibles des différents types de changeurs de prises en charge dans les fichiers de données techniques correspondants :

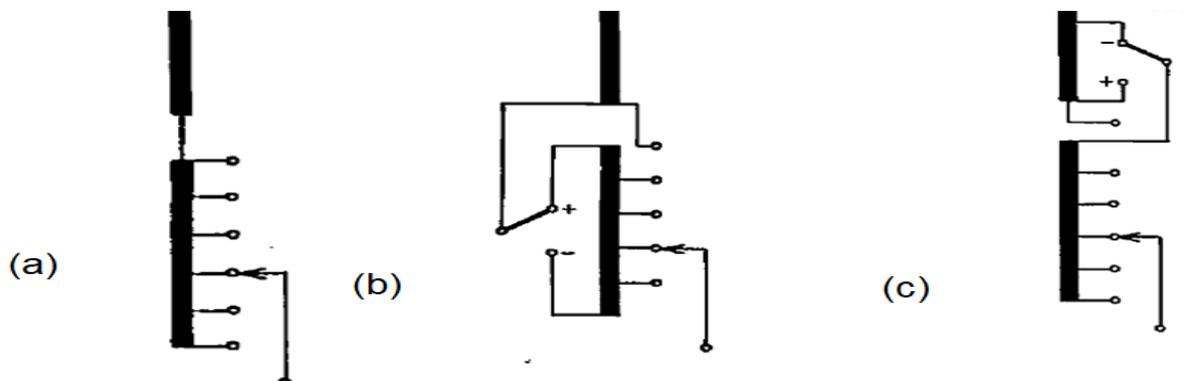


Figure II.6 : Circuits de base

- a) Linéaire (Sans présélecteur)
- b) Inverseur
- c) Présélection (sélecteur grossier)

II.10.3 Désignations des changeurs de prises en charge :

Chaque type de changeur de prises en charge a une version différente en fonction du nombre de phases, du courant nominal maximal, de la tension matérielle maximale U_m , de la série de sélecteurs et du schéma de câblage de base. Par conséquent, le nom d'un modèle de changeur de prises en charge donné doit également répondre à ces caractéristiques. Cela permet une identification sans ambiguïté du changeur de prises en charge [26]

II.10.3.a Exemple de désignation du changeur de prises en charge :

Exemple : CVIII350Y/72.5-10193W signifie :

Changeur de prises en charge type CV, tripolaire, courant traversant maximal 350A, application Étoile, tension maximale pour l'équipement 72.5kV, 19 positions de service, 3 positions du milieu, avec présélecteur inverseur.[26]

- **Niveau de tension maximum de l'équipement :**

40,5 kV, 72,5 kV

- **Nombre de postes de service :**

Le nombre d'emplacements de service peut être de 10, 12, 14 (sans présélecteur) et 19, 23, 27 (avec présélecteur)

- **Deux présélecteurs sont disponibles :**

Présélecteur inversé (W) et présélecteur grossier (G). Le nombre de positions intermédiaires peut être de 0,1 ou 3.

II.10.3.b Domaine d'application :

Le changeur de prises en charge de type CV/SV convient à tous les transformateurs électriques et industriels avec un courant maximum de 500A et une fréquence de 50Hz ou 60Hz (étoile et triangle, triphasé et monophasé).

II.11 Mode de fonctionnement du changeur de prises hors tension :

II.11.1 Principe de commutation du changeur de prises hors tension :

En tournant l'arbre d'entraînement isolé, le changeur de prises en charge peut être ajusté d'une position de fonctionnement à une autre. L'interrupteur de prise hors site peut être actionné par un moteur ou une opération manuelle

Il peut arriver que la pression de contact soit maintenue par une sorte de dispositif à ressort, ce qui provoquera des vibrations

Dans un changeur de prises sans excitation fonctionnant à la même position de prise toute l'année, la résistance de contact peut augmenter lentement en raison de la dégradation locale et de l'oxydation du matériau du point de contact. Un échauffement se produira, entraînant une accumulation de carbone due à la pyrolyse, ce qui augmentera encore la résistance de contact et réduira le refroidissement. [27]

II.11.2 Désignations du changeur de prises hors tension :

Exemple	DU III 1000 - 145 - 06 05 0 Y		
DU	Désignation du produit	DU	DEETAP® DU
III	Nombre de phases	I	Monophasé
		III	Triphasé
1000	Courant traversant assigné maximal I _{um}	200	200A
		4XX	400A
		600	600A
		8XX	800A
		1000	1000A
		12X2	1200A
		16X2	1600A

		2022	2000A
		Ium > 2000 A sur demande	
	Répartition de courant nécessaire	XX0X	Pas de répartition de courant
		XX2X	Double répartition de courant
	Niveaux de commutation parallèles	XXX0	Aucune
		XXX2	2 par phase
145	Tension maximale du matériel Um [kV]	36 ; 72,5 ; 123 ; 145 ; 170 ; 245	
		Um > 245 kV sur demande	
06	Division du cercle de contacts	60	6 contacts (400 mm)
		12	12 contacts, (600 mm)
		18	18 contacts, (850 mm)
05	Nombre de positions de service	Entre 2 et 17 positions de service sont possibles selon l'exécution	
0	Nombre de positions centrales	0	Pas de position centrale
		1	Une position centrale
Y	Type de commutation	Y	Changeur de prises hors tension à point neutre
		D	Changeur de prises hors tension triangle
		ME	Changeur de prises hors tension à pont simple
		MD	Changeur de prises hors tension à pont double
		SP	Changeur de prises hors tension parallèle en série
		YD	Changeur de prises hors tension étoile-triangle
		BB	Changeur de prises hors tension Buck-and Boost
		S	Connexion spéciale

Tableau 4: Explication des désignations du changeur de prises hors tension

II.12 Mode de fonctionnement de l'ARS (Advanced Retard Switch) :

II.12.1 Principe de commutation de l'ARS :

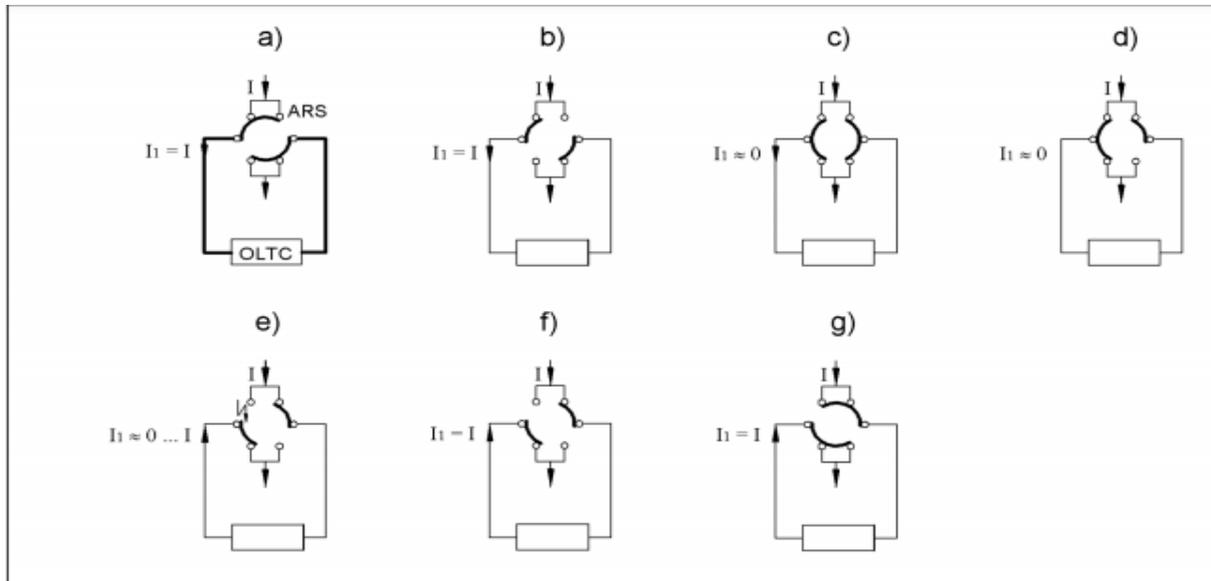


Figure 18:: Séquence de changement de robinet du COMTAP® ARS

Lors de l'opération de changement de prise COMTAP® ARS, le courant I doit être commuté sur l'impédance Z , qui est composée de R et X . La corrosion des contacts provoquée par la commutation dépend du courant I circulant dans les contacts COMTAP® ARS pendant la commutation et de l'impédance Z vers laquelle le courant I va basculer. Cette impédance est constituée par le cheminement des câbles entre le COMTAP® ARS et le changeur de prises en charge, et inversement. Changeur de prises en charge et circuit (circuit de commutation).

La figure suivante montre la séquence de passage d'une position de fonctionnement à une autre. La figure ' a ' montré l'une des deux positions de fonctionnement du COMTAP® ARS. Atteignez d'abord la position médiane illustrée à la figure ' b ' Lorsque la prise est modifiée, le courant I circule dans le circuit de commutation sans changement. Ensuite, atteignez la position indiquée sur la figure ' C '. Dans ce cas, le courant I dans le circuit de commutation est réduit à 0 A. Le courant I circule principalement dans les contacts du COMTAP® ARS qui sont maintenant connectés en parallèle. Dans l'étape suivante, l'un de ces contacts est ouvert (Figure D), donc presque tout le courant I doit être commuté sur le circuit de commutation via COMTAP® ARS

Le circuit de commutation passe par le dernier contact COMTAP® ARS ouvert (figure e). Le courant I 1 change de sens dans la boucle de commutation. Avec la position indiquée sur la figure 'f', le COMTAP® ARS a maintenant atteint une autre position de fonctionnement (figure g). [28]

II.12.2 Désignations de l'ARS (Advanced Retard Switch) :

Désignation du type	COMTAP® ARS I 1000-123-18 02 0 DW
COMTAP® ARS	Type de commutateur de retard avancé
I	Nombre de phases
1,000	Courant nominal maximal traversant I _{um} en A
123	Tension la plus élevée pour l'équipement U _m (en kV)
18	Pas du cercle de contact
02	Nombre de postes de travail
0	Nombre de positions intermédiaires
DW	Type de connexion (DW = double inverseur inverseur sélecteur de commutation concept)

Tableau 5: Désignations de l'ARS (Advanced Retard Switch)

II.13 Précautions de sécurité :

Un transformateur sous tension et des composants COMTAP® ARS sous tension peuvent provoquer la mort ou des blessures graves lors des travaux de maintenance ! Le respect des mesures de sécurité suivantes est obligatoire. [29]

1. Couper le transformateur du côté haut et basse tension
2. Verrouillez le transformateur pour éviter tout redémarrage involontaire.
3. S'assurer que tout est hors tension.
- 4 Reliez visiblement toutes les bornes du transformateur à la terre (câbles de mise à la terre, de connecteurs de mise à la terre) et les court-circuiter.
5. Couvrir ou isoler les parties adjacentes sous tension.

II.13.1 Inspection :

La surveillance du changeur de prises en charge et du mécanisme d'entraînement se limite à une inspection visuelle occasionnelle de la tête du changeur de prises en charge, du relais de protection et du mécanisme d'entraînement. C'est une bonne idée de les faire dans le cadre des travaux d'inspection réguliers des transformateurs [21]

Intervalle	Mesure
Une fois par an	Vérifiez le nettoyage des paillasons, des chemins de câbles et du boîtier de protection du mécanisme d'entraînement
Une fois par an	Vérifier les points d'étanchéité de la tête du changeur de prises en charge, du relais de protection et des tuyaux de raccordement.
Une fois par an	Vérifier si la résistance électrique intégrée dans le boîtier de protection du mécanisme d'entraînement fonctionne normalement
Une fois par an	Vérifier le bon fonctionnement du relais de protection
Une fois par an	Vérifiez l'état impeccable du dessiccateur (gel de silice) pour le conservateur d'huile du changeur de prises en charge

II.13.2 Maintenance :

Les transformateurs de puissance équipés d'OLTC sont les Principaux composants des réseaux électriques. La fiabilité opérationnelle de ces transformateurs et de leurs OLTC est donc extrêmement importante et doit être maintenue à un niveau élevé pendant toute leur durée de vie. L'OLTC à vide est une amélioration majeure de la technologie des changeurs de prises. Amélioration majeure pour la technologie des changeurs de prises, l'OLTC sous vide reste néanmoins un équipement de commutation mécanique et nécessite une maintenance.

Le principe d'une stratégie de maintenance préventive, c'est-à-dire périodique, pour les changeurs de prises en charge à l'huile est le suivant basée sur le temps de service ou le nombre d'opérations, selon la première éventualité. Seul le nombre d'opérations s'applique pour les OLTC à vide de Reinhausen immergés dans l'huile minérale du transformateur. La maintenance basée sur le temps n'est plus nécessaire

Sauf pour des applications spéciales, les intervalles pour les OLTC à l'huile en application point étoile utilisés dans les transformateurs de réseau sont généralement de 7 ans ou entre 1 et 2 ans. Réseau est généralement de 7 ans ou entre 50 000 et 100 000 opérations. et 100 000 opérations. Pour cette application, le temps en service est le facteur décisif. En considérant une durée de vie du transformateur de 40 ans, 5 interventions de maintenance sont nécessaires pour l'OLTC

Les mesures nécessaires entre les intervalles de maintenance des OLTC à vide sont minimales et peuvent être facilement combinées avec les transformateurs habituels. Peuvent être facilement combinées avec l'inspection habituelle du transformateur. L'inspection habituelle du transformateur, et comprennent l'étendue des travaux suivants :

- Contrôle visuel de l'unité d'entraînement du moteur
- Test du relais de protection du changeur de prises
- Contrôle de l'huile du changeur de prises (la rigidité diélectrique et la teneur en eau sont des critères déterminants)
- Contrôle régulier du système de reniflard (gel de silice).[30]

II.14 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est d'offrir une vision globale sur les changeurs de prises, ces caractéristiques, principe et désignation de chaque mode de fonctionnement de changeur de prises (en charge, hors tension et ARS).et en fin on a présente le mode d'inspection et la maintenance des changeurs de prises

