REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Electrique
Spécialité : Réseaux Electriques

THEME

L'impact d'une centrale PV sur la stabilité transitoire des réseaux électriques

---

Présenté par :

GUELLAB Aymen

KEFAIFI Abdelhak

Proposé et Dirigé par :

Pr : SEBAA Karim

Promotion 2019/2020

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Pr : *SEBAA Karim***, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à …

À MES CHERS PARENTS

Vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.
Qu'ALLAH vous donne la santé et une longue vie.

A MES TRES CHERES SEOURS

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes jumelles sœurs Nesrine et Sirine, pour toute l'ambiance dont vous m'avez entouré.

A MON CHER ONCLE AHMED

Mon conseiller, et ami fidèle, qui m'a assisté dans les moments

difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles….

A MON TRES CHER COUSIN ABDERRAHIM

Mon ami d'enfance, Je te considère comme un frère que je n'ai jamais eu.

A LA MEMOIRE DE MA GRANDE MERE

Qui a été toujours dans mon esprit et mon cœur, je te dédie aujourd'hui ma réussite.

Qu'ALLAH, t'accueille dans son vaste paradis.

A TOUS LES MEMBRES DE LA FAMILLES GUELLAB PETITS ET GRANDS

A MES AMIS DE QUARTIER

Yahia, Krimo, Billel, Mohamed, Marouan, …

A MON BINOME ABDELHAK

A MES COLLEGUES

Adel, salem, …

A l'ensemble des étudiant de ma promotion

A TOUS CEUX QUE J'AIME ET QUI M'AIMENT.

AYMEN

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

A mes très chers parents qui ont sacrifiés leur vie pour

moi, et pour qui sont les meilleurs parents de monde. Que dieu

les garde éternellement heureux.

Mes frère et sœurs

A toute la famille Kefaifi et Guellab

A tous mes amis de quartier

A tous les supporteurs de MOLODIA D'ALGER

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le

primaire à ce jour

A tous mes amis et mes collègues

Et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux

d'électrotechnique.

A mon cher ami et mon frère et pour toujours GUELLAB AYMEN.

Avec qui j'ai passé d'agréables moments

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Abdelhak

ملخص

مع الاندماج المتزايد لمحطات الطاقة الكهروضوئية في الشبكات الكهربائية، تأثير الاختراق لهذه المحطات على استقرار النظام الكهربائي وبالأخص الاستقرار العابر يطرح تساؤل مهم جدا.

في هذه الدراسة، قمنا بتقييم حالة الاستقرار العابر وتحديد حدوده في الشبكة الكهربائية المتصلة بمحطة الطاقة الكهروضوئية في حالة التقصير. المحاكاة والاشكال البيانية قدمت باستخدام بيئة MATLAB.

هذه الدراسة اكدت لنا تأثير محطة الطاقة الكهروضوئية على الاستقرار العابر للشبكات الكهربائية.

كلمات مفتاحية : المحطة الكهروضوئية، الشبكة الكهربائية، الاستقرار العابر، المحاكاة ،MATLAB

Résume

Avec l'intégration croissante des centrales photovoltaïques dans les réseaux électriques, l'effet de la pénétration de ces centrales sur la stabilité du système électrique et en particulier sur la stabilité transitoire devient une question très importante.

Dans cette étude, nous présentons l'évaluation de l'état de la stabilité transitoire des SEE et la détermination des limites de la stabilité dans un réseau électrique raccordé au centrale photovoltaïque suite à un défaut de court-circuit triphasé. Les simulations, les représentations graphiques ont été faites sous MATLAB.

Cette étude nous a confirmés l'impact d'une centrale photovoltaïque sur la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Mots clés : centrale photovoltaïque, réseau électrique, stabilité transitoire, simulation, MATLAB.

Abstract

With the increasing integration of photovoltaic power plants into power grids, the effect of the penetration of these plants on the stability of the power system and in particular on transient stability becomes a very important issue.

In this study, we present the evaluation of the state of transient stability of SEEs and the determination of the limits of stability in a power grid connected to the PV power plant following a three-phase short circuit fault. Simulations and graphical representations have been performed in MATLAB.

This study confirmed the impact of a photovoltaic power plant on the transient stability of electrical networks.

Key words : photovoltaic power plant, power grid, transient stability, simulation, MATLAB.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque

Figure I .1 : Système Photovoltaïque. 4
Figure I .2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. 4
Figure I .3 : Les différents types de cellules solaires. 6
Figure I .4 : Schéma d'un modèle d'une diode. 7
Figure I .5 : Schéma d'un modèle de deux diodes. 8
Figure I .6 : Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension. 9
Figure I .7 : Module PV constitue par 3 cellules associées en série. 11
Figure I .8 : Module PV constitue par 3 cellules associées en parallèle. 11
Figure I .9 : Module PV constitue par NS cellules en série et NP cellules en parallèle. 12
Figure I .10 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau. 14
Figure I .11 : Symbole d'un convertisseur DC-DC. 15
Figure I .12 : Symbole et signal d'un onduleur. 15
Figure I .13 : Topologies des systèmes photovoltaïque connectés à un réseau électrique. 16
Figure I .14 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT. 17

Chapitre II : Etude de la stabilité de réseau électrique

Figure II .1 : Schéma d'un réseau électrique. 20
Figure II .2 : Les sous-systèmes du réseau électrique. 21
Figure II .3 : Schéma d'un réseau radial. 23
Figure II .4 : Schéma simplifié d'un réseau bouclé. 23
Figure II .5 : Schéma simplifié d'un réseau maillé. 24
Figure II .6 : Forme d'onde d'un creux de tension. 25
Figure II .7 : Exemple de surtension. 26
Figure II .8 : Forme d'onde illustrant un déséquilibre de tension. 27
Figure II .9 : Harmoniques. 28
Figure II .10 : Système standard IEEE type SMIB 29
Figure II .11 : Classification de la stabilité de réseau électrique. 30
Figure II .12 cas1 : Instabilité de première oscillation 34
Figure II .12 cas2 : Instabilité de plusieurs oscillations. 34
Figure II .13 : Générateur synchrone connecté à un jeu de barres infini. 35

LISTE DES FIGURES

Figure II .14 : Graphe de la puissance électrique P= ∫ (δ).....37
Figure II .15 : Variation temporelle d'angle rotorique.....38
Figure II .16 : Modèle d'un générateur. 42
Figure II .17 : Schéma équivalent d'une ligne de transport. 43
Figure II .18 : Modèle d'un transformateur.....44
Figure II .19 : Schéma équivalent d'une charge. 44

Chapitre III : Simulation et analyse de résultat

Figure III .1 : Modèle d'IEEE type SMIB. 47
Figure III .2 : L'angle.....49
Figure III .3 : Vitesse angulaire. 49
Figure III .4 : Tension au jeu de barre. 49
Figure III .5 : La puissance active de générateur.....50
Figure III .6 : La puissance réactive de générateur.....50
Figure III .7 : Application d'un défaut au niveau de jeu de barre. 50
Figure III .8 : L'angle à t=0.15s.....51
Figure III .9 : Vitesse angulaire à t=0.15s. 51
Figure III .10 : Tension au jeu de barre à t=0.15s 51
Figure III .11 : La puissance active de générateur à t=0.15s.....52
Figure III .12 : La puissance réactive de générateur à t=0.15s.....52
Figure III .13 : L'angle à t=0.25s.....52
Figure III .14 : Vitesse angulaire à t=0.25s. 52
Figure III .15 : Tension au jeu de barre à t=0.25s. 53
Figure III .16 : La puissance active de générateur à t=0.25s.....53
Figure III .17 : La puissance réactive de générateur à t=0.25s.....53
Figure III .18 : Intégration d'une source PV. 55
Figure III .19 : L'angle à t=0.12s.....55
Figure III .20 : Vitesse angulaire à t=0.12s. 55
Figure III .21 : Tension au jeu de barre à t=0.12s. 56
Figure III .22 : La puissance active de générateur à t=0.12s.....56
Figure III .23 : La puissance réactive de générateur à t=0.12s.....…56
Figure III .24 : L'angle à t=0.22s.....57

LISTE DES FIGURES

Figure III .25 : Vitesse angulaire à t=0.22s.....57
Figure III .26 : Tension au jeu de barre à t=0.22s. 57
Figure III .27 : La puissance active de générateur à t=0.22s.....58
Figure III .28 : La puissance réactive de générateur à t=0.22s.....58
Figure III .29 : L'angle à t=0.3s 59
Figure III .30 : Vitesse angulaire à t=0.3s.....60
Figure III .31 : Tension au jeu de barre à t=0.3s. 60
Figure III .32 : La puissance active de générateur à t=0.3s.....61
Figure III .33 : La puissance réactive de générateur à t=0.3s.....61

Abréviations

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateurs photovoltaïques
RS	Résistance série
RP	Résistance parallèle
Icc	Courant de court-circuit
Vco	Tension de circuit ouvert
FF	Facteur de forme (fill factor)
Ipv	Courant à la sortie de la cellule photovoltaïque
Vpv	Tension à la sortie de la cellule photovoltaïque
Ns	Nombres des cellules en série
Np	Nombres des cellules en parallèle
DC	Direct Courant
AC	Alternatif Courant
MPPT	maximum power point Tracking
SEE	Système d'énergie électrique
HTB	Haute tension classe B
HTA	Haute tension classe A
BT	Basse tension
MT	Moyenne tension
HT	Haute tension

ABREVIATION

THT	Très haute tension
FACTS	Flexible Alternatif Transmission System
SMIB	Single Machine Infinity Bus System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TCID	Temps critique d'isolement défaut
PSS	Power System Stabilizer
BUS	Jeu de barre

Symboles

Iph	Le courant délivré par la lumière
I	Courant de sortie de la cellule photovoltaïque
V	Tension aux bornes de la sortie de la cellule photovoltaïque
Vt	Tension thermique
K	Constante de Boltzmann (1,38.10-23J/K)
q	Charge d'électron (1,6.10-19 C)
T	Température ambiante en kelvin
η	Le rendement de la cellule photovoltaïque
P_a	Puissance de l'accélération en (Pu)
P_e	Puissance électrique de générateur en (Pu)
P_m	Puissance mécanique fournie au générateur en (Pu)

ABREVIATION

δ	Angle interne de la machine en (rad)
H	Constante d'inertie en (rad)
$\boldsymbol{\omega}_{\circ}$	vitesse de synchronisme = $2\pi f$, f : fréquence nominal

Table des matières

Liste des figures I

Abréviations IV

Symboles V

Introduction générale 1

CHAPITRE I : Généralités sur le système photovoltaïque

I.1 Introduction 3

I.2 Définition de l'énergie solaire photovoltaïque 3

I.3 La cellule photovoltaïque 4

I.3.1 Principe d'une cellule photovoltaïque 4

I.3.2 Les différents types de cellules photovoltaïque 5

a) Les cellules monocristallines 5

b) Les cellules polycristallines 5

c) Les cellules amorphes 5

I.3.3 Modélisation courant tension d'une cellule photovoltaïque 6

I.3.3.1 Modèle d'une diode 6

I.3.3.2 Modèle de deux diodes 7

I.3.4 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque 9

I.3.4.1 Courant de court-circuit 9

I.3.4.2 Tension de circuit ouvert 10

I.3.4.3 Facteur de forme 10

I.3.4.4 Le rendement 10

I.4 Le module photovoltaïque 11

I.4.1 Module en série 11

I.4.2 Module en parallèle 11

I.4.3 Module mixte 12

I.5 Le panneau photovoltaïque 12

TABLE DES MATIERES

I.6 La centrale solaire photovoltaïque 12
I.7 Installation photovoltaïque raccordée au réseau 13
I.8 Convertisseurs DC/DC 14
I.9 Convertisseurs DC/AC 15
I.10 La commande MPPT 16
I.11 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque 17
I.11.1 Les Avantages 17
I.11.2 Les inconvénients 18
I.12 Conclusion 18

CHAPITRE II : Etude de la stabilité de réseau électrique

II.1 Introduction 19
II.2 Définition de réseau électrique 19
II.2.1 De la centrale aux abonnés 19
II.3 Structure générale et topologie d'un réseau électriques 21
II.3.1 Structure du réseau électrique en Algérie 21
II.3.1.1 Réseaux d'utilisation 21
II.3.1.2 Réseaux de distribution 22
II.3.1.3 Réseaux de répartition 22
II.3.1.4 Réseaux de transport 22
II.3.2 Topologie des réseaux 22
II.3.2.1 Réseaux radiaux 22
II.3.2.2 Réseaux bouclés 23
II.3.2.3 Réseaux maillés 23
II.4 Perturbations du réseau électrique 24
II.4.1 Creux de tension 24
II.4.2 Chute de tension 25
II.4.2.1 Production très éloignée de la consommation 25

TABLE DES MATIERES

II.4.2.2 Manque locale de puissance réactive 25

II.4.2.3 Charge appelée trop importante 26

II.4.3 Surtension 26

II.4.4 Déséquilibre de tension 26

II.4.5 Harmoniques 27

II.5 La Stabilité d'un réseau électrique 28

II.5.1 Définition de la Stabilité d'un réseau électrique 28

II.5.2 Système Electro-énergétique 28

II.5.3 Réseau infini 29

II.5.4 Synchronisme 29

II.5.5 Description générale du système électro-énergétique étudie 29

II.6 Classification de la stabilité 30

II.6.1 La stabilité de tension 31

II.6.1.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations 31

II.6.1.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations 31

II.6.2 La stabilité de fréquence 31

II.6.3 Stabilité de l'angle de rotor 32

II.6.3.1 La stabilité statique 32

II.6.3.2 Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) 32

II.6.3.3 Stabilité angulaire aux grandes perturbations (Stabilité transitoire) 33

a) Relation entre la puissance rotoriques (P- δ) 37

II.7 Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID) 38

II.8 Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire 39

II.8.1 Méthodes d'intégration numériques 39

II.8.2 Méthodes directes 40

II.8.3 Méthodes hybrides 40

II.9 Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire 41

TABLE DES MATIERES

II.10 Modélisation des composantes du réseau électrique.....41
II.10.1 Modélisation des générateurs.....42
II.10.2 Modélisation d'une ligne de transport.....42
II.10.3 Modélisation Transformateurs.....43
II.10.4 Modélisation d'une charge.....44
II.11 Conclusion.....45

Chapitre III : Simulation et analyse de résultat

III.1 Introduction.....46
III.2 Étapes d'analyse de la stabilité transitoire.....46
III.3 Outils de simulations.....47
III.4 Problématique.....47
III.5 Réseau standard (modèle d'IEEE type SMIB).....47
III.5.1 Méthode d'analyse.....47
III.5.2 Calcul du temps critique d'élimination du défaut.....48
III.6 Résultats de simulation et interprétation.....48
III.6.1 L'état initial (cas N°1).....48
III.6.2 Avec défauts (cas N°2).....50
III.6.2.1 Analyse des résultats de simulations du cas N°2.....54
III.6.3 Avec intégration d'une source photovoltaïque (PV) (cas N°3).....55
III.6.3.1 Analyse des résultats de simulations du cas N°3.....58
III.6.4 Avec différentes puissances de source photovoltaïque (PV) (cas N°4).....59
III.6.4.1 Analyse des résultats de simulations du cas N°4.....62
III.5 Conclusion.....62
Conclusion générale.....63

Introduction Générale

Introduction générale :

Avec l'augmentation de la population mondiale et la réduction des ressources naturelles, les compagnies d'électricité sont confrontées aux défis de satisfaire la demande en énergie sous la contrainte de l'acceptabilité de son coût. Avec l'augmentation de l'émission des gaz à effets de serre, la demande des énergies renouvelables a augmenté de manière significative.

