

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والكهرو تقني
Département d'automatique & électrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines électriques

Présenté par

BENZIANE DHIA EDDINE

&

BOUDJELLA ABDERREZAK

Analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électriques

Encadré par : Dr. KHERFANE Naas

Année Universitaire 2021-2022

Dédicace

➤ *Benziane Dhia Eddine :*

Je dédie ce travail à Ma mère et mon père pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

À mes frères, mes grands-parents et ceux qu'ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès.

➤ *Boudjella Abderrezak :*

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de ma période d'études.

Mes chers petits frères pour leur soutien et leurs encouragements.

Mes chers oncles, surtout mes oncles Omar, Mahfoud et Mustapha qui m'ont soutenu de toutes les manières.

Mes tantes et les femmes de mes oncles qui m'ont beaucoup encouragé tout au long de mon parcours scolaire.

Tous mes professeurs et amis dans le secteur du génie électrique qui m'ont aidé depuis que j'ai rejoint l'université.

Je ne pourrai jamais oublier mes amis d'enfance et mes amis actuels.

J'espère que toutes ces personnes et tous ceux qui ont l'occasion de le lire apprécieront ce projet. J'espère que ça leur plaira

Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la force d'accomplir ce projet fin étude et de le mener jusqu'au bout.

Nos remerciements s'adressent d'abord :

À notre encadreur Dr. KHERFANE Naas qui nous a aidés à élaborer ce travail, pour ses conseils avisés, pour ses précieuses remarques sur notre travail et pour toute l'assistance.

Notre témoignage et gratitude sont adressés aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements particuliers vont également à M. BELAZZOUG, enseignant au département d'Automatique et d'électrotechnique à l'université de Blida 1, pour ses conseils, ainsi qu'à M. Mohamed Hussein, ingénieur chez Sonelgaz, qui nous a beaucoup aidé, nous voudrions remercier Mme Bedrani Imane, enseignante de courant faible à l'Institut de formation en électricité et gaz (IFEG), qui a suggéré que nous travaillions sur le logiciel "DigSilent Power factory", c'est un logiciel qui nous a beaucoup aidé dans cette étude.

Nos remerciements sont aussi adressés à tous les enseignants ayant contribué à notre formation de graduation et de poste graduation ainsi qu'à nos camarades avec lesquels nous avons eu l'honneur et le plaisir de partager cette formation.

Nous remercions également tous nos professeurs et le personnel administratif qui nous ont accompagnés au cours des dernières années académiques, et qui nous ont tous aidés et soutenus, de près ou de loin, nous n'oublions jamais de remercier toutes nos familles, surtout nos parents, sans leurs soutiens nous n'aurions pas été ici aujourd'hui.

Nous ne saurons finir sans rendre hommage à toutes ces magnifiques amitiés qui entourent notre existence. Un grand merci à tous nos amis dont la présence, le soutien les échanges et le plaisir partagé nous rendent meilleurs.

Résumé :

L'étude de la stabilité constitue l'un des plus fondamentaux concepts lors de l'étude des systèmes électriques. Parce que l'utilisation de ces derniers dans leurs limites peut entraîner leurs instabilités en cas de perturbation. On a porté plus d'intérêt à la machine synchrone puisqu'elle joue un rôle primordial dans l'analyse de la stabilité transitoire.

Ce travail présente l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire et l'influence de la résistance statorique et la constante d'inertie dans leur amélioration (amélioration traditionnelle) durant un défaut : Court-circuit triphasé.

Les résultats obtenus à l'aide de logiciel « DigSilent power factory » à travers les différentes simulations réalisées prouvent en général la validité de l'étude de la stabilité des réseaux électriques et de leur amélioration en termes de temps critique d'élimination des défauts.

Mots Clés : Stabilité Transitoire, réseau électrique, Amélioration, TCID, constant d'inertie, résistance statorique.

Abstract:

The study of stability is one of the most fundamental concepts in the study of electrical systems because the use of the latter as close as possible to its limits can lead to its instability in case of disturbance.

The synchronous machine has been given more interest since it plays a primordial role in the analysis of the transient stability governed by the mechanical equation.

This work presents the study and analysis of the transient stability and the influence of the stator resistance and the constant of inertia in their improvement (traditional improvement) during a fault: Three-phase short circuit.

The results obtained with the software "DigSilent power factory" through the various simulations performed prove in general the validity of the study of the stability of electrical networks and their improvement in terms of critical time of elimination of faults.

Keywords: Transient stability, power system, improvement, TCID, constant of inertia, stator resistance.

الملخص:

تعتبر دراسة الثبات من أهم المفاهيم الأساسية في دراسة الأنظمة الكهربائية لأن استخدام الأخير في أقصى حدوده يمكن أن يؤدي إلى عدم استقراره في حالة حدوث اضطراب.

كان هناك اهتمام أكبر بالآلة المتزامنة لأنها تلعب دور أساسي في تحليل الاستقرار العابر الذي تحكمه المعادلة الميكانيكية. يقدم هذا العمل دراسة وتحليل الاستقرار العابر وتأثير مقاومة الجزء الثابت وثابت القصور الذاتي في تحسينها (التحسين التقليدي) أثناء حدوث خطأ: دائرة قصر ثلاثية الطور.

النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج "DigSilent power factory" من خلال عمليات المحاكاة المختلفة التي تم إجراؤها تثبت بشكل عام صحة دراسة استقرار الشبكات الكهربائية وتحسينها من حيث وقت التخلص من الأعطال الحرجة.

الكلمات المفتاحية: الاستقرار العابر، الشبكة الكهربائية، تحسين الاستقرار العابر، وقت إزالة الأخطاء الحرجة، ثابت القصور الذاتي، مقاومة الجزء الثابت.

Sommaire

TABLE DES MATIERS	N°
Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Tableaux des matières	IV
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
Liste des Abréviation	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE	
Section 01 : Notions Générales sur les réseaux électrique	4
1.1 Définition de réseau électrique	4
1.2 Le rôle des réseaux électriques	5
1.3 Types des réseaux électriques (production, transport et distribution)	6
1.3.1 Production d'énergie électrique	7
a) Les centrales hydrauliques	7
b) Les centrales thermiques	8
c) Les centrales nucléaires	8
1.3.2 Principaux parties d'un réseau électrique	8
1.3.2.1 Le transport et la répartition	9
1.3.2.1.1 Le transport et lignes d'interconnexion	9
1.3.2.1.2 La répartition	12
1.3.2.2 Distribution	12
1.3.2.3 Consommation	13
1.4 Topologies et structures des réseaux électriques	13
1.4.1 Les critères de choix d'une topologie	13
1.4.2 Différents structures topologiques des réseaux électriques	13
1.4.2.1 Réseau maillé	13
a) Avantages	14
b) Inconvénients	14
1.4.2.2 Réseau bouclé	14
a) Avantages	14
b) Inconvénients	15
1.4.2.3 Réseau radial	15
a) Avantages	15
b) Inconvénients	15
Section 02 : matériels, Qualité d'énergie, stabilité de réseau électrique	16

2.1	Matériels utilisés dans les réseaux électriques	16
2.1.1	Matériels de puissance	16
2.1.1.1	Les lignes électriques	16
	a) Les conducteurs	16
	b) Le Câble de garde	16
	c) Les isolateurs	17
	d) Les pylônes	17
2.1.1.2	Les transformateurs de puissance	18
2.1.1.3	poste de transformation	18
	a) Poste d'interconnexion	19
	b) Poste de répartition	19
	c) Poste urbains et ruraux	19
2.1.2	Matériels de surveillance et de commande	19
2.2	Qualité de l'énergie électrique	20
2.2.1	Les creux de tension et coupures brèves	20
	a) Interruption courte	21
	b) Chutes de tension	21
	c) Tension et/ou courant transitoire	23
	d) Déséquilibre de tension	23
	e) Perturbations harmoniques	23
2.3	Stabilité et réglage des réseaux électriques	24
2.3.1	Une consommation supérieure à la production	24
2.3.2	Une production supérieure à la consommation	24
Conclusion		25
CHAPITRE II : ANALYSE STABILITÉ TRANSITOIRE		
Section 01 : Notions de la Stabilité de systèmes		26
1.1	Définition de la stabilité	26
1.2	Notions mathématique de la Stabilité	27
1.3	Nécessité d'étude de la Stabilité	28
1.4	Types de stabilité	28
1.4.1	Stabilité de tension	29
	1.4.1.1 Stabilité aux petites perturbations (dynamique):	30
	1.4.1.2 Stabilité aux grandes perturbations (transitoires)	31
1.4.2	Stabilité de fréquence	31
1.4.3	Stabilité de l'angle de rotor	31
	1.4.3.1 Stabilité aux petites perturbations (dynamique) :	32
	1.4.3.2 Stabilité aux grandes perturbations (transitoires) :	32
Section 02 : stabilité transitoire		34
2.1	L'objectif de la stabilité transitoire	34

2.2	Les Facteurs influant sur la stabilité du transitoire	35
2.3	Caractéristiques d'un réseau Avant, pendant ET après une perturbation dans le cadre de la stabilité transitoire	35
2.4	Le modèle mathématique de la stabilité transitoire	36
2.4.1	hypothèses du modèle classique	36
2.4.2	Équation de mouvement (swing équation)	37
2.5	Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID)	41
Section 03 : Les Méthodes d'évaluation et d'amélioration de la stabilité Transitoire		43
3.1	Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire	43
3.1.1	Méthodes d'intégration numériques	43
3.1.2	Méthodes directes ou méthodes énergétiques	44
3.1.2.1	Méthode graphique (Critère d'égalité des aires)	44
3.1.3	Méthodes hybrides	47
3.2	Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire	48
3.2.1	Augmentation de la constante d'inertie des générateurs :	48
3.2.2	Augmentation de la puissance active	48
3.2.3	Implantation des valves rapides des turbines à gaz	48
3.2.4	Installation des protections et des appareils de coupure rapides	48
3.2.5	Installation des résistances d'amortissement	48
3.2.6	Utilisation des PSS	48
Conclusion		50
CHAPITRE III : SIMULATION ET ANALYSE DES RESULTAT		
Section 01 : simulation et analyse des résultats		51
1.1	Présentation de logiciel digsilent PowerFactory	51
1.1.1	Interface Utilisateur	52
1.2	Problématique	53
1.3	Étapes d'analyse de la stabilité transitoire	53
1.4	Méthode dévaluation	54
1.5	Description du réseau étudié	54
1.6	Résultats de simulation et interprétation des résultats obtenus	55
1.6.1	Scénario N°1 : (l'État normal)	55
1.6.2	Scénario N°2 : L'état avec défauts	57
a)	Défaut au bus 1	57
a.1)	Interprétation des résultats	59

b) Analyse de la stabilité transitoire	60
b.1) Défaut au bus 1	60
b.2) Défaut au bus 6	61
b.3) Défaut au ligne 3	63
b.4) Les résultats de simulation des différents TCID dans le Tableau	64
b.5) Interprétation des résultats obtenus	65
1.6.3 Deuxième scénarios (amélioration traditionnelle de ST)	65
a) Variation de la constante d'inertie :	65
a.1) Défaut au bus 1	66
a.2) Les résultats de simulation des différents TCID dans le Tableau	68
a.3) Interprétation des résultats obtenus	68
b) Variation de la résistance statorique des générateurs (R)	68
b.1) Cas 01 : Si (R=0.015 pu)	69
b.2) Cas 02 : Si (R=0.025pu)	69
b.3) Cas 03 : Si (R=0.025pu)	70
b.4) Interprétation des résultats obtenus	70
Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	72
BIBLIOGRAPHIE	73

Liste des Figures

N°	Les Titres des Figures	Page
1	Schéma du réseau de transport	5
2	Efficacité énergétique des systèmes électrique	7
3	Schéma simplifié d'un réseau électrique	9
4	Structure des réseaux de transport	10
5	Schéma équivalent d'une ligne de transport	10
6	Représentation d'un transformateur.	11
7	Schéma équivalent d'une charge.	12
8	Réseau maillé	14
9	Réseau radial	15
10	Lignes de transport d'énergie électrique	17
11	Transformateur de puissance	18
12	Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.	21
13	Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	22
14	Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales	22
15	Exemple de cas de surtensions transitoires	23
16	États du générateur : a) équilibre en régime permanent b) fonctionnement perturbé.	27
17	Classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance	29
18	Variation d'angle de rotor	33
19	Les buts de la stabilité transitoire	34
20	Conditions avant, pendant et après un défaut	36
21	Le flux de puissance mécanique et électrique dans un générateur et un moteur	37
22	Courbe d'oscillation	40
23	Principe de la méthode dichotomie pour trouver le CCT	44
24	Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini	45
25	Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission	46
26	L'espace de travail après la création d'un nouveau projet	52
27	Structure de réseau test	55
28	Angles rotoriques des 2 générateurs (cas normal)	56
29	Vitesses angulaires des 2 générateurs (cas normal)	56
30	Puissances actives des 2 générateurs (cas normal)	56
31	Puissances réactives des 2 générateurs (cas normal)	57
32	Tensions des jeux de barres (cas normal)	57
33	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=0.15	58

34	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=0.15 S	58
35	Tensions des jeux de barres à TID=0.15 S	58
36	Puissances actives des 2 générateurs à TID=0.15 S	59
37	Puissances réactives des 2 générateur à TID=0.15 S	59
38	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,208 s (système stable)	60
39	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,208 s (système stable)	60
40	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,209 s (système instable)	61
41	Vitesses angulaires des 2 générateur à TID =0,209 s (système instable)	61
42	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,27 s (système stable)	61
43	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,27 s (système stable)	62
44	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,271 s (système instable)	62
45	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,271 s (système instable)	62
46	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,176 s (système stable)	63
47	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,176 s (système stable)	63
48	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,177 s (système instable)	63
49	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,177 s (système instable)	64
50	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,210 s	66
51	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,210 s	66
52	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,491 s	66
53	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,491 s	67
54	Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,492 s	67
55	Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,492 s	67

Liste des Tableaux

N°	Les Titres des Tableaux	Page
1	Le TCID durant un défaut de court-circuit triphasé sur le réseau Test	64
2	Les valeurs initiales de constant d'inertie	65
3	Variation des valeurs initiales de constant d'inertie	65
4	Impact de la constant d'inertie H sur le TCID	68
5	Variation des valeurs initiales des résistances	68
6	Impact de la résistance sur le TCID (R=0.015 p.u)	69
7	Impact de la résistance sur le TCID (R=0.025 p.u)	69
8	Impact de la résistance sur le TCID (R=0.035 p.u)	70

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
R	Résistance de la ligne
X	Réactance de la ligne.
G	Conductance de la ligne
B	Réactance capacitive de la ligne
Z_{Tik}	L'impédance du transformateur
Y_{Tik}	L'admittance du transformateur
V	Tension aux bornes de la charge
P	Puissances active consommées par la charge
Q	Puissances réactive consommées par la charge
Z	Impédance de la charge
T_e	Couple électromagnétique
T_m	Couple le couple mécanique
P_e	La puissance électrique
P_m	La puissance mécanique
T_a	Couple d'accélération
T_r	Couple d'amortissement
J	Moment d'inertie du rotor
θ_m, δ_m	L'angle mécanique
ω_{sm}, ω_s	Vitesse de rotation synchrone en rd/s
ω_m	La vitesse mécanique du rotor
W_k	L'énergie cinétique emmagasinée par la machine
M	Le moment d'inertie de la partie tournante
S_b	La puissance de base de la machine
δ	L'angle électrique
P	Nombre de paires de pôles.
H	La constante d'inertie de la machine.
δ_i	L'angle interne de chaque

E_i	Tension interne de chaque.
Y_{ij}	Les éléments de la matrice d'admittance.
θ_{ij}	Les angles des éléments de la matrice d'admittance
δ_{cr}	L'angle critique
Xl	La réactance de la ligne
Xd	La réactance de générateur
Vb	Tension du jeu de barre infinie.
E	Force électromotrice du générateur
Pmax	La puissance électrique maximale.
δ_0	L'angle de fonctionnement avant l'apparition du défaut.
ST	Stabilité transitoire
TCID, CCT	Le temps critique d'isolement de défaut
TID	Le temps d'isolement de défaut.
PSS	Power System Stabiliser
MT	Moyen tension
BT	Base tension

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Actuellement, le monde connaît un développement et un progrès très rapide, l'homme a commencé à bénéficier de ces derniers, mais avec la croissance démographique, l'augmentation de l'industrialisation, l'homme était obligé de passer à la production et de l'énergie électrique pour satisfaire cette forte demande. Dans sa tâche, l'homme était aussi forcé à acheminer et transporter cette énergie.

Quand on parle de transport d'énergie électrique, il faut souligner les limites économiques et environnementales qui freinent la construction de nouvelles lignes électriques. C'est pourquoi les réseaux actuels doivent fonctionner près de leurs limites de stabilité pour que ces limites répondent aux nouvelles exigences.

En examinant les raisons de la conception des réseaux électriques, nous constatons qu'ils sont utilisés pour fournir une énergie continue qui maintient stabilisation de réseau.

Cependant, lorsque des événements négatifs se produisent, tels que la foudre, des accidents ou d'autres événements inattendus, un court-circuit peut se produire entre les conducteurs des lignes de transmission ou entre le conducteur et la terre, ils sont appelés défauts.

En raison de la variété des conditions d'exploitation et de la gravité des accidents, ces réseaux doivent rester normalement stables pour de petites variations au voisinage des points d'exploitation ainsi que pour des conditions d'exploitation sévères. Les équipements de contrôle installés sur les réseaux peuvent être trop limités ou insuffisants pour répondre efficacement aux diverses perturbations. Les opérateurs doivent donc s'efforcer d'améliorer le fonctionnement de leur réseau tout en s'efforçant d'atteindre un niveau de sécurité satisfaisant. Le système énergétique, après tout, reste vulnérable aux perturbations. Le système doit être en mesure de répondre aux exigences de charge et de résister à diverses perturbations de nature sévère telles que la foudre, la perte d'unité génératrice, un court-circuit sur la ligne de transmission et une perte de charge importante.

Après une perturbation transitoire, si le système est stable, il reviendra rapidement à un nouvel état d'équilibre. S'il est instable, cela entraînera une augmentation progressive de l'écart entre les angles de rotor des générateurs ou une diminution progressive des tensions des nœuds des réseaux. Cet état instable peut alors conduire à une avalanche de pannes, au détachement d'une grande partie du réseau et parfois même à une panne complète.

Pour que des défauts apparaissent sur le réseau électrique, une analyse de la stabilité du réseau électrique doit être réalisée. Cette analyse consiste à évaluer la capacité du système à supporter des perturbations potentielles puis à proposer des moyens d'améliorer cette capacité. Pour résoudre ce problème, les ingénieurs ont eu recours à la modélisation et à la simulation. En particulier, les études de stabilité deviennent l'un des outils essentiels pour la planification, la conception et l'amélioration réseaux électriques.

La notion de stabilité transitoire est liée aux effets de perturbations soudaines de forte amplitude et de courte durée (déconnexions de ligne, défauts de court-circuit, etc.). C'est ici que l'intervention des organismes de protection et de régulation est essentielle pour rétablir la stabilité pendant la période transitoire. La détermination du temps critique d'isolement de défaut TCID est une caractéristique importante du fonctionnement du disjoncteur. Cette méthode est une grande importance dans l'analyse, la planification et l'exploitation du réseau électrique. De sorte que la valeur de TCID dépend non seulement de la position et de l'ampleur du défaut, mais également des paramètres intrinsèques du réseau électrique.

Notre objectif dans cette étude est limité à l'analyse et à l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau électrique par des méthodes conventionnelles, en fonction de la détermination du TCID.

Ce travail est réparti sur trois chapitres principaux :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté un concept général du réseau électrique, en définissant son rôle et ses différentes structures et parties, en plus des appareils que l'on y retrouve.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la stabilité sa définition, notion mathématique, Nécessité, ses types ensuite il cible la stabilité transitoire (objectif, les Facteurs influant, Caractéristiques d'un réseau, le modèle mathématique, Détermination de temps critique d'isolement de défaut, enfin des méthodes d'évaluations et améliorations de la stabilité transitoire (ST)).
- Dans le dernier chapitre, À travers le programme de simulation des réseaux électriques étudiés : 3 machines - 9 barres, nous avons appliqué une analyse comparative des résultats obtenus, en plus de présenter les résultats de simulation de la stabilité transitoire par rapport aux défauts symétriques appliqués au réseau et Nous avons terminé le chapitre avec l'amélioration traditionnel.

Enfin, nous concluons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX
ÉLECTRIQUE

Introduction :

Ce chapitre vise une étude théorique sur le réseau électrique, nous voulons mettre en évidence le réseau électrique. Nous allons exposer deux sections pour y arriver :

La première section réservée pour les notions générales sur le réseau électrique ; la deuxième section pour les matériels, la qualité d'énergie et la stabilité de réseau électrique.

Section 01 : Notions Générales sur les réseaux électrique :

Dans cette section nous donnons un aperçu générale du concept de réseau électrique (Définition et son rôle, type et différents structures topologiques)

1.1 Définition de réseau électrique :

Le réseau électrique est un certain nombre de fonctions et de comportements généraux, qui doivent être définis, mis en œuvre et maîtrisés par une bonne conception et exploitation. Ce sont ensuite des ouvrages et des matériels (lignes aériennes et souterraines, postes, câbles, appareillage, transformateurs, parafoudres, etc.) qui, assemblés, forment le réseau physique ; la qualité conditionne très largement celle du réseau, donc celle de la desserte en électricité de ses clients [1]. C'est enfin un ensemble complet d'automatisation et de transmission d'informations et de commandes, un ensemble coordonné, donc le système nerveux est absolument nécessaire à la protection des ouvrages et des matériaux, à la solidité du réseau de verrous et aux conditions extérieures telles que la foudre et les intempéries ; Une plate-forme également pour l'opérateur pour maîtriser un outil technique, pour les réseaux publics au moins, qui n'est pas concentré en un seul endroit, mais couvre des milliers et des centaines de milliers de kilomètres carrés.

Les réseaux électriques fonctionnent avec des raccordements aux centres de production tels que les centrales électriques et thermiques, les basses tensions, et les hautes tensions, voire très hautes tensions, pour réduire les pertes joules selon (**Figure N°1**).

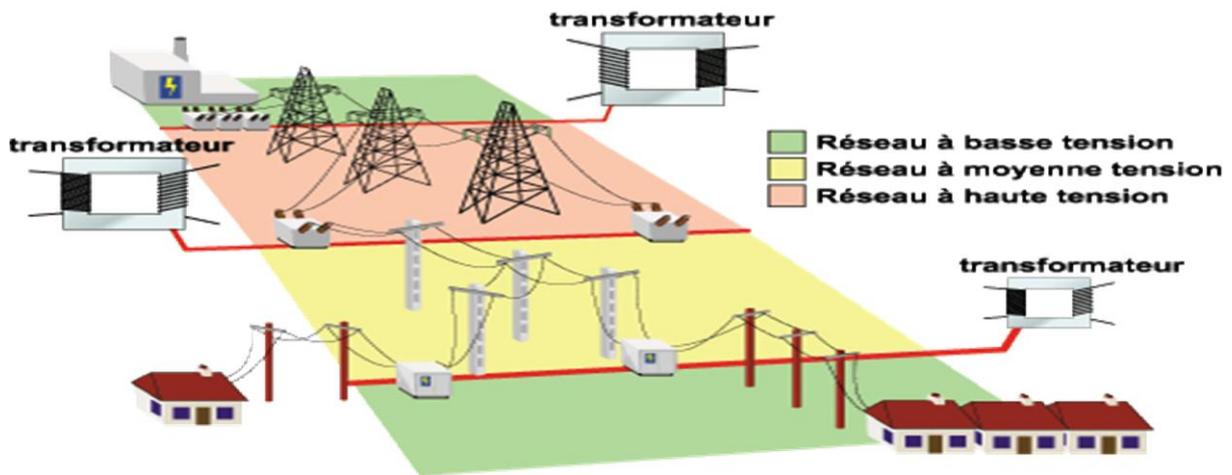


Figure N°1 : Schéma du réseau de transport.

Un réseau électrique est un système maillé mettant en œuvre [1]:

- **Des nœuds** (ou postes) où sont raccordés : les centrales (centre de production), les charges (consommation) et les lignes électrique (élément du réseau).
- **Des branches** (ou lignes électrique) : qui lie les nœuds.

Le maillage du réseau améliore la disponibilité de l'alimentation électrique pour les utilisateurs, ainsi que la stabilité et la qualité du produit électrique, car les deux dépendent de la puissance de court-circuit, qui augmente avec le réseau ou la puissance précise des centres de production installés et connectés.

1.2 Le rôle des réseaux électriques :

Le réseau électrique est hiérarchisé par le niveau de tension et est divisé en trois postes principales, à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

Le concept de limites entre les niveaux de tension du réseau électrique peut être défini, et ces limites sont assurées par les postes sources et les transformateurs, et le réseau électrique est utilisé de telle manière qu'il garantit trois objets principaux :

La distribution d'électricité doit être assurée malgré les fluctuations du réseau. En fait, il s'agit à la fois d'un problème financier et de sécurité des produits de base ; matériaux et personnes.

Ainsi, le gestionnaire de réseau doit être en mesure de faire face à ces risques et d'éviter les dangers potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est l'un des premiers objectifs. [4]

L'onde de tension fait l'objet d'une obligation contractuelle selon laquelle l'opérateur doit respecter la règle d'égalité, c'est-à-dire la neutralité entre clients tout en maintenant une continuité de service maximale.

Le but de la dernière exploitation est plus économique, de sorte que l'exploitation doit se faire de manière optimale pour réduire les pertes, en plus de réduire les coûts de maintenance et d'investissement.