Chapitre 3 :
Simulation d'un réseau
MT par OPENDSS

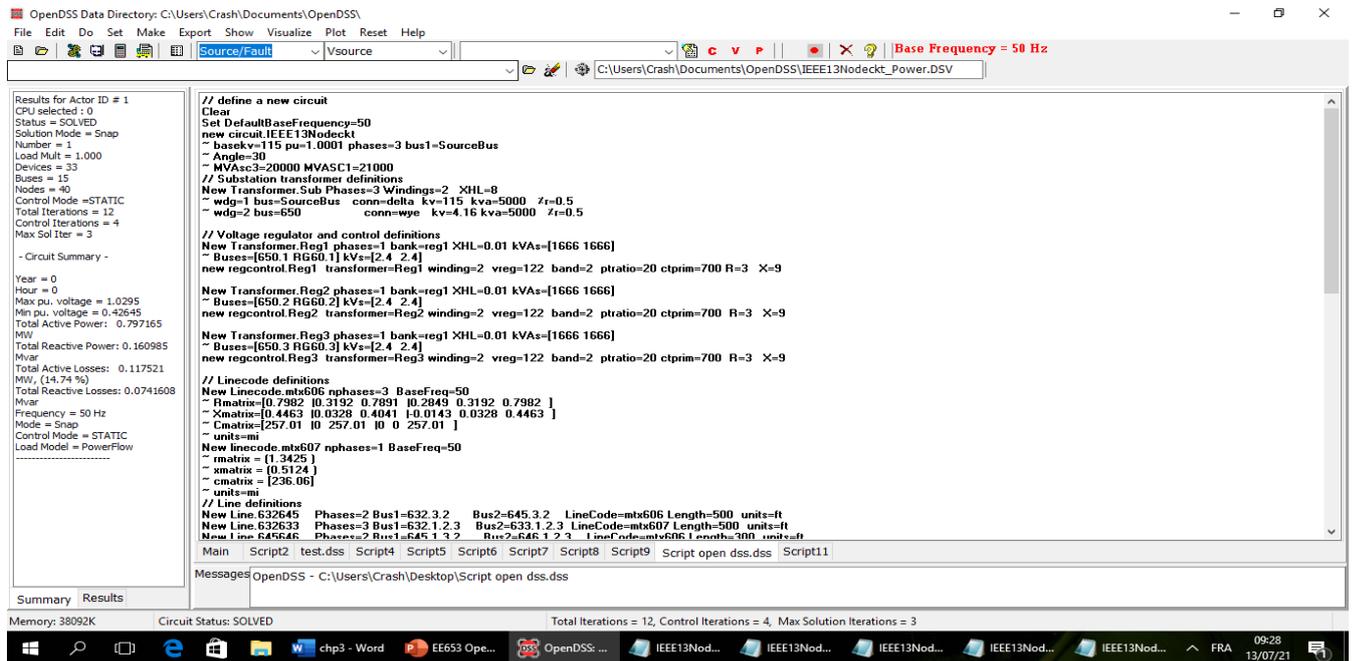
III.1 Introduction :

Dans l'exercice de planification du réseau de distribution, la pratique courante de la simulation est de ne considérer que le pire des cas, c'est-à-dire la charge de pointe de la ligne. Par conséquent, la méthode à suivre consiste à déterminer quelles sont les tensions et puissances actives et réactives de chaque nœud en régime permanent, afin de pouvoir déterminer si le réseau doit finalement être mis à niveau. OpenDSS et d'autres logiciels capables de traiter ces informations et d'effectuer des calculs de flux de charge sont couramment utilisés.

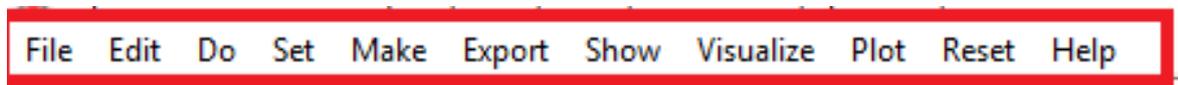
III.2 Introduction au script OpenDSS :

OpenDSS permet d'exécuter toutes les fonctions par un script basé sur du texte. Cela facilite l'utilisation d'OpenDSS pour les circuits complexes car les scripts DSS peuvent être configurés pour différents formats de transfert de données. OpenDSS possède une syntaxe de commande spécifique pour la définition et la création d'objets et les paramètres de chaque composant peuvent être fournis dans un ordre aléatoire. Le compilateur OpenDSS traite chaque paramètre dans un ordre positionnel et construit la structure du composant. Certaines commandes nécessitent une interprétation à plus d'un niveau. Par exemple, la commande NEW est compilée par l'interpréteur principal de la commande DSS et transmet le reste de la chaîne à l'exécutif pour l'ajout de nouveaux éléments de circuit. L'exécutif DSS détermine le type d'élément à ajouter et confirme qu'il s'agit d'une classe enregistrée. Lorsque la commande NEW entraîne l'instanciation d'un élément DSS, celui-ci est doté de valeurs par défaut raisonnables. OpenDSS supporte également une variété de délimiteurs, d'autres caractères spéciaux et de propriétés de tableau. La modélisation des différents composants d'OpenDSS est décrite dans les sections suivantes.[30]

III.3 Interface utilisateur :



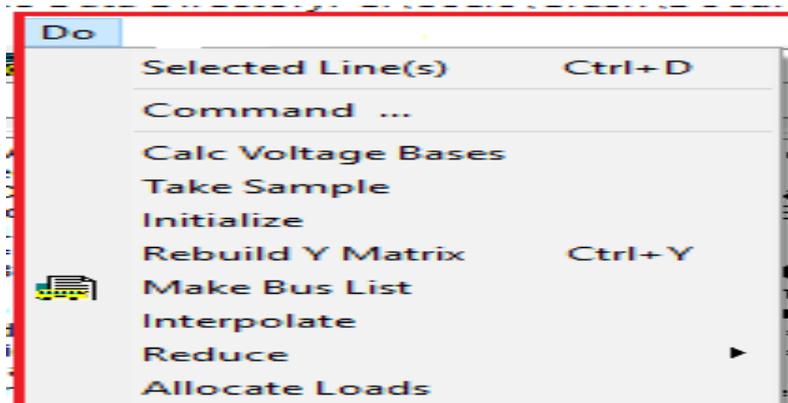
III.3.1 Menus :



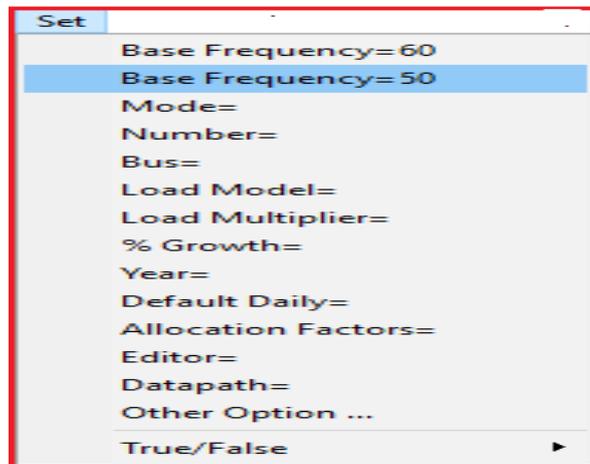
la plupart du travail dans OpenDSS. Notez que tous ces menus peuvent être exécutés en écrivant des commandes alternatives.

- **File and Edit** : créez, ouvrez, enregistrez et modifiez les fichiers du projet.
- **Do** : contient les commandes utilisées pour exécuter les chaînes de texte OpenDSS.

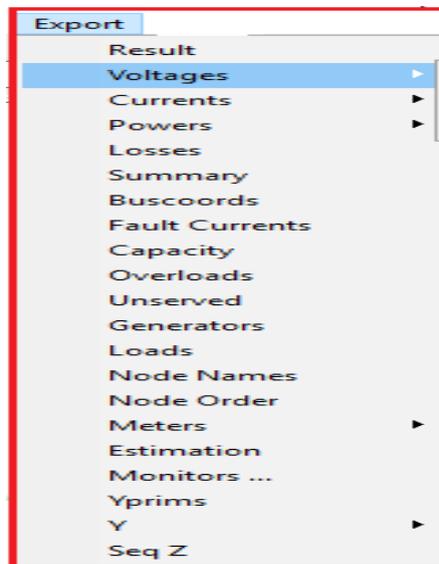
La commande “**Selected Line(s)**” est couramment utilisée, comme la commande générale “**Run**”.



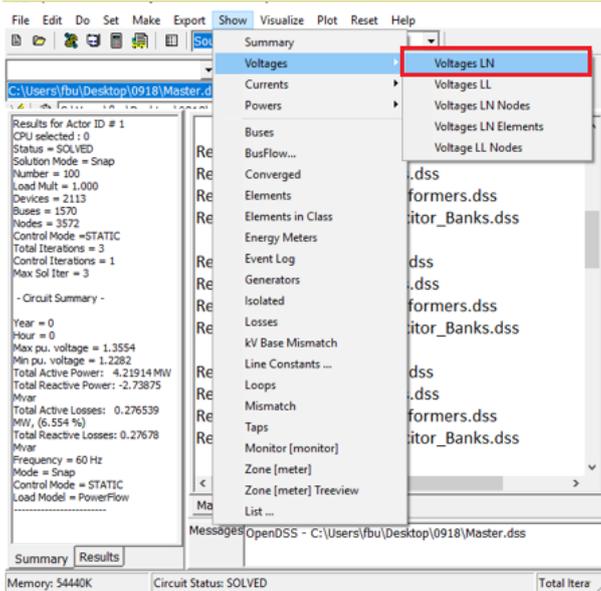
- **Set**: nous permet de définir tous les paramètres de la solution qui peuvent être définis via les commandes de script d'option.



- **Export** : permet d'enregistrer divers rapports dans des fichiers csv



- **Show** : contient une grande partie des mêmes informations que les rapports exportés à l'aide du menu Export, mais les affiche directement dans l'interface graphique.



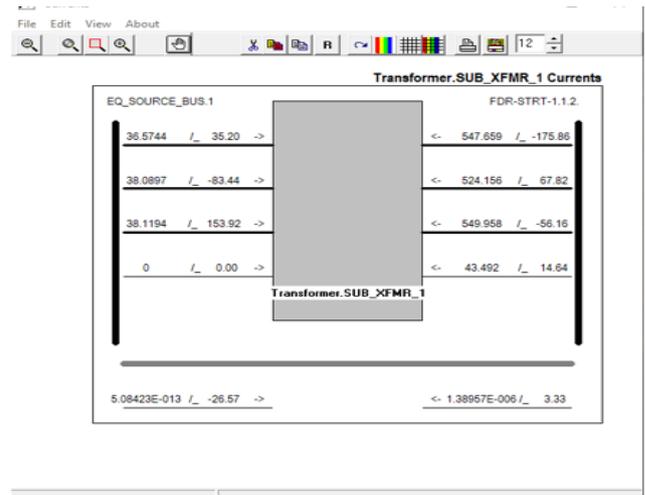
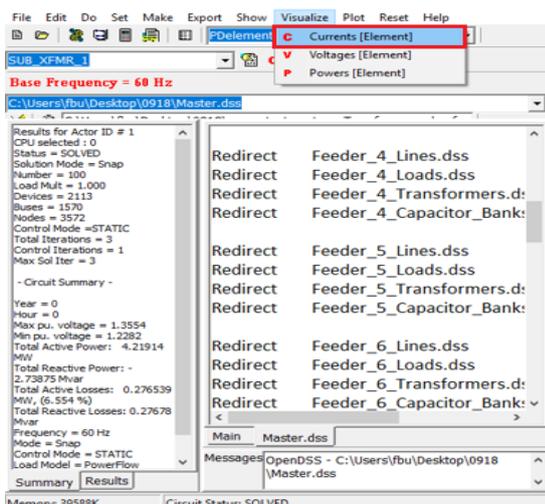
comp_test_system_VLN.Txt - Notepad

File Edit Format View Help

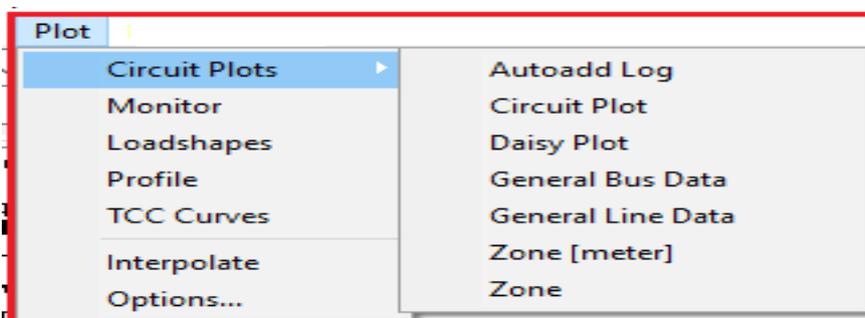
SYMMETRICAL COMPONENT VOLTAGES BY BUS (for 3-phase buses)

Bus	Mag:	V1 (kV)	p.u.	V2 (kV)	%V2/V1	V0 (kV)	%V0/V1
eq_source_bus	26.01	1.306	0.01092	0.04199	1.684E-009	6.477E-009	
fdr-str1-1	1.818	1.312	0.001295	0.07124	0.0005336	0.02935	
fdr-str1-2	1.813	1.309	0.0007208	0.03975	0.0001336	0.007367	
189-b28t	0.0007858	0.0005671	1.812	2.306E005	0.0003349	42.63	
189-a	0.0008766	0.0006326	1.811	2.066E005	0.0006157	70.24	
189-b	0.0009113	0.0006577	1.811	1.907E005	0.0007116	78.88	
189-1	0.00113	0.0008157	1.809	1.601E005	0.001245	110.1	
189-2	0.001333	0.0009623	1.807	1.356E005	0.001664	124.8	
189-3	0.001524	0.0011	1.806	1.185E005	0.002041	133.9	
189-4	0.001721	0.001242	1.805	1.049E005	0.002419	140.6	
189-5	0.001973	0.001424	1.803	9.137E004	0.002893	146.6	
189-6	0.002229	0.001609	1.801	8.008E004	0.003347	150.1	
189-8	0.002719	0.001962	1.798	6.514E004	0.004184	153.9	
189-9	0.003226	0.002112	1.797	6.148E004	0.004538	155.1	
189-10	0.003185	0.002299	1.795	5.636E004	0.004949	155.4	
189-11	0.003315	0.002392	1.794	5.413E004	0.005154	155.5	
189-12	0.003522	0.002542	1.793	5.09E004	0.005464	155.1	
189-13	0.003755	0.00271	1.792	4.771E004	0.00584	155.5	
189-14	0.004314	0.003113	1.789	4.148E004	0.00674	156.3	
189-15	0.00458	0.003305	1.788	3.904E004	0.007196	156.5	
189-16	0.005144	0.003712	1.786	3.471E004	0.008071	156.9	
189-17	0.005411	0.003905	1.784	3.298E004	0.008484	156.8	
189-18	0.005708	0.00412	1.783	3.124E004	0.008944	156.7	
189-19	0.006006	0.004335	1.782	2.967E004	0.009405	156.6	
189-20	0.006096	0.004399	1.781	2.922E004	0.009544	156.6	
189-21	0.006304	0.004549	1.778	2.824E004	0.009994	158.5	
189-21x	0.006539	0.004719	1.779	2.721E004	0.0105	160.6	
387-a	1.818	1.312	0.001553	0.08547	0.001114	0.06131	
387-1	1.817	1.312	0.001901	0.1046	0.001711	0.09417	
387-2	1.817	1.311	0.00208	0.1144	0.001987	0.1094	
387-3	1.817	1.311	0.00232	0.1277	0.002342	0.1289	
387-4	1.817	1.311	0.002656	0.1462	0.002862	0.1575	
387-5	1.817	1.311	0.003056	0.1682	0.003477	0.1914	