Parmi les différents types de sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est devenue la plus prometteuse en raison des facteurs suivants :

- L'augmentation de l'efficacité des cellules solaires
- L'amélioration de la technologie de fabrication
- Des économies d'échelle **[1].**

Durant les dernières décennies, l'humanité a eu recoure aux énergies renouvelables. Par conséquent, dans de nombreux pays, nous constatons une effervescence en termes des modules photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution.

Contrairement aux autres ressources renouvelables, telles que le vent et les générateurs solaires thermiques, les centrales photovoltaïques sont plus flexibles et par conséquent peuvent être déployés plus facilement **[2]**.

La fonction principale d'un réseau électrique est la liaison des différents centres de consommation aux centrales de production tout en satisfaisant la demande en énergie électrique et en assurant la continuité de la fourniture d'énergie dans les limites de puissance demandée, le maintien de la tension et de la fréquence dans les normes contractuelles.

Les systèmes électro-énergétiques (SEE) sont souvent sujets à des perturbations pouvant entrainer de sérieux dégâts sur leurs constituants, notamment les générateurs et les lignes de transmission. Elles affectent les conditions de fonctionnement normal, et conduisent souvent à la perte de la stabilité de tout le système l'équilibre production consommation de l'énergie électrique, et par conséquent, la continuité de service ne sont alors plus assures **[3]**. Cet état entraine souvent un écroulement de tout le réseau tel que le blackout survenu sur le réseau Algérien le 03 février 2003 et celui de New York le 14 Aout 2003.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités.

INTRODUCTION GENERALE

Par définition, on dit qu'un système est stable s'il demeure dans un état d'équilibre dans les conditions normales de fonctionnement, ou s'il retrouve un nouvel état d'équilibre acceptable après une perturbation quelconque. L'analyse de la stabilité d'un SEE consiste alors à étudier le caractère des oscillations électromécaniques des alternateurs et à maintenir le fonctionnement synchrone après l'apparition d'un défaut. L'étude de la stabilité revêt une importance particulière dans le fonctionnement et les planifications des SEE. En effet, elle permet la détermination des protections et la détermination des temps critiques d'élimination des défauts, plus connus sous le terme de TCID, du plan de tension et de la capacité d'échange des puissances entre systèmes **[4]**.

La stabilité transitoire traite des effets des perturbations brutales de forte amplitude et de courte durée, tel que, les défauts de court-circuit, les déconnexions de lignes, des groupes de production, les variations brusque de la charge… etc. L'intervention des dispositifs de protection et de régulation est indispensable pour rétablir la stabilité pendant la période transitoire. La détermination du TCID constitue une caractéristique importante du fonctionnement des disjoncteurs. Elle est d'une importance majeure à la fois dans l'analyse, la planification et le fonctionnement du SEE **[3]**.

L'objectif essentiel du présent travail est l'évaluation de l'impact d'une centrale photovoltaïque intégrée dans un réseau. Ainsi que de l'état de la stabilité transitoire et la détermination des limites de la stabilité. Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre consiste à la description générale du système photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre décrit le problème de la stabilité du SEE. Nous avons également rappelé les caractéristiques des différents types de stabilité ainsi que la modélisation générale d'un système de puissance adapte à l'étude de la stabilité angulaire.
- Dans le troisième chapitre nous présentons d'abord le schéma équivalent du réseau étudie. Ensuite nous exposons les résultats de simulation obtenus par le logiciel MATLAB ainsi que leurs analyses.

Enfin notre mémoire se termine par une conclusion générale relative aux résultats de simulations.

Chapitre I

Généralités sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction :

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, (étoile la plus proche de la terre). Il fournit une énergie colossale à la Terre **(**10 000 fois l'énergie nécessaire**)** sous forme d'énergie lumineuse, La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie couvre une partie importante de la surface terrestre **[5]**.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Bien que l'énergie photovoltaïque la plus jeune des énergies renouvelables, et devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance (disponibilité), l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, et elle est souple et fiable **[6]**.

Ce chapitre consiste à la description générale du système photovoltaïque, il a pour but d'expliquer le principe de fonctionnement de ce système. En donnant des généralités sur les composants de ce dernier et son raccordement au réseau.

I.2. Définition de l'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble **[7]**.

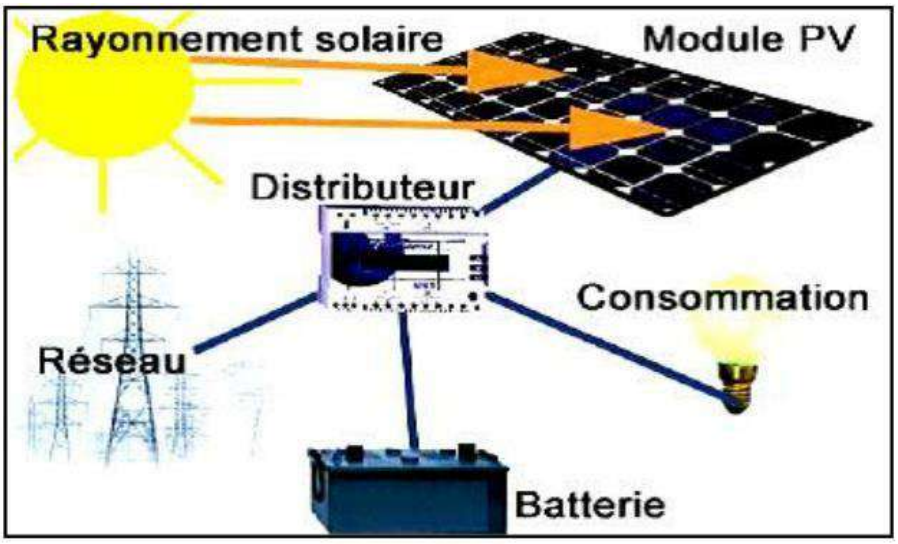


Figure I.1. Système Photovoltaïque **[7]**.

I.3. La cellule photovoltaïque :

I.3.1. Principe d'une cellule photovoltaïque :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée d'un composant à semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique **(Figure I.2) [8]**.

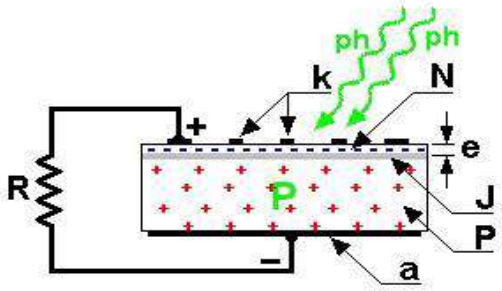


Figure I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque **[8]**.

Lorsque le rayonnement solaire arrive sur la cellule, une partie de ce rayonnement sera réfléchie, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule est considérée comme une diode à jonction PN particulière.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Les cellules composées de semi-conducteurs génèrent un courant (et une différence de potentiel) lorsqu'elles sont illuminées **[8]**.

Un cristal semi-conducteur dopé **P** est recouvert d'une zone très mince dopée **N** et d'épaisseur **e** égale à quelques millièmes de millimètre. Entre les deux zones se trouve une jonction **J.**

La zone **N** est couverte par une grille métallique qui sert de cathode **k** tandis qu'une plaque métallique **a** recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre **[9]**.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium poly-cristallin moins coûteux à produire.

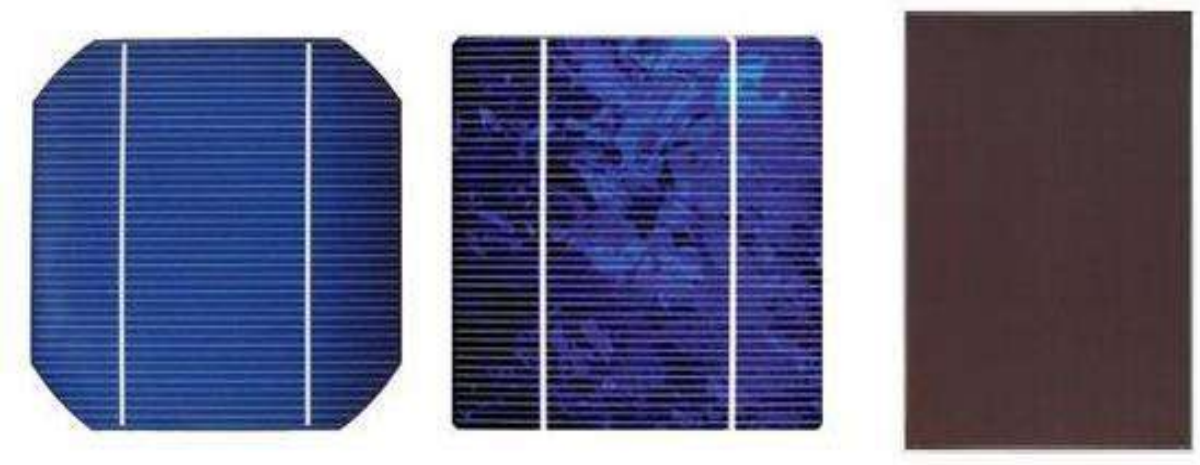
I.3.2. Les différents types de cellules photovoltaïque :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

a) **Les cellules monocristallines :** Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % au laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.
b) **Les cellules polycristallines :** Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).
c) **Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) **[10]**.



a) cellule monocristalline **b) cellule polycristalline** **c) cellule amorphe**

Figure I.3. Les différents types de cellules solaires **[10]**.

I.3.3. Modélisation courant tension d'une cellule photovoltaïque :

La modélisation est nécessaire pour pouvoir étudier et analyser le comportement et le fonctionnement de la cellule PV **[10]**.

Les cellules PV sont représentées par deux différents modèles :

I.3.3.1. Modèle d'une diode :

Dans ce modèle, la cellule PV est modélisée par une source de courant en parallèle avec une diode **(Figure I.4)**. La source de courant est représentée par un courant généré par la lumière I_{ph}, ce courant varie linéairement avec la variation du rayonnement solaire. Nous modélisons également les chutes ohmiques et les courants de fuites par deux résistances :

- Une résistance "shunt" en parallèle Rp modélise les courants de fuite dus aux effets de bord de la jonction PN.
- Une résistance en série Rs modélise les pertes aux contacts et aux connections. Elle est très faible**.**

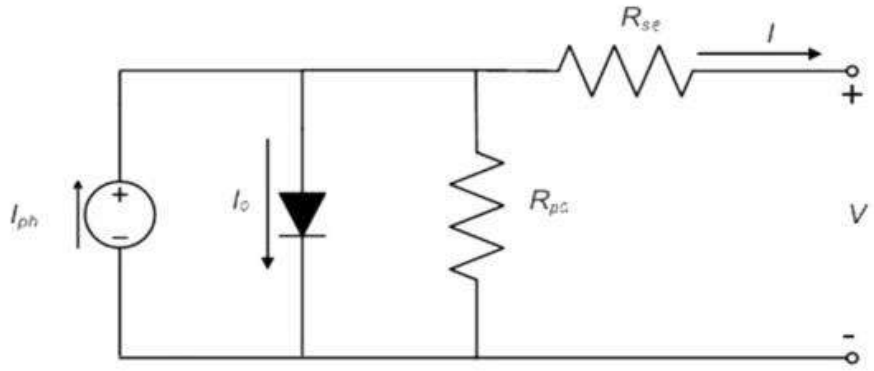


Figure I.4. Schéma d'un modèle d'une diode **[10]**.

L'équation caractéristique de ce modèle est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t N}\right) - 1\right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{(I.1)}$$

I_{ph} : est le courant généré par la lumière.

I **:** courant de sortie de la cellule PV.

V : tension aux bornes de la sortie de la cellule PV.

R_{sh} **et** R_s : résistance shunt et résistance série qui représentent les pertes de la cellule PV.

V_t = KT/q : tension thermique.

k = 1.38×10^{-23} j/°K : constante de Boltzmann.

q = 1.67×10^{-23} coulomb : charge d'un électron élémentaire.

T : température ambiante en °K.

I.3.3.2. Modèle de deux diodes :

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit du modèle simple d'une diode **(Figure I.5)**. Cette diode est incluse pour fournir une courbe caractéristique I-V bien plus précise.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- Le générateur de courant : il délivre le courant I_{Ph} correspondant à courant photo généré.
- La résistance série R_s **:** elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- La résistance parallèle R_p : également connue sous le nom de résistance de court-circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.