1.3 Types des réseaux électriques (production, transport et distribution) :

[2]

Le système de production, de transport et de distribution d'électricité comprend :

- Centrales électriques pour produire l'énergie électrique.
- Réseau de transmission et interconnexion très haute tension de 225 KV ; 400 kV pour "transférer" l'énergie des centrales électriques vers les points de consommation et de distribution.
- Réseau de répartition à haute Tension 60 KV en général et 90 KV.
- Réseaux de Distribution Moyennes tensions 30;20,15 et 10Kv.
- Réseau de Distribution Basse Tension 230/400v pour alimenter les abonnés domestiques et certains types d'utilisateurs.
- Les abonnés MT et BT sont alimentés par voie aérienne ou câbles souterrains provenant respectivement des postes sources HTB/MT et postes basse tension MT/BT.

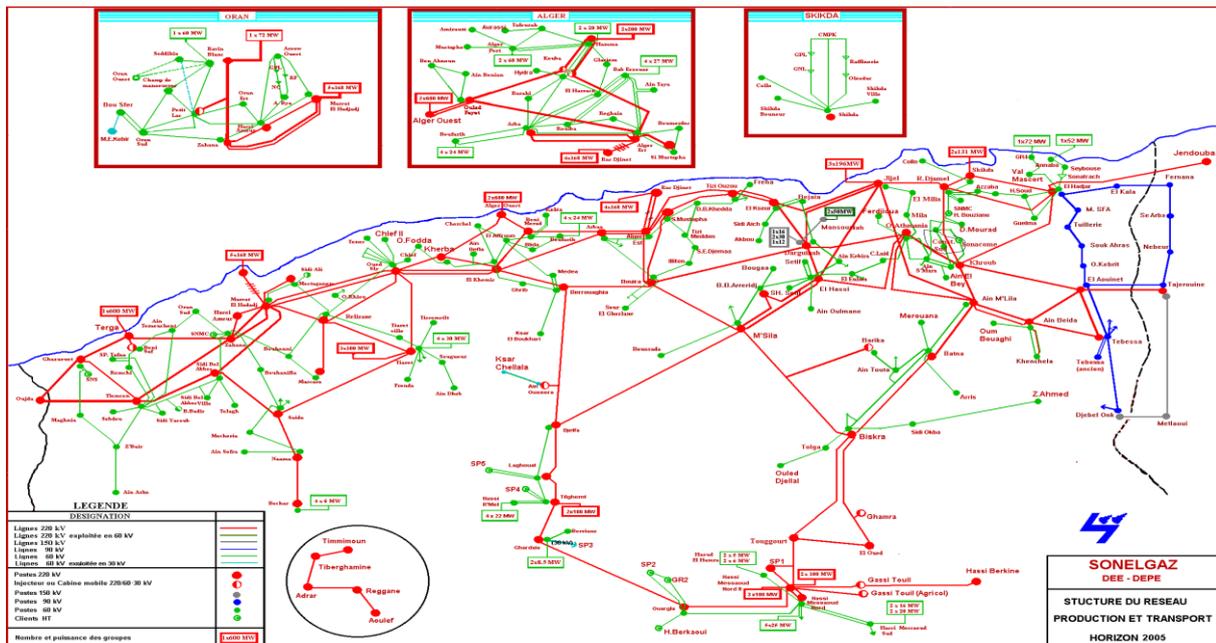


Figure N°2 : Efficacité énergétique des systèmes électriques

1.3.1- Production d'énergie électrique :

Lorsqu'elle n'est pas d'origine chimique (piles et accumulateurs), ou photovoltaïque (énergie solaire), l'électricité « de synthèse » est toujours produite selon le même principe, c'est-à-dire la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, issue du mode de mouvement d'un aimant dans un enroulement d'un fil conducteur. Ce principe de générateur (qui peut être comparé à une dynamo d'éclairage de vélo) fonctionne à partir de différentes sources motrices : hydraulique (barrages), éolienne (éoliennes), vapeur d'eau (centrales nucléaires et centrales thermiques à flamme) qui chacune le moteur fera tourner le générateur. [3]

Une très grande partie de l'énergie électrique est produite par trois types de centrales :

a) Les centrales hydrauliques [15]:

L'énergie des chutes d'eau est utilisée pour entraîner des turbines hydrauliques. On distingue selon la hauteur de chute :

- Les usines de basse chute : $10 \leq h \leq 30$ m.
- Les usines de moyenne chute : $30 \leq h \leq 120$ m.
- Les usines de haute chute : $h \geq 120$ m.

b) Les centrales thermiques [16]:

Une centrale thermique est une centrale qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Cette source peut être un combustible (par exemple le gaz naturel, certaines huiles minérales, le charbon, les déchets industriels et les ordures ménagères).

c) Les centrales nucléaires [17]:

On sait que ces centrales utilisent le principe de la conversion thermodynamique, en conservant leur chaudière comme réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue par la fission de l'uranium est la source de chaleur utilisée. Ces centrales produisent environ 15 % de l'électricité. Une centrale nucléaire est presque identique à une centrale thermique sauf que la chaudière qui brûle le combustible est remplacée par un réacteur nucléaire.

Bien que nous ayons entrepris d'exploiter le vent, les marées et l'énergie rayonnante du soleil, dans les années à venir, ces sources d'énergie ne représenteront qu'une petite partie de l'énergie totale dont nous aurons besoin. Tout semble indiquer que, globalement, nous essaierons de continuer à exploiter les ressources fossiles (charbon et gaz naturel) et nucléaires. L'électricité ne peut jamais être stockée à l'échelle industrielle : elle nécessite à tout moment que la production d'électricité soit égale à ce qui est consommé. En Algérie, la société « Sonelgaz » assure, à tout moment, un équilibre entre les offres de production et les besoins de consommation qui varient selon la saison, la météo du jour, l'heure, etc. Des prévisions définissent les besoins théoriques nécessaires et les ajustements ont lieu en permanence pendant la journée. [3]

1.3.2 - Principaux parties d'un réseau électrique :

Pour que la connexion entre la production et la consommation soit réalisée, il est nécessaire d'établir des lignes aériennes et des canalisations souterraines. Les lignes sont connectées à des nœuds appelés 'postes'. Ces sous-stations d'une importance particulière comprennent des transformateurs, des dispositifs de contrôle, de modulation et de protection.

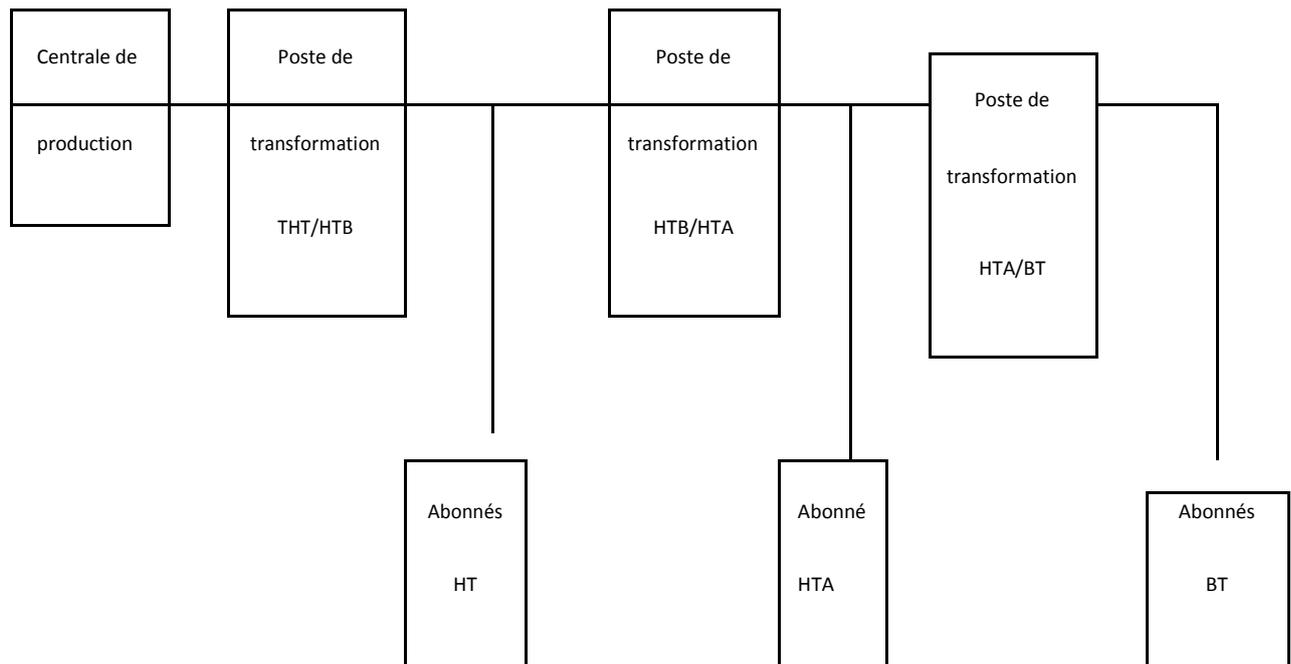


Figure N°3 : Schéma simplifié d'un réseau électrique

1.3.2.1 Le transport et la répartition :

1.3.2.1.1- Le transport et lignes d'interconnexion : [16]

L'objectif de ces réseaux est de relier les grands centres de production aux régions de consommation. La tension varie d'un pays à l'autre, mais le niveau de tension pour la transmission est généralement fixé entre 220 kV et 800 kV. Les distances géographiques entre les centres de consommation la variabilité ou la versatilité de la charge, et l'impossibilité de stocker de l'énergie en grande quantité, ont créé le besoin d'un système électrique long capable de transmettre la ligne électrique sur une distance. Ces lignes de transport et d'interconnexion peuvent s'étendre sur des milliers de kilomètres. Les missions des réseaux de transport sont : le transport d'énergie, l'interconnexion nationale et l'interconnexion internationale pour échanger des puissances et renforcer la solidarité du système en cas d'urgence. Le niveau de tension doit être élevé car les pertes joules sont inversement proportionnelles au carré de la tension ($p = k/U^2$) avec U de la tension du réseau et k une constante qui dépend des lignes. L'alimentation électrique est transmise par des connexions en courant continu (DC) ou en courant alternatif (AC). Les lignes AC longue distance présentent des inconvénients liés aux problèmes de stabilité et aux problèmes de compensation de puissance réactive pour maintenir un bon niveau de tension. Les connecteurs DC n'ont pas ces problèmes et coûtent même moins cher sur des distances suffisamment longues. En revanche, ils risquent d'utiliser des adaptateurs AC/DC et DC/AC. Enfin, les réseaux de transport sont plus ou moins maillés, avec les sections des lignes variant de 570 à 1200 mm² [3].

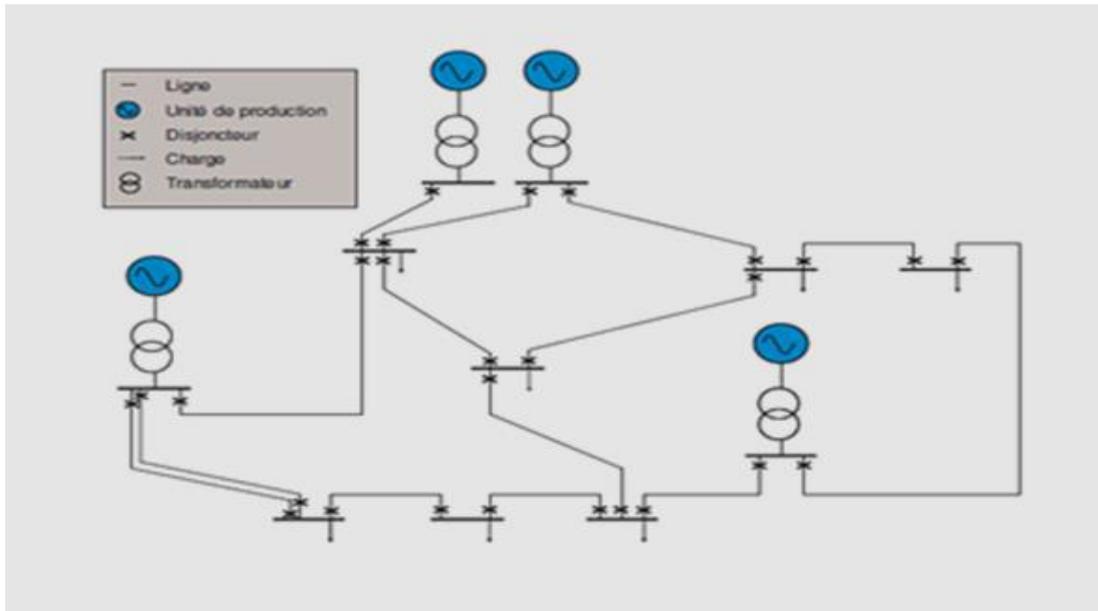


Figure N°4 : STRUCTURE DES RÉSESAUX DE TRANSPORT

➤ **Modélisation d'une ligne de transport**

Comme mentionné ci-dessus, la connexion entre les centres de production et les zones de consommation se fait au moyen de réseaux de transport. Ce qui peut faire l'échange d'énergie à travers des lignes d'interconnexion, entre pays ou entre de grandes zones liées à différents opérateurs de réseau. [21] Le modèle d'une ligne de transport est donné par des quadripôles symétriques représentés par la **Figure N°5 (a, b)** [22] :

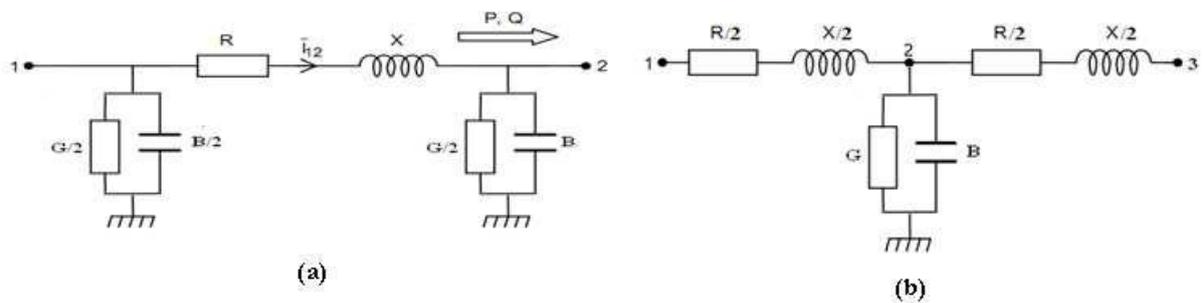


Figure N° 5. Schéma équivalent d'une ligne de transport

(a) : Modèle en π .

(b) : Modèle en T.

R : résistance de la ligne.

X : réactance de la ligne.

G : conductance de la ligne.

B : réactance capacitive de la ligne.

➤ **Modélisation des Transformateurs :**

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais à son tour, c'est un appareil très important dans le réseau électrique, car c'est une machine essentielle pour transmettre l'énergie électrique. Le transformateur est utilisé pour modifier la tension et le courant dans le circuit, et grâce à cette propriété, l'énergie électrique peut être transmise sur de longues distances d'une manière Économique et distribué dans les usines et les maisons.

Chaque transformateur peut être modélisé par une résistance en série avec une réactance comme elle indique la **Figure N°6** :



Figure N° 6 : Représentation d'un transformateur.

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

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

$$Y_{Tik} = \frac{1}{R_{Tik} + jX_{Tik}} \quad (1.2)$$

Avec :

Z_{Tik} = L'impédance du transformateur.

Y_{Tik} = L'admittance du transformateur.

➤ **Modélisation d'une charge :**

On peut représenter le modèle équivalent d'une charge par une impédance Z :

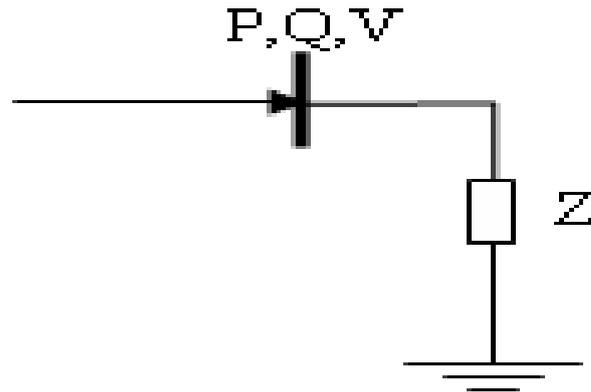


Figure N°7 : Schéma équivalent d'une charge.

Après avoir déterminé les données nécessaires de l'étude de l'écoulement de puissance, on peut calculer l'admittance par :

$$Z = Y^{-1} = \left(\frac{P-jQ}{V^2} \right) \quad (1.3)$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la charge.

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

Z : impédance de la charge.

1.3.2.1.2- la répartition [19]:

Ce réseau qui comprend des lignes à haute tension (ligne HT entre 30 KV / 60 KV / 90 KV) sert d'intermédiaire entre le réseau de transport et le réseau de distribution. Il doit avoir la capacité de traverser plusieurs dizaines de MW sur quelques dizaines de kilomètres. Ce réseau doit être particulièrement faible ; Ses réseaux sont également beaucoup plus étroits que les réseaux de transmission.

1.3.2.2 Distribution [5]

Le réseau de distribution fait partie d'un réseau électrique qui dessert les consommateurs transformateurs qui desservent les clients locaux. Il est composé de postes sources (transformateurs d'électricité. Il transfère l'énergie électrique d'un réseau de transmission ou de distribution aux, équipements de compensation, équipements de protection et de contrôle commande), et de lignes aériennes ou souterraines. La tension des réseaux de distribution est généralement comprise entre 380V et 30 kV. Il se compose de deux niveaux de désignation : «

haute tension A » (MT) et « basse tension » (BT). Le réseau de distribution a généralement une structure radiale, où chaque départ est connecté à un jeu de barre du poste-source qui se divise plusieurs fois (avec des artères primaires et secondaires) avant d'atteindre les transformateurs de distribution. Ces réseaux radiaux peuvent être interconnectés à des points de connexion normalement ouverts : ils permettent de reconfigurer le réseau après qu'une erreur se soit produite afin de limiter le nombre de clients qui s'arrêtent.

1.3.2.3 – Consommation :

La consommation représente l'ensemble des utilisateurs d'énergie électrique. Ce groupe est très diversifié et s'étend sur des potentiomètres de 380V à 30kV et des courants de quelques mA à quelques kA.

1.4 Topologies et structures des réseaux électriques :[6]

1.4.1 Les critères de choix d'une topologie : [11]

Le choix d'une topologie répond à des objectifs :

- Assurer la sécurité des personnes et des biens.
- Obtenir un niveau de qualité de services fixé.
- Assurer le résultat économique souhaité.

Mais il lui faut aussi se soumettre à un ensemble de commandes :

- Elle est adaptée à la densité de la population et/ou de la consommation, également appelée densité de la charge, qui influence de façon très prépondérante, de sorte que cette densité permet d'appréhender les différents domaines de consommation. Consiste à définir deux types de zones de consommation.

1.4.2 Différents structures topologiques des réseaux électriques

1.4.2.1 Réseau maillé : [20]

Ce type de réseau offre une très grande fiabilité d'approvisionnement car chaque tronçon de ligne peut être alimenté via différentes voies. Même une défaillance sur plusieurs tronçons n'engendre pas une grosse perturbation. Les réseaux maillés sont surtout construits et exploités là où la sécurité d'approvisionnement d'un grand nombre de clients peut être compromise par

une perturbation, comme c'est particulièrement le cas pour les réseaux de transport et de distribution haute tension.

La (Figure N°8) montre l'exemple d'un réseau maillé. [7]

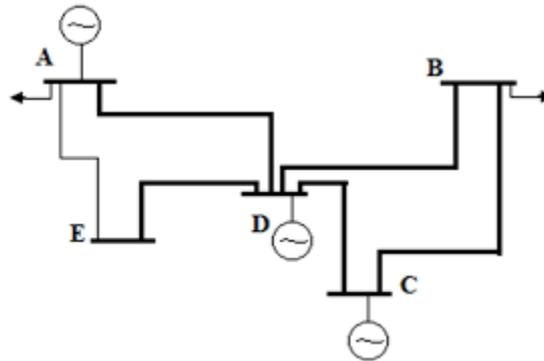


Figure N°8 : Réseau maillé

a) Avantages [7]

Le réseau maillé est caractérisé par :

- Une grande sécurité d'exploitation ;
- Une chute de tension réduite.

b) Inconvénients [7]

- Le coût de réalisation est énorme ;
- Nécessité des protections sophistiquées.

1.4.2.2 Réseau bouclé [18]

Les réseaux bouclés sont des réseaux maillés simplifiés, présentant un certain nombre de boucles fermées. Chacune de ces boucles contient un nombre limité de sources. L'énergie peut transiter alors par des chemins différents, et la mise hors tension accidentelle d'un tronçon n'entraîne pas de surcharges inadmissibles pour les autres tronçons. Les réseaux bouclés sont généralement utilisés pour les réseaux de répartitions.

a) Avantages [7]

- Grande continuité de service ;
- Un bon rendement ;

- Faible chute de tension.

b) Inconvénients : [7]

- Forts courants de court-circuit ;

- Plus onéreux et plus difficile à exploiter que le précédent.

1.4.2.3 Réseau radial : [6]

Ce type de topologie se retrouve principalement dans les réseaux MT et BT. Pour un faisceau, il consiste à connecter deux bornes de source MT de manière à ce que le flux de puissance n'ait qu'un seul chemin à suivre.

Quant à l'arborescence, elle est constituée d'un poste de distribution qui dessert plusieurs postes de distribution basse tension grâce aux dérivations réalisées à différents niveaux des lignes qui alimentent les postes MT/BT.

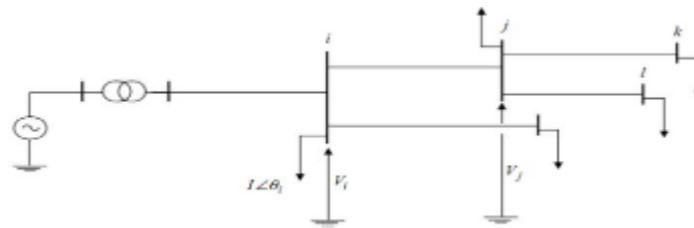


Figure N°9: Réseau radial

a) Avantages : [7]

- Facile à étudier et à construire ;

- Pour effectuer des travaux, il suffit d'ouvrir l'appareil (sectionneur, interrupteur ...) placé au début du réseau.

b) Inconvénients : [7]

- Des grandes chutes de tension pour les longueurs dépassant 500m ;

- La mise hors tension des consommateurs en cas d'une panne en tête de ligne.

Section 02 : matériels, Qualité d'énergie, stabilité de réseau électrique :

La section suivant cible les matériels, la qualité d'énergie et la stabilité de réseau électrique

2.1 Matériels utilisés dans les réseaux électriques.

Les équipements haute tension (communément appelés matériels de puissance) ne sont pas les seuls composants du réseau électrique, mais aussi un ensemble de fonctions utiles, comme la télécommande (la télé conduite) ou le système de protection.

2.1.1 Matériels de puissance :

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barre qui relie les départs lignes et les départs transformateurs. [8]

2.1.1.1 Les lignes électriques :

La fonction de "transmettre de l'énergie" sur de longues distances est très basique. Si bien que les lignes électriques sont à ce moment les seules capables d'assurer cela. Ces lignes sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs.

Ces conducteurs sont espacés de quelques centimètres afin de réduire l'effet couronne qui entraîne des pertes en ligne, différentes des pertes Joule.

a) Les conducteurs :

Le rôle des conducteurs est de transmettre l'énergie électrique ; Elle peut être aérienne ou souterraine (et parfois sous-marins). Les facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas, etc. affectent évidemment les conducteurs aériens, il est donc impératif qu'ils soient choisis pour résister à toutes ces intempéries. De nos jours les matériaux les plus utilisés dans la production des câbles sont : l'aluminium, le cuivre, l'acier. [9]

b) Le Câble de garde :

En tête de ligne, un câble appelé « câble de garde » est disposé, et il a un rôle important dans la protection contre la foudre, pour éviter toute surtension au niveau des conducteurs.

Il existe deux types de câble de garde : [9]

- des câbles almélec-acier normaux ;
- des câbles almélec-acier avec circuits de communication à l'intérieur. Équipés de fibres optiques, ils transmettent les informations nécessaires à la protection, au contrôle et à l'exploitation du réseau.

C'est aussi un moyen d'offrir des solutions haut débit pour les collectivités territoriales.

c) Les isolateurs :

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes [17]. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important. Les chaînes peuvent être [9]:

- Simples (câbles légers en suspension).
- Doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension).
- Doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

d) Les pylônes

Pour maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, nous utilisons des pylônes, et tout cela pour assurer la sécurité des personnes, en plus de la sécurité des installations situées à proximité des lignes.

Sa forme, sa hauteur, sa solidité ou sa résistance mécanique dépendent de son environnement (conditions climatiques) et des sollicitations mécaniques (sol) auxquelles il est exposé. Leur silhouette présente une disposition de câble conducteur.

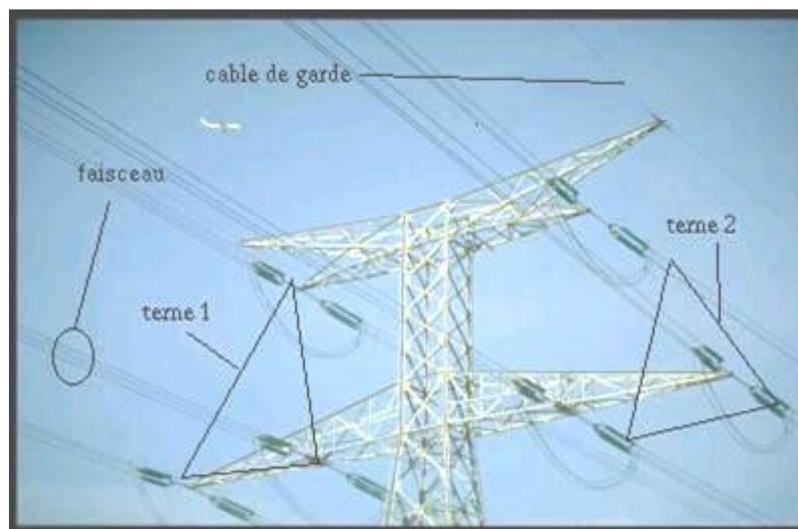


Figure N°10 : Lignes de transport d'énergie électrique.