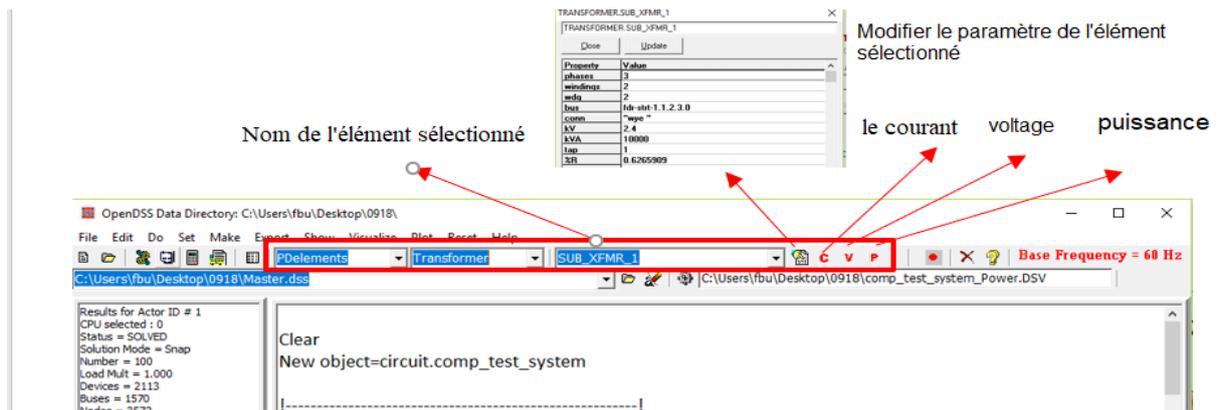
- **Visualize** : fournit une sortie graphique du dispositif sélectionné via le sélecteur d'éléments.



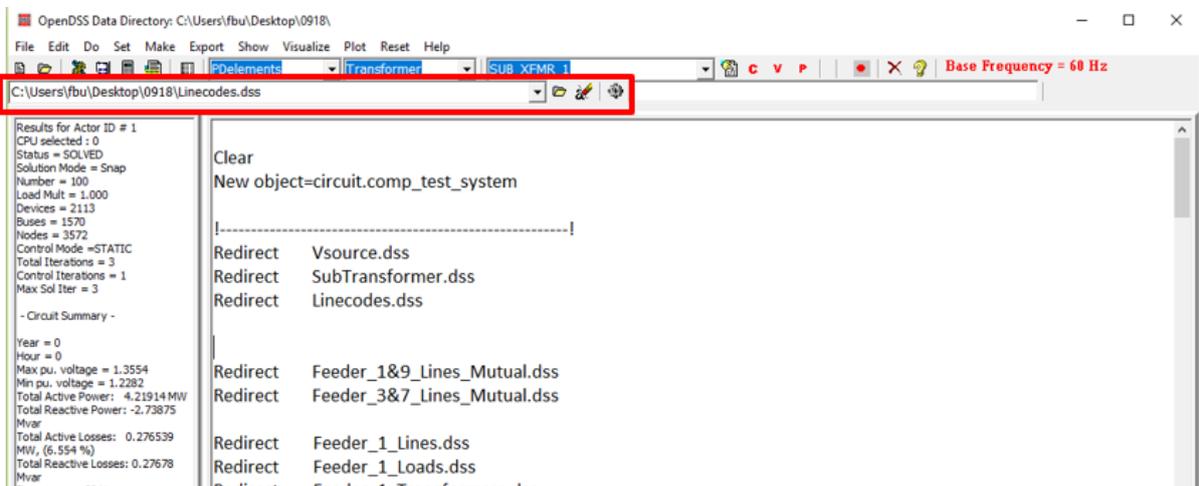
- **Plot** : fournit une sortie graphique pertinente pour l'ensemble du système



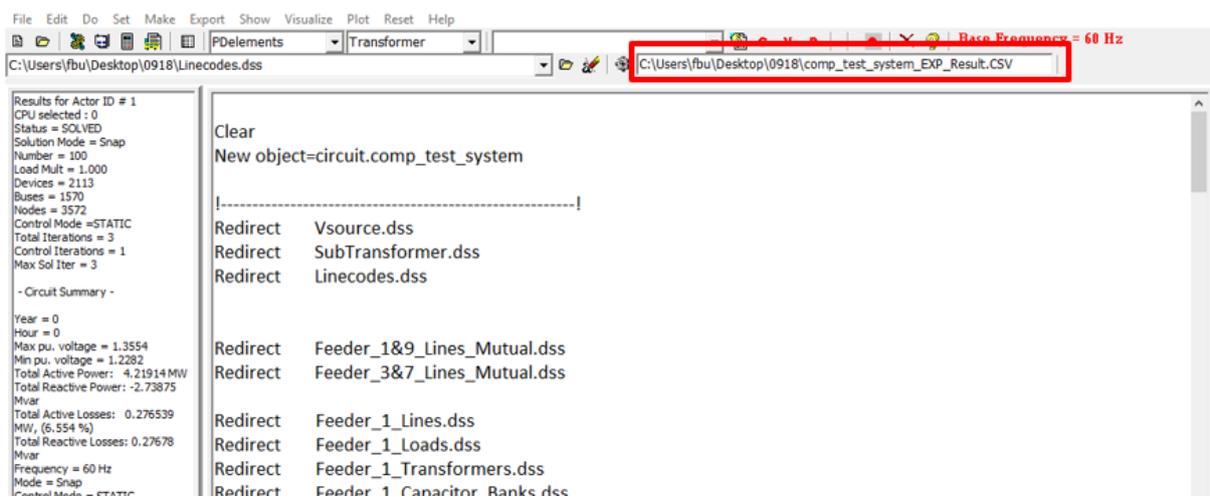
- **Outils d'Elément** : permettent à l'utilisateur de sélectionner l'élément du circuit (par type) à modifier ou à afficher les visualisations.



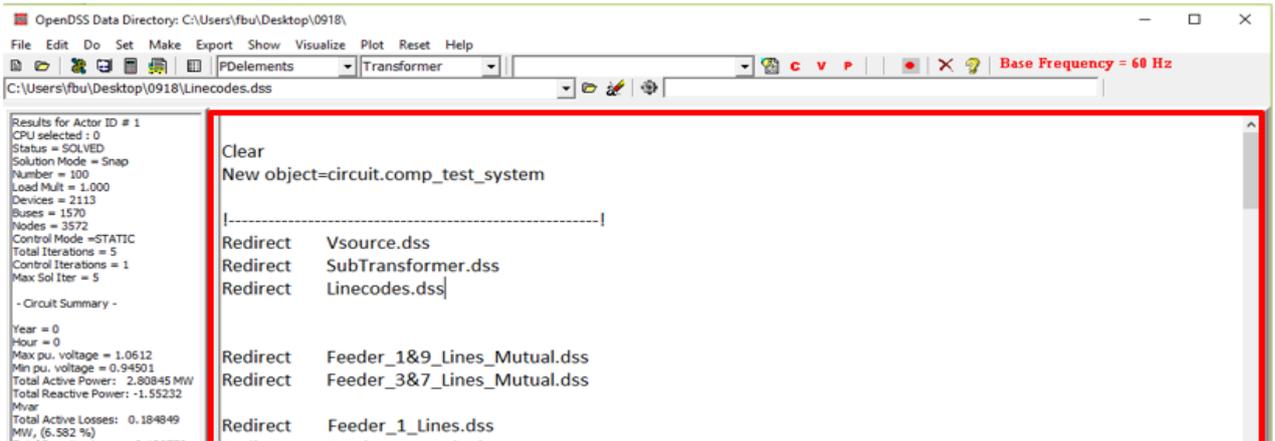
- **Outils pour les scripts** : permet de sélectionner le script à exécuter parmi les scripts actuellement ouverts.



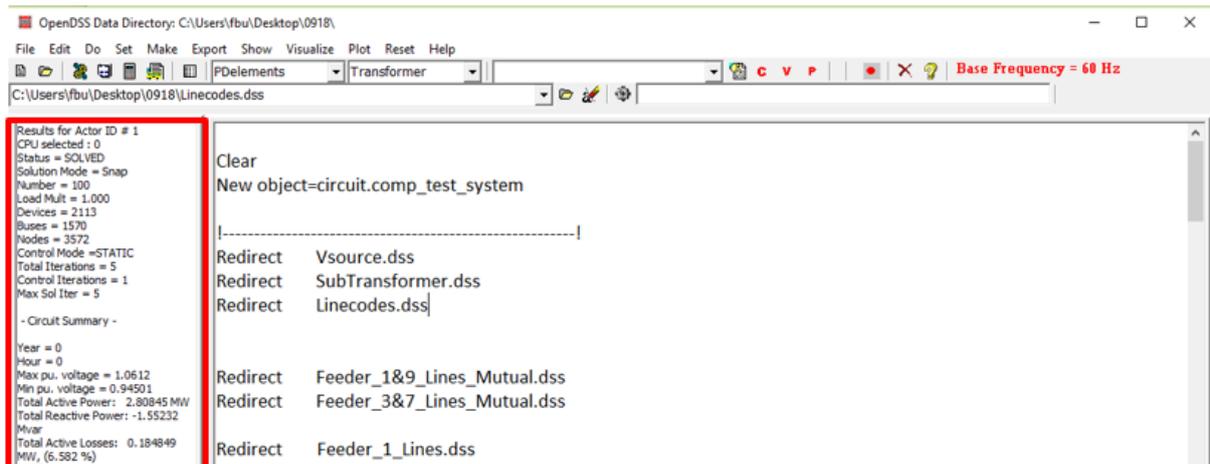
- **Barre des résultats** : fournit une version condensée des résultats.



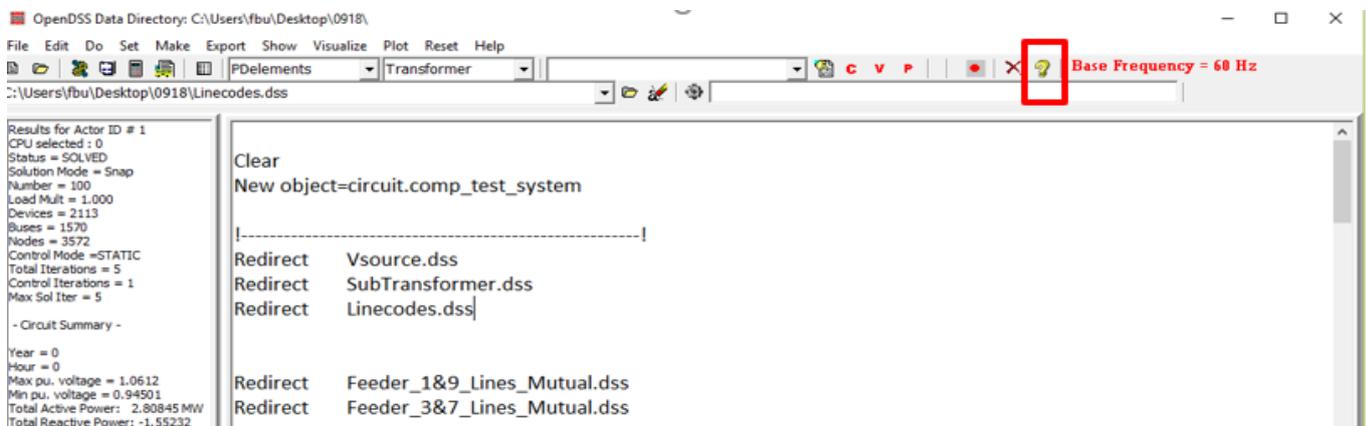
- **Script Windows** : nous permettent de modifier directement divers fichiers *.dss.

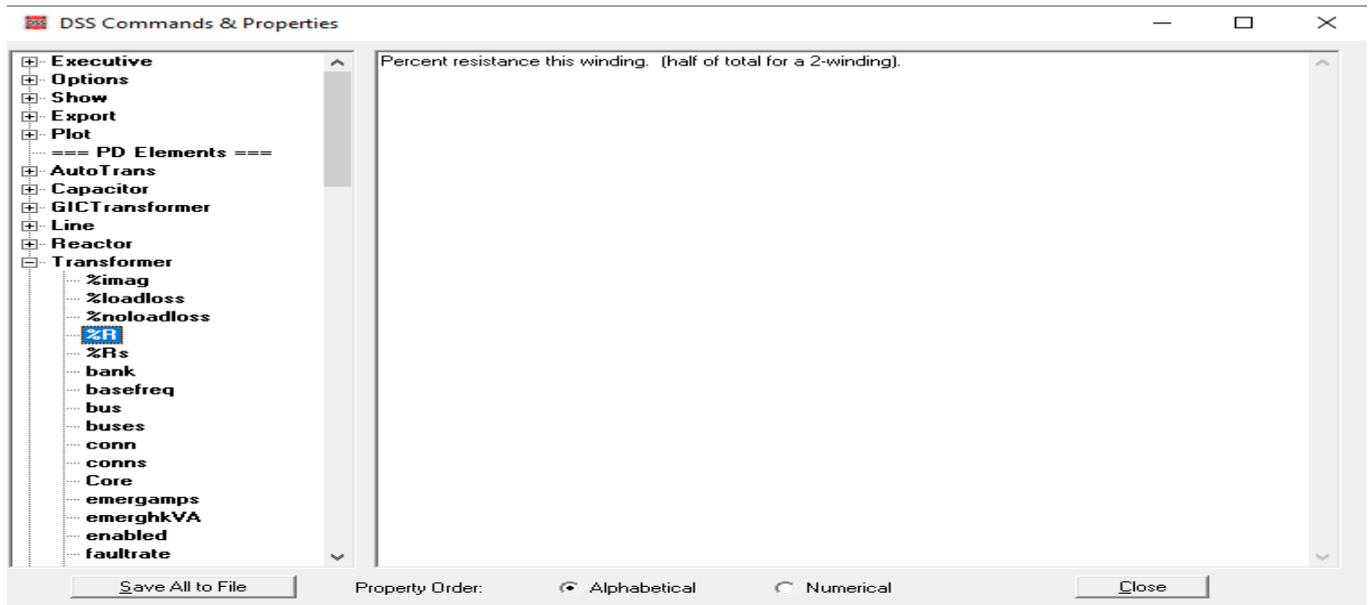


- **Fenêtre de résumé** : nous fournit le bref résumé des solutions.