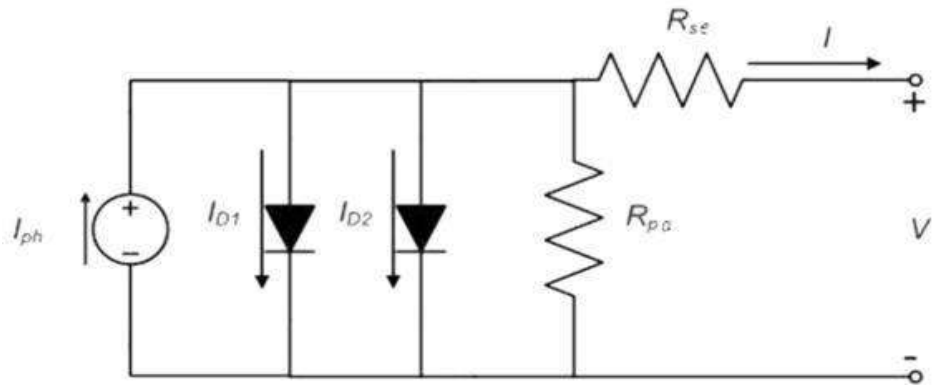


Figure I.5. Schéma d'un modèle de deux diodes **[11]**.

L'équation caractéristique de ce modèle est la suivante :

$$\boldsymbol{I = I_{ph} - I_{D1}\left[\exp\left(\frac{V+R_sI}{V_tN_1}\right)-1\right] - I_{D2}\left[\exp\left(\frac{V+R_sI}{V_tN_2}\right)-1\right] - \frac{V+R_sI}{R_{sh}}} \quad \textbf{(I.2)}$$

Avec :

$$\boldsymbol{I_{ph} = I_r \times \frac{I_{ph0}}{I_{r0}}} \quad \textbf{(I.3)}$$

$\boldsymbol{I_r}$: Rayonnement (intensité de la lumière) en W/m2 capté par la cellule.

$\boldsymbol{I_{ph0}}$: courant généré mesuré pour un rayonnement I_{r0}.

$\boldsymbol{I_D}$**,** $\boldsymbol{I_{D1}}$ **et** $\boldsymbol{I_{D2}}$: courants de saturation des diodes D, D1 et D2.

N, N1 et N2 : facteurs de puretés respectives des diodes D, D1 et D2 **[9]**.

I.3.4. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque :

On appelle caractéristique courant tension $I(V)$, la courbe représentant la variation du courant I en fonction de la tension V aux bornes de la cellule.

Les paramètres caractéristiques suivants peuvent être extraits de ce graphe :

- Le courant de court-circuit Icc.
- La tension de circuit ouvert Vco.
- Le courant Im et la tension Vm tels que le produit des deux soit maximal comme représenter sur **(Figure I.6).**

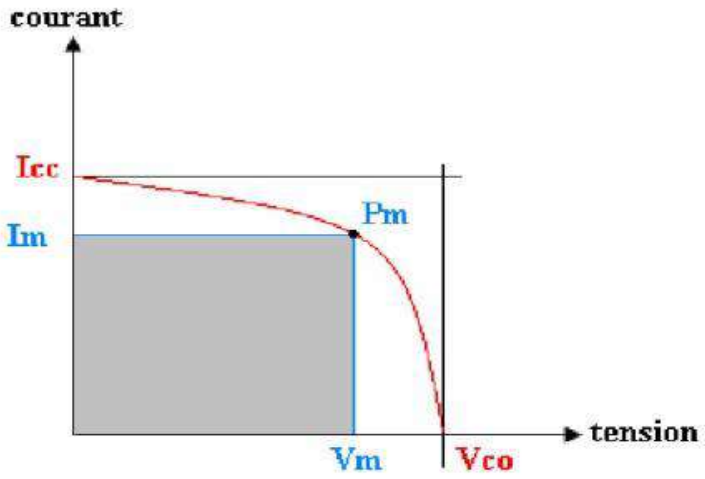


Figure I.6. Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension **[11]**.

I.3.4.1. Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle, Rsh infinie) ce courant se confond avec le photo-courant Iph **[11]**.

$$\boldsymbol{I_{cc} = I_{ph} - I_0\left[e^{\frac{(V+R_S I_{cc})}{V_T}} - 1\right] - \left(\frac{V}{R_{sh}} + \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}}\right)} \quad \textbf{(I.4)}$$

En court-circuit V=0, et pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme I_d devant I_{ph}. L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1+\frac{R_s}{R_{sh}}} \quad \text{(I.5)}$$

D'où :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad \text{(I.6)}$$

I.3.4.2. Tension de circuit ouvert :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse **[12].**

On peut écrire :

$$V_{c0}(I = 0) = V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad \text{(I.7)}$$

I.3.4.3. Facteur de forme :

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance calculée par la multiplication de la tension de circuit-ouvert et le courant de court-circuit.

Il exprime comme suite :

$$\mathbf{FF} = \frac{\mathbf{Vm} \times \mathbf{Im}}{\mathbf{Vco} \times \mathbf{Icc}} \quad \text{(I.8)}$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le panneau est performant **[13].**

I.3.4.4. Le rendement :

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses. Si S est la surface de ce module, E l'éclairement en W/m^2, le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{V_{co} \times I_{cc} \times FF}{E \times S} \quad \text{(I.9)}$$

I.4. Le module photovoltaïque :

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique **[14].**

I.4.1. Module en série :

Dans un module en série, les cellules sont traversées par le même courant et la tension générale de panneaux solaires est égale à la somme des tensions de chaque cellule **[14].**

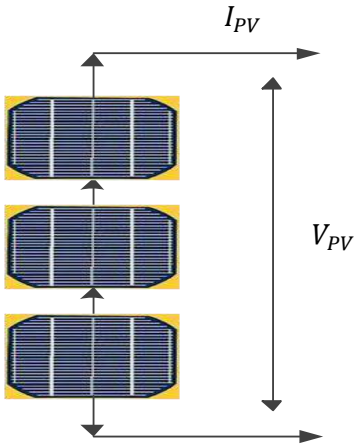


Figure I.7. Module PV constitue par 3 cellules associées en série **[14].**

I.4.2. Module en parallèle :

Dans ce module on associe plusieurs cellules en parallèle le courant générale de panneaux solaires est égale à la somme des courants de chaque branche **[14].**

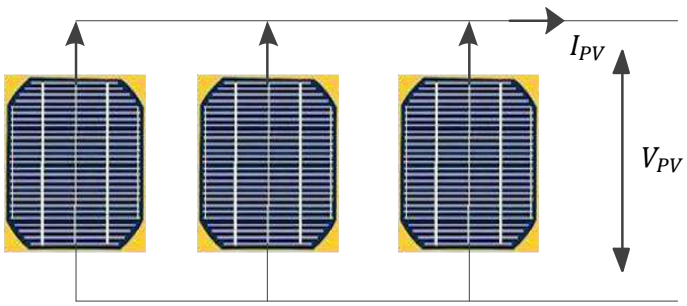


Figure I.8. Module PV constitue par 3 cellules associées en parallèle **[14].**

I.4.3. Module mixte :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module **(Figure I.9)**. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension **[12].**

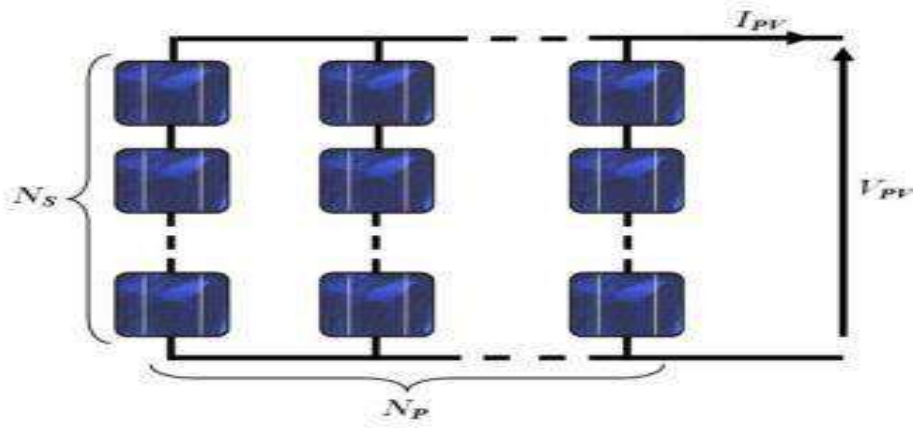


Figure I.9. Module PV constitue par NS cellules en série et NP cellules en parallèle **[12].**

Ce module est protégé en face avant par une plaque de verre et en face arrière par un autre matériau (verre ou résine) et installé sur un cadre en aluminium anodisé.

I.5. Le panneau photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque est une combinaison de plusieurs modules PV. Il représente pour un système PV la source d'énergie à fournir qui a son tour alimente le reste des composants du processus photovoltaïque (hacheur, onduleur, batterie, charge...).

Le choix d'un panneau photovoltaïque a été primordial car l'alimentation avec une seule cellule ou même un module ne suffit pas pour satisfaire les besoins de notre système PV **[15].**

I.6. La centrale solaire photovoltaïque :

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par l'ensemble de panneaux solaires photovoltaïques à base de silicium qui sont reliés entre eux en série ou en parallèle et branchés sur un ou plusieurs onduleurs.

Les centrales solaires sont de grandes puissances, à l'opposé des systèmes solaires photovoltaïques autonomes (alimentation des habitations isolés, des refuges.) ou des systèmes solaires décentralisé raccordé au réseau. Ce système permet la production d'électricité.

L'énergie produite par des panneaux est liée à la puissance solaire reçue. Cette dernière est en fonction de l'ensoleillement du lieu, de la position géographique (latitude), de l'inclinaison du plan considéré et de son orientation **[16].**

I.7. Installation photovoltaïque raccordée au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, au près duquel il s'approvisionne au besoin ; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau, mais ce n'est pas nécessaire **[10].**

Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques La conversion de puissance peut contenir les deux étapes, une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse réaliser un courant sinusoïdal à la tension du réseau, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu, comme dans le cas d'utilisation des MPPT pour une exploitation maximale de la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif comme dans le cas d'utilisation des charges en courant alternatif **[10].**

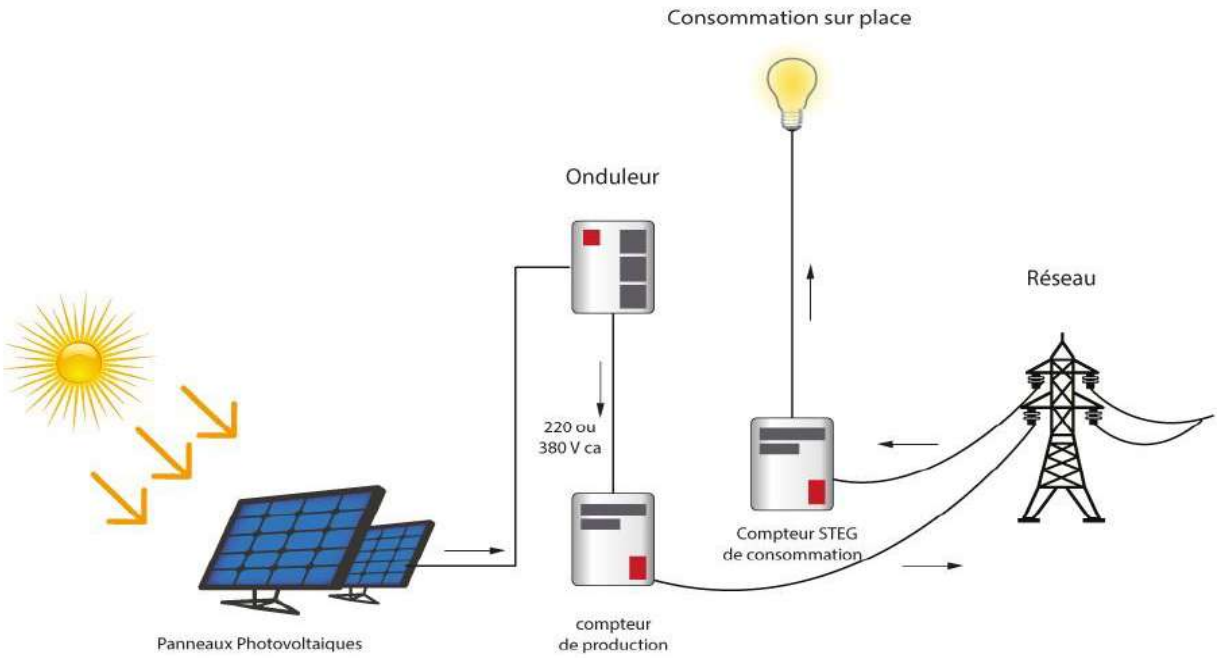


Figure I.10. Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau.

I.8. Convertisseurs DC/DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante.

On distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) :

- Hacheur dévolteur (ou Buck).
- Hacheur survolteur (ou Boost)
- Hacheur dévolteur- survolteur (ou Buck- Boost) **[17].**

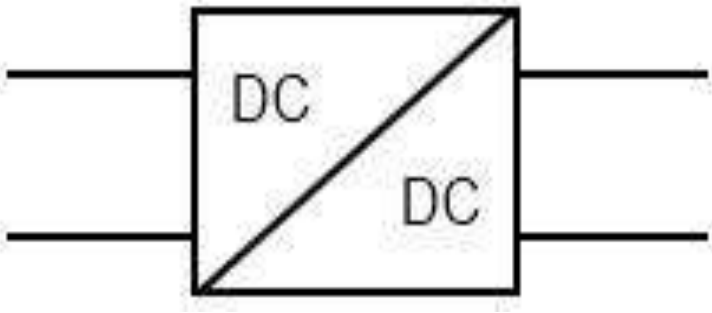


Figure I.11. Symbole d'un convertisseur DC-DC **[17].**

I.9. Convertisseurs DC/AC :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme la montre là **(Figure I.12)** on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

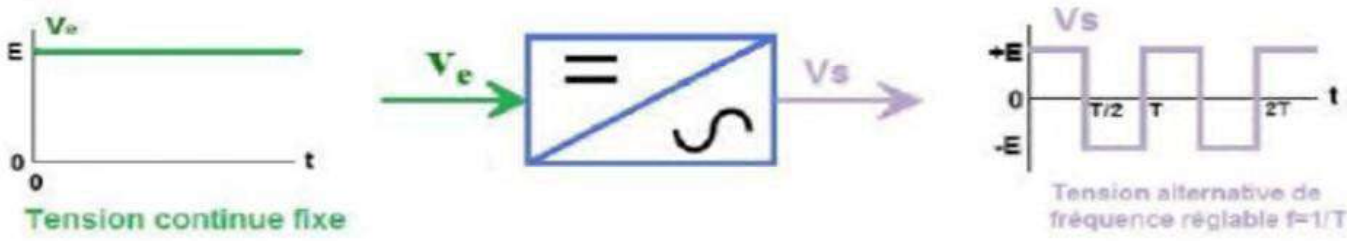
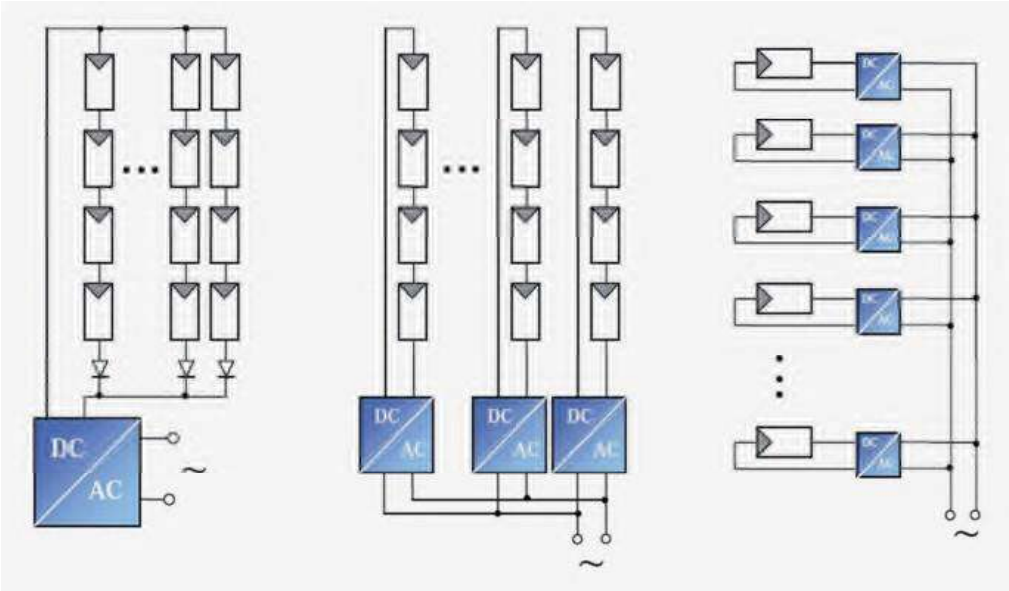


Figure I.12. Symbole et signal d'un onduleur.

Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux modules **(Figure I.13) [18].**



a) onduleur centrale **b) onduleur string** **c) onduleurs intégrés au PV**

Figure I.13. Topologies des systèmes photovoltaïque connectés à un réseau électrique **[19].**

I.10. La commande MPPT :

Un MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (*Vppm, I ppm*) **[20].**

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC/DC comme représenté sur la **figure (I.14).**

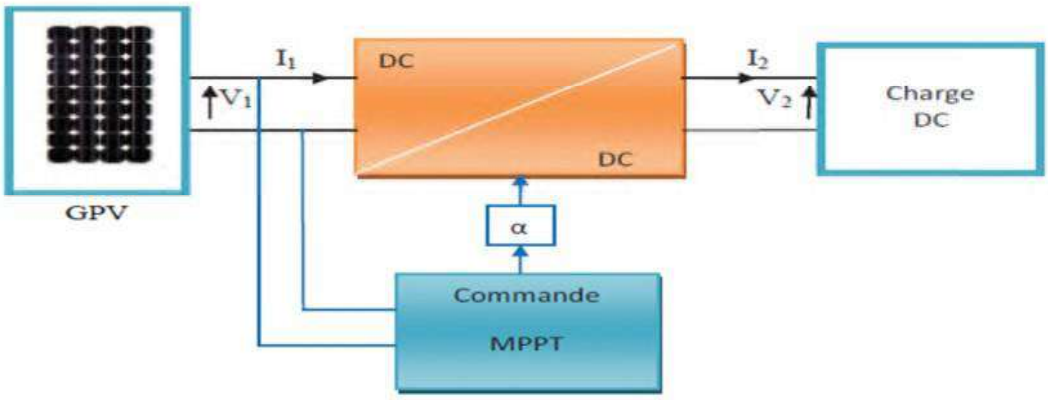


Figure I.14. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT **[20].**

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

I.11. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque :

I.11.1. Les Avantages :

- La source primaire est gratuite :

Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans.

Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs.

- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer **[21].**

I.11.2. Les inconvénients :

- Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée **[21].**

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les composants d'un système photovoltaïque, de la cellule photovoltaïque, sa modélisation et ses caractéristiques courant-tension.

Ainsi qu'un aperçu sur le principe de fonctionnement de ce système et son raccordement au réseau à travers des convertisseurs DC/DC et DC/AC. On a présenté aussi la commande MPPT du générateur photovoltaïque.

Chapitre II

Etude de la stabilité de réseau électrique

II.1. Introduction :

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et/ou électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes. Face à une variation de puissance, le système électrique doit normalement retrouver un état stable. Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger.

Les perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation).

L'écart en termes de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Des études sont nécessaires pour pouvoir éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique. Pour cela, on s'intéresse dans ce chapitre à la stabilité des systèmes électro-énergétique qui est un facteur essentiel pour préserver le matériel et assurer la continuité du service.

Dans ce chapitre, nous présentons le problème de la stabilité. Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée la modélisation des éléments constituant le réseau électrique (tels que les générateurs, les charges, ainsi que les lignes et les transformateurs) et qui interviennent exclusivement dans l'étude de la stabilité transitoire du SEE.

II.2. Définition de réseau électrique :

Les réseaux électriques (transport et distribution) ont pour rôle d'acheminer l'énergie des sites de production vers les lieux de consommation, avec des étapes de baisse du niveau de tension dans des postes de transformation.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques...etc. avec les centres de consommation (villes, usines...) **[22].**

II.2.1. De la centrale aux abonnés :

La tension à la sortie des grandes centrales est portée à 400 000 volts (ou 400 kV) pour limiter les pertes d'énergies sous forme de chaleur dans les câbles des lignes électriques de

transport (ce sont les pertes par « effets de joule »). Ensuite, la tension est progressivement réduite au plus près de la consommation, pour arriver aux différents niveaux de tension auxquels sont raccordés les consommateurs **(Figure II.1) [23].**

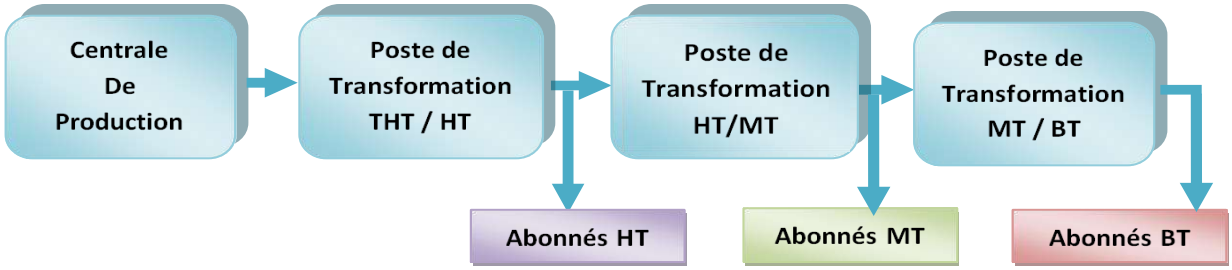


Figure II.1. Schéma d'un réseau électrique **[23].**

Les réseaux publics d'électricité sont constitués d'un ensemble de conducteurs et de postes électriques permettant d'acheminer l'énergie depuis les installations de production jusqu'aux installations de consommation.

Les conducteurs sont les lignes aériennes ou les câbles souterrains (ou les câblages courant en façades d'immeubles) desservant le territoire selon un schéma maillé ou arborescent. Pour des raisons tenant à des calculs technico-économiques, ils sont exploités à différents niveaux de tension.

Les postes électriques sont situés aux nœuds du maillage ou de l'arborescence des conducteurs. Ils accueillent les transformateurs (pour le changement de niveau de tension), les organes d'aiguillage et de manœuvre des flux et les équipements de surveillance et de sécurité du réseau **[23].**

Le réseau électrique est exploité de manière à satisfaire les exigences suivantes **[24]** :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas ± 10 % de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas ± 0,5 Hz.
- Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.

II.3. Structure générale et topologie d'un réseau électriques :

Dans les pays dotés d'un système électrique élaboré, le réseau est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

Traditionnellement, les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes : la génération, le transport et la distribution **(Figure II.2)**. Chaque sous-système est relié par des postes sources chargés de l'adéquation des niveaux de tension **[25].**

Dans le contexte de ce paragraphe, nous allons présenter la structure et la topologie du réseau électrique Algérien.

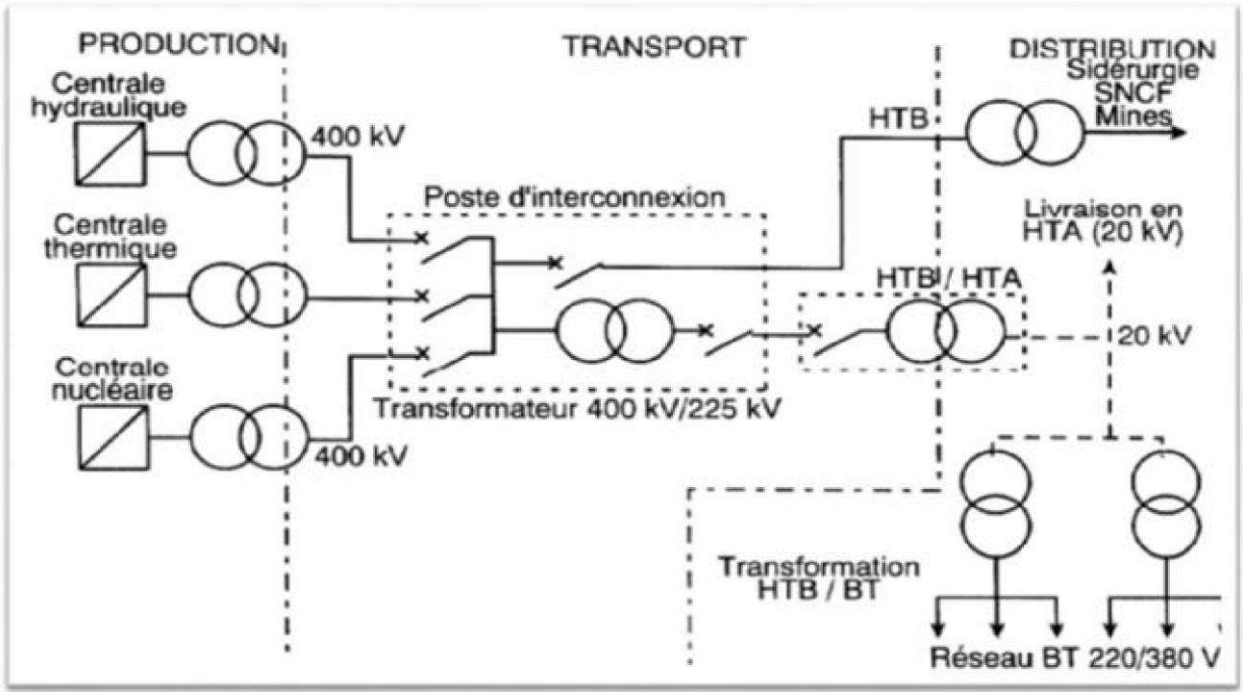


Figure II.2. Les sous-systèmes du réseau électrique **[25]**

II.3.1. Structure du réseau électrique en Algérie :

II.3.1.1. Réseaux d'utilisation :

Ces sont les réseaux de basse tension (BT) qui alimentent les maisons, l'éclairage public, les moteurs et les appareils domestiques. Ce type de réseau électrique doit présenter une continuité de service permanente. Généralement la gamme de tension est de 220 volts à 380 volts **[25].**

II.3.1.2. Réseaux de distribution :

Ce sont les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent aux réseaux d'utilisation les puissances nécessaires demandées. Ils doivent observer des distances limitées de voisinage, c'est pour cela que ces réseaux se réalisent en souterrain dans les villes. (En Algérie le niveau de tension de distribution de l'énergie est fixé à 10 kV) **[25].**

II.3.1.3. Réseaux de répartition :

Ce sont les réseaux HT/MT (10/30 kV), leur fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution, Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils classer veut qui sont aux générales des zones importantes de consommation. Pour assurer cette fonction ces réseaux auront une topologie de réseau bouclé, ce qui permet d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties **[25].**

II.3.1.4. Réseaux de transport :

Ils assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire national grâce à des transits de puissances importantes et de tensions qui sont de 60, 220, et 400 kV **[25].**

II.3.2. Topologie des réseaux :

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- Par les lignes aux appareillages plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

II.3.2.1. Réseaux radiaux :

Le principe de fonctionnement de réseau radial est à une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur une telle structure ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Il est de type arborescent. Cette arborescence se déroule à partir des points d'alimentation, qui sont constitués par les postes de distribution publique HTB/HTA ou HTA/HTA (répartition) **[26].**

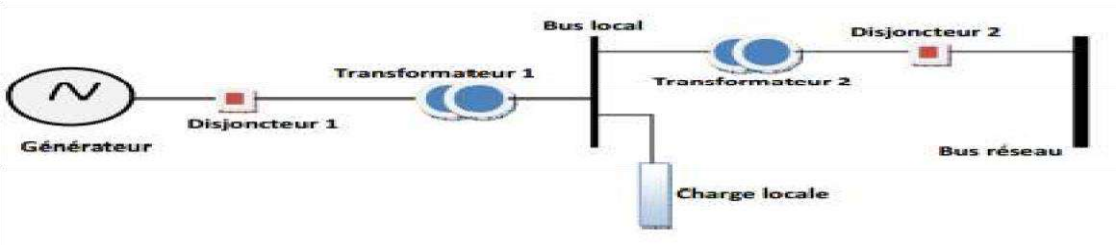


Figure II.3. Schéma d'un réseau radial.