2.1.1.2 Les transformateurs :

Transformateur de puissance : Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique. [10]

On trouve sur les réseaux électriques deux types de transformateurs de puissance [8]:

- **Les autotransformateurs qui n'ont pas d'isolement entre le primaire et le secondaire :**

Lorsqu'il est en service, il a un rapport de transformation fixe, mais si l'autotransformateur est mis hors service. Ils vont changer.

- **Les transformateurs avec régleurs en charge :**

Lorsqu'il est en service, il est capable de changer leur rapport de transformation. Notez que le but de son utilisation est de maintenir une tension constante au secondaire (la tension la plus basse), De plus, il joue un rôle prépondérant dans le maintien de la tension.

On veille à assurer la protection des transformateurs au moyen de mécanismes redondants, car les transformateurs sont des équipements particulièrement sollicités.

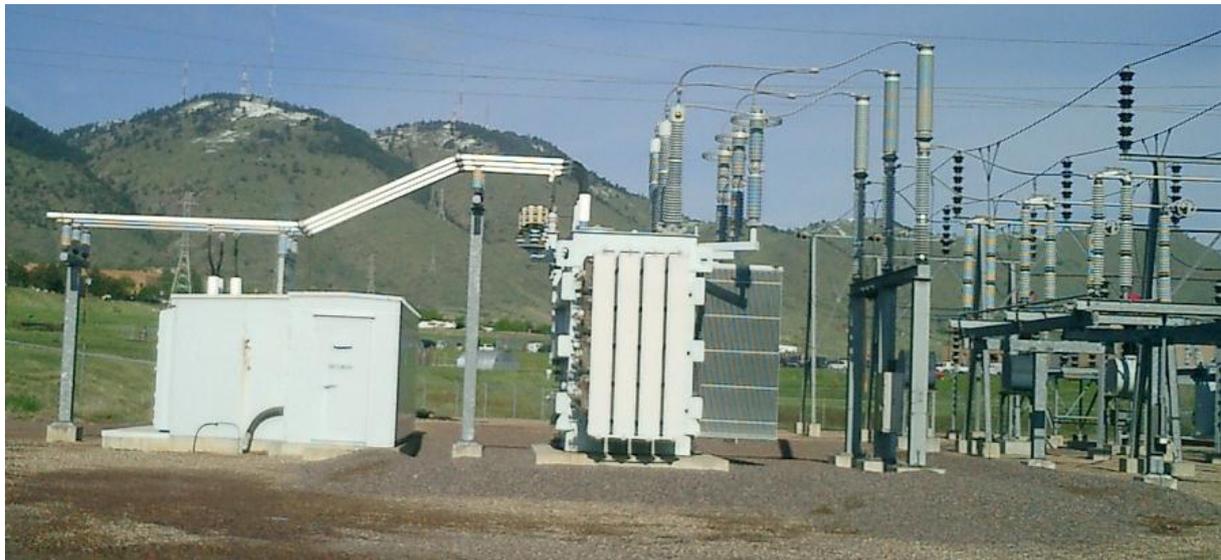


Figure N°11 : Transformateur de puissance.

2.1.1.3 – Poste de transformation :

Parmi les éléments du réseau électrique on trouve les postes électriques (postes de transformation), qui sont l'élément qui transmet et distribue simultanément l'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la rabaisser en vue de sa consommation par les utilisateurs. [18]

On distingue trois types de postes [11] :

a) Poste d'interconnexion :

Les lignes à haute tension reçoivent ces postes, l'énergie produite qui est convertie en THT avant d'être transférée au poste de répartition.

b) Poste de répartition :

Généralement, les lignes tracées entre un poste de distribution et des postes basse tension urbains et ruraux véhiculent des courants sous des tensions comprises entre 5 500 et 15 000 volts.

c) Poste urbains et ruraux :

Ils réduisent cette tension à 220-380V (la tension de fonctionnement est disponible pour les utilisateurs) [11].

2.1.2 Matériels de surveillance et de commande

La conduite est effectuée à partir de centres de conduite régionaux (dispatchings) ou nationaux. Ceux-ci disposent d'outils de contrôle à distance (SCADA, notamment), en plus de divers dispositifs qui permettent : [8]

- De commander les organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs),
- De connaître la position de ces organes,
- De mesurer un certain nombre de grandeurs (tension, intensité, fréquence),
- De signaler des dysfonctionnements (alarmes).

En plus des éléments ci-dessus qui permettent le contrôle à distance, il existe sans aucun doute des dispositifs locaux qui peuvent effectuer automatiquement des manœuvres visant à protéger le fonctionnement du système électrique.

Il est nécessaire de travailler à fournir de grands réseaux de canaux de communication fiables et sécurisés pour échanger ces informations entre le centre de conduite et les postes qu'il exploite.

Le matériel de surveillance est destiné à l'analyse à posteriori des incidents. Il est principalement constitué des consigneurs d'état chargés d'enregistrer la position des appareils en panne et de pérographes qui récupèrent l'évolution des tensions et des courants lors d'accidents grâce à un système appelé « système à mémoire ». Lorsque les capteurs sont à proximité du poste, Des jauges de qualité peuvent également être installées, visant à mesurer les coupures de courant.

Ces équipements fournissent des données qui consultées sur place. Par commodité, sa transmission peut se faire à distance, mais la fiabilité requise des canaux de transmission utilisés est moins importante que dans le cas précédent.

2.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie peut être définie comme le degré de conformité de la tension, de la fréquence et de la forme d'onde d'un système d'alimentation à des spécifications connues, et est récemment devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, et les personnels qui exploitent, entretiennent ou gèrent des sites tertiaires ou industriels, des équipementiers et des centrales nucléaires, essentiellement pour les raisons suivantes : [8]

- La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises ;
- La généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations ;
- L'ouverture du marché de l'électricité.

La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous forme de différentes perturbations : surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique, creux de tension.

2.2.1 Les creux de tension et coupures brèves [12]:

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min. La cause principale des chutes de tension est les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations associées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Cependant, la raison la plus importante des creux de tension et des interruptions brèves est les courts-circuits. Ils génèrent de brusques différences d'amplitude de tension, et pour cela, les chutes de tension correspondantes ont une allure rectangulaire en fonction du temps.

L'apparition de courts-circuits au niveau du réseau peut affecter une, deux ou trois phases, et peut provoquer des déphasages supplémentaires entre elles. Une chute de tension peut également être causée par des moteurs de grande puissance (principalement asynchrones). En

général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette augmentation de courant entraîne une chute de tension qui diminue à mesure que le courant diminue.

Et si l'on parle de la durée des chutes de tension provoquées par le démarrage des moteurs de forte puissance, elles durent de quelques secondes à quelques dizaines de secondes, et se caractérisent par une chute de tension triphasée.

Enfin, la saturation du transformateur ou des modifications de la structure du réseau peuvent également être à l'origine de la chute de tension. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

a) Interruption courte :

Une courte interruption peut être définie comme une perte complète ou comme l'arrêt de la tension d'alimentation pendant une période allant d'un demi-cycle à 3 secondes. Se produit lorsque la tension d'alimentation ou le courant de charge chute en dessous de 0,1 pu.

b) Chutes de tension :

Lorsque la traversée dans la ligne électrique est suffisamment importante, le courant circulant dans la ligne provoque une chute de tension (**Figure N°12**). Ensuite, la tension est inférieure à la fin de la ligne qu'à l'origine, et plus la ligne est chargée pendant la traversée de puissance, plus la chute de tension est importante.

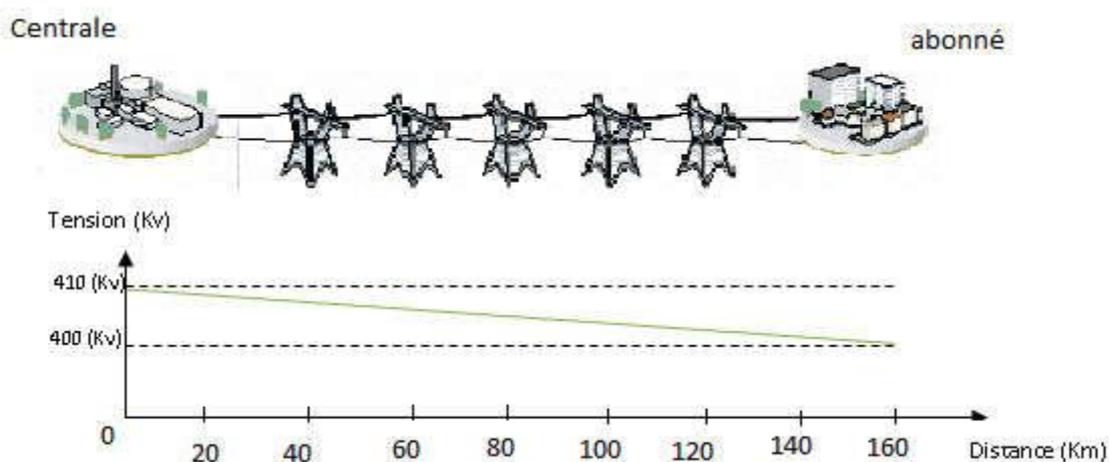


Figure N°12: Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Si la consommation double, la chute de tension double. [14]

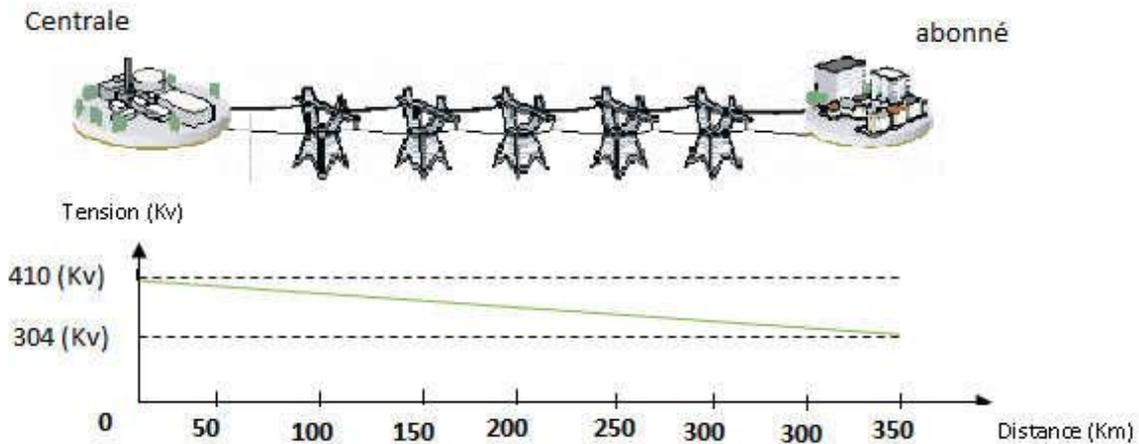


Figure N°13: Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

La consommation peut être éloignée de la production dans un réseau, si cela se produit, ce réseau a un profil de tension différent du réseau dans lequel la production et la consommation sont distribuées (**Figure N°13**). Chaque constructeur impose une tension à sa sortie, et c'est la consommation fournie qui commande la variation de tension dans le réseau.

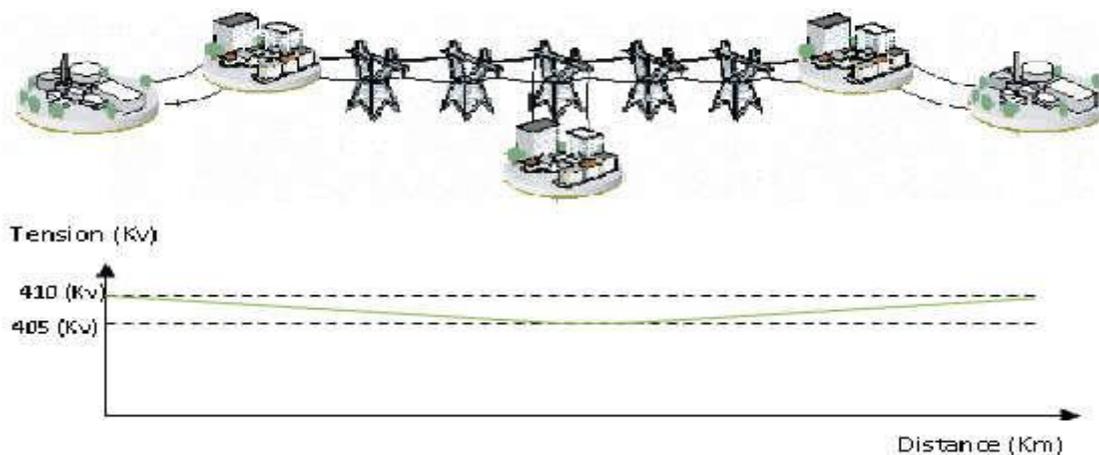


Figure N°14: Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

Ne soyez donc pas surpris d'apprendre que la variation de tension des réseaux HTB dépend de l'emplacement. Lorsque la consommation est maximale, la tension est élevée aux points du réseau où les centrales sont alimentées, et aux points de consommation éloignés des centrales elle est relativement faible. Les figures (12) (13) (14) sont valables pour un certain moment, à un certain niveau de consommation. Lorsque la consommation évolue dans le temps, la tension évolue également, de sorte qu'elle diminue lorsque la consommation augmente, et augmente

lorsque la consommation diminue. En tout point du réseau, la tension ne correspond pas, et c'est normal. Mais cette différence est compensée par les ajustements de tension effectués aux postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison. [14]

c) Tension et/ou courant transitoire :

Les surtensions transitoires représentées sur la (**Figure N°15**) sont des phénomènes de courte durée et d'aspect aléatoire. Ils sont empêchés de dépasser l'amplitude du niveau normal de la tension de base à la fréquence de 50 Hz ou 60 Hz pendant moins de 1 seconde. De plus, il existe des équipements sensibles aux courants/tensions transitoires, tels que les appareils électroniques.

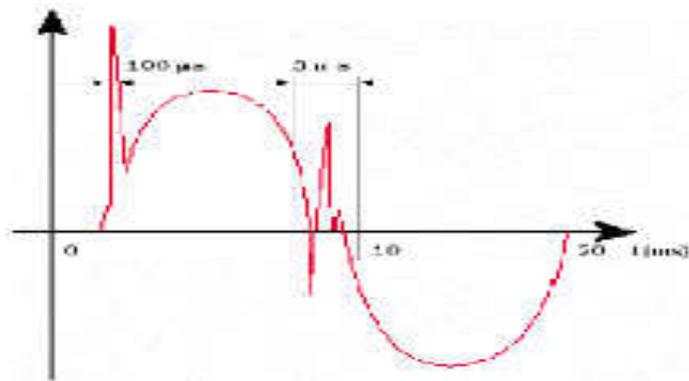


Figure N°15: Exemple de cas de surtensions transitoires

d) Déséquilibre de tension :

Un système électrique triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et courants triphasés sont de même amplitude et sont déphasés de 120° les uns par rapport aux autres. Si l'une de ces deux conditions n'est pas satisfaite, le système est dit : un système déséquilibré ou asymétrique. Parmi les causes, on peut citer les charges monophasées qui affectent directement le courant et par conséquent engendrent un déséquilibre des tensions. [13]

e) Perturbations harmoniques :

Les composants dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale, qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale, sont appelés harmoniques.

2.3 Stabilité et réglage des réseaux électriques

L'électricité fait partie de ces rares énergies qui ne peuvent pas être stockées à grande échelle (sauf pour les batteries ou les barrages qui sont de faibles réserves d'énergie électromécanique inertielle). À tout moment, les gestionnaires de réseau doivent assurer un équilibre entre l'offre et la demande. En cas de défaut, deux phénomènes principaux sont observés :

2.3.1 Une consommation supérieure à la production :

Le risque de perte de charge à fréquence métrique ou de black-out (perte rapide de synchronisation sur les générateurs) n'est pas exclu, comme dans le cas du déversement de charges énormes en Italie en 2003.

2.3.2 Une production supérieure à la consommation :

Il peut y avoir dans ce cas une accélération des machines synchrones qui produisent l'électricité et un emballement pouvant conduire également à un blackout.

La fréquence de rotation étant imposée, le réglage de la tension ne peut se faire qu'en agissant sur le courant d'excitation de la machine synchrone (alternateur).

Le réglage de tension peut aussi se faire en insérant des bobines dans le réseau électrique ou des batteries de condensateurs ou en les débranchant suivant le cas : chute de tension ou élévation de tension, sachant qu'un réseau électrique chargé engendre une baisse de tension et qu'un réseau à vide engendre une surtension. Il existe aussi d'autres moyens de réglage tels que les plots des autotransformateurs.

Conclusion :

L'objectif de ce chapitre était de présenter la littérature académique en cadre théorique du réseau électrique

Nous avons donné un aperçu général sur le réseau électrique sa définition, son rôle, ses différents structures topologiques, ainsi que, la stabilité, son réglage et le matériels nécessaires pour se faire.

CHAPITRE II :
ANALYSE DE LA STABILITÉ
TRANSITOIRE

Introduction :

La maintenance de la stabilité et la sécurité représente un indicateur important et inhérent à l'existence du réseau électrique. Avec la sûreté de la continuité de fourniture de l'électricité tout le temps même que dans le cas des défauts très sévères.

la section I présente une revue littérature académique et certain dimension conceptuelle sur les bases de la stabilité de système électrique (définition, notions mathématique, nécessité , types) la deuxième section présente la stabilité transitoire(l'objectif , les facteurs influant , les caractéristiques d'un réseau Avant, pendant et après une perturbation , le modèle mathématique, et le temps critique d'isolement de défaut) et la troisième section sera réservée aux méthodes d'évaluation et d'amélioration de la stabilité transitoire.

Section 1 : Notions de la Stabilité de systèmes :

La section suivante présente une revue de la littérature académique qui se concentre sur les bases de la stabilité de system, sa définition, notions mathématiques et nécessité et ses types.

1.1 Définition de la stabilité :

La stabilité d'un réseau électrique est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation [23]

Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différents jeux de barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs. [24]

En prenant un seul générateur comme exemple, sa capacité à revenir à un point de fonctionnement stable après avoir été soumis à des perturbations peut être analysée à l'aide de la figure :

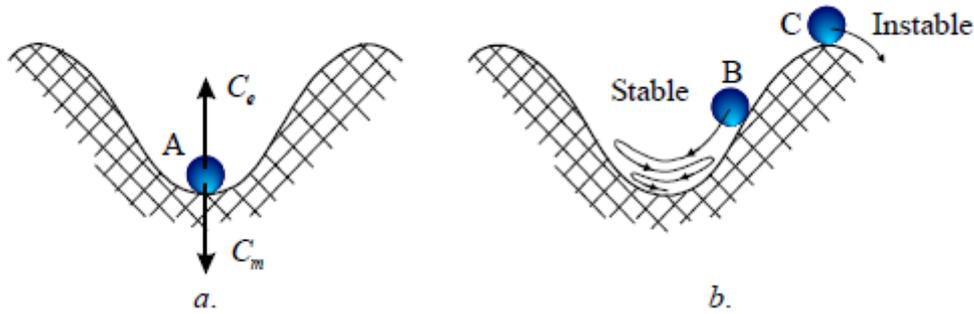


Figure N°16 : États du générateur : a) équilibre en régime permanent b) fonctionnement perturbé.

1.2 Notions mathématiques de la Stabilité :

Pour un système dynamique défini par l'ensemble des équations différentielles de premier Ordre :

$$\dot{x} = f(x) \tag{1.1}$$

Avec :

- $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ est le vecteur d'état du système ;
- f est un opérateur non linéaire défini par l'ensemble : $f = [f_1, f_2, \dots, f_n]$

On a les définitions suivantes :

- Point d'équilibre

Si $x(t_0) = x^* \Rightarrow x(t) = x^* \forall t \geq t_0$, donc l'état système x^* est le point d'équilibre. Pour que le système soit en état d'équilibre si une fois $x(t) = x^*$ il reste $x(t) = x^*$ pour tout le Temps subséquent. De cette condition, on peut écrire

$$x^* \text{ Est le point d'équilibre } f(x^*) = 0 \tag{1.2}$$

- Stabilité

Le point d'équilibre $x = 0$ est dit stable si :

$$\forall \varepsilon > 0, \forall t_0 > 0, \exists \delta(t_0, \varepsilon) \\ \|x_0\| < \delta(t_0, \varepsilon) \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0 \tag{1.3}$$

La définition implique que les trajectoires qui commencent suffisamment près du point de L'équilibre trouvant finalement autour de son voisinage. Si $\delta(t_0, \varepsilon)$ est choisi indépendant de t_0 . La stabilité uniforme est définie comme suite :

- Stabilité uniforme

$$\forall \varepsilon > 0, \forall t_0 > 0, \exists \delta(\varepsilon) \\ \|x_0\| < \delta(\varepsilon) \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon \forall t \geq t_0 \tag{1.4}$$

- Instabilité

On dit que Le point d'équilibre $x = 0$ est instable s'il n'est pas stable.

- Stabilité asymptotique

Le point d'équilibre $x = 0$ est asymptotiquement stable si on plus d'être stable

$$\forall t_0 > 0, \exists \delta(t_0)$$
$$\|x_0\| < \delta(t_0) \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} (\|x(t)\|) = 0 \quad (1.5)$$

Par conséquent, dans le cas de stabilité asymptotique, les trajectoires des systèmes qui Commencent suffisamment près du point de l'équilibre convergeront finalement à ce point [25] [26]

1.3 NECESSITE D'ETUDE DE LA STABILITE :

En pratique, pour faire face aux incidents graves et limiter leurs conséquences, il est nécessaire d'adopter des mesures curatives et installer des automates spécifiques qui constituent le plan de défense du système électrique, en limitant la propagation de ces incidents et en facilitant la reconnexion rapide des consommateurs des zones hors tension.

Tout défaut doit être identifié immédiatement afin d'isoler le plus rapidement possible du réseau sain l'ouvrage siège du défaut. [27]

Les études de la stabilité consistent à :

- Prévoir le fonctionnement synchrone ;
- Envisager les principaux scénarios critiques tels que le déclenchement des lignes, le déclenchement des transformateurs, le court-circuit, la perte des groupes de production, la perte de l'alimentation du distributeur, la variation de charge importante, etc. ;
- Prédire le comportement du réseau face à ces perturbations ;
- Prévoir les schémas d'exploitation ;
- Préconiser les moyens à mettre en œuvre tels que les types de protection et de réglage, plans de délestage, etc.
- Prévoir et planification de l'ensemble production-consommation.

Ces études permettent donc de comprendre le comportement du réseau et de déterminer les moyens de minimiser les risques de perte d'alimentation.

1.4 Types de stabilité :

Les différentes formes d'instabilité qui en résultent ne peuvent être traitées et comprises efficacement en même temps. En raison de la grande dimensionnalité et de la complexité des problèmes de stabilité, la classification aide à générer des spécifications conditionnelles et à

analyser des types simples, en utilisant un degré approprié de détail pour la représentation du système et des techniques analytiques.

L'analyse de la stabilité représente l'identification des facteurs principaux qui contribuent à l'instabilité, est considérablement facilitée par une classification de la stabilité donc La classification est importante pour une analyse pratique significative et pour résoudre les problèmes de la stabilité des réseaux électriques.

La classification de la stabilité proposée ici est dépend des paramètres physiques de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude des perturbations. On peut Classifier les types de la stabilité comme la figure indiquée ci-dessous ; [28]

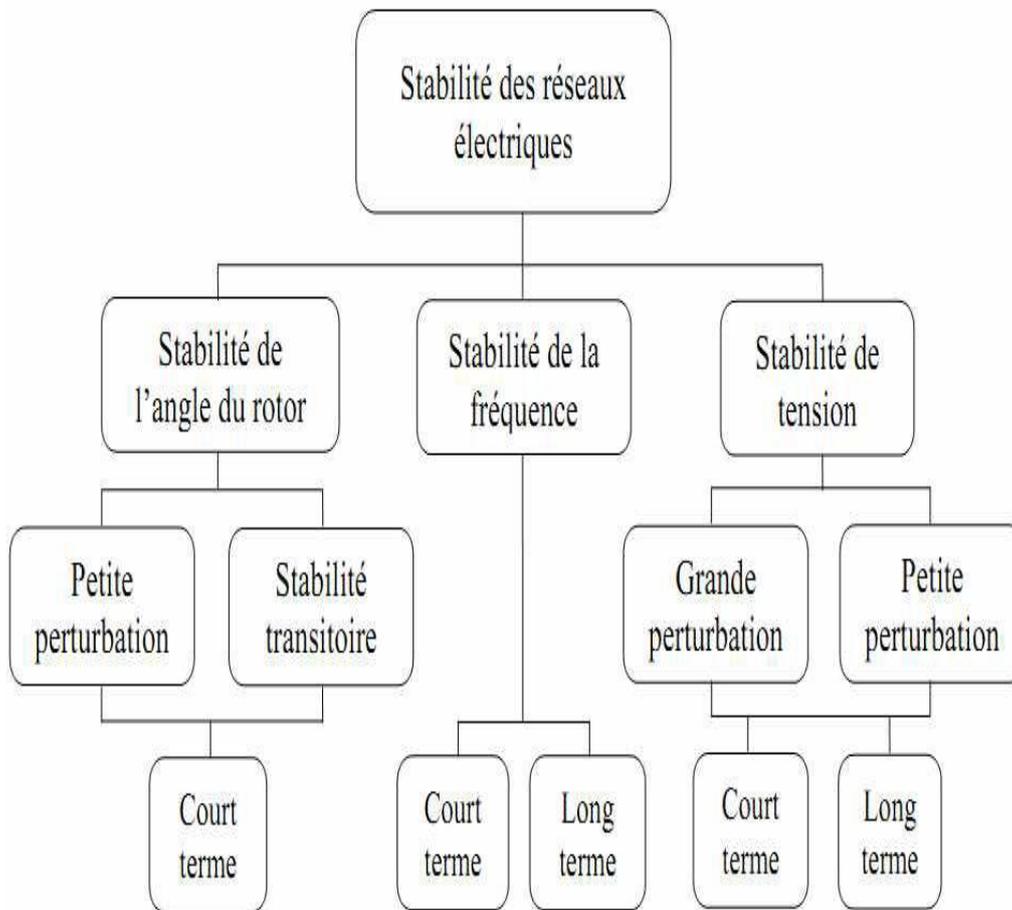


Figure N° 17 : Classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance

1.4.1 Stabilité de tension :

Alors que les phénomènes d'instabilité des petits signaux et des transitoires sont principalement liés aux générateurs synchrones et à leur contrôle, la stabilité de la tension est principalement liée au réseau et aux charges. La stabilité de la tension peut être définie comme la capacité d'un

système électrique à maintenir l'amplitude de la tension sur tous les bus dans des limites acceptables après que le système a subi une perturbation. La perte d'équilibre entre la demande de charge et l'alimentation de la charge est la principale cause d'instabilité de tension, qui se traduit par des basses tensions inacceptables sur le réseau [29], [30]. Les phénomènes d'instabilité de tension se manifestent souvent par une chute brutale de tension donc appelée chute de tension.