- **Help Button** : fait apparaître la référence des commandes et des propriétés des éléments d'OpenDSS, qui fournit un guide arborescent des différentes commandes de script dans OpenDSS.[30]





III.4 Déclaration des composants du réseau électrique dans

OPENDSS :

III.4.1 Les lignes :

Les modèles de lignes équivalentes nécessitent trois fichiers, à savoir la définition de la ligne, la géométrie de la ligne/le code de la ligne et les données du fil. Le format de la définition de ligne dans OpenDSS est décrit comme suit :

New Line. bus1=.2.4 bus2=.2.4 length=586.923 units=ft geometry=geom4 (or line code=code4)

III.4.2 Géométries des lignes :

La géométrie de ligne est la classe d'objets utilisée pour spécifier la position des conducteurs, le type de conducteurs et les paramètres de réduction Kron

Propriété	Description
Nconds	Nombre de conducteurs dans la géométrie
Nphases	Nombre de phases. Tous les autres conducteurs sont considérés comme neutres et déphasés.
Cond	Ce numéro identifie chaque conducteur de la géométrie.
Wire	Désigne le type de fil utilisé et renvoie à la classe de données sur les fils.

X,H	Coordonnée X et hauteur du conducteur en {mi kft km m Ft in cm}.
Reduce	Oui/Non. Réduisez les neutres en utilisant la formule de réduction Kron.
Normamps	Intensité normale, ampères.
Emergamps	Intensité d'urgence, ampères

Tableau 6: Propriétés de la géométrie de la ligne

Le format de la géométrie des lignes dans OpenDSS est décrit comme suit :

**New LineGeometry.geom4 nconds=2 nphases=1 cond=1 wire=4_CU_65 x=3.67001
h=35.2999 units=ft cond=2 wire=4_CU_65 x=3.67001 h=29.4 units=ft reduce=y**

III.4.3 Line Code :

Propriété	Description
R1	Résistance de séquence positive en ohms par unité de longueur.
R0	Résistance homopolaire en ohms par unité de longueur.
X1	Réactance en séquence positive en ohms par unité de longueur.
X0	Réactance homopolaire en ohms par unité de longueur
C1	Capacité en séquence positive en nano-farads par unité de longueur
C0	Capacité zéro-séquence en nano-farads par unité de longueur.
Base Freq	Fréquence de base à laquelle les valeurs d'impédance sont spécifiées.

Tableau 7 : Propriétés du code de ligne

Le format du code de ligne dans OpenDSS est décrit comme suit :

**New Linecode.code4 nphases=3 r1=0.3489 x1=0.426198 r0=0.588811 x0=1.29612
c1=10.4308823411236 c0=4.48501282215346 units=km baseFreq=60 normamps=310
emergamps=310**

III.4.4 Loads (Charges) :

Propriété	Description
Bus	Nom du bus auquel la charge est connectée
Phases	Nombre de phases de la charge.
KV	Tension de base de la charge en KV
KW/KVAR	KW et KVAR nominaux pour la charge.
Pf	Facteur de puissance nominal de la charge

KVA	Définition de la charge de base en KVA.
Model	Définit comment la charge va varier en fonction de la tension. Dans cette thèse, modèle 1 : charge normale charge de type courant avec P et Q constants
Conn	Connexion Wye/Delta pour la charge
Vminpu	Tension p.u. minimale pour laquelle le modèle est supposé s'appliquer. En dessous de cette valeur, on revient modèle à impédance constante
Vmaxpu	Tension p.u. maximale pour laquelle le modèle est supposé s'appliquer. Au-dessus de laquelle il modèle à impédance constante.
Xf KVA	KVA nominal du transformateur de service pour l'attribution des charges en fonction du KVA connectés au bus.
Allocation factor	Facteur d'allocation pour l'allocation des charges sur la base des Kva connectés au bus.
Class	Nombre entier qui sépare la charge selon une classe particulière
Status	Fixe ou variable, à modifier par des multiplicateurs
NumCust	Nombre de clients à desservir par cette charge.

Tableau 8 : Propriétés de la charge

Le format du modèle de charge distribué équivalent dans OpenDSS est décrit comme suit :

New Load. Phases=1 bus1=.2 class=1 Conn=wye kv=7.2 xfkva=10 allocationfactor=1 model=1 kva=2.037 pf=0.982 numcust=1

III.4.5 Source :

Propriété	Description
Bus	Le bus auquel la source est connectée.
Base KV	Base/ Ligne nominale KV
p.u.	Montant réel par unité à laquelle la source fonctionne
Angle	Angle de base, degrés de la première phase
Frequency	Fréquence de la source
Phases	Nombre de phases de la source
MVASC3/MVASC1	MVA de court-circuit triphasé et monophasé
R1	Résistance de séquence positive de la source en ohms
R0	Résistance homopolaire de la source en ohms

X1	Réactance en séquence positive de la source en ohms
X0	Réactance homopolaire de la source en ohms.

Tableau 9 : Propriétés de la source de tension

Le format de la source de tension dans OpenDSS est décrit comme suit :

**New Circuit. basekv=12.47 pu=1.045 angle=0 Bus1=130 R1=0.193 X1=1.79 R0=0.13
X0=1.582**

III.4.6 Régulateur/Transformateur:

Propriété	Description
Buses	Définition du bus auquel les enroulements sont connectés
Phases	Nombre de phases
Windings	Nombre d'enroulements
KVA	KVA de base
KV	Tension nominal de l'enroulement
Xhl	Pourcentage de réactance entre le haut et le bas de l'enroulement
Load loss	Pourcentage de perte de charge à la charge nominale.
Ppm	Parties par million pour la réactance anti-flottante à connecter de chaque borne à la terre
Vreg	Paramètres du régulateur de tension en volts pour l'enroulement à contrôler.
Ptatio	Rapport du transformateur de potentiel qui convertit la tension de l'enroulement contrôlé à la tension du régulateur
Ctprim	Valeur nominale du primaire du transformateur de courant en Ampères, pour convertir les ampères de ligne en ampères de commande
band	Largeur de bande en volts pour le bus contrôlé.
Conns	Connexions de ce bobinage Wye/Delta

Tableau 10 : Propriétés de régulateur

Le format du modèle de la banque régulatrice utilisé dans OpenDSS est décrit comme suit :

New Transformer. <trans name> phases=1 windings=2 buses=(<name>.1, <name>.1)

conns= (wye, wye) kvs= (7.2,7.2) kvas= (333,333) xhl=0.001 %loadloss=0.0001

**New regcontrol. <name> transformer=<trans_name> winding=2 vreg=124 ptratio=60
ctprim=400 band=2**

III.4.7 Banques de condensateurs:

Propriété	Description
Elément	L'élément du circuit, généralement une ligne ou un transformateur, auquel le PT et le CT de la commande du condensateur sont connectés.
Terminal	Numéro de la borne de l'élément de circuit auquel le Cap control est connecté
Type	Paramètres du type de contrôle pour le condensateur. {Courant tension kvar PF temps}.
ON setting	Valeur à laquelle le Cap control vise à mettre le condensateur sous tension.
OFF setting	Valeur à laquelle le Cap control vise à mettre le condensateur hors tension.
Enabled	Oui/Non Indique si l'élément est activé.
CT phase	Numéro de la phase surveillée pour le contrôle du courant
PT phase	Numéro de la phase surveillée pour le contrôle de la tension

Tableau 11 Propriétés des condensateurs

Le format du modèle de la batterie de condensateurs dans OpenDSS est décrit comme suit :

New Capacitor. <cap name> bus1=<name> kvar=900 kv=12.47 phases=3 conn=wye

**New capcontrol. <control name> Capacitor=<cap name> element=line. <name>
terminal=2 type=current Onsetting = 43 Offsetting= 33 enabled=yes ctpphase=2
ptphase=2 [30]**

III.5 Simulation d'un réseau électrique MT :

III.5.1 Réseau test à 33 nœuds :

Le réseau test à 33 nœuds est un réseau de distribution radial de tension 12.66 kV et de charge totale de 3715 kW et 2300 kvar. Sa configuration initiale est schématisée par la figure A.1. Il est constitué de 32 lignes et 5 liaisons de bouclage. Les lignes de 1 à 9 ont une capacité de transmission maximale de 400 A. Les lignes de 10 à 32 ont une capacité maximale de 200 A.

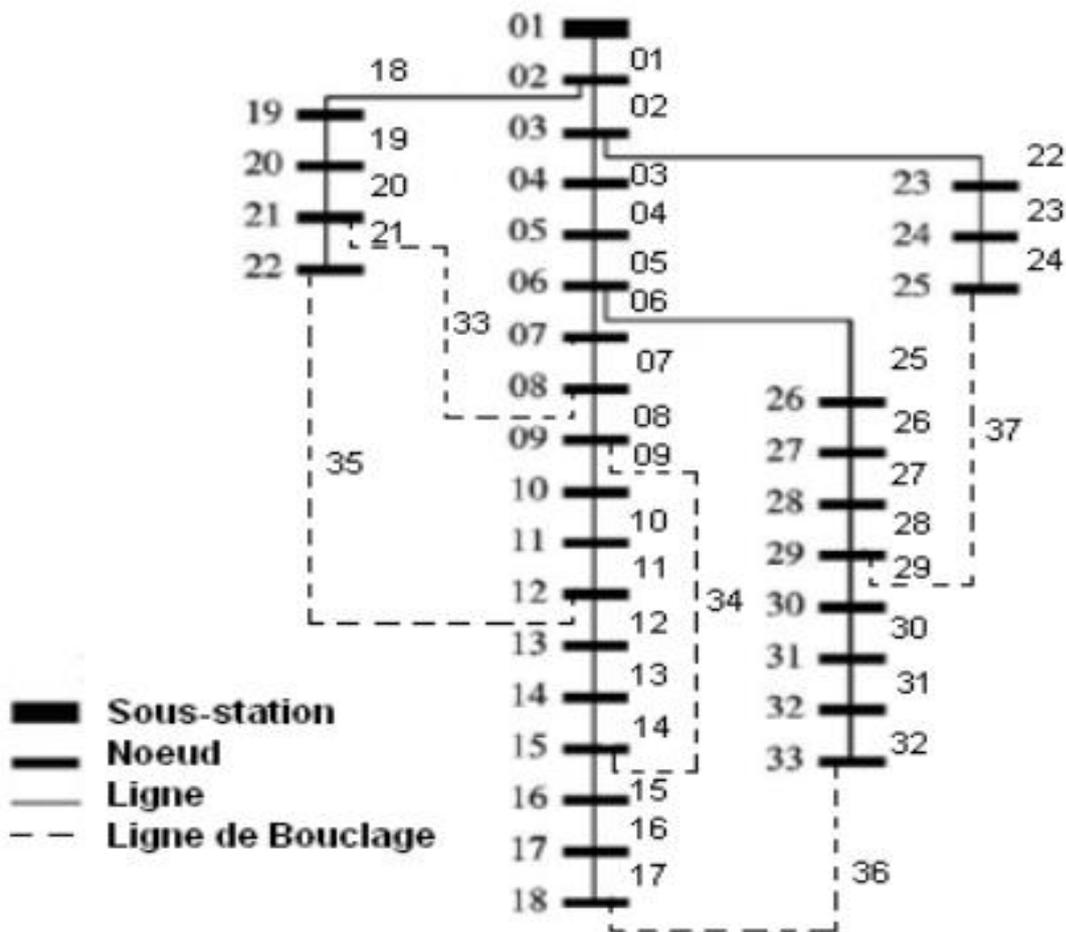


Figure 19: Schéma unifilaire du réseau test

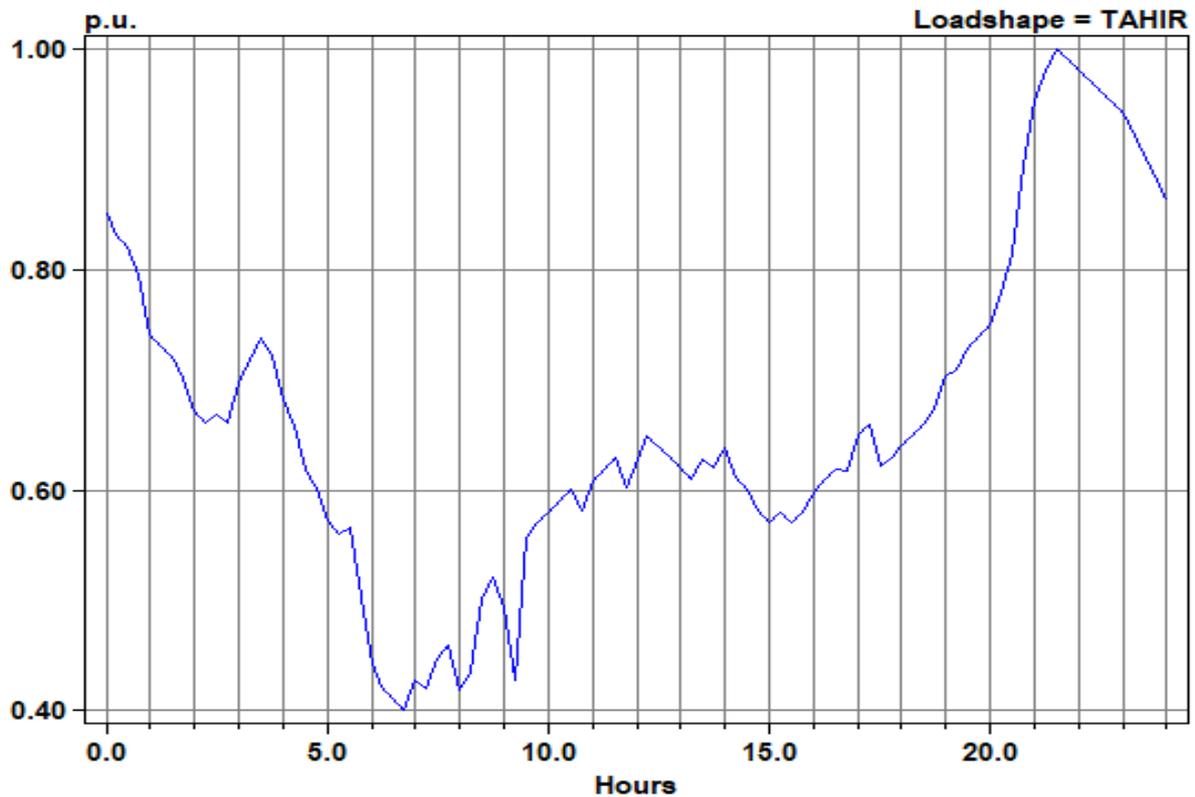


Figure 20: variation de la charge de réseau

- **Observation :**

On observe que la variation de la charge en 24 heures se divise en trois intervalles :

- [21h30 - 07h00] : la charge diminue progressivement jusqu'à la valeur minimale, on les appelle les heures creuses.