II.3.2.2. Réseaux bouclés :

Cette topologie **(Figure II.4)** est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés **[27].**

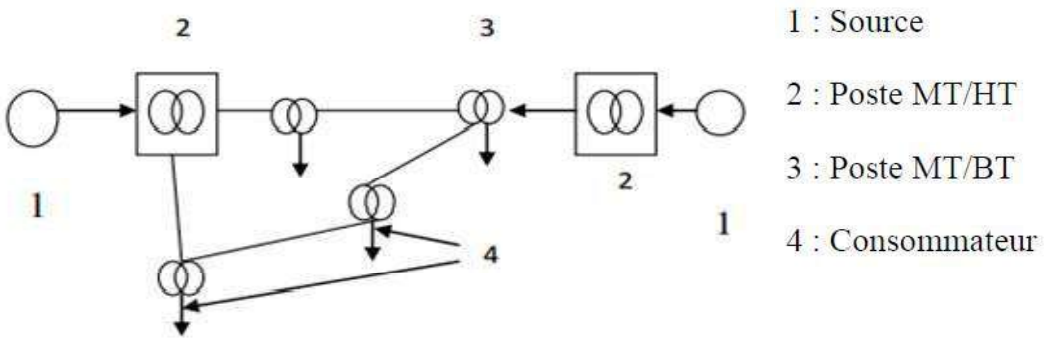


Figure II.4. Schéma simplifié d'un réseau bouclé.

II.3.2.3. Réseaux maillés :

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

On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher **[28].**

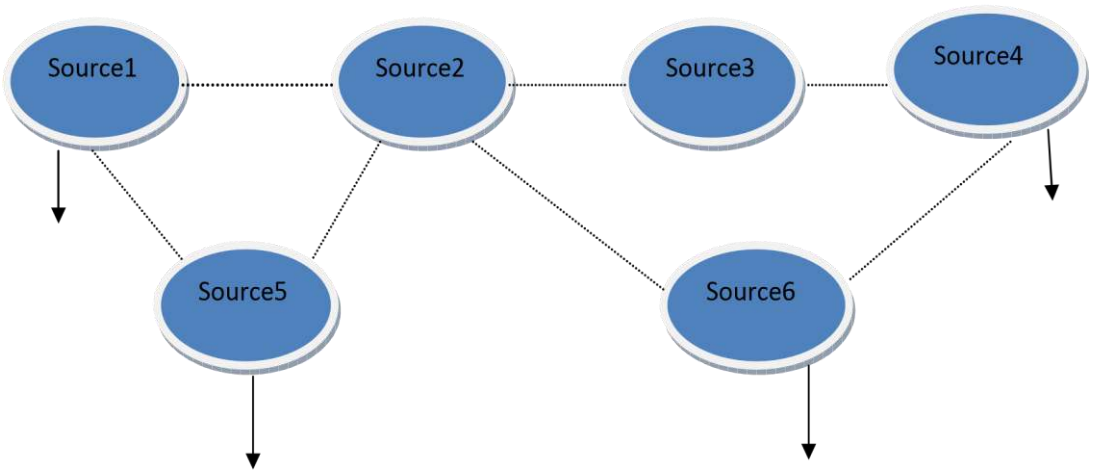


Figure II.5. Schéma simplifié d'un réseau maillé.

II.4. Perturbations du réseau électrique :

Le réseau électrique peut être soumis à de multiples perturbations. Ces défauts, qui peuvent être mesurés grâce à l'utilisation de centrales de mesure, peuvent endommager les machines et fragiliser toutes les installations électriques.

Il existe différents types de perturbations : les creux de tension, les surtensions passagères, les phénomènes transitoires, les déséquilibres, les distorsions harmoniques ou encore les entailles de commutations **[29].**

II.4.1. Creux de tension :

Les creux de tension sont des réductions soudaines de plus de 10% de la tension nominale, suivies de son rétablissement après une courte durée variant entre (08) milli secondes et une (01) minute.

Ces derniers sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle.

Ils sont caractérisés par leur amplitude et leur durée et peuvent être monophasés ou triphasés **(Figure II.6)** selon le nombre de phase concerné. Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excédent certaines limites **[30].**

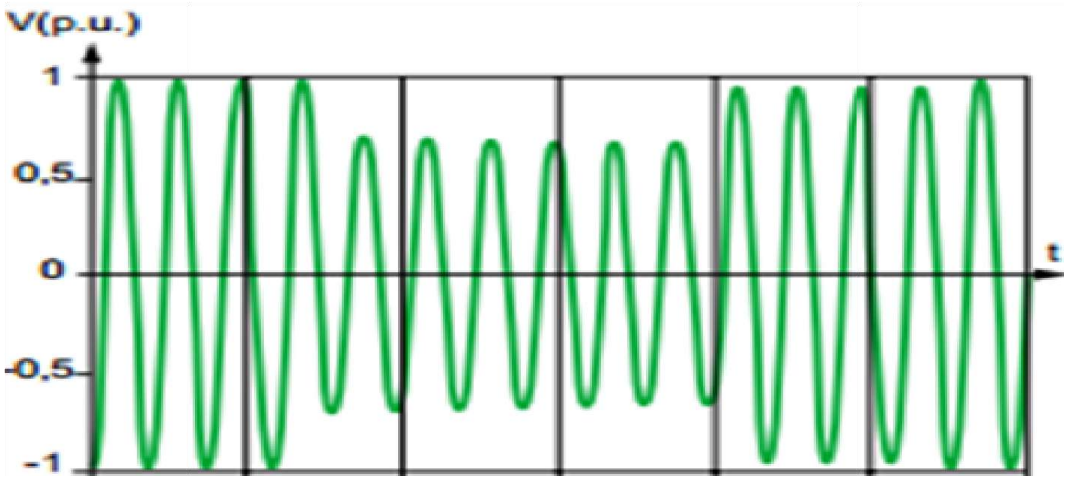


Figure II.6. Forme d'onde d'un creux de tension.

II.4.2. Chute de tension :

Les chutes de tension apparaissent lors du transit de puissance dans une ligne. Lorsque celui-ci est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante parmi les facteurs qui causent la chute de tension, on trouve **[31]** :

II.4.2.1. Production très éloignée de la consommation :

Dans la plupart des cas, les sources de production de l'énergie électrique se trouvent très éloignés des zones de consommation. Le transport de l'énergie s'accompagne des chutes dues au transport de l'énergie réactive **[31].**

II.4.2.2. Manque locale de puissance réactive :

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise.

A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs. La limite de production de la puissance réactive des générateurs et due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotoriques et statoriques **[31].**

II.4.2.3. Charge appelée trop importante :

L'une des causes de l'instabilité de tension correspond à une charge élevée. Ceci est dû à l'augmentation croissante de la demande et à un large transfert d'énergie entre compagnies.

Une instabilité de tension peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue.

II.4.3. Surtension :

Les surtensions sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus 110% de la tension nominale **(Figure II.7)**, laquelle se rétablit après une courte durée.

Les surtensions sont de trois natures :

- Temporaires (à fréquence industrielle),
- De manœuvre,
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre),
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre) **[32].**

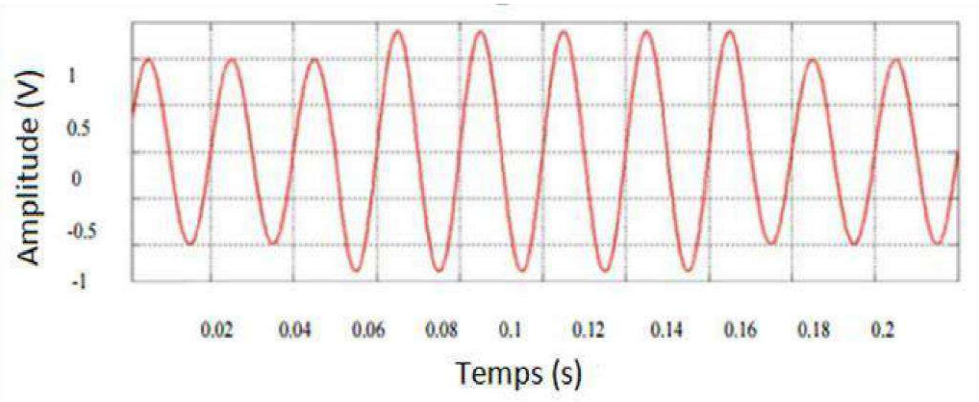


Figure II.7. Exemple de surtension**.**

II.4.4. Déséquilibre de tension :

Il est caractérisé par les symétries d'amplitude ou de déphasage des tensions triphasés en régime permanent. Il se produit dans les systèmes de distributions lorsque les impédances

des lignes du réseau sont asymétriques, ou lorsque des branches alimentent un équipement monophasé ou un récepteur triphasé déséquilibré **(Figure II.8).**

L'impact le plus courant du déséquilibre est la surchauffe des équipements et par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie **[33].**

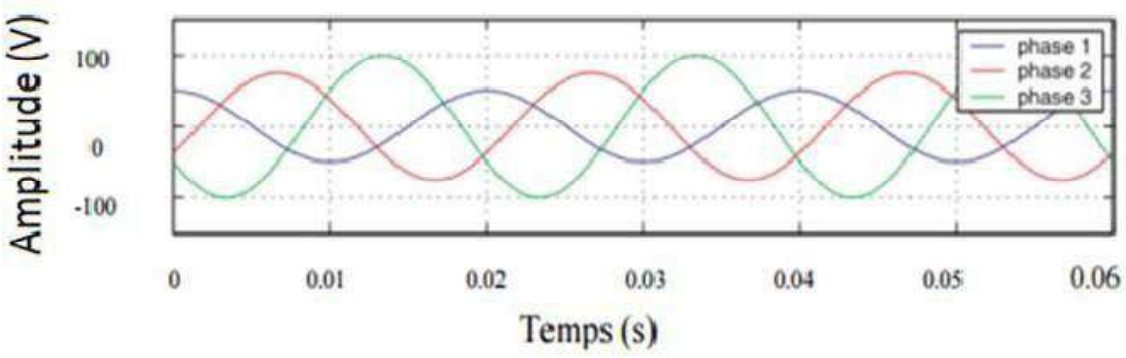


Figure II.8. Forme d'onde illustrant un déséquilibre de tension**.**

II.4.5. Harmoniques :

Les harmoniques sont des perturbations qui affectent la forme de la tension **(Figure II.9).** Elles sont caractérisées par des composantes multiples de la fréquence fondamentale. Le courant consommé par les charges connectées au réseau présence une forme de sinusoïdale distordue.

Les harmoniques sont dû à l'introduction des charges non-linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs…) **[31].**

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer :

- Des vibrations et bruits,
- Des échauffements des condensateurs,
- Des échauffements dus aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs,
- Des perturbations sur le fonctionnement de certains appareils électriques.

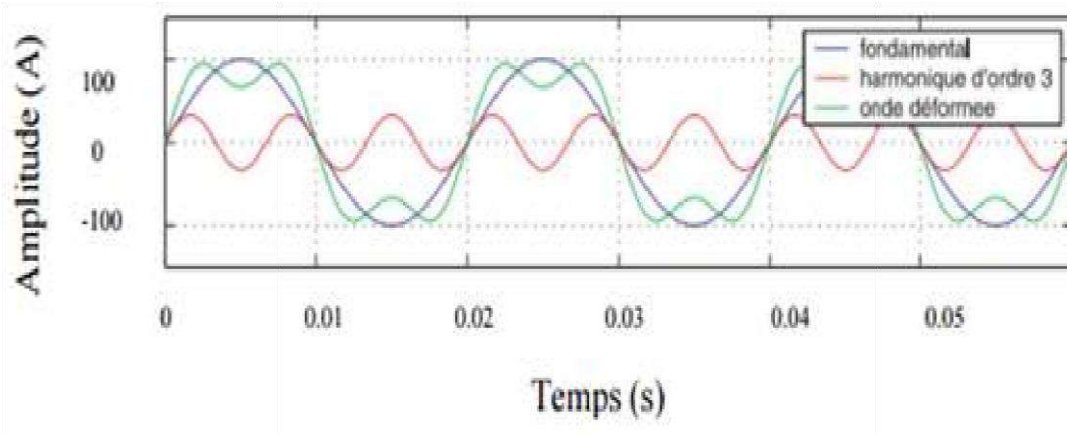


Figure II.9. Harmoniques**.**

II.5. La Stabilité d'un réseau électrique :

II.5.1. Définition de la Stabilité d'un réseau électrique :

Pendant des années, des recherches diverses et complexes étaient effectuées pour comprendre les problèmes de stabilité des systèmes de puissance. Ainsi de nombreuses définitions de la stabilité de systèmes de puissance étaient proposées en insistant sur les divers aspects qui reflètent la manifestation de l'état stable de système.

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 **[34].**

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 **[35].**

II.5.2. Système Electro-énergétique :

On appelle un système électro-énergétique un ensemble d'installations électriques destinées à produire, transporter et à la fois distribuer l'énergie électrique aux consommateurs **[36].**

II.5.3. Réseau infini :

Un réseau est dit infini ou de grande puissance lorsque sa tension et sa fréquence sont fixes et une perturbation sur une machine n'affecte pas le réseau **[36].**

II.5.4. Synchronisme :

On dit qu'une machine fonctionne en synchronisme, si sa fréquence est égale à la fréquence du réseau. On dit qu'un système fonctionne en synchronisme, si toutes les machines reliées à ce réseau ont la même fréquence du réseau **[36].**

II.5.5. Description générale du système électro-énergétique étudie :

Un réseau SMIB (Single Machine Infinity Bus System) est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est à-dire dont la puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) à travers des lignes et d'un transformateur. La machine synchrone est modélisée par une force électromotrice constante $\boldsymbol{E}$ derrière une réactance $\boldsymbol{X_s}$.