De nombreuses charges alimentées par un système électrique sont contrôlées de manière à avoir une sorte de comportement réparateur. Les gros moteurs industriels, les charges de chauffage contrôlées par thermostat, les transformateurs à changement de prise sont des exemples de charges qui réagissent aux perturbations en essayant de rétablir leur consommation électrique.

Cette action réparatrice a pour effet d'augmenter encore le stress sur un système déjà stressé. En particulier, la demande de puissance réactive pourrait augmenter au-delà de la capacité disponible, entraînant l'intervention de protections de limitation telles que les limiteurs de surexcitation dans les générateurs synchrones. [29]

La plupart des coupures de courant du système électrique ont été causées par une instabilité de la tension entraînant un effondrement de la tension. [31]

1.4.1.1 Stabilité aux petites perturbations (dynamique): [32]

La stabilité de la tension de petite perturbation concerne la capacité d'un système à contrôler les tensions suite à de petites perturbations telles que des changements incrémentiels de la charge du système. Cette forme de stabilité est déterminée par les caractéristiques des charges, des commandes continues et des commandes discrètes à un instant donné. Ce concept est utile pour déterminer, à tout instant, comment la tension du système répondra aux petits changements du système.

Un critère de stabilité de la tension de faible perturbation est que, dans une condition de fonctionnement donnée pour chaque bus du système, l'amplitude de la tension du bus augmente à mesure que l'injection de puissance réactive au niveau du même bus augmente. Un système est instable en tension si, pour au moins un bus du système, l'amplitude de la tension du bus (V) diminue à mesure que l'injection de puissance réactive (Q) au niveau du même bus augmente. En d'autres termes, un système est stable en tension si la sensibilité V - Q est positive pour chaque bus y et instable si la sensibilité V - Q est négative pour au moins un bus. La période

d'intérêt pour les problèmes de stabilité de tension peut varier de quelques secondes à des dizaines de minutes

1.4.1.2 Stabilité aux grandes perturbations (transitoires) :

La stabilité de la tension de perturbation importante concerne la capacité d'un système à contrôler les tensions à la suite de perturbations importantes telles que des défauts du système, une perte de production ou des contingences de circuit. Cette capacité est déterminée par les caractéristiques de charge du système et les interactions des commandes et protections continues et discrètes. La détermination de la stabilité aux perturbations importantes nécessite l'examen des performances dynamiques non linéaires d'un système sur une période de temps suffisante pour capturer les interactions de dispositifs tels que les changeurs de prises de transformateur de sous-charge et les limiteurs de courant de champ de générateur. La période d'étude d'intérêt peut s'étendre de quelques secondes à des dizaines de minutes. Par conséquent, des simulations dynamiques à long terme sont nécessaires pour l'analyse.

1.4.2 Stabilité de fréquence :

La stabilité de fréquence concerne la capacité d'un système électrique à maintenir une fréquence constante dans une plage nominale après une perturbation sévère du système entraînant un déséquilibre important entre la production et la charge. Il est basé sur la capacité à rétablir l'équilibre entre la production systémique et la charge, avec une perte de charge minimale. Les perturbations graves du système entraînent généralement des déplacements importants des flux de fréquence, de puissance et de tension, et d'autres variables du système, Le temps qui caractérise les processus et les dispositifs actifs, s'étend de la fraction de secondes à plusieurs minutes, Par conséquent, la stabilité de la fréquence peut être un phénomène à court ou à long terme . [33] [32]

1.4.3 Stabilité de l'angle de rotor :

Est de maintenir la synchronisation de toutes les machines synchrones a des conditions de fonctionnement normales ou après une perturbation, donc le principal facteur d'instabilité de système est le déséquilibre entre le couple électrique à l 'entrée et le couple mécanique à la sortie dans chaque machine donc la vitesse ne reste pas constant.

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques : soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système

Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système.

La stabilité angulaire nécessite l'étude des évolutions électromécaniques du réseau électrique puisque l'équilibre entre les forces électromagnétiques et mécaniques appliquées à l'appareil est l'une des principales raisons sa stabilité cette stabilité peut être divisée en deux types qui sont soit petites perturbations soit grandes perturbations. [34] [35]

1.4.3.1 Stabilité aux petites perturbations (dynamique) :

La stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme, une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc.

L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non oscillatoire, entre les angles de rotor.

Pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement Proportionnelle à la variation de l'angle Des exemples typiques des petites perturbations Peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique Appliquée à une machine du système ou sur sa charge, ... L'analyse d'un tel système peut être accomplie par la linéarisation du système d'équations différentielles non linéaires, La stabilité du système peut être évaluée par l'analyse des valeurs propres de la matrice d'état du système.

[28][36][37]

1.4.3.2 Stabilité aux grandes perturbations (transitoires) :

La stabilité angulaire aux grandes perturbations, est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme après une perturbation importante tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération. Le résultat de la réaction du système implique de grandes excursions des angles des rotors des générateurs est influencée par la relation non linéaire de la puissance par rapport à l'angle [38]. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (cas 1) et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. L'instabilité transitoire peut se résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation, instabilité de multi oscillations (cas 2). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes comme il est montré dans **la figure 18**. [39]

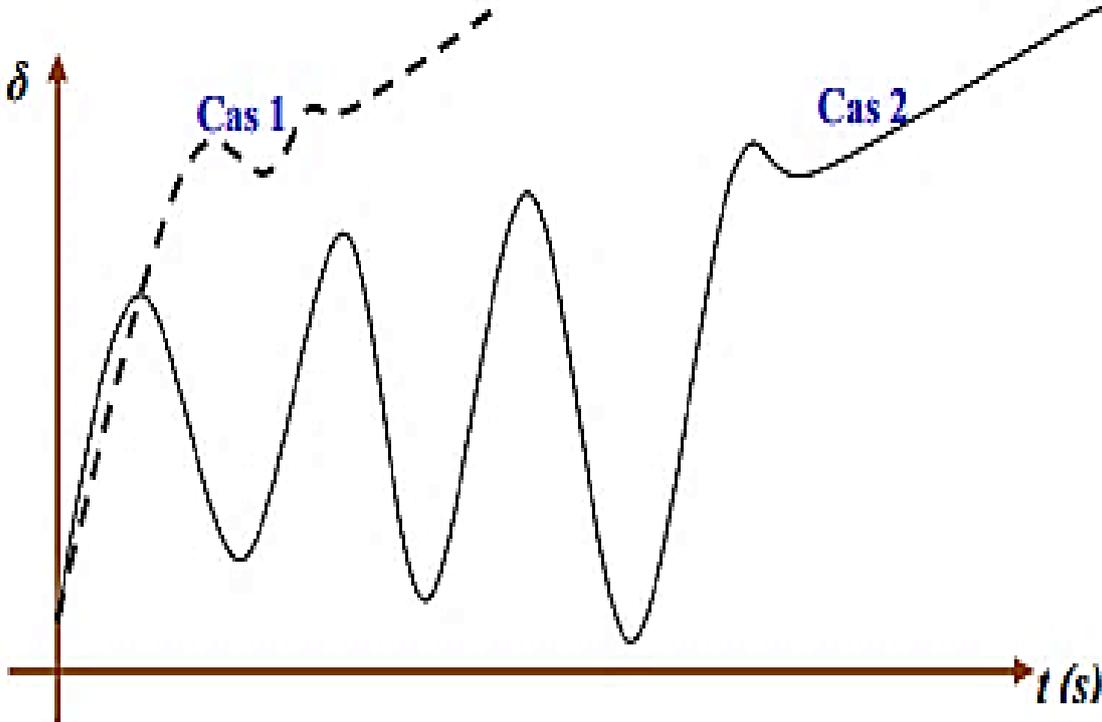


Figure N°18 : Variation d'angle de rotor

Section 02 : stabilité transitoire :

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude dans cette section cible l'objectif de la stabilité transitoire, les Facteurs influant sur la stabilité du transitoire, Caractéristiques d'un réseau Avant, pendant et après une perturbation dans le cadre de stabilité transitoire ensuite nous allons présenter le modèle mathématique. Enfin le temps critique d'isolement de défaut

2.1 L'objectif de la stabilité transitoire : [40]

Le but principal de l'étude de la stabilité transitoire est de déterminer et de connaître le temps nécessaire pour éliminer le défaut afin que le réseau reste dans un état stable. Grâce à cela, il est possible d'identifier les défauts critiques du réseau dans les études d'urgence en utilisant des temps critiques pour éliminer les défauts des machines, Par conséquent, les études sont basées sur la recherche du comportement dynamique des variables qui affectent le travail des générateurs, vitesse, courant, ainsi que l'angle, car ces variables déterminent le temps critique pour éliminer le défaut et ainsi connaître la stabilité ou la non stabilité du réseau.

Aussi, les études de ST permettent une meilleure compréhension du comportement des réseaux électriques et facilitent la mise en œuvre des politiques de planification et d'opération.

Elles sont également utiles pour valider si les nouveaux circuits répondent aux critères établis dans les normes techniques de chaque pays et pour vérifier le réglage et le contrôle des Équipements de protection.

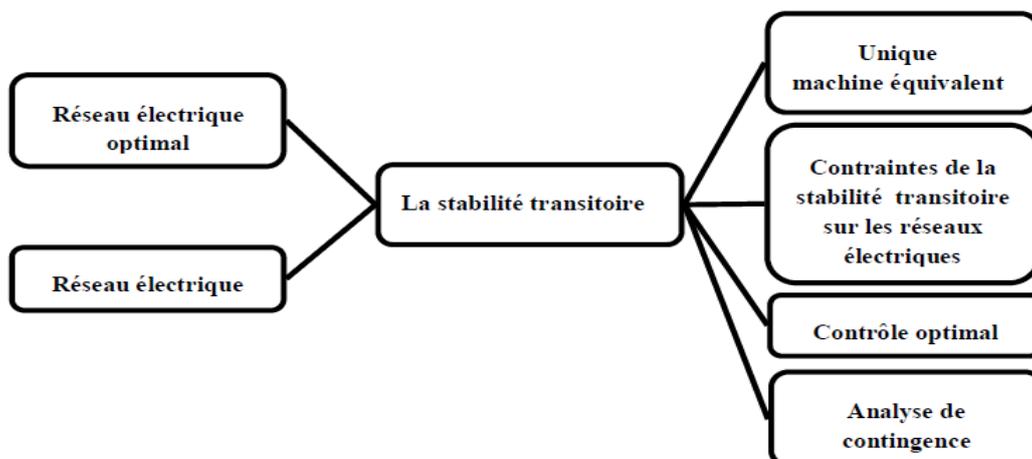


Figure N° 19 : Les buts de la stabilité transitoire

2.2 Les Facteurs influant sur la stabilité du transitoire : [27]

Le système électrique est un système hautement non linéaire dont la dynamique de performance est influencée par un large éventail de paramètres. La stabilité transitoire dépend :

- Type de perturbation ;
- Durée de perturbation ;
- Lieu de perturbation ;
- Types de sources ;
- Types de récepteurs ;
- Architecture du réseau ;
- Mode d'exploitation du réseau ;
- Causes d'instabilités prises en compte ;
- Performance des systèmes de protection (relais, réenclenchement) ;
- Point de fonctionnement avant défaut (niveau de puissance active, topologie du réseau, degré d'excitation des machines, etc.);
- Caractéristiques dynamiques des générateurs, des charges, des régulateurs, des stabilisateurs ;

2.3 Caractéristiques d'un réseau Avant, pendant ET après une perturbation dans le cadre de la stabilité transitoire: [40]

Les perturbations sont des changements soudains et irréguliers d'une ou plusieurs variables d'un système. Pour faciliter la simulation, les études ST ne considèrent généralement que les défauts triphasés à proximité du jeu de barres, avec ou sans ouverture de ligne.

La Figure20 présente un comportement typique de la vitesse angulaire de trois machines synchrones. Avant le défaut (0 à 300 ms), le réseau se retrouve en condition stable. Quelques Instants après, un défaut est survenu sur une des lignes ; les machines souffrent de changements soudains de vitesse pour compenser les altérations électriques.

Cette période marque aussi le début de la ST. Afin d'éviter la destruction de l'équipement et de diminuer l'impact économique du défaut, le système de protection déclenche une ligne à 600ms .Dans la Figure20, la vitesse angulaire d'un des générateurs augmente plus rapidement que les autres. Si, à la fin de la simulation, un ou plusieurs générateurs ne reviennent pas à des

conditions d'opération, on dit que le réseau est instable et ces machines sont appelées critiques. Le moment, à partir duquel la simulation présente des machines critiques, est appelé temps critique d'élimination de défaut ou CCT (*critical clearing time*).

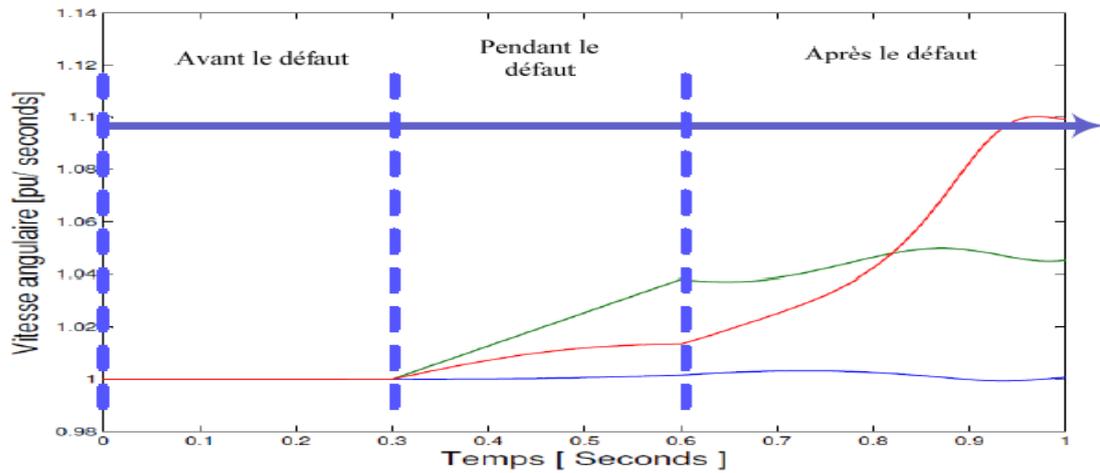


Figure N° 20 : Conditions avant, pendant et après un défaut

La stabilité d'un réseau dépend principalement des deux aspects suivants :

1. Des conditions initiales du réseau au régime permanent : données dynamiques des générateurs et de l'écoulement de puissance ;
2. De la sévérité du défaut : durée et localisation.

2.4 LE MODELE MATHÉMATIQUE DE LA STABILITÉ TRANSITOIRE :

2.4.1 HYPOTHESES DU MODELE CLASSIQUE : [41]

Le modèle classique de la ST est supporté par les hypothèses suivantes

- La puissance mécanique d'entrée reste constante pendant la simulation.
- L'amortissement est négligeable.
- Le modèle de tension constante derrière la réactance pour la machine synchrone est valide.
- L'angle du rotor coïncide avec celui de la tension derrière la réactance transitoire.
- Les charges sont représentées par des impédances (ou admittances) constantes
- le fonctionnement de la machine est en mode équilibré et, par conséquent, on ne considère que la réactance de séquence positive ;
- L'excitation de la machine est constante
- La saturation, les pertes et la saillance de pôles sont négligées.

2.4.2 Équation de mouvement (swing équation) : [41] [42] [43]

La puissance d'accélération P_a et l'angle du rotor δ sont connus sous le nom d'équation de swing. La solution de l'équation de swing montrera comment l'angle du rotor change par rapport au temps suite à une perturbation. Le tracé de δ en fonction du temps t est appelé la courbe de swing. Une fois la courbe d'oscillation connue, la stabilité du système peut être évaluée. Le flux de puissance mécanique et électrique dans un générateur et un moteur est illustré à la **Figure N°21**.

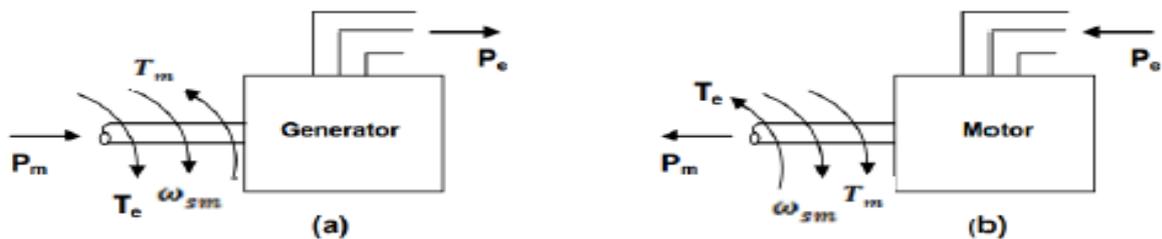


Figure N°21 : Le flux de puissance mécanique et électrique dans un générateur et un moteur

Considérons une génératrice synchrone illustrée à la **Figure N°21** (a) développant un couple électromagnétique T_e . Elle reçoit une puissance mécanique P_m au couple d'arbre T_e et tourne à la vitesse synchronisée ω_{sm} via l'arbre de la machine motrice. Il fournit la puissance électrique P_e au réseau électrique via les barres omnibus. Si T_m est le couple mécanique moteur, alors en régime permanent avec pertes négligées on a :

$$T_e = T_m \tag{2.1}$$

En raison d'une perturbation, un couple d'accélération ($T_m > T_e$) ou de décélération ($T_m < T_e$) T_a sur un rotor est produit :

$$T_a = T_m - T_e \tag{2.2}$$

Si J est le moment d'inertie combiné du moteur principal et du générateur, en négligeant le frottement et le couple d'amortissement T_r , à partir des lois de rotation :

$$T_a = T_m - T_e - T_r \tag{2.3}$$

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \tag{2.4}$$

Où θ_m est le déplacement angulaire du rotor par rapport à l'axe de référence fixe sur le rotor. La référence angulaire est choisie par rapport à un référentiel en rotation synchrone se déplaçant à vitesse angulaire constante ω_{sm} soit :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.5)$$

Avec :

ω_{sm} : vitesse de rotation synchrone en rd/s

δ_m Angle mécanique

t : temps

Où δ_m est la position avant la perturbation du défaut à l'instant $t=0$ La dérivation de l'équation (2.5) donne la vitesse angulaire du rotor :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.6)$$

Et l'accélération du rotor est

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.7)$$

En remplaçant (2.7) par (2.4):

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.8)$$

En multipliant (2.8) par ω_m on obtient :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.9)$$

Étant donné que la vitesse angulaire multipliée par le couple est égale à la puissance, l'équation ci-dessus peut être écrite en termes de puissance :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.10)$$

La quantité $J\omega_m$ est appelée la constante d'inertie et elle est notée M . L'équation de swing en termes de constante d'inertie devient :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

Avec :

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.12)$$

Où : W_k est l'énergie cinétique emmagasinée par la machine à la vitesse synchrone en joules [J].

Donc l'expression de M est comme suit :

$$M = \frac{2 W_k}{\omega_m} \quad (2.13)$$

Si on suppose que les variations de vitesse ω_m restent toujours faibles durant longtemps avant que la stabilité soit perdue, alors : $\omega_m = \omega_{sm}$:

$$M = \frac{2 W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.14)$$

On doit écrire l'équation de mouvement en fonction de l'angle électrique δ , la relation entre l'angle mécanique et l'angle électrique est :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.15)$$

Alors l'équation de mouvement en fonction de l'angle électrique est :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.16)$$

Conversion de l'équation de mouvement en unité relative :

$$\frac{2}{p} \frac{2 W_k}{\omega_{sm} S_b} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_b} - \frac{P_e}{S_b} \quad (2.17)$$

Avec : $H = \frac{W_k}{S_b}$

La constante d'inertie H (en sec) de la machine est définie par le rapport d'énergie cinétique W_k emmagasinée par la machine à la vitesse synchrone en joules, et de la puissance de base S_b de la machine en volt ampère [VA].

Donc l'équation vaut :

$$\frac{2}{p} \frac{2H}{\omega_{sm}} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(pu) - P_e(pu) \quad (2.18)$$

De l'équation (2.5), on tire :

$$\omega sm = \frac{2}{p} \omega s \quad (2.19)$$

Alors :

$$\frac{2H}{\omega s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = Pm(pu) - Pe(pu) \quad (2.20)$$

La courbe de swing, qui est le tracé de l'angle de couple δ en fonction du temps t , peut être obtenue en résolvant l'équation de swing. Deux courbes d'oscillation typiques sont illustrées à la figure :

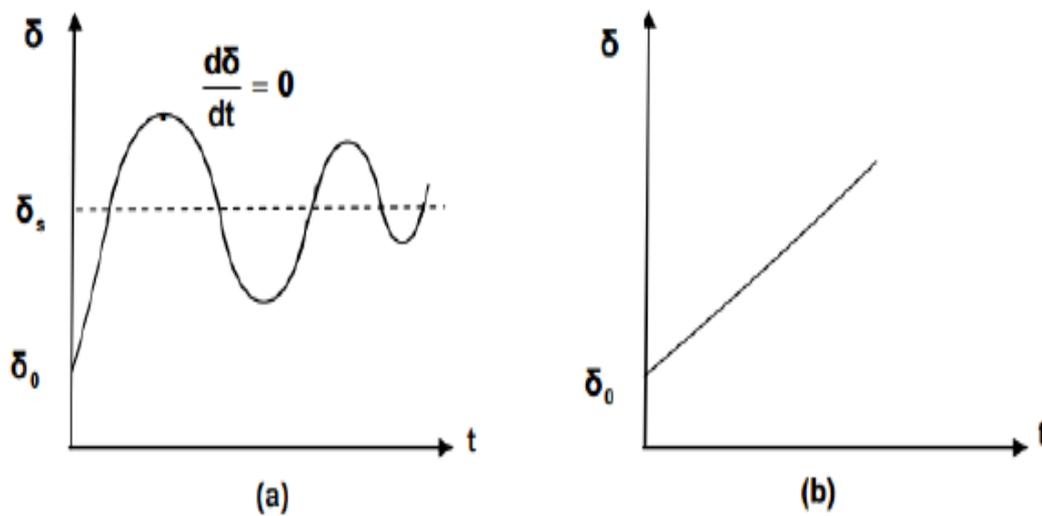


Figure N°22 : Courbe d'oscillation

Les courbes de balancement sont utilisées pour déterminer la stabilité du système. Si l'angle du rotor δ atteint un maximum puis diminue, cela montre que le système a une stabilité transitoire. Par contre si l'angle du rotor δ augmente indéfiniment, alors cela montre que le système est instable.

Pour un système multi machines, s'il y a un déséquilibre des couples agissants sur le rotor de la i ème machine, cette dernière va accélérer ou ralentir selon l'équation du mouvement suivante :

$$\frac{2H_i}{\omega s} \frac{d\omega_i}{dt} = Pm(pu) - Pe_i(pu) \quad (2.21)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega s \quad (2.22)$$

Où la puissance électrique est définie par les équations suivantes :

$$Pe_i = |E_i|^2 |G_{ii}| + \sum_{j=1}^n |E_i| |E_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i(t) + \delta_j(t)) \quad (2.23)$$

P_m : Puissance mécanique de chaque machine.

P_{ei} : Puissance électrique de chaque machine.

ω_i : vitesse de chaque machine.

δ_i : L'angle interne de chaque.

E_i : Tension interne de chaque.

Y_{ij} : Les éléments de la matrice d'admittance.

θ_{ij} : Les angles des éléments de la matrice d'admittance

2.5 Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID) : [42] [44] [45]

CCT (Critical Clearing Time) est le temps critique ou le temps maximum nécessaire au générateur synchrone pour maintenir l'état du générateur reste en synchronisation. Le système électrique devient instable lorsque l'angle du rotor δ devient plus grand. Cette augmentation de δ affecte considérablement le changement de puissance de sorte que le temps d'isolation critique peut être déterminé en obtenant l'angle du rotor. Si une perturbation survient et que le système ne peut pas la gérer, le système sera déclaré instable.

Cette instabilité affecte l'ensemble du système. Il est donc nécessaire de déterminer le temps critique d'isolement de défaut pour éviter toute perturbation.

Pour calculer ce temps, plusieurs méthodes sont développées, mais la méthode dichotomique recherche le TCID (CCT) en réalisant plusieurs simulations numériques successives dans un intervalle de temps de recherche choisi en le divisant en deux à chaque itération, est la plus précise. Cette procédure itérative donne sans aucun doute la valeur la plus précise du TCID. Mais le nombre de simulation et le temps de calcul sont très importants.