- [18h00-21h30] : la charge augmente progressivement jusqu'à la valeur maximale. On les appelle les heures de pointes.

- [07h00-18h00] : la charge est stable et moyenne.

III.5.2 Simulation du réseau électrique MT sans régulateur en charge :

- Pour le nœud 1 :

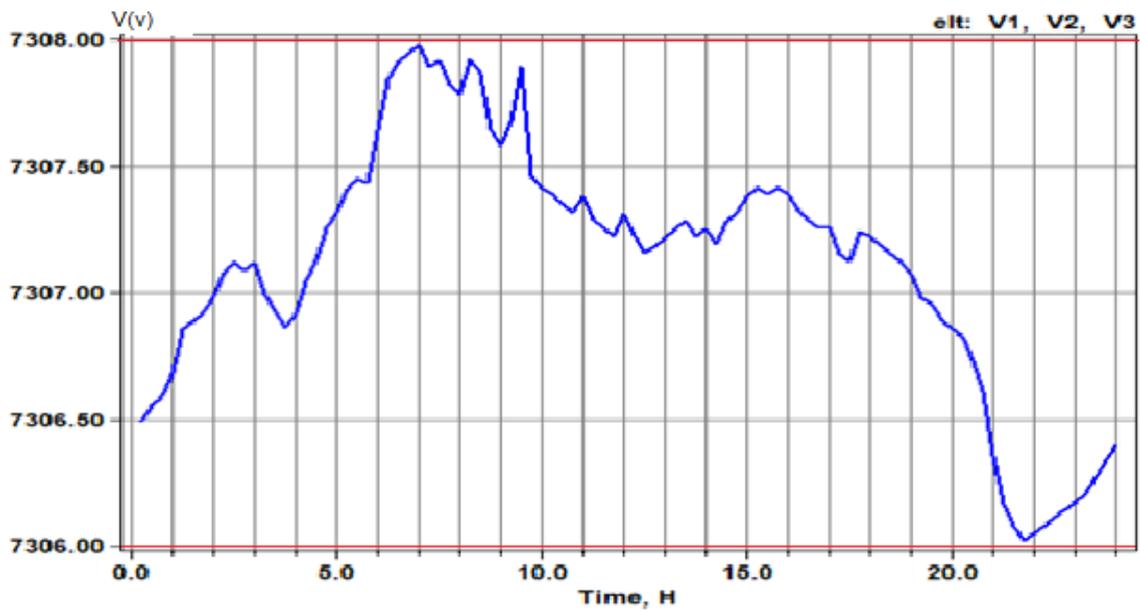


Figure 21: variation de tension (nœud 1)

$V_{max}=7307.86 \text{ v}$

$V_{min}=7305.71 \text{ v}$

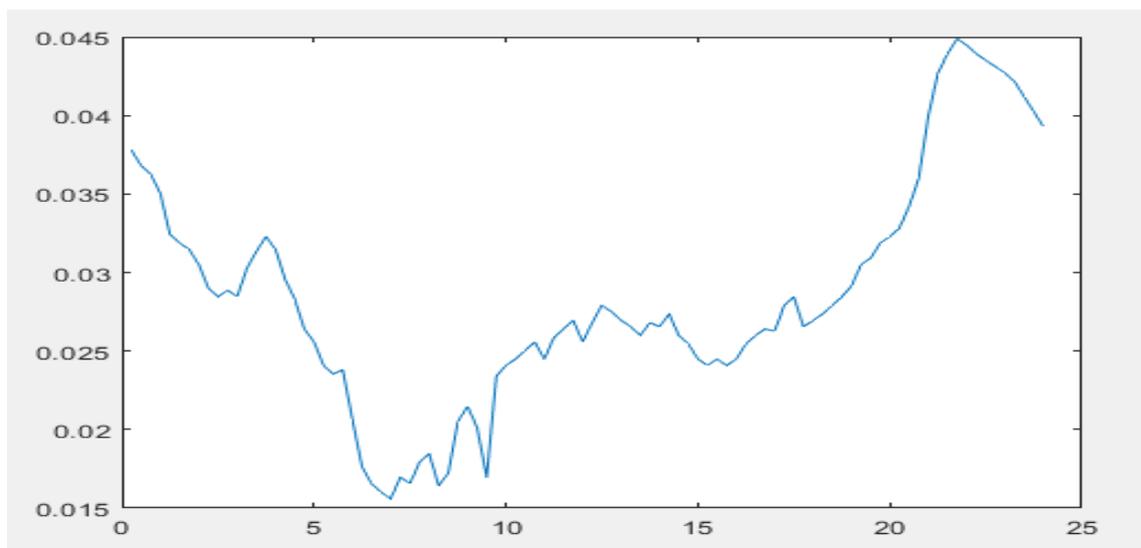


Figure 22: chute de tension (nœud 1)

- Pour le nœud 22 :

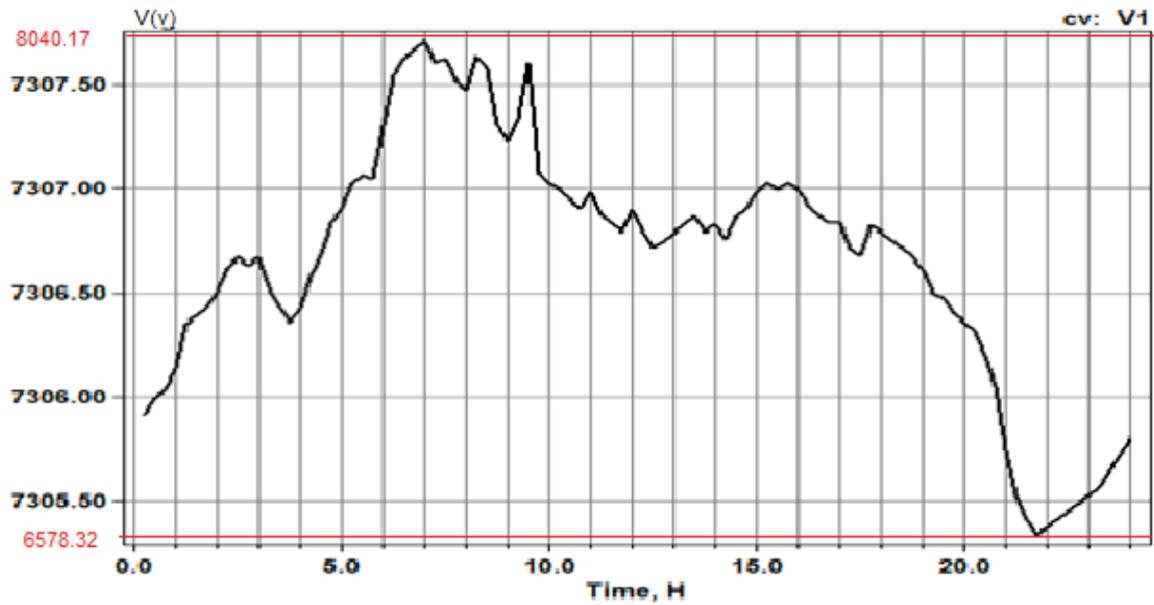


Figure 23: variation de tension (nœud 22)

$V_{max}=7307.7 \text{ v}$

$V_{min}=7305.34 \text{ v}$

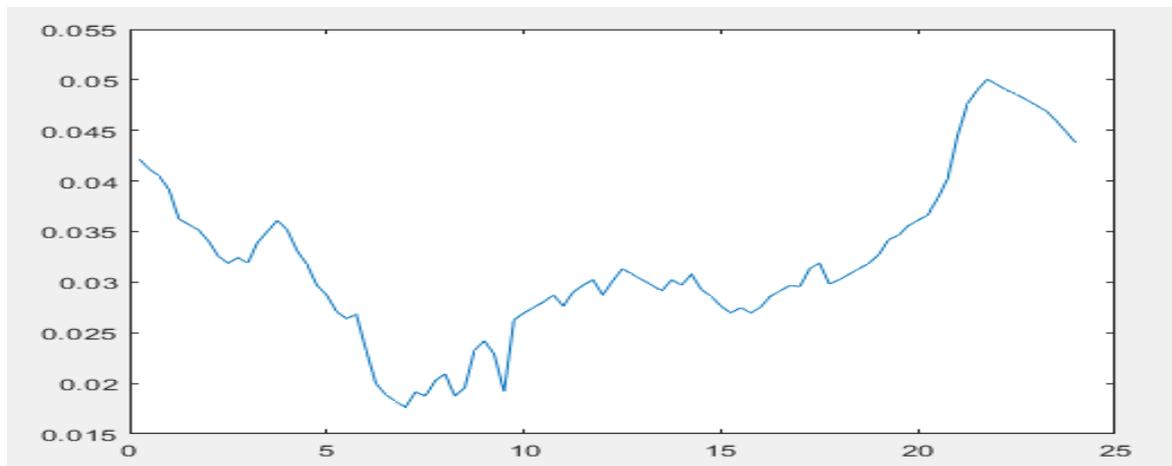


Figure 24: chute de tension(nœud 22)

- **Commentaire :**

Les graphes des nœuds 1 et 22 présentent la variation des tensions (V) et la chute de tension (%) par rapport au temps (24h)

On remarque que la variation de la charge semblait inversement proportionnelle avec la tension des nœuds et directement proportionnelle avec la chute de tension c.-à-d. si la charge augmente la tension diminue et la chute de tension augmente et vice versa.

- **Remarque :**

Les valeurs de tension affichées dans les graphes est la tension simple

$$V_s = \frac{12660}{\sqrt{3}} = 7309,25 \text{ v}$$

- **Pour le nœud 18 :**

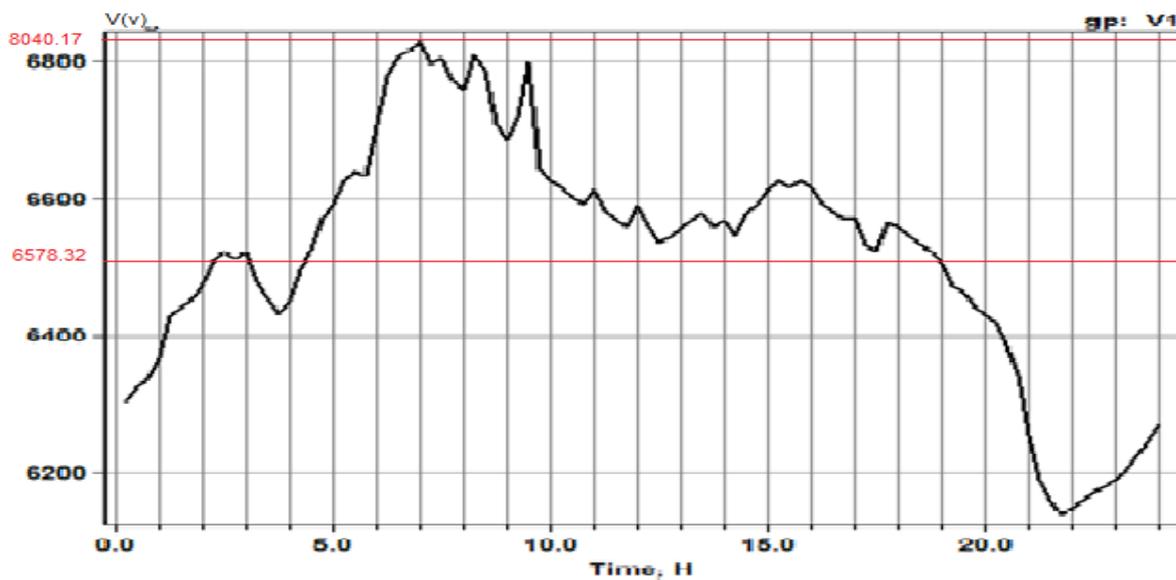


Figure 25: variation de tension (nœud 18)

$V_{max} = 6829.63 \text{ v}$

$V_{min} = 6136.43 \text{ v}$

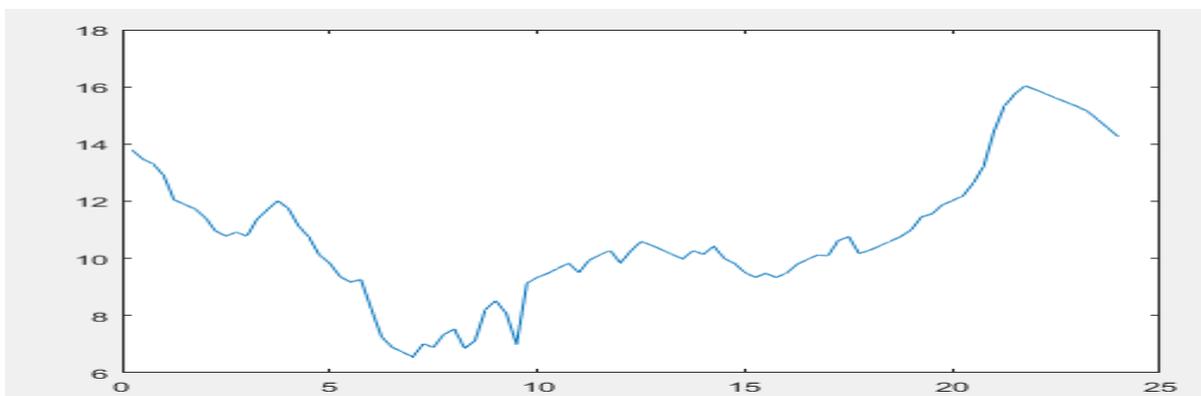


Figure 26: chute de tension (nœud 18)

- Pour le nœud 25 :