Le nœud infini est un point où la tension est constante et fixée en module et en phase (inertie très grande par rapport à des autres machines).

La figure **(II.10)** représente un système standard IEEE type SMIB avec la commande d'excitation du Générateur Synchrone Puissant **[36].**

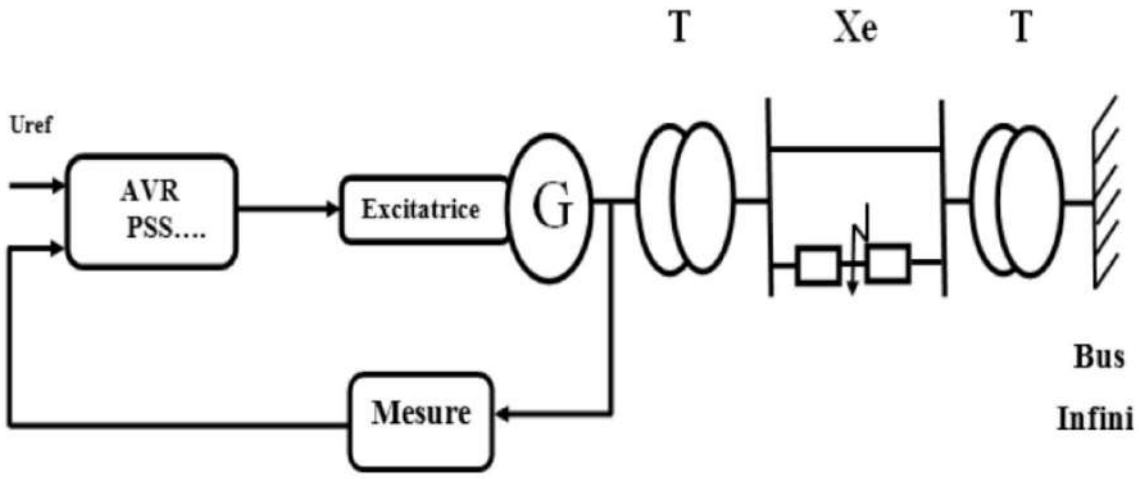


Figure II.10. Système standard IEEE type SMIB **[36].**

II.6. Classification de la stabilité :

La stabilité peut être étudiée en considérant la topologie du réseau sous différents angles.

L'état de fonctionnement d'un réseau électrique est décrit selon des grandeurs physiques, telles que l'amplitude et l'angle de phase de la tension à chaque bus, et la puissance active/réactive circulant dans chaque ligne et la vitesse de rotation de la génératrice synchrone. Si elles ne sont pas constantes, le réseau électrique est considéré comme étant en perturbations.

La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation :

- Stabilité de l'angle du rotor.
- Stabilité de tension.
- Stabilité de fréquence.

La stabilité peut être classifiée en petite et grande amplitude de perturbation en fonction d'origine et de l'ampleur du défaut. Par rapport au temps d'évaluation, la stabilité peut être à court ou à long durée, tel qu'il est décrit dans la **(Figure II.11) [37].**

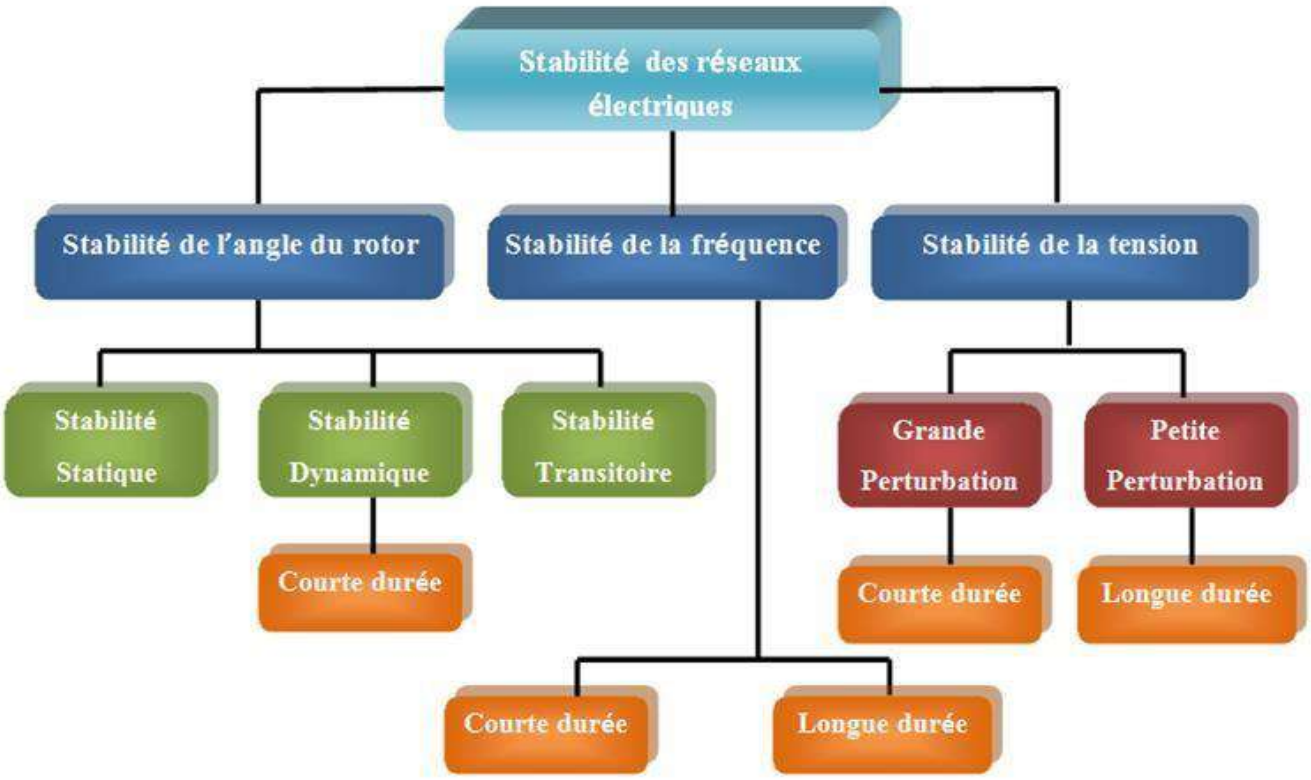


Figure II.11. Classification de la stabilité de réseau électrique **[34].**

II.6.1. La stabilité de tension :

La stabilité de tension est la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension de fonctionnement normal dans les limites admissibles à tous les jeux de barres, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation.

L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension.

Il est important de noter que l'instabilité de tension ne se produit pas toujours toute seule.

Souvent, l'instabilité de tension et l'instabilité de l'angle de rotor se produisent ensemble,

L'une pouvant entraîner l'autre, Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations **[38].**

II.6.1.1. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations :

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production, ...etc.

II.6.1.2. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

Elle est définie comme étant la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit, ...etc.

II.6.2. La stabilité de fréquence :

C'est la capacité d'un réseau électrique à maintenir la fréquence dans les limites admissibles. Suite à une perturbation grave dans le réseau, Cette perturbation résulte d'un déséquilibre significatif entre la production et la charge. Cette stabilité dépend des capacités de maintenir ou restaurer l'équilibre entre la production et la charge. Avec une perte minimale involontaire de la charge,

L'instabilité résultante se produit sous forme d'oscillations de la fréquence soutenue, menant au déclenchement des unités de production et/ou des charges pendant les variations de la fréquence, 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 **[39].**

II.6.3. Stabilité de l'angle de rotor :

La stabilité de l'angle de rotor concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation.

Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système.

L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs **[40].**

Suivant l'amplitude de la perturbation, nous pouvons caractériser la stabilité de l'angle de rotor en trois sous-catégories :

II.6.3.1. La stabilité statique :

Après le régime transitoire dû à la perturbation, le système entre dans le régime permanent. Dans ce cas, pour étudier le système, il faut évaluer la stabilité statique du réseau.

Le système n'est pas stable si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : l'état instable ou l'état d'urgence. Dans un réseau qui est dans l'état d'urgence, Les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires. Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement. Dans cette situation, on peut ramener tout le réseau à l'état normal grâce à des opérations de restauration **[37].**

II.6.3.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité 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 **[39].**

Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable.

II.6.3.3. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire) :

La stabilité transitoire reste toujours une considération de base et d'une grande importance dans le design et le fonctionnement du réseau électrique.

Elle se rapporte à l'aptitude du système électrique de retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude, Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale, La réponse du système implique de grandes variations des angles rotoriques, La stabilité transitoire dépend de la relation non-linéaire couples-angles.

Le phénomène de la stabilité transitoire concerne les grandes perturbations telles que :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La perte d'un ouvrage (une ligne de transmission, débranchement des transformateurs).
- La perte d'un groupe de production **[41]**.

Les conséquences de ces défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement total du réseau, 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 (en anglais First Swing Instability) elle s'étend sur 3 à 5 secondes **(Figure II.12 cas 1**).

Elle peut 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) **(Figure II.12 cas2**), La gamme de temps associée s'étend de 10 à 20 secondes **[41]**.

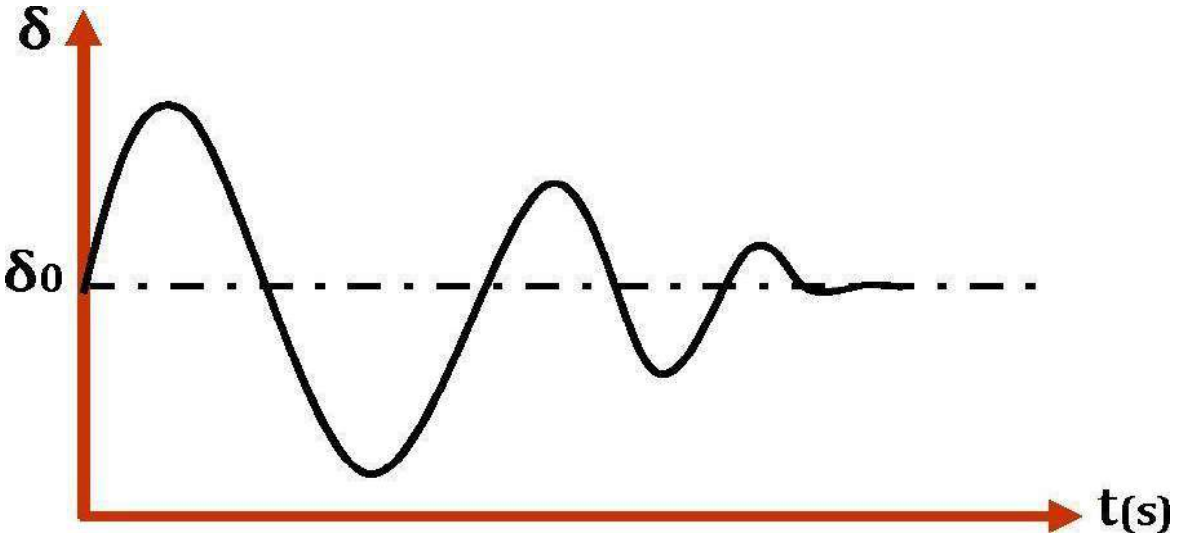


Figure II.12. Cas 1. Instabilité de première oscillation.

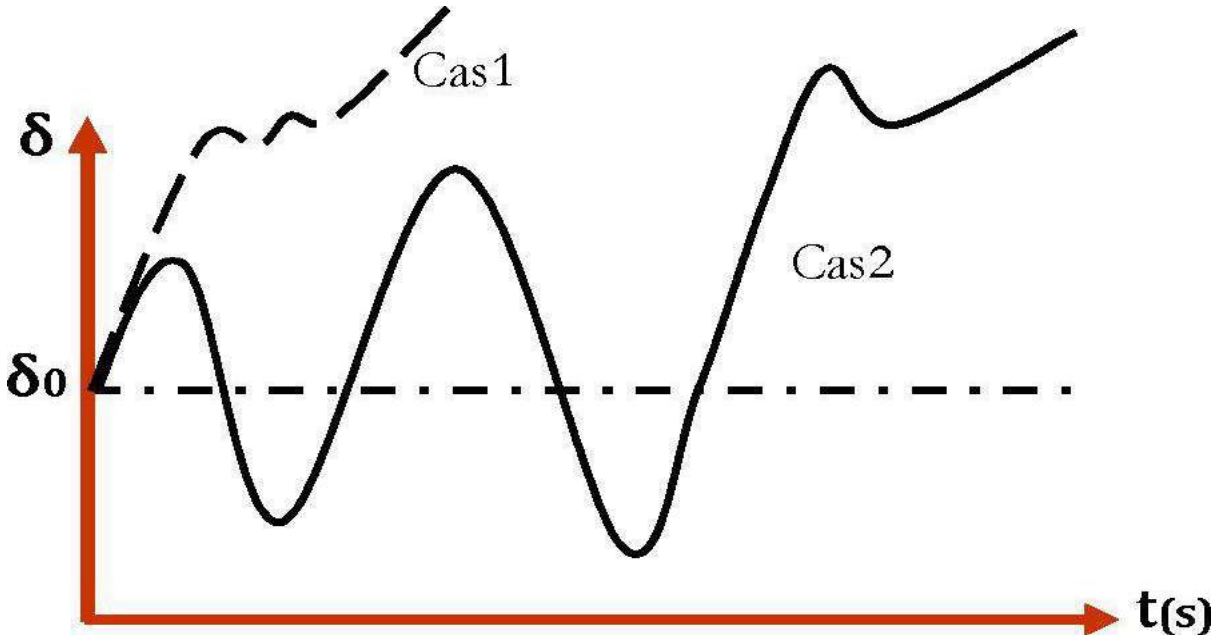


Figure II.12. Cas 2. Instabilité de plusieurs oscillations.

Le concept de la stabilité peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère des aires égales (Equal Area Criteron). Cette rapproche regroupe l'équation du mouvement et le couple (P-δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle du 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 transport **(Figure II.13) [41]**.