A partir de l'équation de mouvement de la machine si la puissance électrique pendant le défaut est nulle, l'équation d'oscillation est linéaire et peut être résolue directement par intégration :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m \quad (2.24)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2.25)$$

Par l'intégrale on trouve :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} P_m t + C \quad (2.26)$$

A $t=0$ $\frac{d\delta}{dt} = 0$ alors :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega s Pm}{2H} t \quad (2.27)$$

Par l'intégrale on trouve :

$$\delta = \frac{\omega s Pm}{2H} t^2 + \delta_0 \quad (2.28)$$

A $t=t_{cr}$ on a : $\delta = \delta_{cr}$ alors :

$$\delta_{cr} = \frac{\omega s Pm}{2H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad (2.29)$$

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr}-\delta_0)}{\omega s Pm}} \quad (2.30)$$

Section 03 : Les Méthodes d'évaluation et d'amélioration de la stabilité transitoire :

3.1 Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire :

3.1.1 Méthodes d'intégration numériques : [46] [47]

L'étude de la stabilité en utilisant cette méthode consiste à trouver un modèle mathématique capable de représenter le réseau et la dynamique des machines durant trois phases importantes : avant, pendant et après une perturbation quelconque. Les équations sont résolues dans le domaine temporel en se servant des méthodes d'intégration numérique. Les plus utilisées sont la méthode d'Euler modifiée et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Habituellement, pour trouver la limite de stabilité transitoire ou le temps critique d'isolement de défaut (CCT), cette méthode procède par dichotomie.

La **Figure N°23** présente la méthode de dichotomie pour trouver le CCT, dans cet exemple, le CCT est trouvée en quatre étapes. Premièrement, nous commençons par un intervalle $[t_{min1}, t_{max1}]$, quand $t = t_{min1}$ le système est stable et quand $t = t_{max1}$ le système est instable. Puis, nous divisons l'intervalle de recherche en deux $\frac{t_{max1} + t_{min1}}{2}$. Quand **tmax2** = $\frac{t_{max1} + t_{min1}}{2}$ le système est instable.

Deuxième étape, nous divisons le nouvel intervalle en deux et nous voyons l'état du système...etc

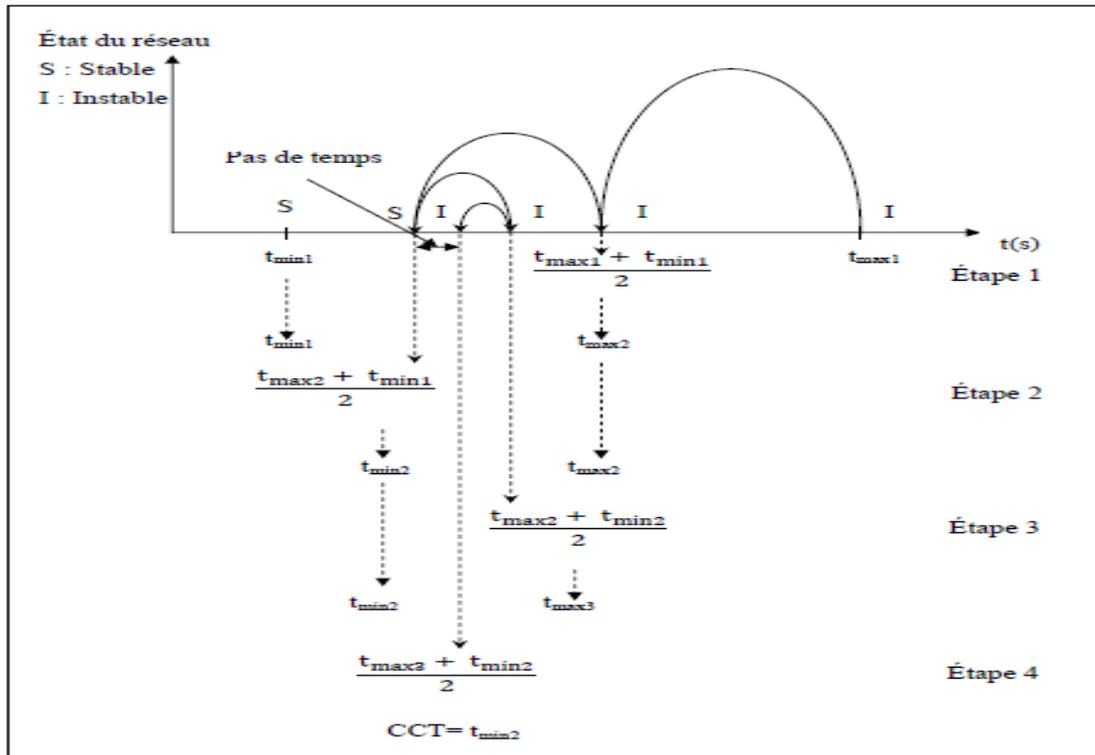


Figure N°23 : Principe de la méthode dichotomie pour trouver le CCT

La simulation temporelle est un procédé précis, même pour un système de puissance complexe et large. Cependant, les méthodes de simulation temporelle sont coûteuses en temps de calcul.

3.1.2 Méthodes directes ou méthodes énergétiques :

Les méthodes énergétiques permettent de déterminer les limites de la stabilité transitoire sans recourir à la résolution des équations d'état différentielles du réseau électrique. Ces méthodes utilisent des techniques se basant sur la fonction d'énergie transitoire. Ou la méthode critère des aires égales est aussi très utilisée en raison de son efficacité d'évaluer l'indice de stabilité et sa simplicité le (temps de calcul court) [48] [49]

3.1.2.1 Méthode graphique (Critère d'égalité des aires) : [39] [41]

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion). Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe ($P-\delta$) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor.

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission, (Figure N°24).

Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E en série avec une réactance X_d (modèle classique). La ligne X_l et la réactance sont représentés par la réactance X_{eq}



Figure N°24 : Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

$$E = j(X_d + X_l)I + V_b \quad (2.31)$$

$$I = \frac{E \angle \delta - V_b \angle 0}{jX_d + jX_l} \quad (2.32)$$

Ou $X_{eq} = X_d + X_l$

La puissance complexe circulant dans le bus infini :

$$S = V_b I^* \quad (2.33)$$

$$S = V_b \angle 0 \left(\frac{(E \angle \delta) - (V_b \angle 0)}{-jX_{eq}} \right) \quad (2.34)$$

$$S = \frac{(V_b \angle 0 E \angle \delta) - (V_b^2 \angle 0)}{X_{eq} \angle -90} \quad (2.35)$$

$$S = \frac{V_b \cdot E \angle \delta}{X_{eq} \angle -90} - \frac{V_b^2 \angle 0}{X_{eq} \angle -90} \quad (2.36)$$

$$S = \frac{V_b}{X_{eq}} \angle 90 - \delta - \frac{V_b^2}{X_{eq}} \angle 90 \quad (2.37)$$

La puissance de sortie réelle du générateur est :

$$P = \frac{EV_b}{X_{eq}} \cos(90 - \delta) - \frac{V_b^2}{X_{eq}} \cos(90) \quad (2.38)$$

$$P = \frac{EV_b}{X_{eq}} \cos(90 - \delta) + 0 \quad (2.39)$$

$$P = \frac{EV_b}{X_{eq}} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (2.40)$$

Considérons un défaut, tel un défaut sur la ligne de transmission, appliqué au système précédent disparaissant après quelques périodes du système. Ceci va modifier l'écoulement de puissance

et, par conséquent, l'angle de rotor δ . Retracer la courbe (P- δ) en tenant compte de ce défaut, **Figure N° 25** En dessous de cette courbe, nous pouvons considérer deux zones :

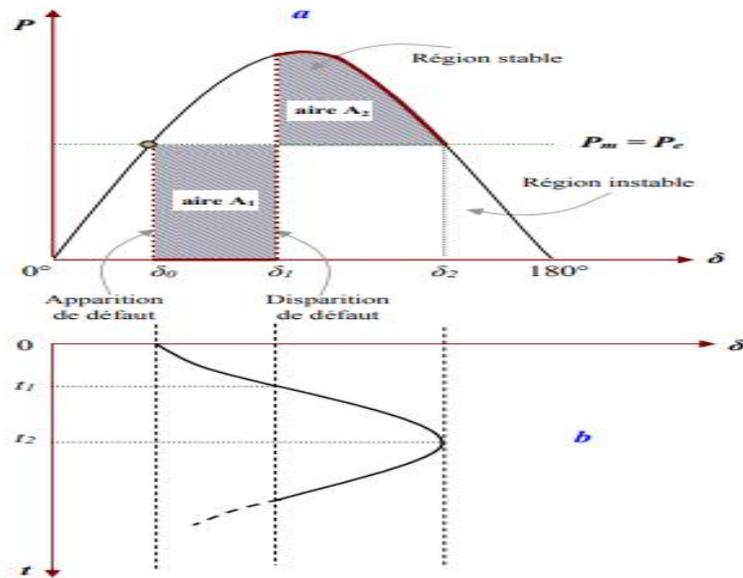


Figure N° 25: Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission

- La première zone (zone A1, zone d'accélération) se situe au-dessous de la droite horizontale correspondante au point de fonctionnement initial (la droite de charge). Elle est limitée par les deux angles de rotor (δ_0 et δ_1) correspondants à l'apparition et à la disparition de défaut. Cette zone est caractérisée par l'énergie cinétique stockée par le rotor du fait de son accélération $P_m > P_e$
- La deuxième zone (zone A2, zone de décélération), qui commence après l'élimination du défaut, se situe en dessus de la droite de charge : elle est caractérisée par la décélération du rotor $P_m < P_e$

Si le rotor peut rendre dans la zone A2 toute l'énergie cinétique acquise durant la première phase, le générateur va retrouver sa stabilité. Mais si la zone A2 ne permet pas de restituer toute l'énergie cinétique, la décélération du rotor va continuer jusqu'à la perte de synchronisme.

La relation entre les aires des zones (A1 et A2) et la stabilité transitoire peut être mathématiquement expliquée comme suit :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m(pu) - P_e(pu)) \quad (2.41)$$

En multipliant cette équation par $2 \frac{d\delta}{dt}$ nous obtenons :

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{H} \frac{d\delta}{dt} (P_m - P_e) \quad (2.42)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{\omega_s}{H} \frac{d\delta}{dt} (P_m - P_e) \quad (2.43)$$

En intégrant l'équation (2.41) en fonction du temps, on obtient :

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + Cst = \int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{\omega_s}{H} (P_m - P_e) \quad (2.44)$$

δ_0 : l'angle du rotor, initial, à l'instant de l'apparition du défaut.

δ_2 : l'angle du rotor à la fin de la période transitoire

Ainsi, lorsque : $t=0 \Rightarrow \delta=\delta_0 \Rightarrow$ la constante $\frac{d\delta}{dt} = 0$

Après l'élimination du défaut, l'angle δ va s'arrêter de varier et le générateur va retrouver sa vitesse de synchronisme, lorsque $\frac{d\delta}{dt} = 0$

Par conséquent, l'équation (2.43) s'écrit comme suit :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.45)$$

Alor :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.46)$$

Où : δ_1 est l'angle de rotor à l'instant de l'élimination de défaut.

$$A1 = A2 \quad (2.47)$$

Ainsi, la limite de la restauration de la stabilité transitoire se traduit mathématiquement par l'égalité des aires de la zone A1 et de la zone A2 : cette condition est appelée critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion).

3.1.3 Méthodes hybrides : [50]

Les méthodes hybrides s'appuient sur une combinaison des deux méthodes décrites ci-dessus pour la détermination des machines critiques et de la marge de stabilité, lesquels paramètres servent à décrire la stabilité du système.

3.2 Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire :

Compte tenu de son importance dans la planification, la conception et l'exploitation des réseaux électriques, l'amélioration de la stabilité transitoire reste un défi majeur pour les ingénieurs afin d'éviter tout événement pouvant entraîner une panne. Les solutions possibles pour améliorer la stabilité transitoire sont basées sur : [51] [52]

3.2.1 Augmentation de la constante d'inertie des générateurs :

Cette méthode permet au rotor d'accélérer moins vite, quand le réseau subit un défaut Quelconque (équation 2.20). L'énergie cinétique regagnée est réduite et le risque de perdre le synchronisme est alors diminué. Dans la plupart des cas, cette méthode coûte très chère, et ne peut être appliquée que dans des cas particuliers.

3.2.2 Augmentation de la puissance active :

En se référant à l'équation 2.2, on peut remarquer que la marge de stabilité peut être augmentée si en augmentant la puissance active, soit en diminuant la réactance X_{eq} par la construction des lignes en parallèle, soit en augmentant la tension du service.

3.2.3 Implantation des valves rapides des turbines à gaz

L'une des principales raisons de l'instabilité du système électrique est due à l'excès d'énergie fournie par la turbine pendant la période de défaut. La vanne rapide aide à réduire la puissance d'entrée mécanique lorsque le générateur est en accélération pendant le défaut et améliore ainsi la stabilité du système [53]

3.2.4 Installation des protections et des appareils de coupure rapides

Les disjoncteurs à grande vitesse permettent de supprimer le défaut le plus rapidement possible alors que le temps d'accélération du rotor est réduit. Plus le disjoncteur fonctionne rapidement, plus le défaut est éliminé rapidement et mieux le système rétablit les conditions de fonctionnement normales [53]

3.2.5 Installation des résistances d'amortissement

Ce sont des résistances connectées en shunt avec des disjoncteurs rapides afin de réduire L'accélération du rotor après le défaut et par conséquent le risque de perdre le synchronisme Est aussi réduit.

3.2.6 Utilisation des PSS : [54] [55]

Le problème d'oscillations électromécaniques est résolu en ajoutant au générateur un contrôleur spécifique appelé : (Power System Stabilizer (PSS)). Ce contrôleur Détecte les variations de vitesse de rotor ou de puissance électrique du générateur et applique un signal, adapté, à l'entrée

du régulateur de tension. Le générateur peut ainsi produire un couple d'amortissement additionnel qui compense l'effet négatif du système d'excitation sur les oscillations.

Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Un choix adéquat des paramètres des PSS Engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la Stabilité de l'ensemble du système.

Conclusion :

L'objet de ce chapitre était de présenter la littérature académique de l'analyse de la stabilité transitoire d'un réseau électrique.

On a donné un aperçu général sur la stabilité de réseau électrique, définition, notions mathématiques, nécessité, types. Nous avons également présenté la stabilité transitoire sous ses différentes approches : le modèle principal, les caractéristiques, les facteurs influant et la notion TCID ou CCT (Critical Clearing Time) : le temps critique ou le temps maximum nécessaire au générateur synchrone pour maintenir l'état du générateur reste en synchronisation.

CHAPITRE III :
SIMULATION ET ANALYSE
DES RÉSULTAT

Section 01 : simulation et analyse des résultats

Dans cette étude nous utiliserons le programme Power factory pour étudier l'analyse de la stabilité transitoire, il cible les présentations de l'logiciel, Étapes d'analyse de la stabilité transitoire, méthode d'évaluation, Résultats de simulation et interprétation des résultats obtenu dans les trois scénarios (normal, défaut, amélioration).

1.1 Présentation de logiciel digsilent Power Factory [56] :

Le programme de calcul **Power Factory**, tel qu'écrit par **DIGSILENT**, est un outil d'ingénierie assistée par ordinateur pour l'analyse des systèmes de transmission, de distribution et d'alimentation électrique industrielle. Il a été conçu comme un progiciel avancé, intégré et interactif, dédié à l'analyse du système d'alimentation électrique et du contrôle afin d'atteindre les principaux objectifs de planification et d'optimisation de l'exploitation.

Le programme **Power Factory** n'a pas de bouton "Enregistrer" pour les projets. Toutes les modifications apportées à la base de données système sont immédiatement stockées dans la base de données sur disque. Cela signifie que vous pouvez terminer le programme à tout moment sans avoir à enregistrer votre travail au préalable (il est une option pour enregistrer manuellement les scénarios d'opération. Le concept des scénarios d'opération est décrit dans le manuel de l'utilisateur, ils ne font pas encore partie du didacticiel).

Le logiciel ne réactivera pas le dernier projet actif au démarrage. Cependant, les derniers projets actifs sont conservés dans le menu principal Fichier. Pour réactiver un projet récemment actif, il suffit de faire un clic gauche sur l'une de ces entrées.

Ce Tutoriel peut donc être interrompu à tout moment sans suite, et peut être poursuivi à tout moment ultérieurement en réactivant le projet Tutoriel.

"DIGSILENT" est l'acronyme de "Digital Simulation of Electrical Networks". DIGSILENT Version 7 a été le premier logiciel d'analyse de système électrique au monde avec une interface graphique intégrée à une seule ligne. Ce schéma unifilaire interactif incluait des fonctions de dessin, des capacités d'édition et tous les éléments statiques et fonctionnalités de calcul dynamique. Power Factory a été conçu et développé par des ingénieurs et des programmeurs qualifiés possédant de nombreuses années d'expérience dans les domaines de l'analyse et de la programmation des systèmes d'alimentation électrique. La précision et la validité des résultats obtenus avec Power Factory ont été confirmées dans un grand nombre d'implémentations, par des organisations impliquées dans la planification et l'exploitation de systèmes électriques à travers le monde.

Pour répondre aux exigences d'analyse du système d'alimentation des utilisateurs, Power Factory a été conçu comme un outil d'ingénierie intégré pour fournir une suite complète de fonctions d'analyse du système d'alimentation au sein d'un seul programme exécutable. Les fonctionnalités clés incluent :

1. Fonctions centrales de Power Factory : définition, modification et organisation des cas ; noyau numérique routines ; fonctions de sortie et de documentation.
2. Graphique intégré interactif sur une seule ligne et gestion des cas de données.
3. Élément du système électrique et base de données de cas de référence.
4. Fonctions de calcul intégrées (par exemple, calcul des paramètres de ligne et de machine basé sur la géométrie ou les informations de la plaque signalétique).
5. Configuration du réseau du système d'alimentation avec accès SCADA interactif ou en ligne.
6. Interface générique pour les systèmes de cartographie informatisés.

Utilisation d'une base de données unique, avec les données requises pour tous les équipements d'un système électrique (par exemple, ligne données, données du générateur, données de protection, données harmoniques, données du contrôleur), signifie que Power Factory peut exécuter facilement toutes les fonctions de simulation de puissance dans un environnement de programme unique - des fonctions telles que flux de charge, calcul de court-circuit, analyse harmonique, coordination de protection, calcul de stabilité et analyse modale

1.1.1 Interface Utilisateur :

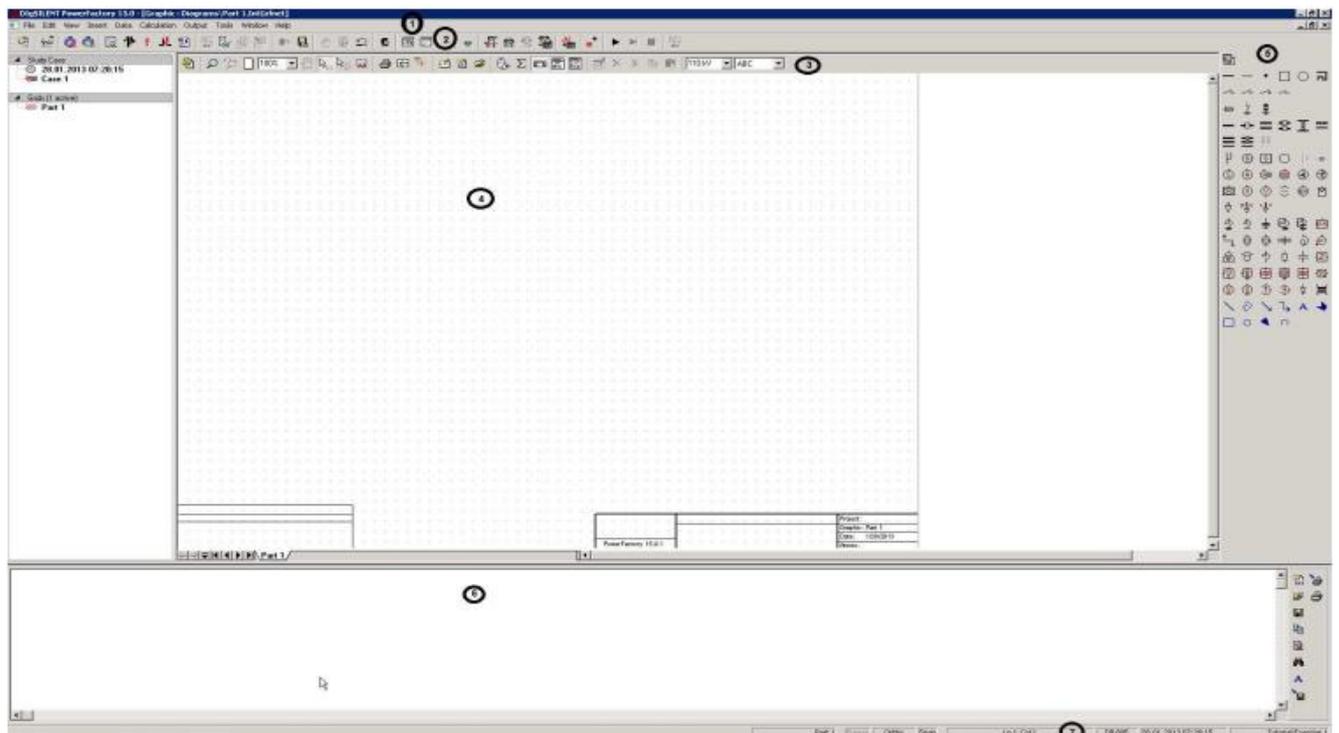


Figure 26 : L'espace de travail après la création d'un nouveau projet

1. La barre de menu principale
2. . La barre d'icônes principale. Celui-ci contient une zone de liste montrant tous les cas d'étude disponibles. Le choix d'un cas d'étude différent dans la liste bascule vers ce cas d'étude. S'il n'y a pas assez d'espace pour afficher tous les boutons du volet, cette barre d'outils est affichée avec de petits boutons fléchés "haut" et "bas", avec lesquels le reste des boutons est accessible.
3. La barre d'icônes de la fenêtre graphique locale. Cette barre d'outils est également affichée avec de petits boutons fléchés "haut" et "bas" qui permettent d'accéder à des boutons supplémentaires si la fenêtre est trop petite pour afficher tous les boutons. Les icônes de cette barre d'icônes dépendent du contenu de la fenêtre affichée. Dans ce cas particulier, il s'agit de la fenêtre graphique avec le schéma unifilaire.
4. La fenêtre graphique à une seule ligne vide avec grille de dessin. La grille montre où les éléments graphiques s'aligneront, si l'option d'accrochage est activée.
5. La boîte à outils de dessin. Ceci est affiché dans son état « ancré » sur le côté droit de la fenêtre graphique.
6. . La fenêtre de sortie. Il s'agit de la fenêtre blanche sous la fenêtre graphique. Il est utilisé pour afficher le texte messages, rapports de texte et affiche également des liens actifs pour le débogage du modèle de données.
7. La barre d'état. Cela donne des informations sur l'état actuel de Power Factory. Par exemple, il indique la position du curseur soit dans la fenêtre graphique, soit dans la fenêtre de sortie. Ça aussi affiche le nom du projet actuellement actif.

1.2 Problématique :

Il peut être résumé comme suit :

- **Scénario N°1** : fonctionnement normal.
- **Scénario N°2** : étude de la stabilité transitoire dans cas de défaut de court-circuit sur les jeux de barres et les lignes (Nous avons choisi bus 1 et bus 6 et la ligne 3 pour la simulation).
- **Scénario N°3** : Amélioration de la stabilité transitoire par la méthode classiques (influence de la résistance statorique des générateurs et la constant d'inertie).

1.3 Étapes d'analyse de la stabilité transitoire :

L'analyse de la stabilité transitoire est appréciée en procédant aux étapes de calcul suivantes par l'outil digsilent power factory.

- 1- calculer le flux de charge.
- 2- calculer les conditions initiales.
- 3- définir évènement.
- 4- éliminer l'évènement.
- 5- Start simulation.

1.4 MÉTHODE D'ÉVALUATION :

Nous créons d'abord un défaut au niveau des lignes et des jeux de barres (buses) , puis nous modifions le temps d'isolement des défauts pour chaque cas en augmentant ou en diminuant TID en suivant la méthode dichotomie pour obtenir les temps critique d'isolement des défauts (TCID), puis nous visualisons les vitesses angulaires et les angles du rotor, pour différents générateurs synchrones du réseau modèle.

L'observation du comportement transitoire du système ne peut révéler Que deux cas :

- Système stable : si toutes les vitesses angulaires des générateurs Tendent vers une valeur fixe très proche de la vitesse du Synchronisme.
- Système instable : si au moins une vitesse angulaire d'un Générateur ne converge pas vers la vitesse de synchronisme.