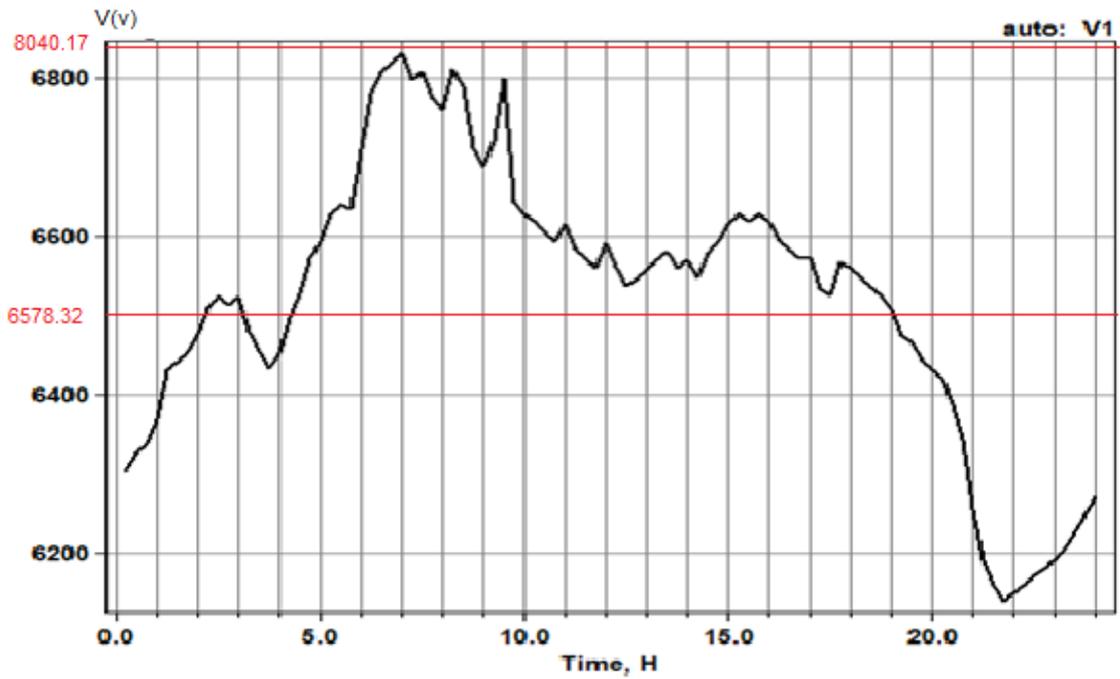


Figure 27: variation de tension (nœud 25)

$V_{max}=6831.06 \text{ v}$

$V_{min}=6139.62 \text{ v}$

nœud

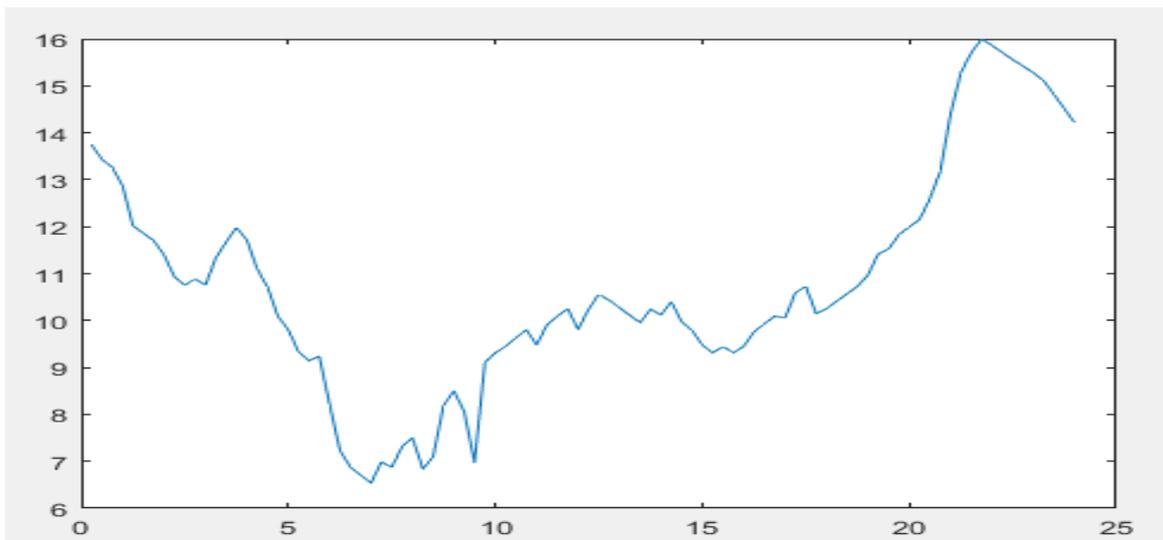


Figure 28: : chute de tension (noeud 25)

- Pour le nœud 33 :

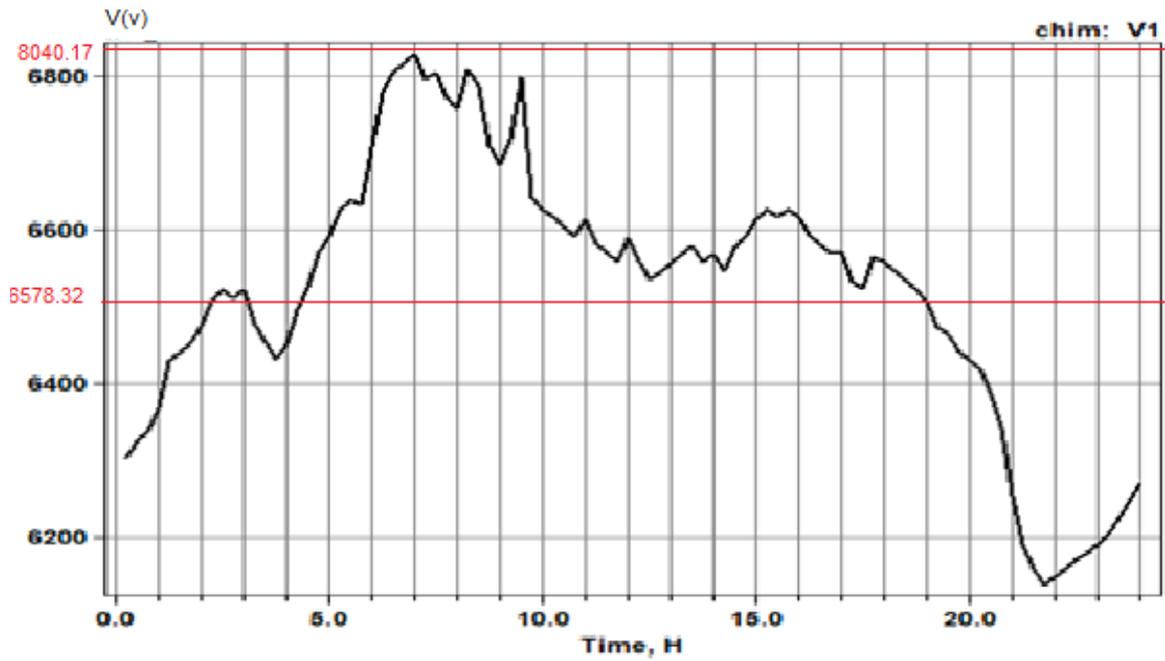


Figure 29: variation de tension (nœud 33)

$V_{max}=6830.28 \text{ v}$

$V_{min}=6137.89 \text{ v}$

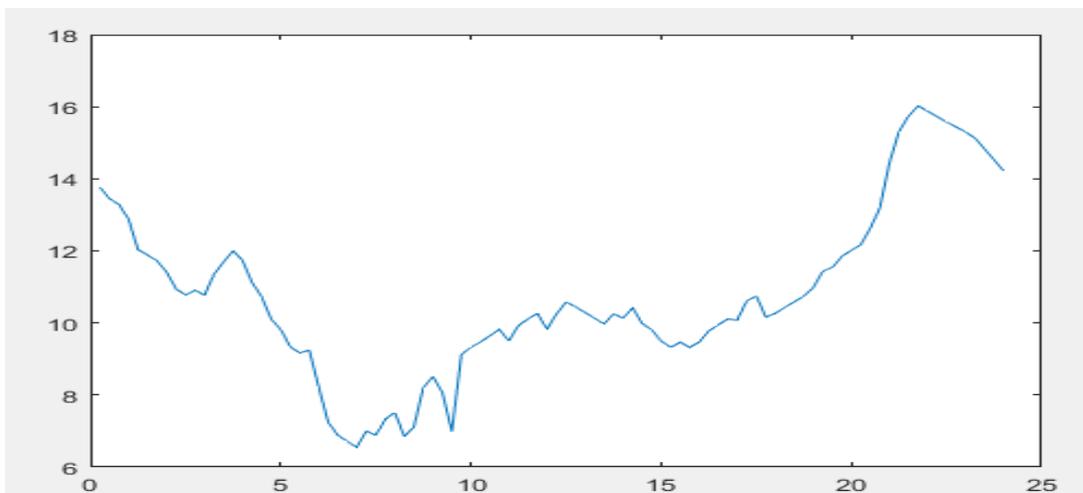


Figure 30: : chute de tension (nœud 33)

- **Commentaire :**

On remarque qu'il y a une chute de tension dans les nœuds 18 et 25 et 33 a cause de deux facteurs :

-la distance des noeuds par rapport à la source. De sorte que plus nous nous éloignons de la source, plus la valeur de tension est basse, et vice versa.

-le nombre des consommateurs par chaque nœud (la charge).

III.5.3 Simulation d'un réseau électrique MT avec régulateur en charge :

- Pour le noeud1 :

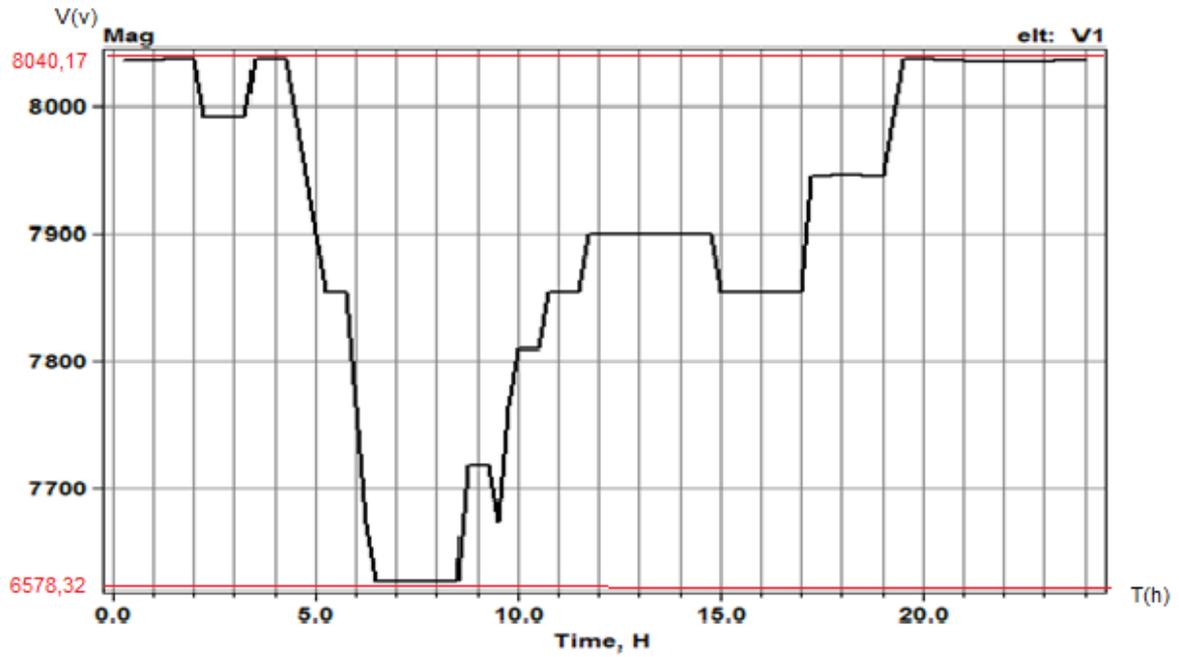


Figure 31: variation de tension avec régulateur (noeud 1)

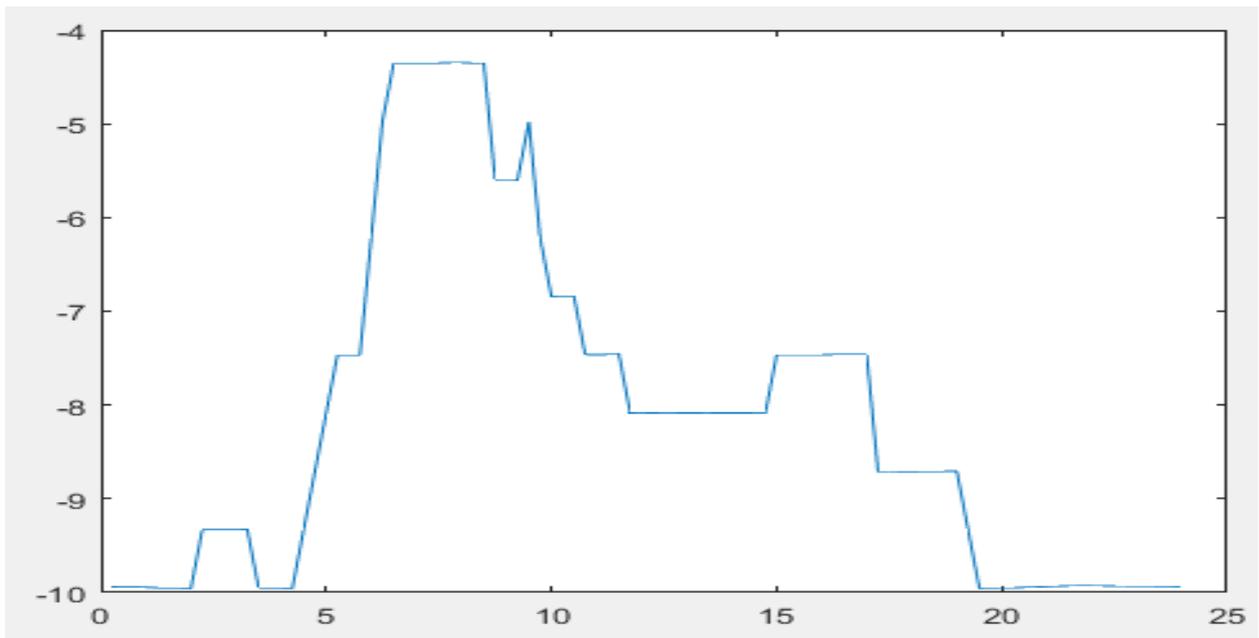


Figure 32: : chute de tension avec régulateur (noeud 1)

- Pour le nœud 22 :