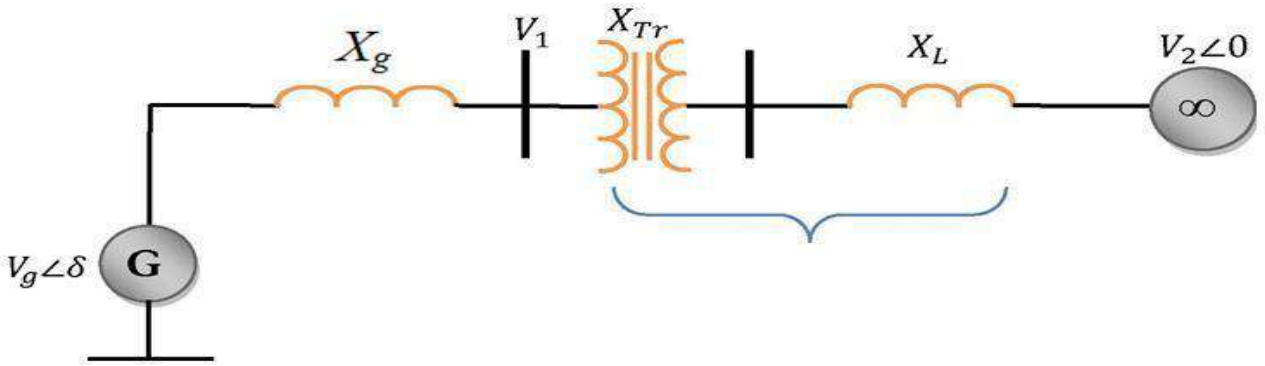


Figure II.13. Générateur synchrone connecté à un jeu de barres infini.

Le générateur est modélisé par une source de tension idéal $\boldsymbol{V_g}$ en série avec une réactance $\boldsymbol{X_g}$ (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance $\boldsymbol{X_E}$.

$$\boldsymbol{X_E = X_{TR} + X_L} \quad \text{..... (II.1)}$$

Dans l'état d'équilibre la puissance produite $\boldsymbol{P_e}$ par le rotor est donnée par l'équation suivante :

$$\boldsymbol{P_e = \frac{V_g . V_2}{X_g + X_s}} \quad \text{..... (II.2)}$$

Le mouvement du rotor qui obéit à la deuxième loi du NEWTON est donné par l'équation différentielle suivante :

$$\boldsymbol{Cm - Ce = \frac{Jd^2\theta m}{dt^2}} \quad \text{..... (II.3)}$$

$\boldsymbol{J}$ **:** Moment d'étertie total de la machine synchrone.

$\boldsymbol{\theta}$ **:** angle mécanique du rotor (rad).

$\boldsymbol{Cm}$ **:** couple mécanique de la turbine ou la charge ($N.m$).

$\boldsymbol{Ce}$ **:** Couple électrique du rotor ($N.m$).

Si l'équation **(II.3)** est multipliée par le terme de la pulsation mécanique angulaire, on obtient :

$$\boldsymbol{\omega m}.\boldsymbol{J}\frac{\boldsymbol{d^2\theta m}}{\boldsymbol{dt^2}} = \boldsymbol{P_m} - \boldsymbol{P_e} \quad \textbf{(II.4)}$$

Tel que :

$\boldsymbol{Pm}$ = $\boldsymbol{Cm}$. ω$\boldsymbol{m}$ **:** la puissance mécanique exercée par le rotor (W).

$\boldsymbol{Pe}$ = $\boldsymbol{Ce}$. ω$\boldsymbol{m}$ **:** la puissance électrique exercée par le rotor (W).

Si l'accélération angulaire est exprimée en angle électrique, au lieu de l'équation **(II.4).**

On aura :

$$\frac{2}{\boldsymbol{P}}.\boldsymbol{\omega m}.\boldsymbol{J}\frac{\boldsymbol{d^2\theta e}}{\boldsymbol{dt^2}} = \boldsymbol{P_m} - \boldsymbol{P_e} \quad \textbf{(II.5)}$$

L'utilisation de :

$$\boldsymbol{\omega m} = \frac{\boldsymbol{\omega e}}{\boldsymbol{P}/_2} \quad \textbf{(II.6)}$$

Nous donnons :

$$\frac{\boldsymbol{2}}{\boldsymbol{\omega e}}.\left(\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{\omega m2}.\boldsymbol{J}\frac{\boldsymbol{d^2\theta e}}{\boldsymbol{dt^2}}\right) = \boldsymbol{P_m} - \boldsymbol{P_e} \quad \textbf{(II.7)}$$

Comme :

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{J}.\boldsymbol{\omega}2.\boldsymbol{\omega m} \quad \textbf{(II.8)}$$

On obtient alors :

$$\boldsymbol{2}\frac{\boldsymbol{H}}{\boldsymbol{\omega e}_{\circ}}\frac{\boldsymbol{d^2\theta e}}{\boldsymbol{dt^2}} \quad \textbf{(II.9)}$$

Donc l'équation du système est décrite comme suit :

$$\frac{\boldsymbol{H}}{\boldsymbol{\omega}_{\circ}}\frac{\boldsymbol{d^2\delta}}{\boldsymbol{dt^2}} = \boldsymbol{P_a} = \boldsymbol{P_m} - \boldsymbol{P_e} \quad \textbf{(II.10)}$$

Avec :

$\boldsymbol{Pa}$ **:** Puissance de l'accélération (PU).

$\boldsymbol{P}$e **:** Puissance électrique (PU).

Pm : Puissance mécanique (PU).

δ : Angle interne de la machine (rad).

H : Constante d'inertie (rad).

$\omega_{\circ}$: Pulsation de référence.

L'équation (**II.2)** peut être écrite comme suit :

$$P_e = P_{max}.\sin\delta \quad \text{(II.11)}$$

a. Relation entre la puissance rotoriques (P- δ) :

Dans l'état équilibre, la puissance produite par le générateur $\mathbf{P_e}$ est donnée par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{V_g.V_2}{X}\sin\delta \quad \text{(II.12)}$$

Ou, **δ** est l'angle de rotor, est le déphasage entre la tension interne du générateur V_g et la tension du jeu de barres infini V_2.

L'équation **(II.11)** est représentée graphiquement par la (**Figure II.14).**

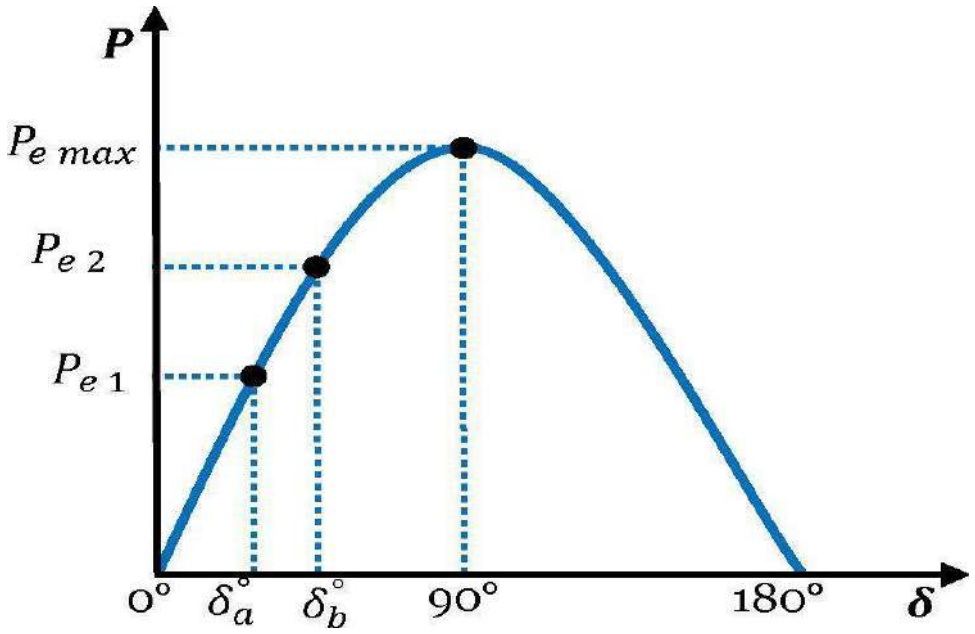


Figure II.14. Graphe de la puissance électrique P= ∫ (δ).

L'ors de l'équilibre la puissance $\mathbf{P_{e1}}$ est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant $\boldsymbol{\delta_a}$.

Un brusque changement sur la charge du générateur entraine une variation de la puissance mécanique par exemple de $\mathbf{P_{e1}}$ à $\mathbf{P_{e2}}$ **(Figure II.14).**

Le rotor va accélérer de sorte que l'angle du rotor augmente de $\boldsymbol{\delta a}$ à $\boldsymbol{\delta b}$, pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Ce pendant l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément.

Ainsi bien que la puissance développée par l'angle $\boldsymbol{\delta b}$ soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle $\boldsymbol{\delta b}$ jusqu'à qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération.

L'énergie supplémentaire va ralentir le rotor et la diminution de l'angle de puissance, suivant l'inertie et là l'amortissement du système les oscillations de l'angle du rotor résultant vont s'amortir et la machine restera stable **(cas 1 Figure II.15)** Ou diverger et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le système **(cas 2 Figure II.15).**

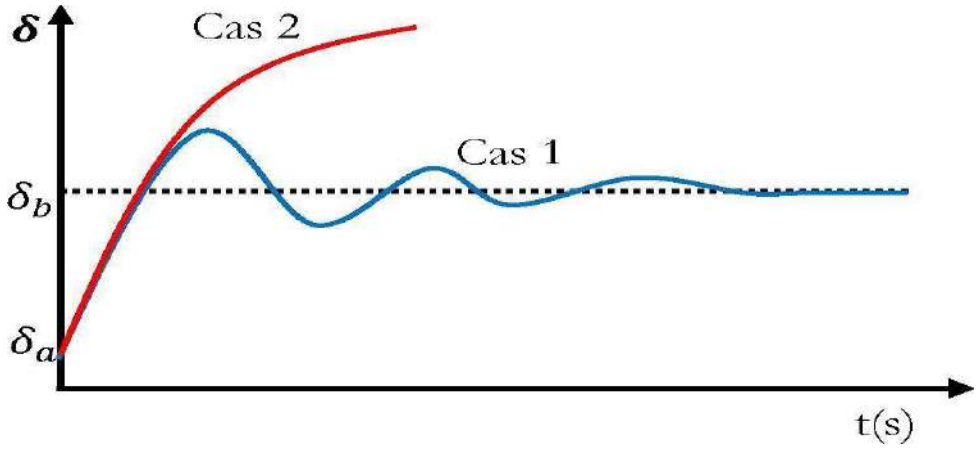


Figure II.15. Variation temporelle d'angle rotorique.

II.7. Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID) :

C'est le paramètre le plus décisif dans l'analyse de la stabilité transitoire d'un réseau électrique. Mathématiquement c'est la solution de l'équation différentielle de second ordre non linéaire connue sous le nom de Swing équation ou équation de mouvement. Physiquement, il représente le temps maximal durant lequel notre réseau peut supporter un défaut (court-circuit, surcharge, surtension, surintensité) sans perdre sa stabilité **[42].**

D'après l'équation de mouvement de la machine :

$$t_c = \sqrt[2]{\frac{H(\delta_c - \delta_0)}{90.f.P_m}} \quad \text{(II.13)}$$

D'où :

δ_c : l'angle critique.

II.8. Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire :

Avec l'accroissement mondial sur la demande de l'énergie électrique, l'interconnexion entre les différents payés et les contraintes économiques pour la construction des nouvelles centrales électriques et la réalisation de nouvelles lignes de transports, la stabilité transitoire est devenue plus critique tous ces facteurs entrainent l'exploitation des réseaux électriques prés de leurs limites de stabilité. Ce qui donne une importance capitale à l'évaluation de la stabilité transitoire en temps réel. À cause de la forte non-linéarité une étude analytique rigoureuse n'est guère possible, la résolution nécessiterait la prise en compte d'un grand nombre des paramètres. Plusieurs méthodes d'évaluation ont été développées. Elles peuvent être classées en trois familles **[41].**

- Méthodes d'intégration numériques.
- Méthodes directes (ou énergétiques).
- Méthodes hybrides.

II.8.1. Méthodes d'intégration numériques :

Ces méthodes évaluent la robustesse du réseau vis-à-vis de grandes perturbations en déterminant son évolution temporelle par résolution, pas à pas, de l'ensemble des équations différentielles non linéaires qui gouvernent les phénomènes de stabilité transitoire, en donnant l'évolution des angles de rotor en fonction du temps, généralement, les méthodes implicites d'intégration numériques sont utilisées pour résoudre l'ensemble d'équations (ex : la méthode trapézoïdale). L'évaluation comporte deux phases :

- La phase pendant défaut caractérisée par une marge de temps très courte (de l'ordre de 100ms).

- La phase après élimination de défaut qui peut s'étendre à quelque secondes (généralement, un system qui n'a pas perdu le synchronisme après quelques secondes, est considéré stable) **[41].** Souvent, on évalue la stabilité :

Soit on cherche à savoir si le system perd le synchronisme pour un temps d'élimination de défaut donné.

Soit on évalue la limite de stabilité par le temps critique d'élimination de défaut CCT (Critical Clearing Time).

Pour détecter la conservation de stabilité, il faut juste vérifier que les angles du rotor des différentes machines s'évoluent dans une marge de valeurs spécifiques durant la simulation **[39].**

II.8.2. Méthodes directes :

Les inconvénients des méthodes temporelles précités ont motivé le développement des méthodes non conventionnelles, en particulier, des méthodes directes basées sur le critère de stabilité de Lyapunov dont les tout premiers travaux remontent à 1947 et 1958 (même s'ils n'appliquent pas à la lettre la théorie générale de Lyapunov mais bien le concept énergétique, qui en est un cas particulier. Contrairement aux méthodes de simulations, les méthodes directes évaluent la stabilité transitoire en évitant de faire recours à la résolution des équations différentielles.

La méthode des aires égales est la méthode la plus utilisée pour évaluer la stabilité transitoire d'un system mono machine reliée à un jeu de barres infini, les résultats d'application de cette méthode est l'angle critique du générateur **[41].**

II.8.3. Méthodes hybrides :

Les méthodes hybrides surmontent les deux limitations des méthodes directes comme suit :

L'estimation du problème de stabilité peut être abordée en considérant un système mono machine ou un système à deux machines équivalent du système multi machines.