1.5 Description du réseau étudié :

- 1- jeux de barres → 9
- 2- générateurs → 3
- 3- transformateur → 3
- 4- ligne → 9
- 5- charge → 3

Le réseau test est représenté par le logiciel digsilent power factory comme suit :

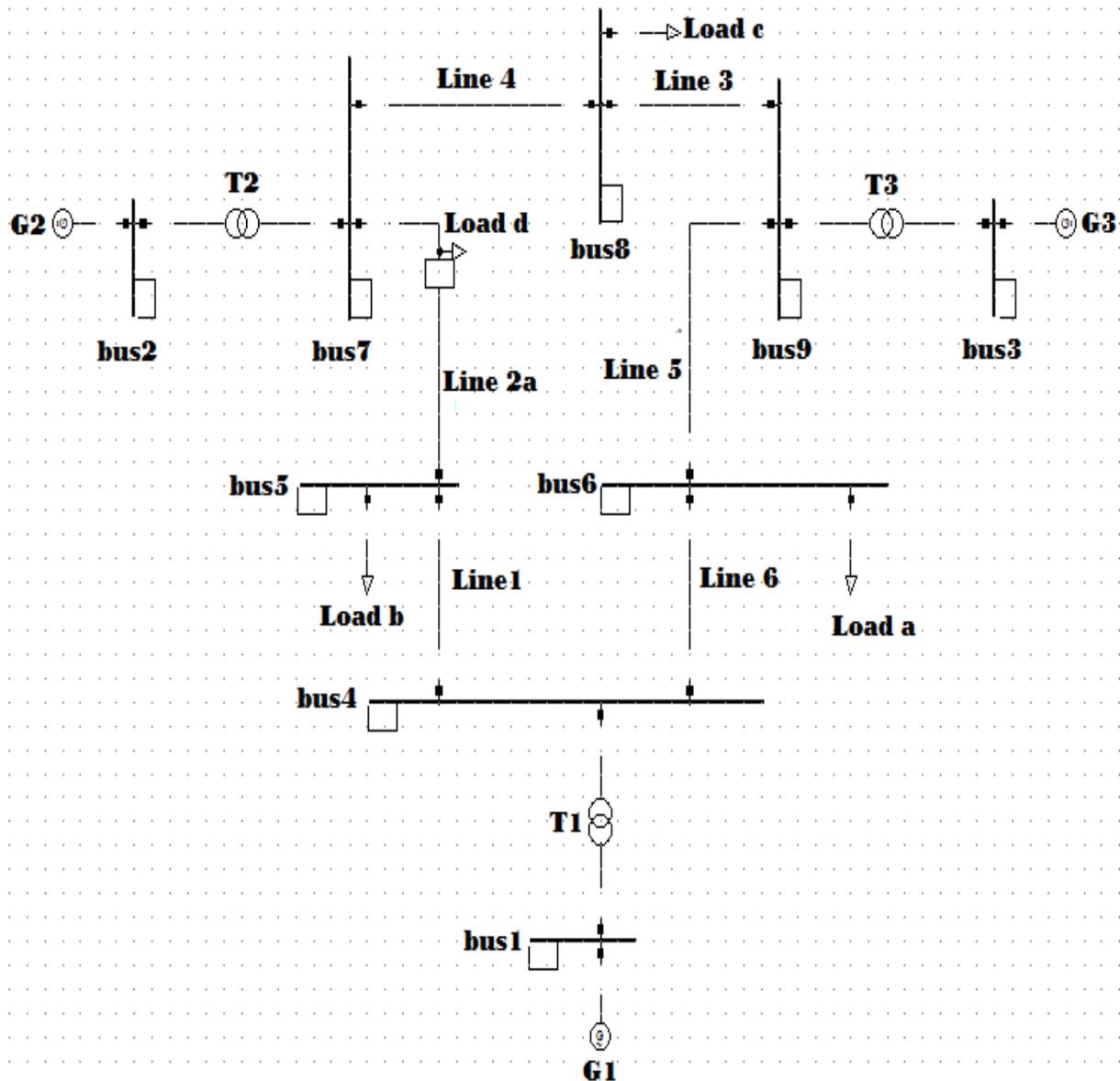


Figure N° 27 : Structure de réseau test.

1.6 Résultats de simulation et interprétation des résultats obtenus ;

1.6.1 Scénario N°1 : (l'Etat normal) :

Après exécution du logiciel digsilent power factory, les résultats de simulation du fonctionnement normal du réseau, à savoir : les angles rotoriques, les vitesses angulaires, les tensions, les puissances Actives et les puissances réactives sont représentés sur les figures ci-dessous.

On constate que le système est parfaitement stable

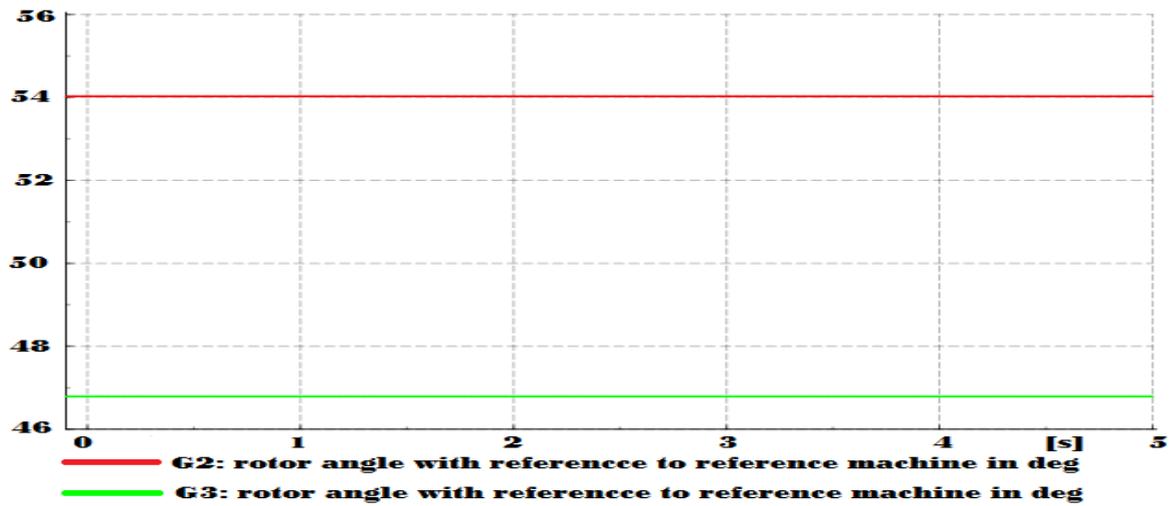


Figure N° 28 : Angles rotoriques des 2 générateurs (cas normal)

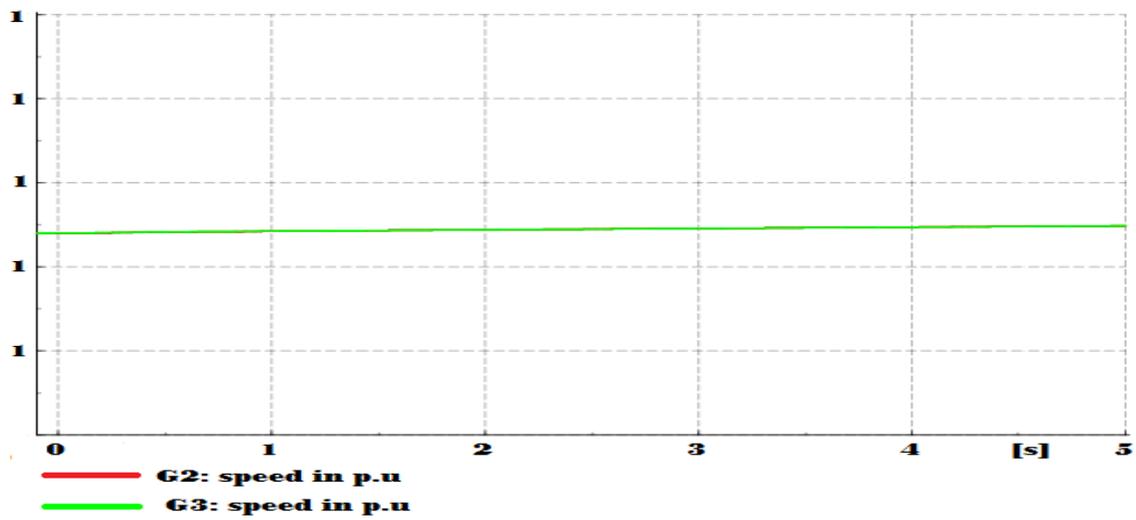


Figure N° 29 : Vitesses angulaires des 2 générateurs (cas normal)

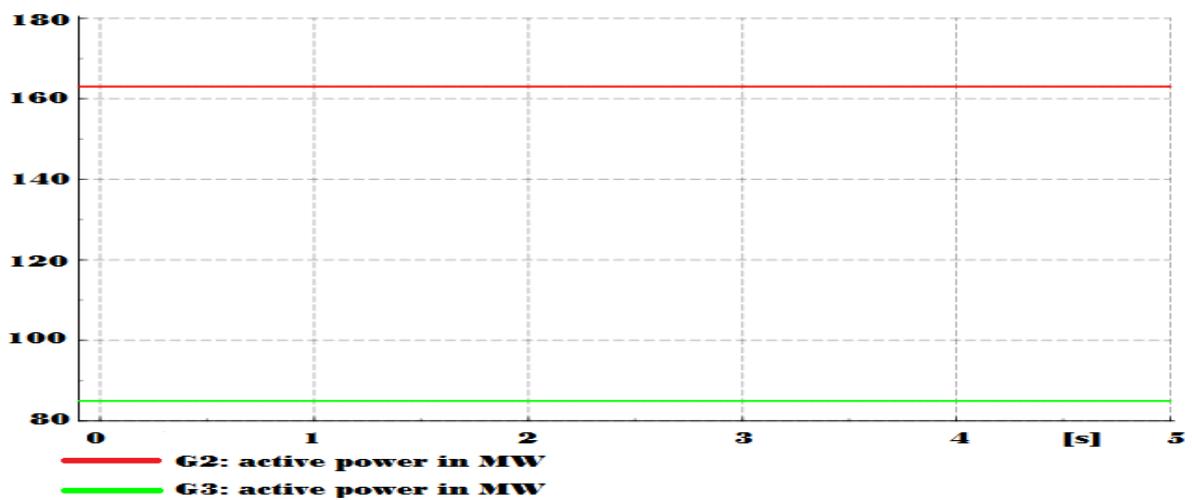


Figure N° 30 : Puissances actives des 2 générateurs (cas normal)

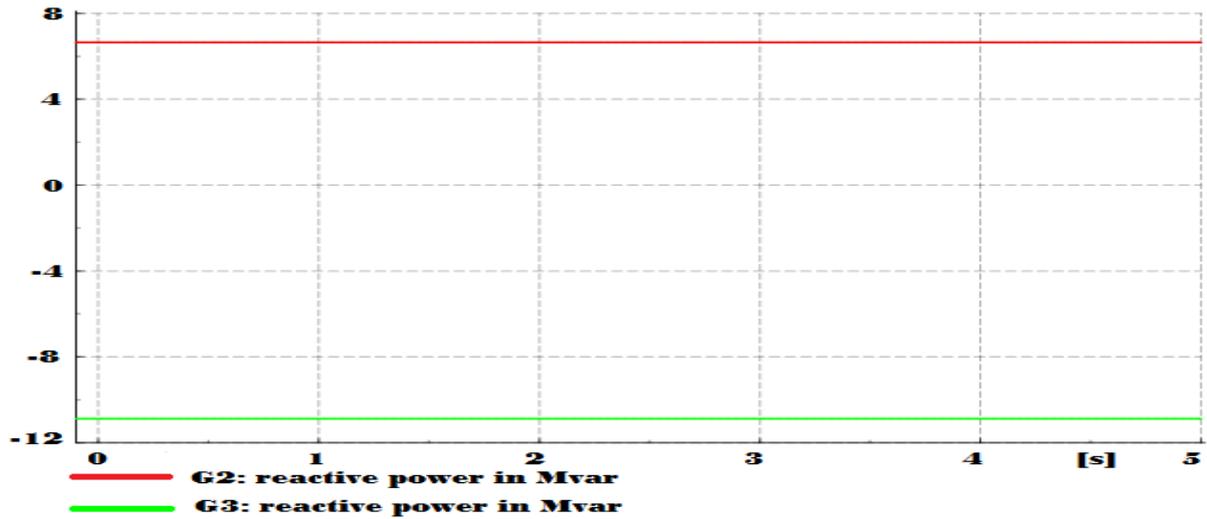


Figure N° 31 : Puissances réactives des 2 générateurs (cas normal)

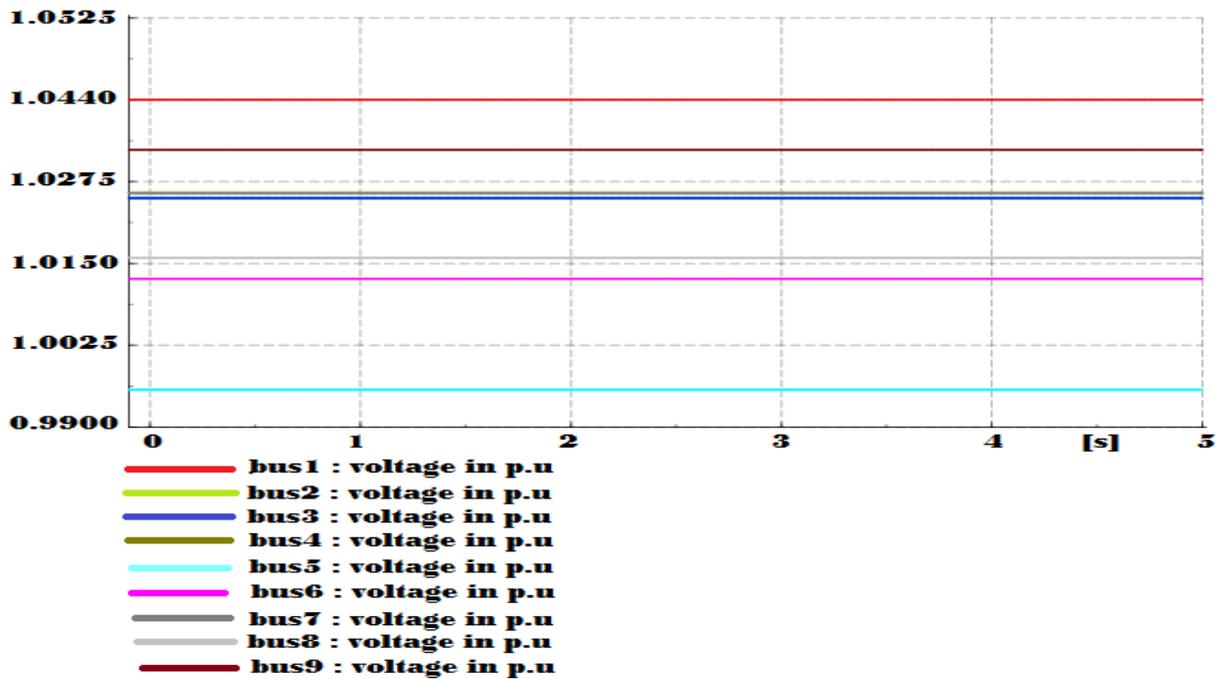


Figure N° 32 : Tensions des jeux de barres (cas normal)

1.6.2 Scénario N°2 : L'état avec défauts :

a) Défaut au bus 1 :

On simule notre réseau avec un temps de défaut $t=0.15s$, les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous :

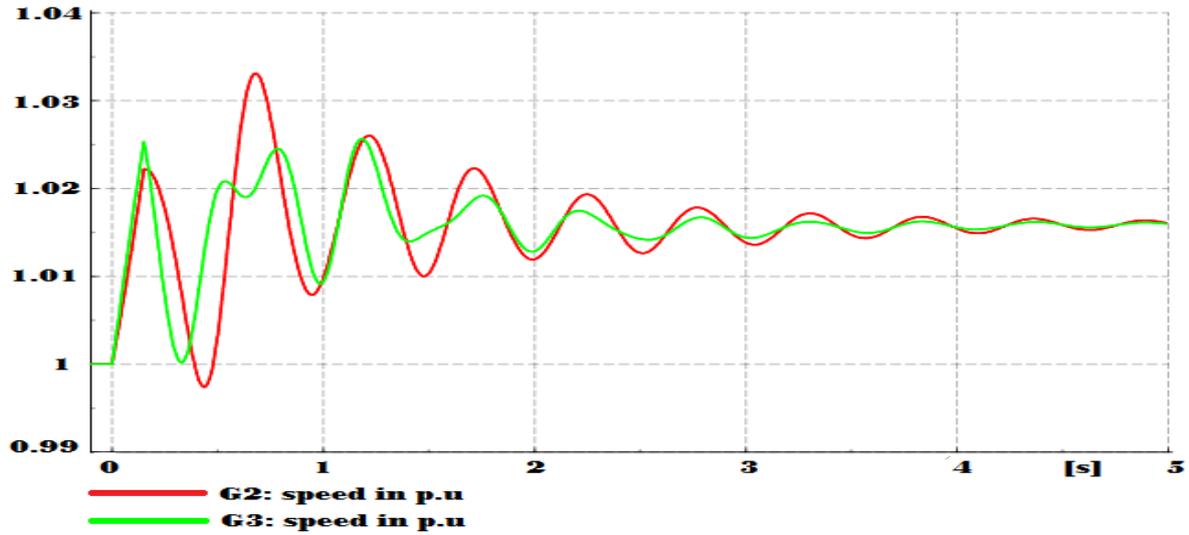


Figure N°33 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=0.15 s

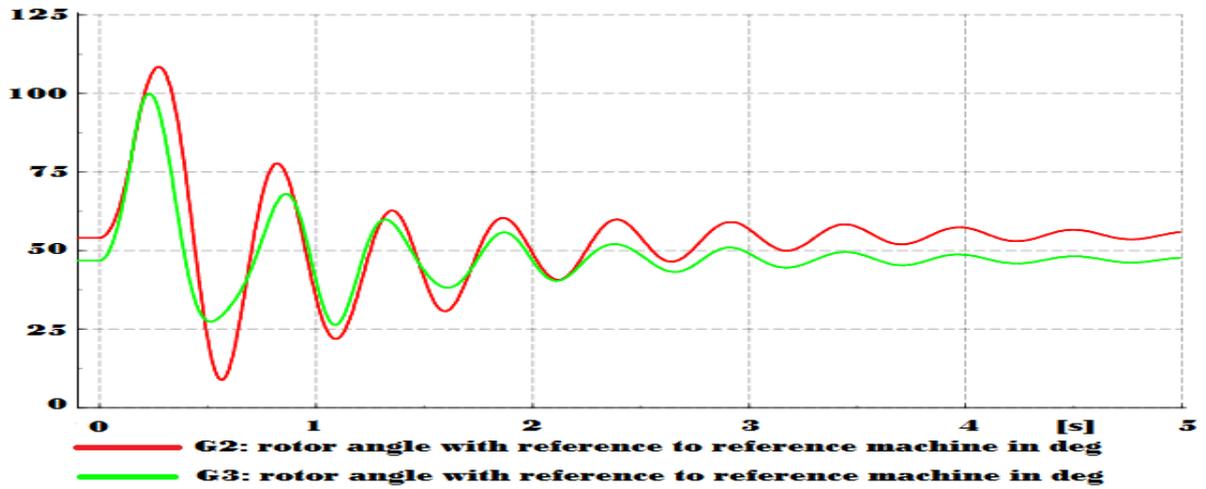


Figure N° 34 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=0.15 s

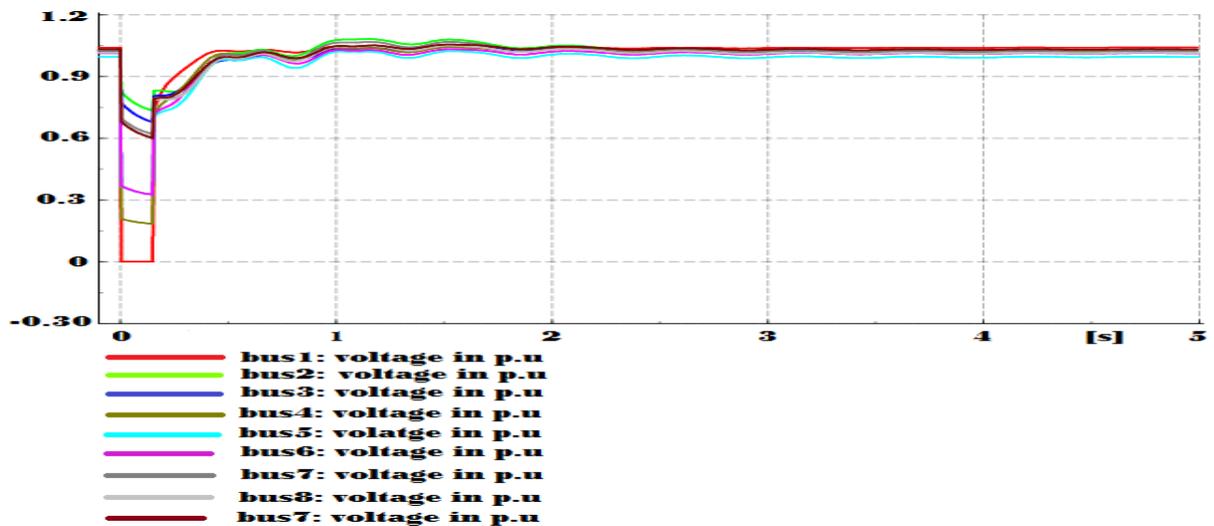


Figure N° 35 : Tensions des jeux de barres à TID=0.15 s

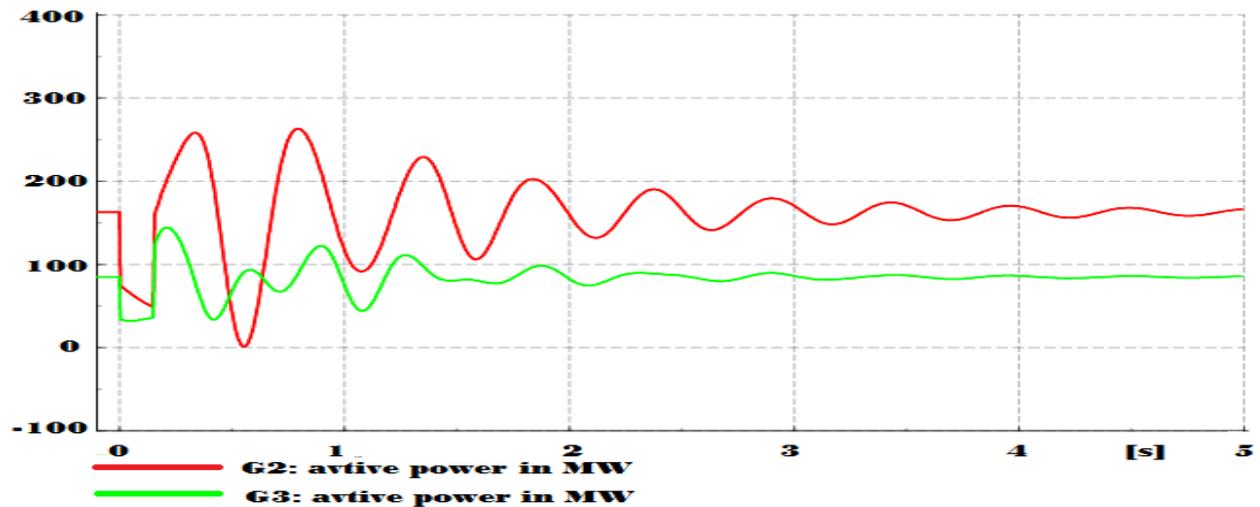


Figure N° 36 : Puissances actives des 2 générateurs à TID=0.15 s

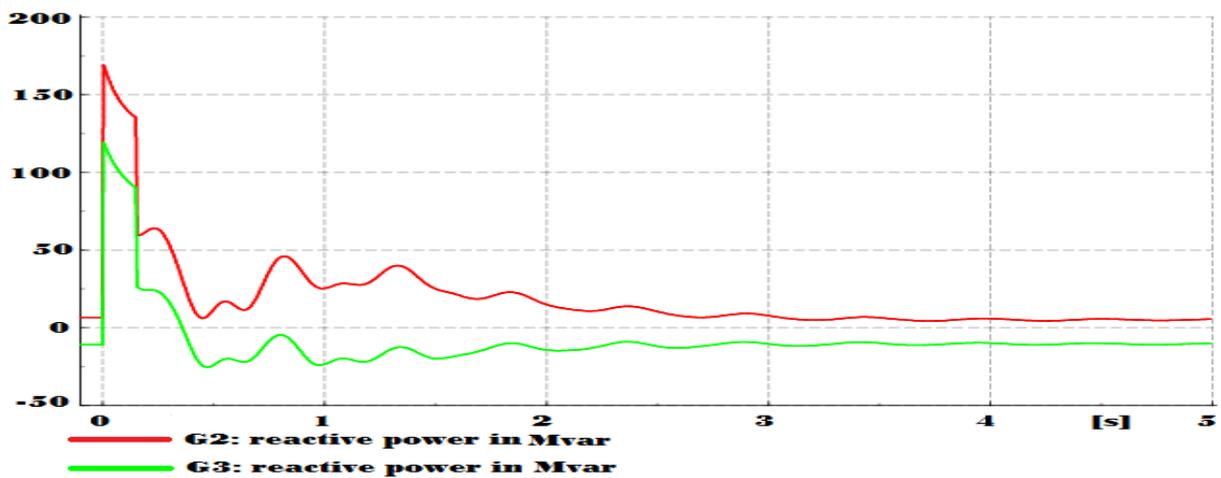


Figure N° 37 : Puissances réactives des 2 générateur à TID=0.15 s

a.1) Interprétation des résultats :

- Lors du défaut, la vitesse angulaire ω_2 et l'angle rotorique δ_2 présentent de fortes oscillations par rapport à la vitesse angulaire ω_3 et l'angle rotorique δ_3 (Figure 33 et 34).
- Nous avons constaté qu'un creux se présente pour chaque tension proche du jeu de barre N°1 une fois que le défaut est éliminé toutes les tensions reprennent leurs formes initiales. (Figure 35).
- nous observons aussi que les puissances P_{s2} présentent de forte oscillation par rapport à celle P_{syn3} . (Figure 36).
- nous observons qu'il y a une surproduction de la puissance réactive (Figure 37).

b) Analyse de la stabilité transitoire :

Sur le même réseau test précédent, on considère un défaut triphasé se produisant, à l’instant $t_1=0$ s au niveau de chaque jeu de barres et les lignes, et s’élimine à $t_2=0.3$ s, le temps critique d’élimination de défaut est déterminé par plusieurs simulations numériques et par l’utilisation de la méthode dichotomie

L’exécution de la simulation nous a permis d’obtenir les résultats de simulations représentées dans les figures qui montrent respectivement les angles rotoriques des générateurs, les vitesses de rotation (cas stable et cas instable) :

b.1) Défaut au bus 1 :