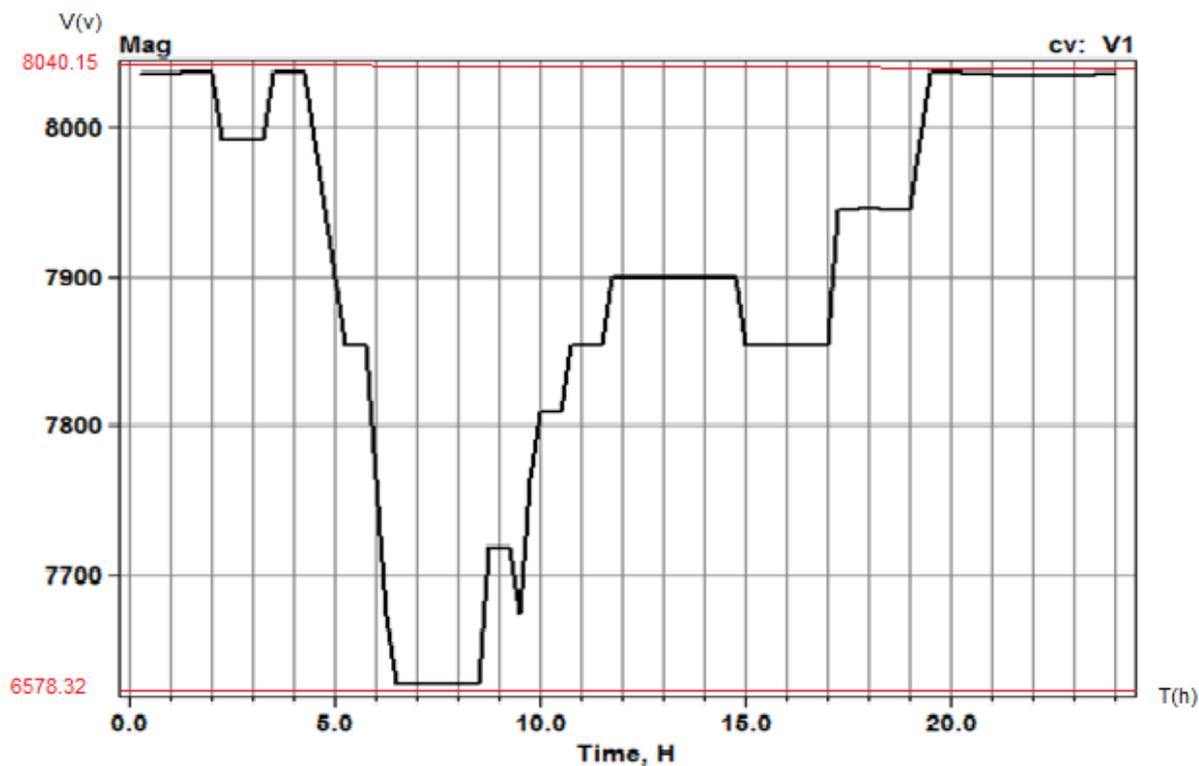


Figure 33: variation de tension avec régleur (nœud 22)

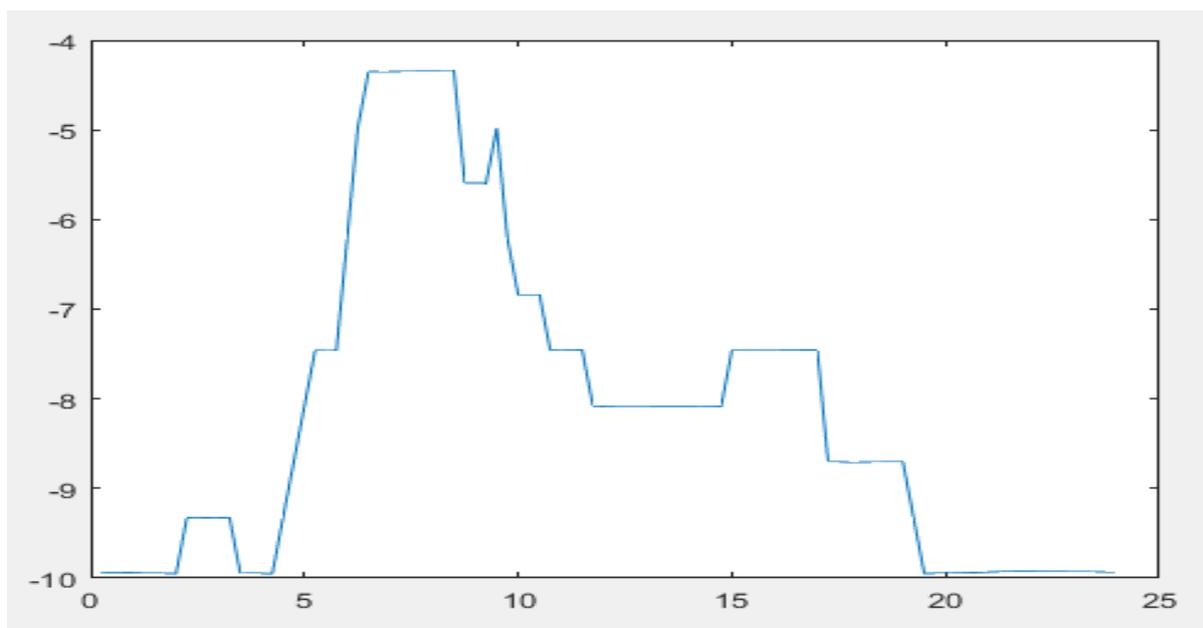


Figure 34: chute de tension avec régleur (nœud 22)

- Pour le nœud 18:

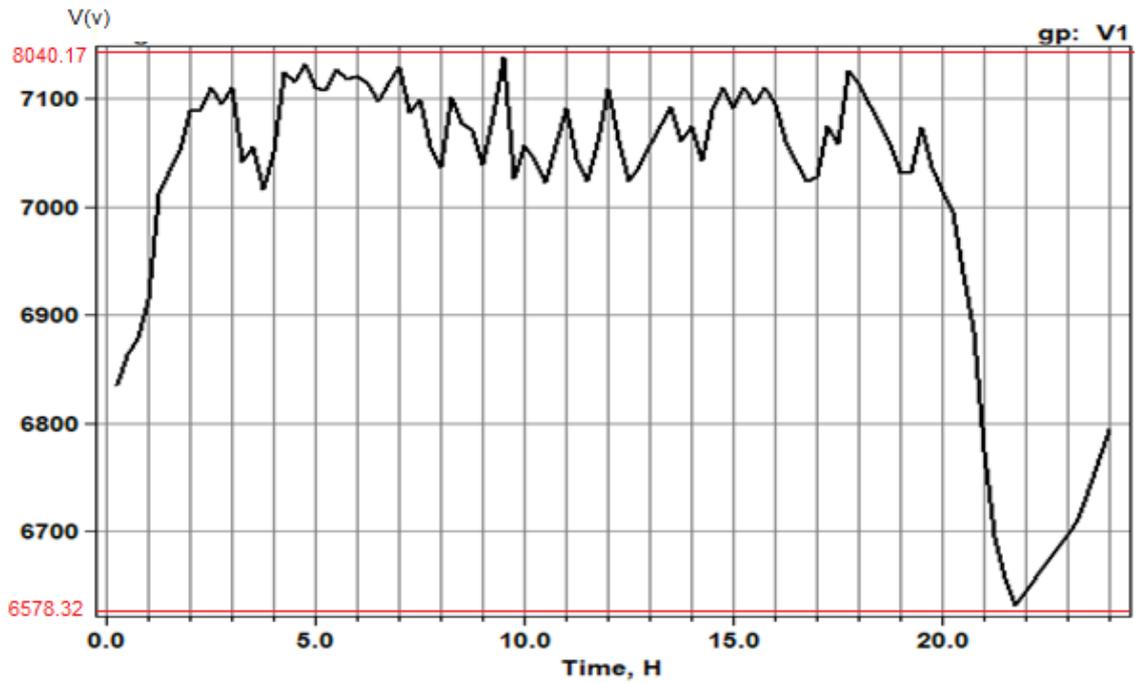


Figure 35: variation de tension avec régleur (nœud 18)

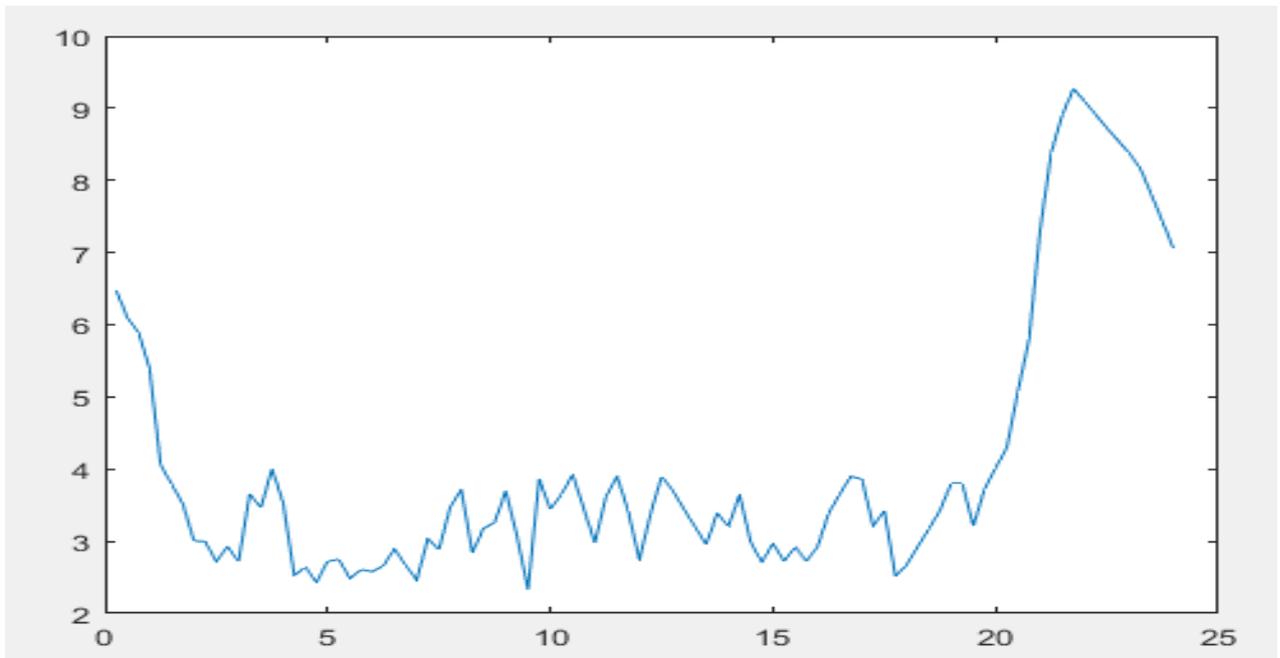


Figure 36: chute de tension avec régleur (nœud 18)

- Pour le nœud 25 :

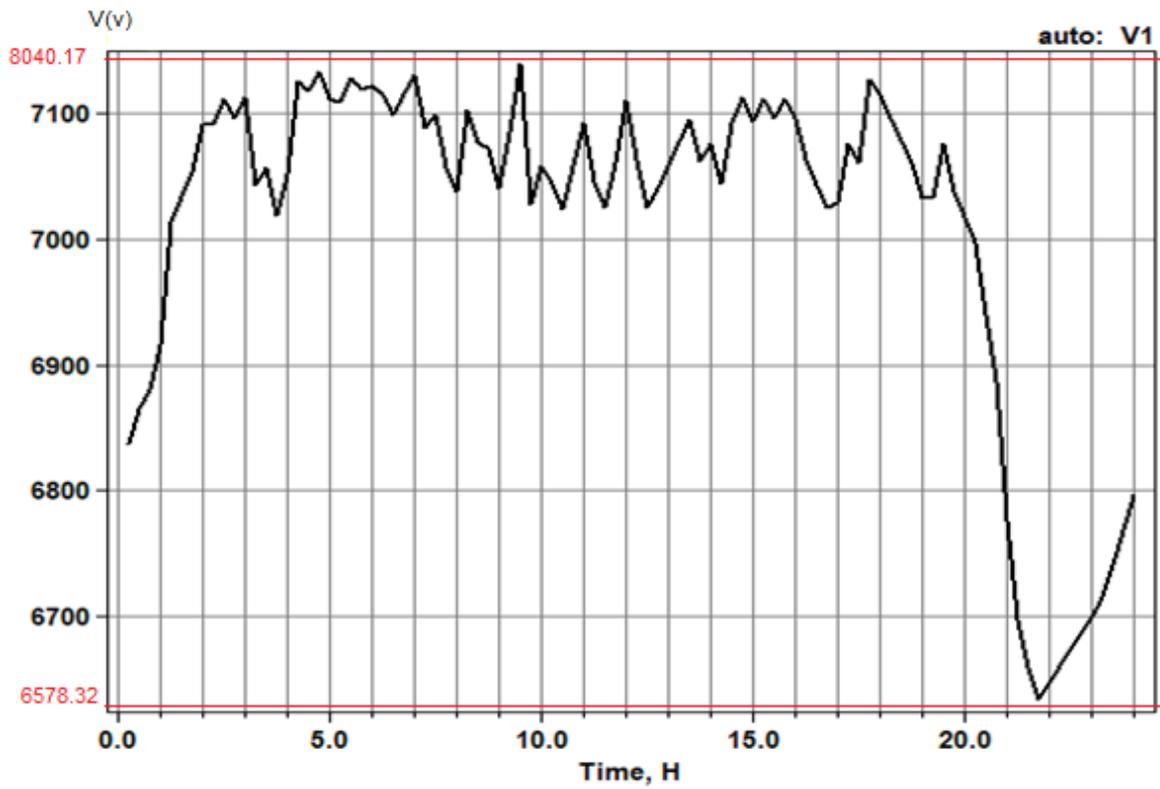


Figure 37: variation de tension avec régleur (nœud 25)

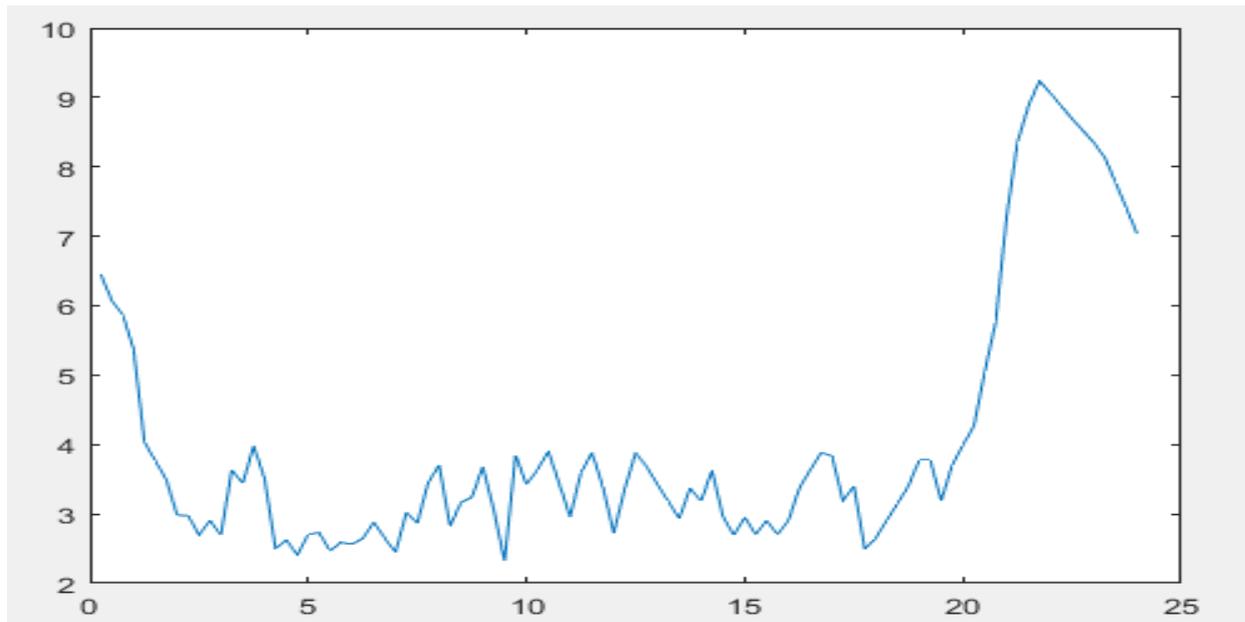


Figure 38: chute de tension avec régleur (nœud 25)

- Pour le nœud 33:

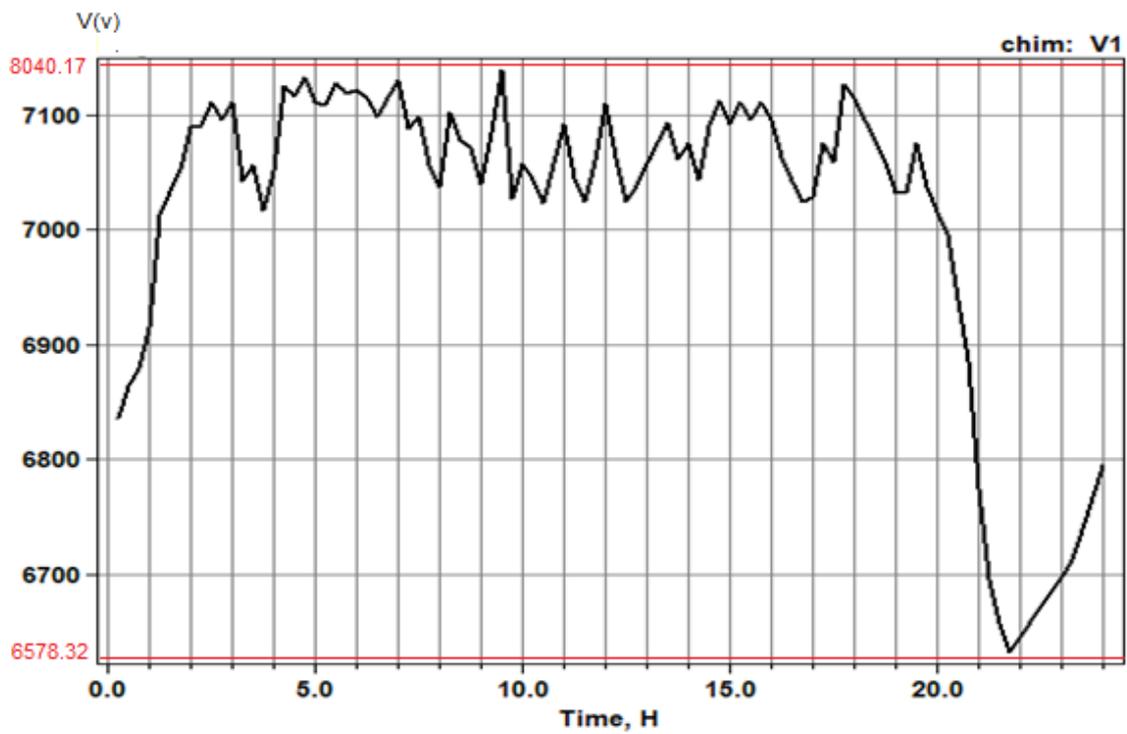


Figure 39: variation de tension avec régleur (nœud 33)

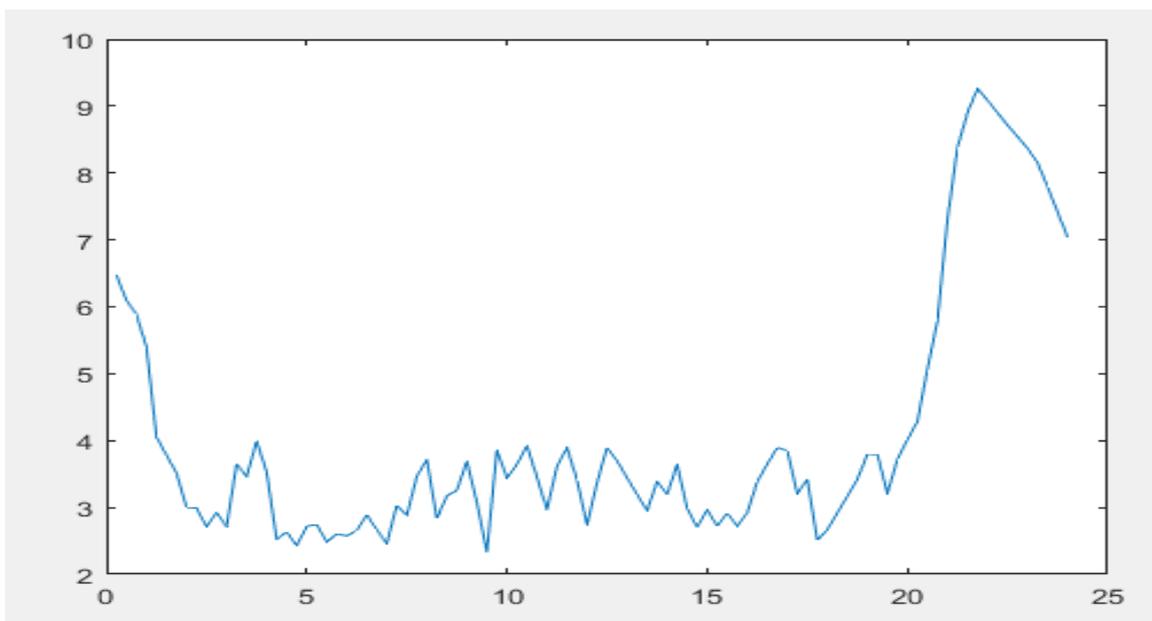


Figure 40: chute de tension avec régleur (nœud 33)

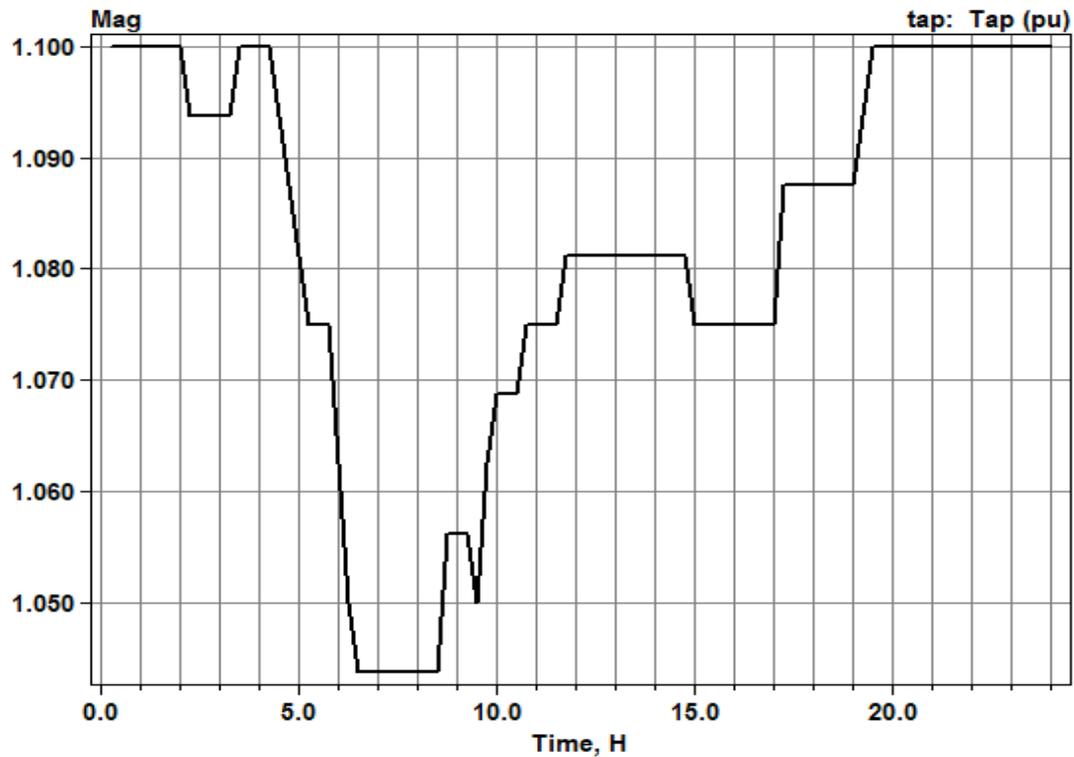


Figure 41: position du régleur en charge.

- **Commentaire :**

On remarque que la chute de tension a disparue du réseau Lorsque le régleur en charge à fonctionnait ce qui a provoqué l'augmentation de la tension.

- **Remarque :**

$$V_s (+10\%) = 7309,25 \times 1,1 = 8040,17v$$

$$V_s (-10\%) = 7309,25 \times 0,9 = 6578,32v$$

III.6 Conclusion :

En guise de conclusion de ce chapitre on a fait une simulation du réseau électrique sans régleur en charge et avec le régleur,

-résultats sans régleur : en remarque l'existence de la chute de tension.

-résultats avec régleur : la chute de tension a disparue du réseau.

L'objectif du changeur de prise dans notre cas est de gardé la tension au secondaire à 7.3 KV, et pour cela on a fait une étude sur ce dernier qui nous a permis de connaitre son fonctionnement.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution au problème de contrôle des chutes de tensions dans un réseau électrique. Qui généralement provoquée par la distance des nœuds par rapport à la source et le nombre des consommateurs par chaque nœud (la charge).

L'approche proposée s'est concentrée en particulier sur la présentation de l'appareil (régleur en charge) exploités sur le réseau afin d'éliminer du mieux que possible les facteurs responsables des perturbations sur le réseau.

Après avoir simulé par le logiciel de simulation OPENDSS, le changeur de prise dans notre cas à garder la tension au secondaire près de 7.3 KV. Nous avons conclu que l'utilisation de régleur en charge dans le réseau électrique est indispensable.

Les références :

- [1] FERAHTIA Saàd « Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS » Mémoire de Fin d'étude 2012 / 2013.
- [2] https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2018/01/Polycopie-R%C3%A9seaux-Electriques_corr-1.pdf
- [3] Egor GLADKIKH. « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » Thèse Doctorat. 2006
- [4]-[Conce01a.PDF - Guide de conception reseaux Schneider top.pdf](#)
- [5]http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_ge-reseaux_transport.pdf
- [5]P.S.R.Murty. "Power System Analysis", BS Publications 2007
- [6]TEGANI Ilyes et DAHMANE Abdeslam, «Optimisation multi objectif à base des algorithmes génétiques appliquée sur un réseau électrique» ,mémoire de Master ,Université de Biskra ,Algérie ,Juin 2011
- [7] Machowski J., Bialek J.W. and Bumby J.R., Power system dynamics and stability, West Sussex, London, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [8]Bornard P., Pavard M. et Testud G., Réseaux d'Interconnexion et de Transport : Réglages et Stabilité, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D4-092, 2005.
- [9]: ALLAOUA Boumediene, Répartition Optimale des Puissances Actives d'un Réseau Electrique IEEE-57 nœuds par algorithme de Colonie de Fourmis, mémoire de magister, Université de Bechar, 2009.
- [10] MENASRIA Amel : Etude comparative de la répartition optimale des puissances d'un réseau d'énergie électrique

- [11] G. Abdelmalek, « Utilisation des méthodes d'optimisations méta heuristiques pour La résolution du Problème de répartition optimale de La Puissance dans les réseaux électriques », mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2010
- [12] https://telum.umc.edu.dz/pluginfile.php/165618/mod_resource/content/0/Chapitre%202%20ecoulement%20de%20puissance.pdf
- [13] <https://docplayer.fr/201798017-Methode-d-analyse-des-reseaux-electriques-les-unites-normalisees-pu.html>
- [14] <http://bib.univoeb.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/7585/1/R%C3%89PARTITION%20DE%20CHARGES%20DANS%20les%20reseaux%20electrique.pdf>
- [15] <https://illustrationprize.com/fr/550-gauss-seidel-method.html>
- [16] 30452506.pdf
- [17] documentation technique au niveau d'usine ce vital (poste haute tension)
- [18] Bernard hochard « le transformateur de puissance » 2eme édition ,1982
- [19] https://www.tsv-transfo.com/fr/fonction-transformateur-electrique/reparation_maintenance-changeurs-de-prises-en-charge/
- [20] <https://uk.megger.com/applications/transformers/tap-changers>
- [21] [REGLEURS%20EN%20CHARGE/4360596_03fr%20\(2\).pdf](http://www.hmoltc.com/Private/Files/4360596_03fr%20(2).pdf)
- [22] <http://www.hmoltc.com/Private/Files/2822418664b8d08163f3.pdf>
- [23] [TD_1800061_03_FR%20\(4\).pdf](http://www.hmoltc.com/Private/Files/TD_1800061_03_FR%20(4).pdf)
- [24] <https://crushtymks.com/fr/energy-and-power/621-4-essential-features-of-transformer-on-load-tap-changer-oltc.html>
- [25] <https://www.eeslab.itu.edu.tr/pages/oltc.html>
- [26] <http://www.hmoltc.com/Private/Files/2755561ad0b40325ce27.pdf>
- [27] <https://crushtymks.com/fr/transformers/1547-voltage-regulation-by-transformer-off-load-tap-changer-on-load-tap-changer-and-avr.html>

[28] 1889046_04en%20(1).pdf

[29] 4434052_01en.pdf

[30] F0126405_PB_OLTCs%20(2).pdf