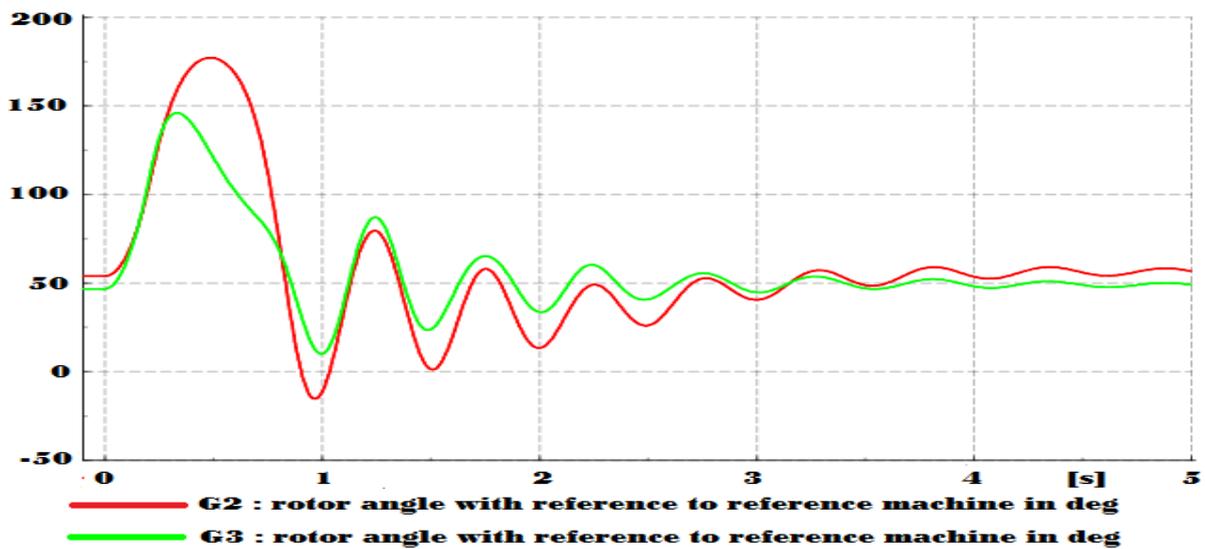


Figure N° 38 : Angles rotoriques des 2 générateurs à $TID=TCID =0,208$ s (système stable)

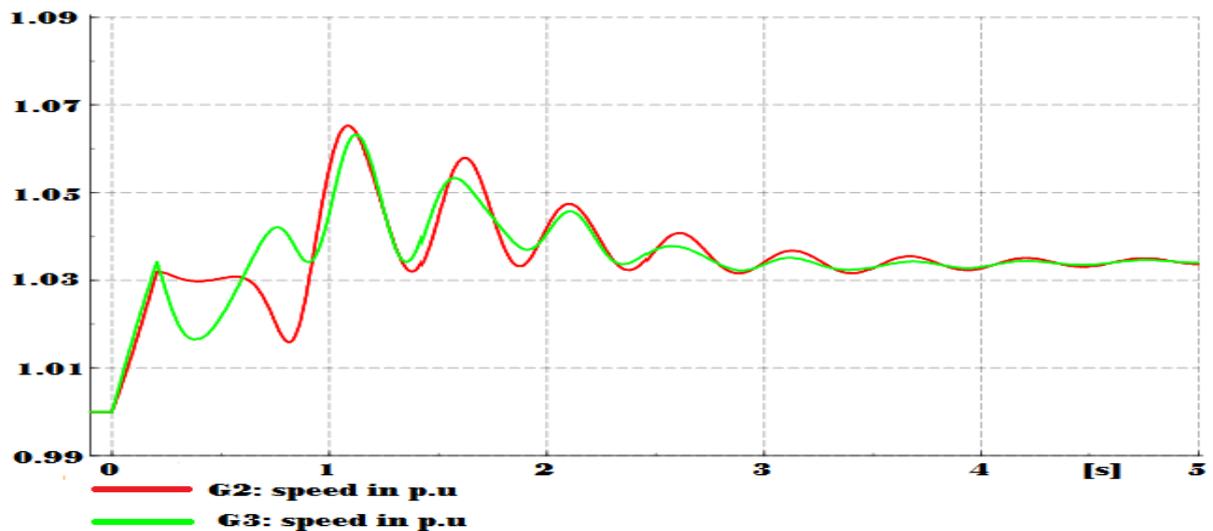


Figure N° 39 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à $TID=TCID =0,208$ s (système stable)

$t_2=TCID =0,208$ s système stable

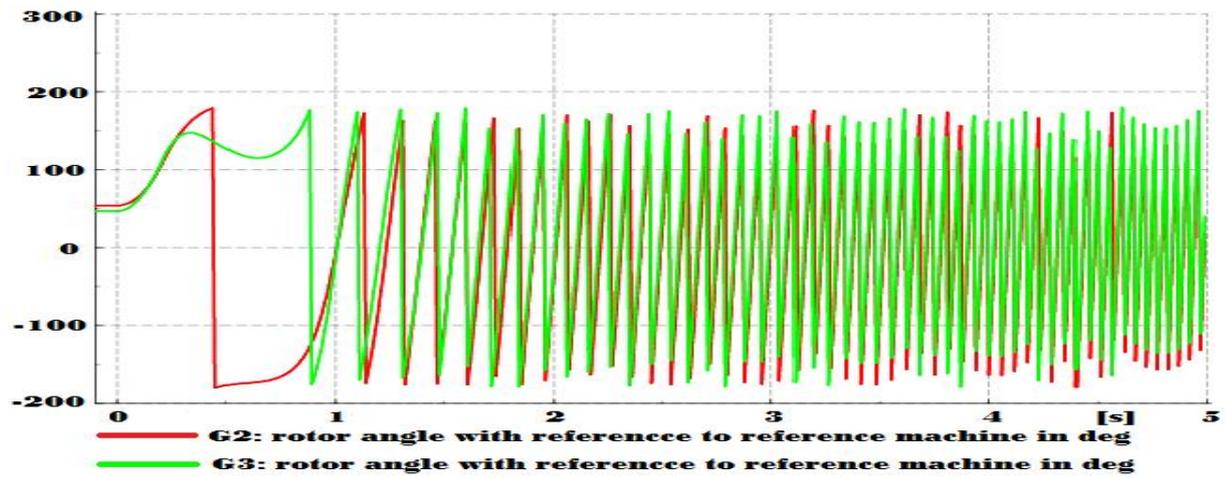


Figure N° 40 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,209 s (système instable)

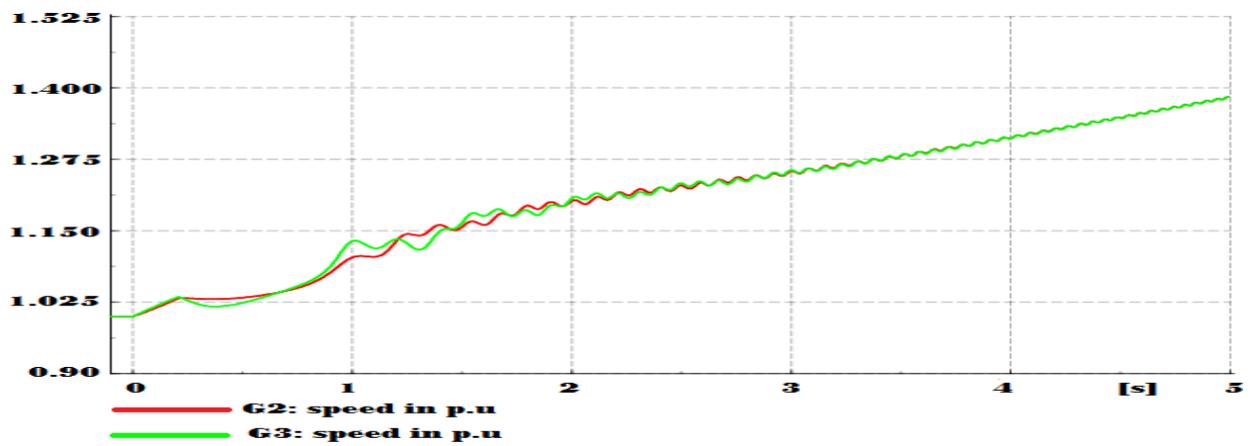


Figure N° 41 : Vitesses angulaires des 2 générateur à TID =0,209 s (système instable)

$t_2 = TID = 0,209$ s système instable

De même, un défaut au bus 6, figures 42, 43 (système stable), figures 44 et 45 (système instable)

b.2) Défaut au bus 6 :

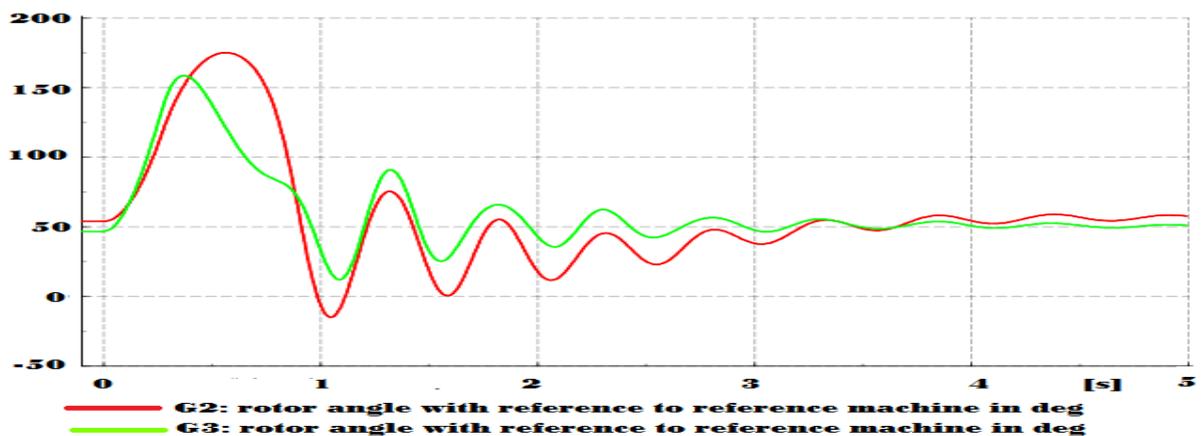


Figure N° 42 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,27 s (système stable)

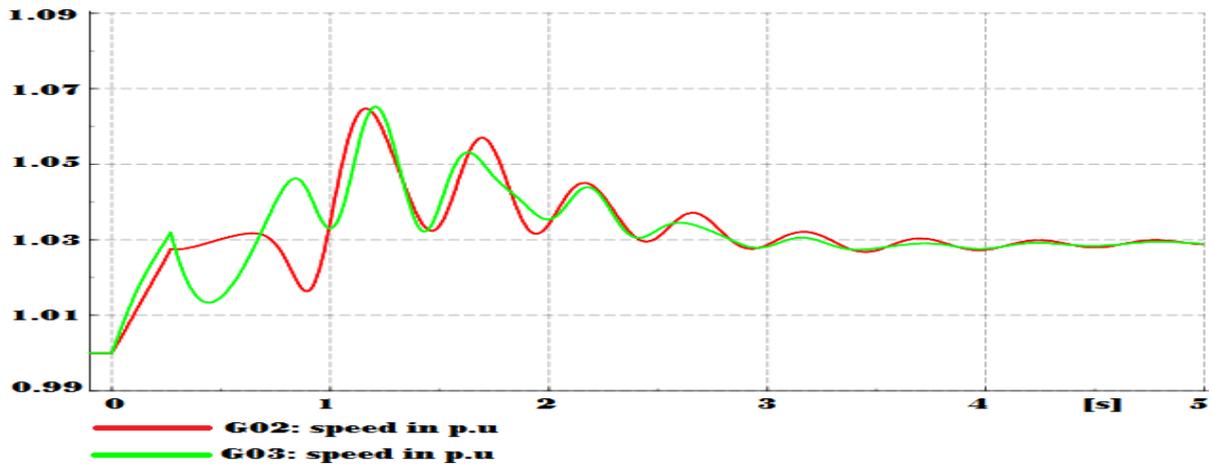


Figure N° 43 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,27 s (système stable)

A $t_2 = TID = TCID = 0,27$ système stable

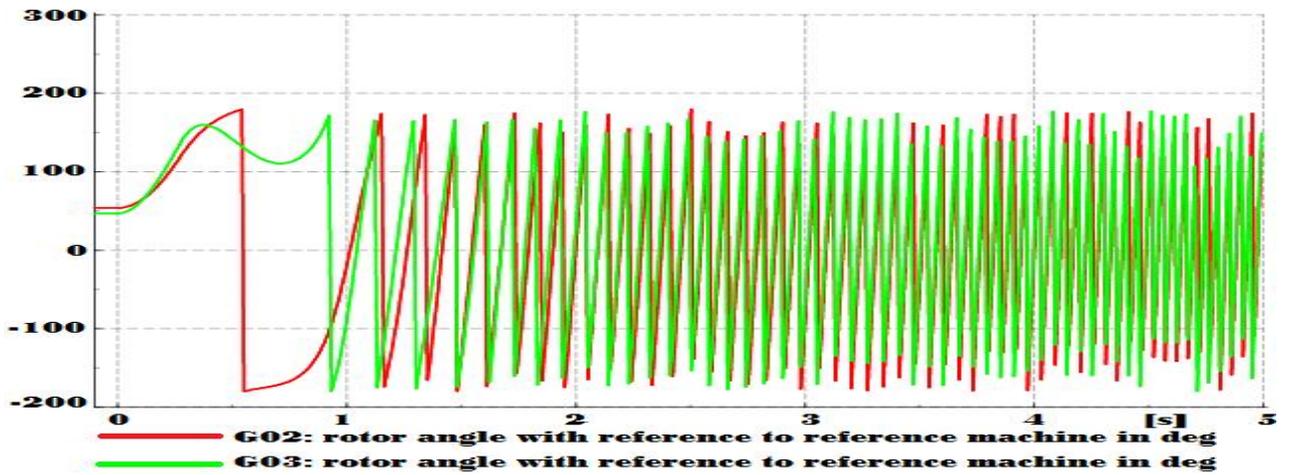


Figure N° 44 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,271 s (système instable)

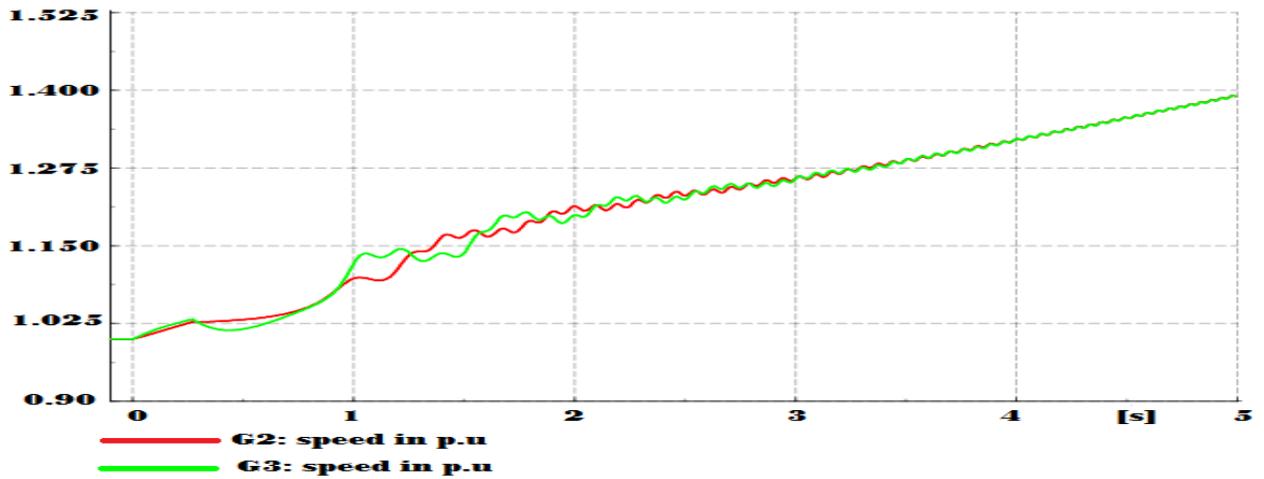


Figure N° 45 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,271 s (système instable)

$t_2 = TID = 0,271$ système instable.

De même manière, un défaut au ligne3, figures 46, 47 (système stable), figures 48 et 49 (système instable).

b.3) Défaut au ligne 3 :

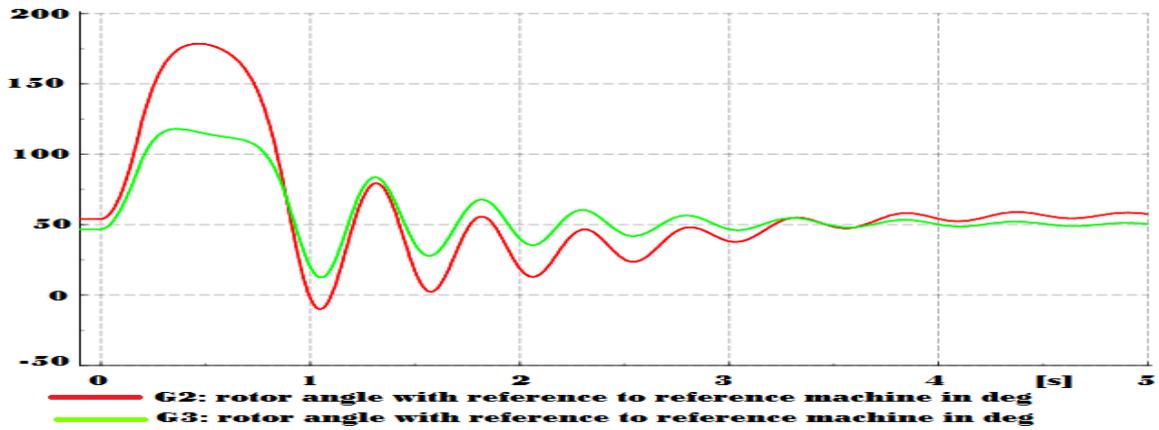


Figure N° 46 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID=TCID =0,176 s (système stable)

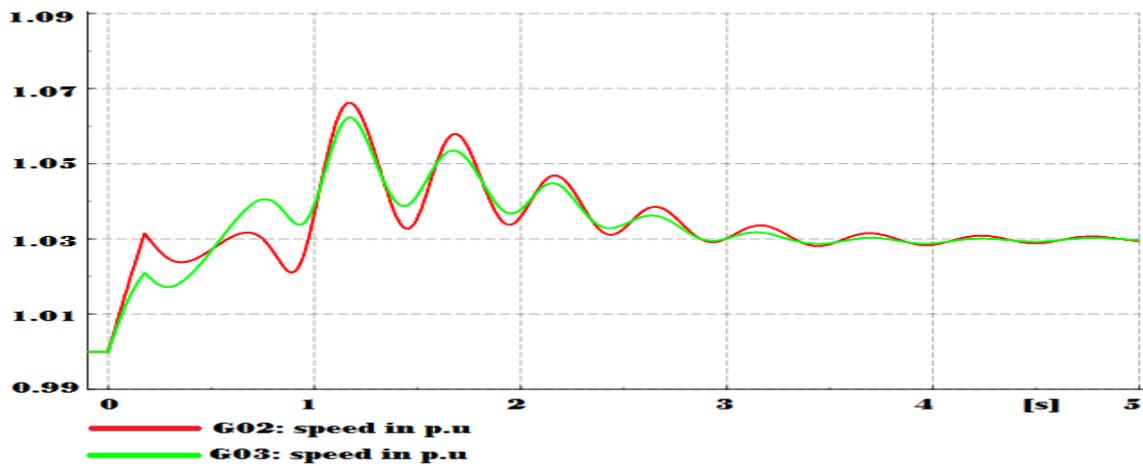


Figure N° 47 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID=TCID =0,176 s (système stable)
A $t_2 = TID = TCID = 0,176$ système stable

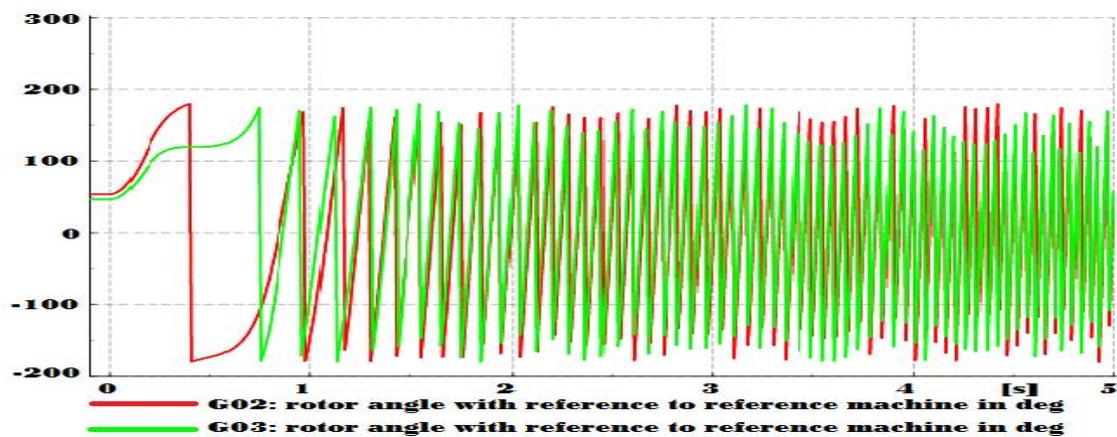


Figure N° 48 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,177 s (système instable)

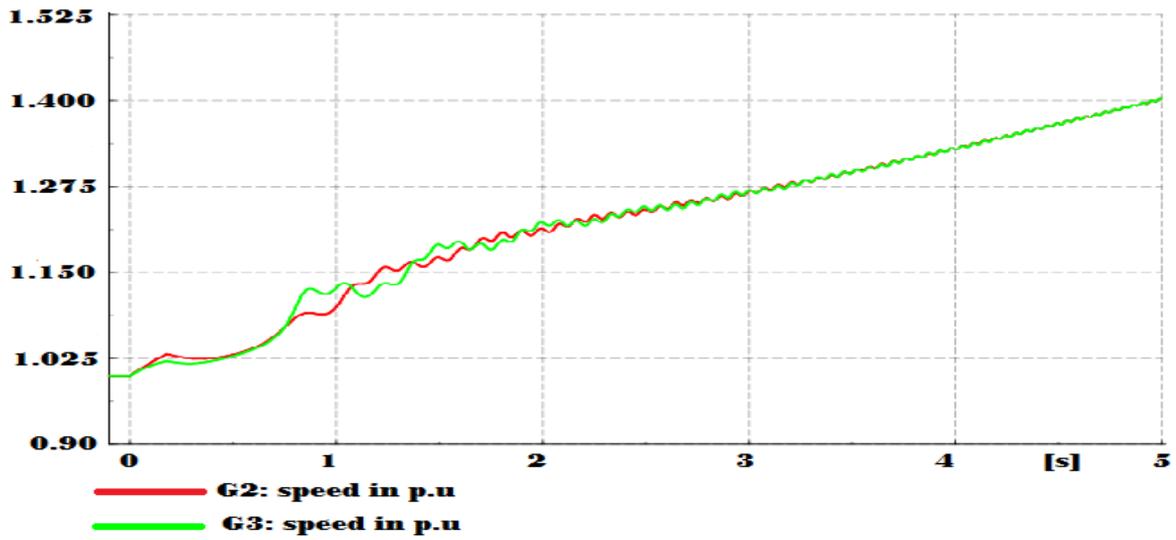


Figure N° 49 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,177 s (système instable)

t₂= TID=0,177 s système instable

Tableau N°1 : le TCID durant un défaut de court-circuit triphasé sur le réseau Test

b.4) Les résultats de simulation des différents TCID dans le Tableau :

Bus1	0.208-209
Bus2	0.141-0.142
Bus 3	0.156-157
Bus4	0.198-199
Bus 5	0.247-248
Bus6	0.27-271
Bus7	0.143-0.144
Bus8	0.197-0.198
Bus9	0.156-0.157
Ligne 1	0.232-0.233
Ligne 4	0.196-197
Ligne2b	0.221-0.222
Ligne3	0.176-0.177
Ligne 5	0.245-246
Ligne 6	0.244-245

b.5) Interprétation des résultats obtenus :

Les résultats présentés par le tableau 1 montrent que pour chaque défaut sur le réseau donne une valeur de TCID. Cette valeur est due essentiellement au changement de la matrice admittance pour chaque cas, et par conséquent la modification de la matrice Y changera complètement l'écoulement de puissance et la condition initiale et pour chaque période de temps (avant, durant et après défaut), c'est le TCID minimum qui montre le point faible de réseau qui nécessite de renforcer.

Les Figures 38, 40, 42, 44, 46,48 montrent respectivement les évolutions dynamiques des angles rotoriques relatifs du système obtenu pour différentes durées de défaut, Il apparait que pour le bus 1 par exemple que le système est stable jusque 0,208 s. Au-delà de 208 s, le système devient instable donc le temps maximum limite pour lequel le système demeure stable est 0,208 s ce temps appelé le TCID.

1.6.3 Deuxième scénarios (amélioration traditionnelle de la stabilité transitoire)**a. Variation de la constante d'inertie :**

Dans cette partie on va essayer d'analyser l'effet de la constante d'inertie H sur la stabilité du système, On va fixer la constante d'inertie et on varier le temps d'isolement de défaut (TID) chaque fois jusqu'à l'obtention du temps critique d'isolement de défaut.

Avant augmentation (cas précédent) :**Tableau N°2 : Les valeurs initiales de constant d'inertie**

Générateur 1	1,175125s
Générateur 2	4,775 s
Générateur 3	1,770125s

Après augmentation :**Tableau N°3 : Variation des valeurs initiales de constant d'inertie**

Générateur 1	5 s
Générateur 2	10 s
Générateur 3	7 s

a.1) Défaut au bus 1 :

Le temps d'isolement de défaut était 0.210 sec :

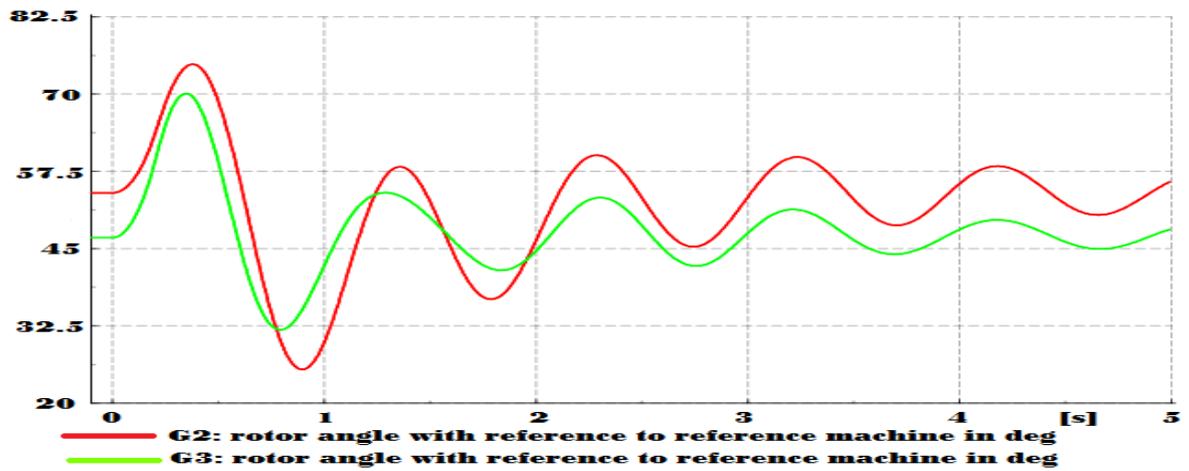


Figure N° 50 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,210 s

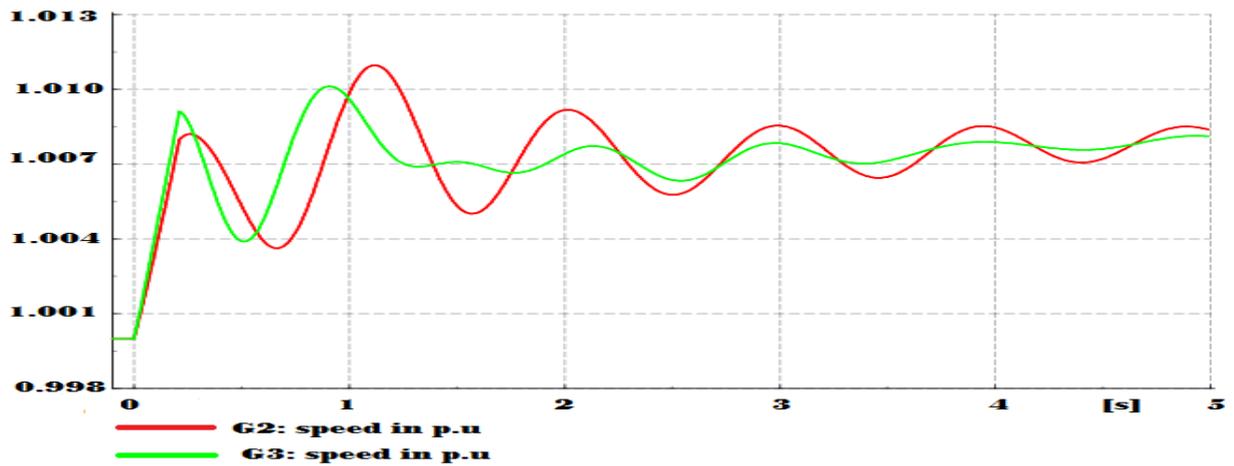


Figure N° 51 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,210 s

Le temps d'isolement de défaut devient 0.491 sec :

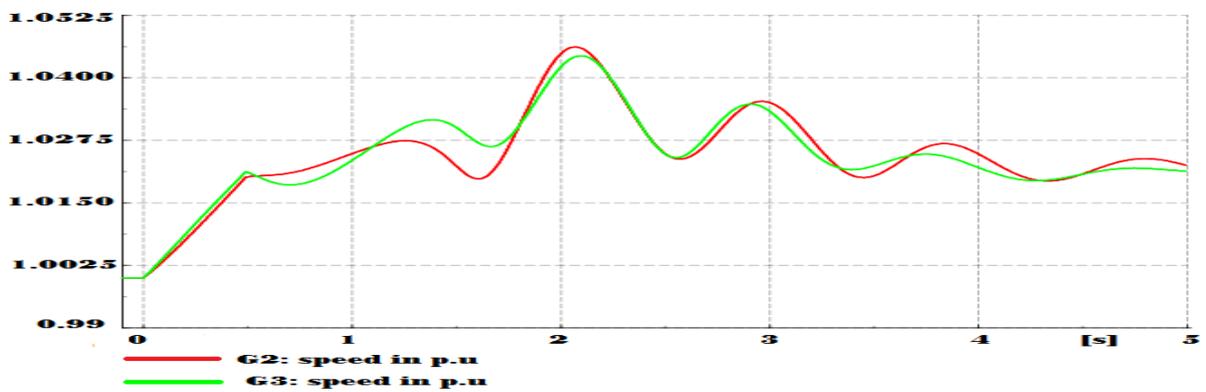


Figure N° 52 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID= TCID =0,491 s

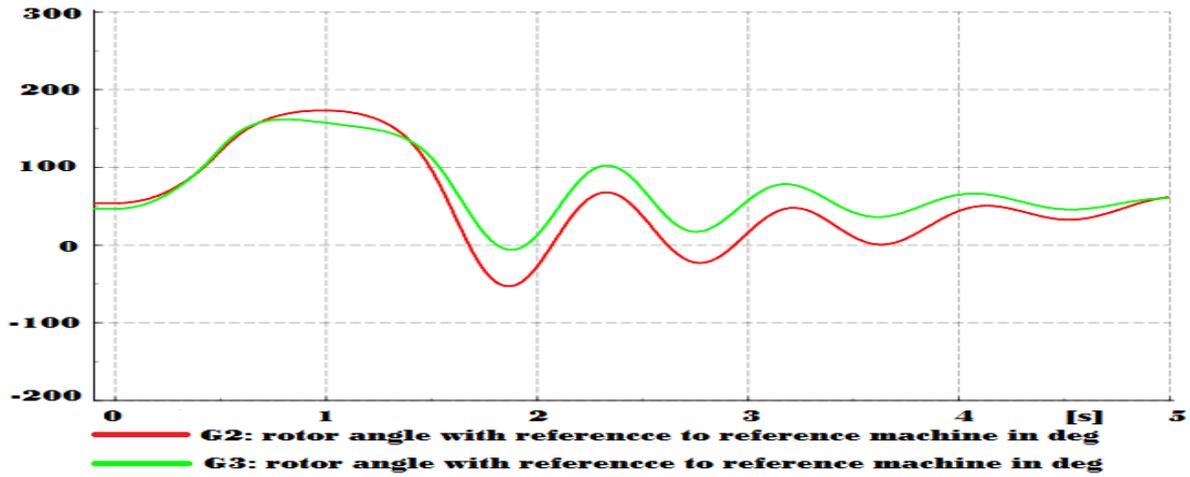


Figure N° 53 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =TCID =0,491 s

Le temps d'isolement de défaut est 0.492 sec :

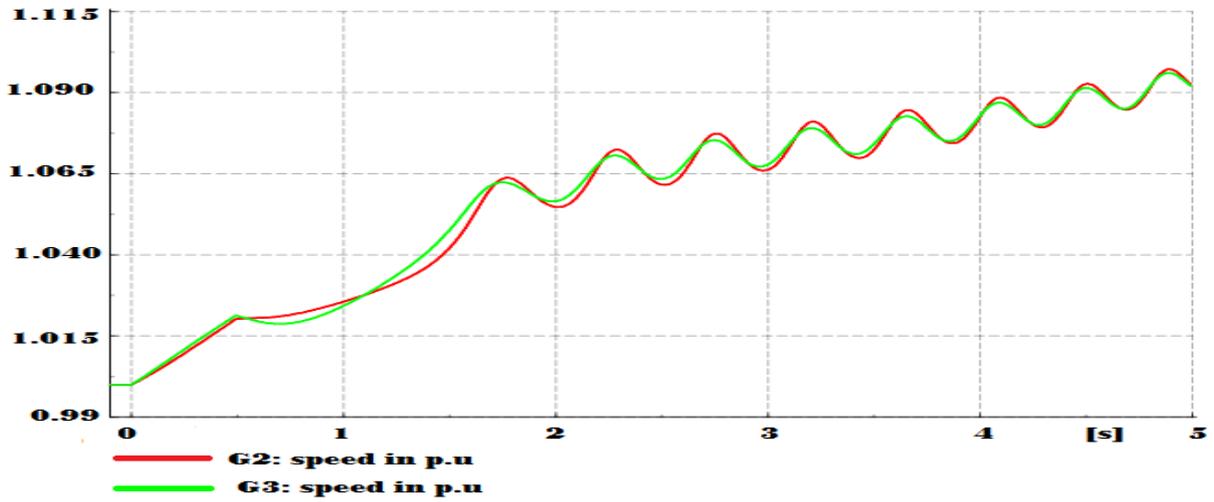


Figure N° 54 : Vitesses angulaires des 2 générateurs à TID =0,492 s

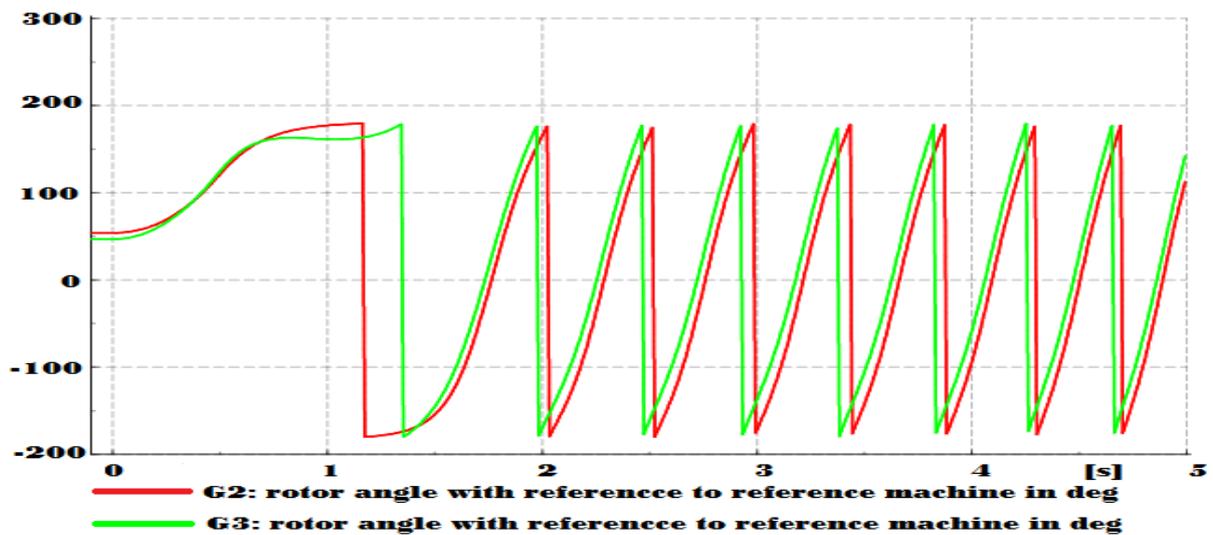


Figure N° 55 : Angles rotoriques des 2 générateurs à TID =0,492 s

a.2) Les résultats de simulation des différents TCID dans le Tableau :

Tableau N°4 : Impact de la constant d’inertie H sur le TCID

Bus	TCID(s)
Bus1	0.491-0.492
Bus2	0.292-0.293
Bus 3	0.331-0.332
Bus4	0.458-0.459
Bus 5	0.590-0.591
Bus6	0.643-0.644
Bus7	0.304-0.305
Bus8	0.448-0.449
Bus9	0.338-0.339
Ligne 1	0.547-0.548
Ligne 4	0.447-0.448
Ligne2b	0.494-0.495
Ligne3	0.386-0.387
Ligne 5	0.559-0.56
Ligne 6	0.566-0.567

a.3) Interprétation des résultats obtenus :

Avant augmentation la constante d’inertie H des 3 générateur le temps critique d’isolement de défaut $T_d=0.208$ sec. Si on augmente H alors le temps critique d’isolement de défaut $TCID=0.491$ sec. On conclue que si on augmenter la constante d’inertie H, le temps critique d’isolement de défaut augmente.

b) Variation de la résistance statorique des générateurs (R) :

Malgré les nombreux moyens différents utilisés pour améliorer la stabilité transitoire du réseau de transport d’énergie, nous mettrons en évidence la résistance du générateur en changeant sa valeur et en observant son impact sur la stabilité du réseau.

Tableau N°5 : Variation des valeurs initiales des résistances

Générateur 2	0.015 p.u	0.025 p.u	0.035 p.u
Générateur 3	0.015 p.u	0.025 p.u	0.035 p.u

Les résultats de temps critiques en fonction de la résistance statorique des générateurs dans le Tableau :

b.1) Cas 01 : Si (R=0.015 p.u) :**Tableau N°6 : Impact de la résistance sur le TCID (R=0.015 p.u)**

Bus	TCID(s)
Bus1	0.215-0.216
Bus2	0.167-0.168
Bus 3	0.21-0.211
Bus4	0.206-0.207
Bus 5	0.260-0.261
Bus6	0.290-0.291
Bus7	0.155-0.156
Bus8	0.215-0.216
Bus9	0.182-0.189

b.2) Cas 02 : Si (R=0.025 p.u) :**Tableau N°7 : Impact de la résistance sur le TCID (R=0.025 p.u)**

Bus	TCID(s)
Bus1	0.22-0.221
Bus2	0.205-0.206
Bus 3	0.27-0.271
Bus4	0.213-0.214
Bus 5	0.272-0.273
Bus6	0.306-0.307
Bus7	0.169-0.170
Bus8	0.232-0.233
Bus9	0.206-0.207

b.3) Cas 03 : Si (R=0.035 p.u) :**Tableau N°8 : Impact de la résistance sur le TCID (R=0.035 p.u)**

Bus1	0.226-0.227
Bus2	0.259-0.26
Bus 3	0.364-0.365
Bus4	0.22-0.221
Bus 5	0.286-0.287
Bus6	0.325-0.326
Bus7	0.187-0.188
Bus8	0.258-0.259
Bus9	0.235-0.236

b.4) Interprétation des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le temps critique d'élimination de défaut (TCID) a augmenté considérablement en augmentant la valeur de la résistance interne des générateurs.

Par exemple, changeons, $R= 0.025$ p.u, aux niveaux des générateurs de système et en effectuant un défaut triphasé dans jeu de barre 1, On remarque que le TCID a augmenté de 5 ms.

Si $R= 0.035$ p.u ; le TCID a augmenté de 6 ms.

On peut conclure que l'augmentation de la valeur de la résistance améliore la valeur TCID, Mais n'oublions pas que la résistance produit des pertes joules des générateurs, il n'est donc pas possible de déduire jusqu'à ce que nous simulions.

Conclusion :

Dans ce chapitre, la section 1 est fonctionné sur l'utilisation de l'outil de simulation par **logiciel Power factory**, nous avons étudié un réseau dans le cas normal et les résultats obtenus sont parfaitement stable en suite on a créé un défaut de court-circuit dans les jeux de barres et les lignes de réseau puis on a calculé le **TCID** qui se représente comme un facteur important pour connaître la marge de stabilité selon la méthode de dichotomie.

Selon les résultats obtenus nous avons remarqué que le lieu de court-circuit à un impact sur la stabilité transitoire (**TCID**).

Afin d'améliorer la stabilité, nous avons utilisé l'amélioration traditionnelle et nous remarquons si la constante d'inertie et la résistance des générateurs augmente, le temps critique augmente Alors on peut dire que, le système est plus stable lorsque H et R est plus grand.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Comme nous l'avons vu dans cette étude, l'analyse de la stabilité transitoire est un sujet brûlant et est très important dans le fonctionnement et la conception des systèmes électriques.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en 3 chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons fait un rappel sur les réseaux électriques ainsi que ses diverses structures existantes, parties et appareils.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de stabilité : définition, notion mathématique, Nécessité, ses types .on a focalisé l'étude sur la stabilité transitoire (objectif, les facteurs influant, Caractéristiques d'un réseau, le modèle mathématique, Détermination de temps critique d'isolement de défaut, et enfin des méthodes dévaluations et améliorations de la ST).

Dans le troisième chapitre on a ciblé l'influence de la résistance statorique et la constant d'inertie dans l'amélioration de la stabilité transitoire (amélioration traditionnelle), nous avons fait la simulation sur un réseau de test composé de 9 jeu de barres et 3 générateurs dans le cas de création de défaut de court-circuit dans les différents jeu de barres et lignes.

On a calculé le TCID qui se représente comme un facteur important pour connaître la marge de stabilité selon la méthode de dichotomie, Sachant que la durée d'application des défauts avant la production de l'instabilité varie d'un cas à l'autre selon la structure du réseau ainsi que le changement du point d'application du défaut.

- Les résultats obtenus à l'aide de logiciel « DigSilent power factory » à travers les différentes simulations réalisées prouvent la validité de l'étude de la stabilité des réseaux électriques et leur amélioration en termes de temps critique d'élimination des défauts.

Bibliographie

Bibliographie :

[1] L. Boufenneche, « Généralités sur les réseaux électriques », cours réseau électrique 3ème Licence ELT, Université des Frères Mentouri, Constantine 1, 2018.

[2] : Guide sonelgaz.

[3] : Théodore Wildi, Gilbert Sybille. Electrotechnique. 4eme édition. De Boeck, 2005.

[4] : Nezzari sara, Benrouag boutheina, « Etude et réglage de la stabilité de tension d'un micro réseau électrique », mémoire de master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 06/09/2020.

[5] Yujun He, « Contribution au réglage de la tension sur un réseau HTA avec producteurs – Apport de la flexibilité de la demande », thèse de Doctorat, école doctorale STITS, Centrale Supélec, 2015.

[6] Bouhafis hadri, Mehamed salah Eddine Lemlissa, «Etude et exploitation d'une source PV raccordée au réseau électrique», mémoire de master, Université de Ghardaïa, 2018/2019.

[7] Terkia Nabeche, Fatima Tezkratt, «Restructuration du réseau électrique MT de la région de Fréha pour alimentation du pôle d'excellence de Tamda», mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 28 /09 2014.

[8]<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique-page-4.html#:~:text=Mat%C3%A9riels%20de%20puissance,lignes%20et%20les%20d%C3%A9partements%20transformateurs>. Consulté le 29/03/2020.

[9] Vanilli Sandra Tefeguim, « Etude de la construction d'une ligne électrique haute tension 90kv pa-wona », master en ingénierie Officiel de l'Institut International de l'eau et de l'Environnement, France, 2014.

[10] Jean Sanchez, «Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 21/06/ 2011.

[11] Touzi Dehia, Khoudir Loundja, «Restructuration du réseau moyenne tension 30 kV de la ville tizi ouzou», Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018.

[12] Vanya Ignatova, «Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique», Thèse de doctorat, université Joseph Fournier, France 20/10 2006.

[13]<https://www.clicours.com/perturbations-harmoniques-et-les-differentes-solutions/> consulté le 05/04/2022.

[14] M'hammedi Hamid, «Amélioration de la stabilité du réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS», Mémoire master, université d'Adrar, Adrar, 2017.

[15] Idja Saliha, Douar Ouahiba, Gherbi Anis Mahfoud, « Restructuration du réseau moyenne tension 30kV de la région des ouadhias », Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, option Réseaux électriques, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2010.

- [16] Miguel Angel Fontela Garcia, « INTERACTION DES RESEAUX DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION EN PRESENCE DE PRODUCTION DECENTRALISEE », Sciences de l'ingénieur [physiques]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008.
- [17] Yahi Lynda, Alliche Kahina, «Restructuration du réseau électrique moyenne tension 30kV souterrain du Centre-Ville de tizi ousou», mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur D'Etat en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] Soutou Yacine, Chabane Madjid, Guezoui Farid, « étude des protections d'un départ moyenne tension application poste 60kv/30kv de tizi-medén », Mémoire de master, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.
- [19] N.Saim « Restructuration du réseau moyenne tension 30kV d'AZAZGA », Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2010.
- [20] Taguine Kahina, « Restructuration du réseau de distribution d'énergie pour l'éclairage nocturne du stade El-Eulma», Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [21] Machowski J, Bialek J.W and Bumby J.R, «Power system dynamics and stability », West Sussex, London, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [22] Bornard P, Pavard M et Testud G, « Réseaux d'Interconnexion et de Transport : Réglages et Stabilité », Techniques de l'Ingénieur, Traite Génie Electrique, D4-092, 2005.
- [23] Rabah Benahid, Mohamed Boudour, « Amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électrique », Ouvrage, édition universitaires européennes, 2014.
- [24] Boutaba Samira, «Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC», Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 09 juin 2009.
- [25] G. Carpinelli., Novel FACTS controllers for power system stability enhancement, thèse de doctorat, Faculté des Sciences & Techniques XIX cycle, Université Napoli FedericoII, Novembre, 2006.
- [26] V. KNAZKINS., «Stability of Power Systems with Large Amounts of Distributed Generation », these de doctorat, KTH Electrical engineering, Stockholm, Sweden 2004.
- [27] MESSALTI Sabir, « Analyse De La Stabilité Transitoire Des Réseaux De Transport A Courant Continu En Haute Tension (HVDC-FACTS) », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 23/06/ 2011.
- [28] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, " Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, No. 2/05/ 2004.

- [29] T. V. Cutsem and C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [30] T. VanCutsem, "Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods," Proc. *IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 208-227, février. 2000.
- [31] V. Venkatasubramanian and Y. Li, "Analysis of 1996 western American electric blackouts," in Bulk power systems dynamics and control, VI, aout.2004, pp. 685-721.
- [32] Aliva Routray, definition and classification of power system stability, Mémoire de master, Université Veer Surendra, Sai Burla, 2015.
- [33] Chouabbi Moussa, Djebabla Mebarek, « Etude de la stabilité transitoire du réseau Est algérien avec L'extension du poste Berrahal 400 KV », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, juin 2017.
- [34] Mr. A. Alibi «Evaluation de la stabilité transitoire d'un réseau électrique par intégration numérique», Mémoire de magister, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi ,10 /06/2015.
- [35] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill 1994.
- [36] Laslo Z. Racz et Bela Bokay, Power System Stability, Ed Elsevier, Amsterdam, 1988, (Vol.30).
- [37] Gholipour Shahraki E., « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques», Thèse de doctorat, Faculté des Sciences & Techniques, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [38] Gacem Abdelmalek, « Commande Robuste D'un Dispositif FACTS Par Les Méthodes Métaheuristiques Pour La Stabilité De Tension D'un Réseau Electrique », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 15/04/2019.
- [39] Hasan Alkhatib, « Etude De La Stabilité Aux Petites Perturbations Dans Les Grands Réseaux Electriques : Optimisation De La Régulation Par Une Méthode Meta heuristique », Thèse de Doctorat, Université de Aix-Marseille III, 5 /12/ 2008.
- [40] Camilo Apraez, « Étude comparative de méthodes de simulation de la stabilité transitoire», Mémoire master, Université du Québec, Montréal, 20 /04/ 2012.
- [41] Crow, M.. Computational methods for electric power systems p. 53-54. Boca Raton, CRC Press 2010.
- [42] Elvin Ndagijimana, Iddy Ngendakumana, «Stabilité transitoire du réseau électrique interconnecté du Burundi en tenant compte des projets à court terme», Mémoire de Master, Université du Burundi, Bujumbura, 2017.

- [43] Nur aqilah binti Mohammed amin, « Power system transient stability analysis using matlab softwar », Mémoire de master, Université Tun Hussein , Malaysia, Décembre 2013.
- [44] Yurika, Gibson HM Sianipar, Suwarno, Janson Naiborhu, Determination of Critical Clearing Time in Transient Stability Analysis, 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS) ; P116 .
- [45]https://www.researchgate.net/publication/325631337_ASSESSMENT_OF_THE_CRITICAL_CLEARING_TIME_IN_LOW_ROTATIONAL_INERTIA_POWER_SYSTEMS?fbclid=IwAR3-_it62RvtMZKd8JiEj_6-fa3eUinH0Wcduf78GaqCwpgJy1YlgkFliaA. Consulté le 19/04/2022.
- [46] K.W. Chan, C.H. Cheung et H.T. Su, Time domain simulation based transient stability assessment and control, Proceedings Power Conv., Vol. 3, pp. 1578-1582, 2002.
- [47] Amel Zerigui, «Répartition optimale de la production électrique avec contrainte de stabilité transitoire établie par une approche statistique », Thèse de Doctorat, Université du Québec Montréal, 2/02/ 2015.
- [48] Takahiro, Shinichi Nakagawa, Yuta Ohsaki et Shinichi Iwamoto. 2011. « Transient stability evaluation method based on kinetic energy of postfault trajectories ». Electrical Engineering in Japan, vol. 174, no 3, p. 18-24.
- [49] Y., T. Van Cutsem et M. Ribbens-Pavella. 1988. « A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems », Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 3, no 2, p. 400-412.
- [50] Bagde, B. Y., et P. M. Meshram. 2010. « A Hybrid Decomposition Method for Transient Stability Assessment of Large Power System ». In Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2010 3rd International Conference on. (19-21 Nov. 2010), p. 401-406.
- [51] S. Daiboun, Renforcement De La Stabilité Transitoire Par L'utilisation Des Facts, Mémoire de Magistère, Département D'électrotechnique Université De Skikda 2005.
- [52] Göran, Andersson. Modelling and Analysis of Electric Power Systems. Eth Zürich, September 2008.
- [53]https://electricalquestionsguide.blogspot.com/2011/11/transient-stability-improve-methods.html?m=1&fbclid=IwAR1JbLzS02x67H68YlucnyE5iBx-GJvG2I5-Fc9xl7D3_iApYrJYkj3BzM Consulté le 10/05/2022.
- [54] Benghanem M. « Etude et analyse d'un onduleur à trois niveaux utilisé comme Compensateur statique d'énergie réactive », Mémoire de Magister, université d'usto, Oran, 2000.

[55] Larsen E. V., Swann D. A., « Applying Power System Stabilizers Part I, II and III», IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6, June 1981, pp. 3017-3046.

[56]https://www.academia.edu/12613170/DIG_SILENT_Power_Factory_15_manual consulté 15/05/2022.