La méthode dite SIME (Single Machine Equivalent), est souvent utilisée pour évaluer la stabilité transitoire, c'est une méthode hybride résultant de la combinaison de la méthode

d'intégration temporelle pas à pas appliquée au système multi machine à l'étude, et le critère d'égalité des aires appliqué sur le système mono machine équivalent **[41].**

II.9. Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire :

En vue de son importance dans la planification, la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique, l'amélioration de la stabilité transitoire reste un défi majeur pour les ingénieurs pour éviter tous événement qui peut conduire vers un blackout **[43].**

Les solutions envisageables d'amélioration de la stabilité transitoire se basent sur :

- Augmentation de la constante d'inertie des générateurs ;
- Augmentation de la puissance active ;
- Installation des protections et des appareils de coupure rapides ;
- Implantation des valves rapides des turbines à gaz ;
- Installation des résistances d'amortissement ;
- Utilisation des PSS (Power System Stabilizer).

II.10. Modélisation des composantes du réseau électrique :

Le réseau de transport relie toutes les centrales électriques dans un système de puissance et distribue la puissance aux différents consommateurs.

Les éléments principaux du réseau sont les lignes aériennes à haute tension, les câbles souterrains, les transformateurs et les jeux de barres.

Des éléments auxiliaires peuvent être trouves : des condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes compensation, des systèmes de protection… **[44].**

Pour la modélisation de notre système de puissance, nous intéressons à établir les modèles suivants :

- Modèle des générateurs.
- Modèle de lignes de transmission.
- Modèle de transformateurs.
- Modèle d'une charge.

II.10.1. Modélisation des générateurs :

Dans le calcul de l'écoulement de puissance, un générateur est représenté par une source de tension constante comme le montre la figure ci-dessous **(Figure II.16).**

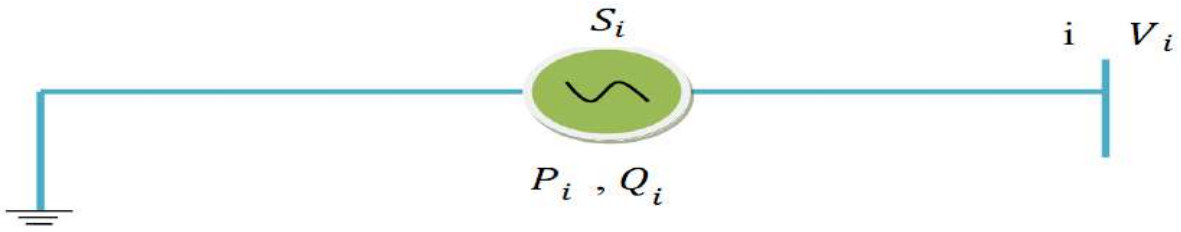


Figure II.16. Modèle d'un générateur.

$$\boldsymbol{S_i = P_i + jQ_i} \quad \textbf{(II.14)}$$

Avec :

$\boldsymbol{S_i}$: la puissance apparente délivrée par le générateur au nœud i.

$\boldsymbol{P_i}$: la puissance active délivrée par le générateur au nœud i.

$\boldsymbol{Q_i}$: la puissance réactive délivrée par le générateur au nœud i.

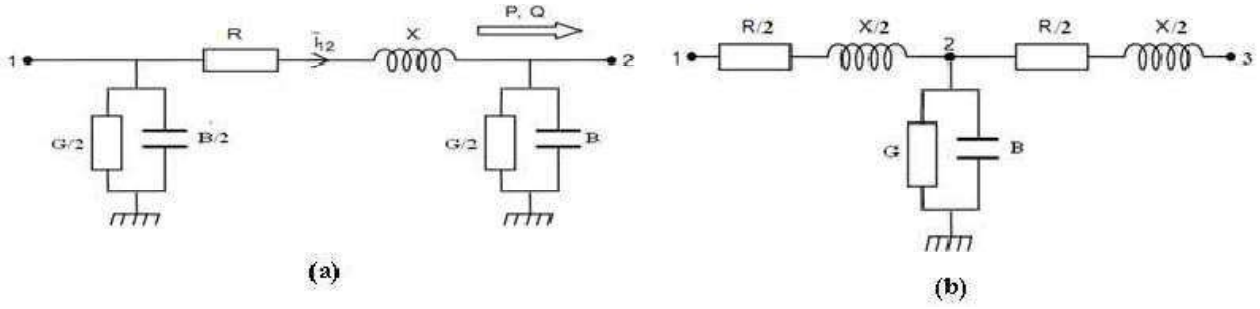
$\boldsymbol{V_i}$: la tension simple entre phase et neutre du générateur au nœud i.

II.10.2. Modélisation d'une ligne de transport :

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation.

Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents **[45].**

Le modèle d'une ligne de transport est donné par des quadripôles symétriques représentes par la Figure **(II.17)** ***(a, b).***



(a) : Modèle en π. (b) : Modèle en T

Figure II.17. Schéma équivalent d'une ligne de transport. **[45].**

D'où :

R : résistance de la ligne.

X : réactance de la ligne.

G : conductance de la ligne.

B : réactance capacitive de la ligne.

II.10.3. Modélisation Transformateurs :

Les transformateurs sont représentés par leur impédance connectée en série avec un transformateur idéal **(Figure II.18).**

Le rapport de transformation est réel pour un transformateur classique alors qu'il est complexe dans le cas d'un transformateur déphaseur.

De manière générale, le rapport de transformation complexe $\boldsymbol{\mu_{ik}}$ est défini par **[26]** :

$$\mu_{ik} = U_i/U_m$$

Avec :

$\boldsymbol{U_i}$: Tension complexe au nœud i.

$\boldsymbol{U_m}$: Tension complexe au nœud m.

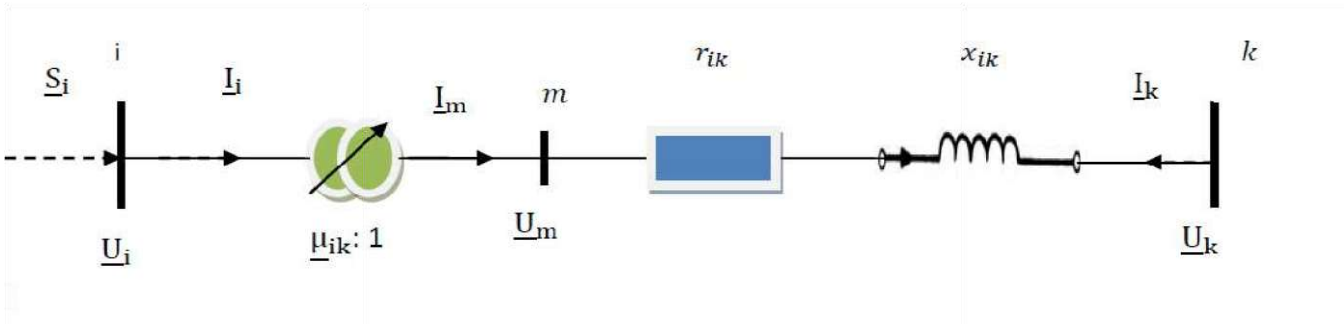


Figure II.18. Modèle d'un transformateur **[26].**

II.10.4. Modélisation d'une charge :

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une impédance Z **(Figure II.19)**.



Figure II.19. Schéma équivalent d'une charge.

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

$$\boldsymbol{Z = Y^{-1}=\frac{P-jQ}{V^2}} \quad \text{.....} \quad \textbf{(II.15)}$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la charge.

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

Z : impédance de la charge.

II.11. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'exposer des généralités sur les réseaux électriques en mentionnant la structure et la topologie du réseau.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. Le concept général de la stabilité peut se synthétiser en trois groupes (stabilité de l'angle de rotor, de la tension et de la fréquence). Ainsi nous avons illustré comment on peut évaluer et améliorer la stabilité transitoire du système.

Nous avons aussi présenté la modélisation du système de puissance (lignes, transformateur, charge), pour les études de la stabilité de réseau.

Chapitre III

Simulation et analyse de résultat

III.1. Introduction :

Les SEE sont souvent sujets à des perturbations pouvant entrainer de sérieux dégâts sur leurs constituants, notamment les générateurs et les lignes de transmission. Ces perturbations peuvent être externes (telles que les coups de foudre) ou internes (telles que les défauts de court-circuit, les variations brusques de charge, etc.).

Elles affectent les conditions de fonctionnement normal, et conduisent souvent à la perte de la stabilité de tout le système.

L'équilibre production consommation de l'énergie électrique, et par conséquent, la continuité de service ne sont alors plus assures **[46].**

Dans ce chapitre, nous allons étudier le comportement du réseau standard IEEE type SMIB (Single Machine Infinity Bus System) face au défaut symétrique (court-circuit triphasé) sur le jeu de barre, avec et sans intégrations de source renouvelable (centrale photovoltaïque).

L'utilisation du logiciel MATLAB nous avons permis d'obtenir plusieurs paramètres indiqués sur les figures qui représentent la tension au niveau de jeu de barre, la vitesse angulaire de générateur, la puissance active et réactive produite par le générateur présence d'un défaut triphasé avec et sans intégrations de centrale photovoltaïque.

III.2. Étapes d'analyse de la stabilité transitoire :

L'analyse de la stabilité transitoire est appréciée en procédant aux étapes de calcul suivantes **[26]** :

- Lecture des données (caractéristiques des lignes, transformateurs, charges, générateurs, régulateurs de tension et de vitesse).
- Calcul de la matrice admittance Y (avant, durant et après l'occurrence de défaut).
- Calcul des impédances équivalentes des charges.
- Calcul de l'écoulement de puissance
- Calcul de la matrice admittance réduite avant défaut, durant défaut, et après défaut.
- Calcul des conditions initiales.
- Résolution des équations différentielles.

- Appréciation de la stabilité et le TCID selon les critères des angles rotoriques.

III.3. Outils de simulations :

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour l'analyse de la stabilité transitoire tels que (MATLAB, EMTP, ETAP, POWER World, PSAT, etc.). Ces logiciels permettent de nous renseigner sur les différents facteurs d'un réseau électrique et à simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau. Ces derniers utilisent les mêmes concepts.

Dans le présent travail, on a choisi MATLAB comme outil de simulation.

III.4. Problématique :

Dans notre étude nous avant présenté les cas suivants :

- Cas N°1 : fonctionnement normal.
- Cas N°2 : avec défauts.
- Cas N°3 : avec intégration d'une source photovoltaïque (PV) et défauts.
- Cas N°4 : avec différentes puissances de source photovoltaïque (PV) et défauts.

III.5. Réseau standard (modèle d'IEEE type SMIB) :

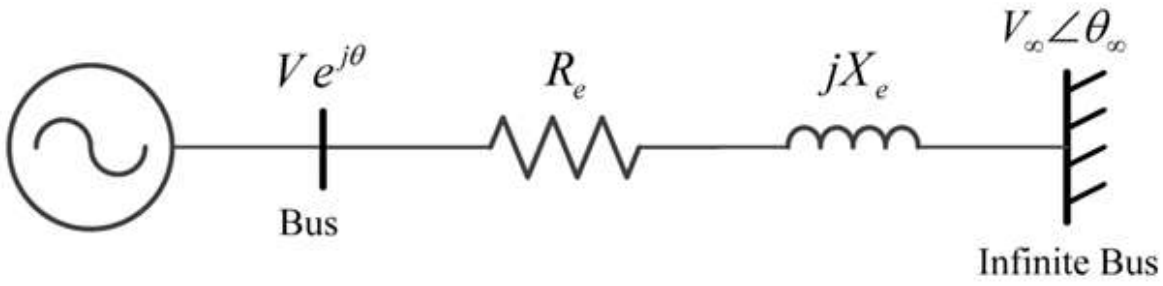


Figure III.1. Modèle d'IEEE type SMIB.

III.5.1. Méthode d'analyse :

Pour examiner l'influence de plusieurs paramètres dans le réseau électrique sur la stabilité de ce dernier, nous avons procédé à une étude comparative vis-à-vis des valeurs du temps critique d'isolement de défaut correspondant à chaque simulation.

Pour ce faire on procède comme suit :

- Création d'un défaut au niveau de jeu de barre, il s'agit d'un court-circuit triphasé équilibré car il représente le défaut le plus sévère qui peut affecter le réseau électrique.
- Changement du temps d'isolement de défaut pour chaque cas d'étude.
- Par la suite une visualisation de vitesse angulaire, l'angle rotorique, ainsi de puissance active et réactive de générateur synchrone et la tension au niveau de jeu de barre du réseau model pour chaque cas d'étude.
- L'observation du comportement transitoire du système ne peut révéler que deux cas :

a) **Système stable :** si toutes les vitesses angulaires des générateurs tendent vers une valeur fixe très proche de la vitesse du synchronisme.
b) **Système instable :** si au moins une vitesse angulaire d'un générateur ne converge pas vers la vitesse de synchronisme.

III.5.2. Calcul du temps critique d'élimination du défaut :

Dans le présent travail, La valeur optimale du TCID, est déterminée par essais et erreurs. Pour cela plusieurs valeurs de la durée défaut *Td* sont préalablement choisies et testées consécutivement jusqu'à ce que le système devienne instable.

La valeur de ce temps correspond au TCID. Pour éclairer cette approche, on considère un défaut triphasé se produisant à l'instant t = 1s sur le jeu de barre.

Le défaut persiste durant un intervalle de temps *Td* dont on fait varier la valeur avec des pas pour obtenir la valeur critique au-delà de laquelle la stabilité n'est plus assurée, après *Td* le défaut est éliminé, l'évaluation de la stabilité des trois périodes avant, durant et après défaut.

III.6. Résultats de simulation et interprétation :

III.6.1. L'état initial (cas N°1) :

Après la simulation du fonctionnement normal du réseau, les résultats des paramètres du réseau : la vitesse angulaire, l'angle rotorique ainsi que la tension, la puissance active et réactive sont présentés ci-dessous (Le système est parfaitement stable).

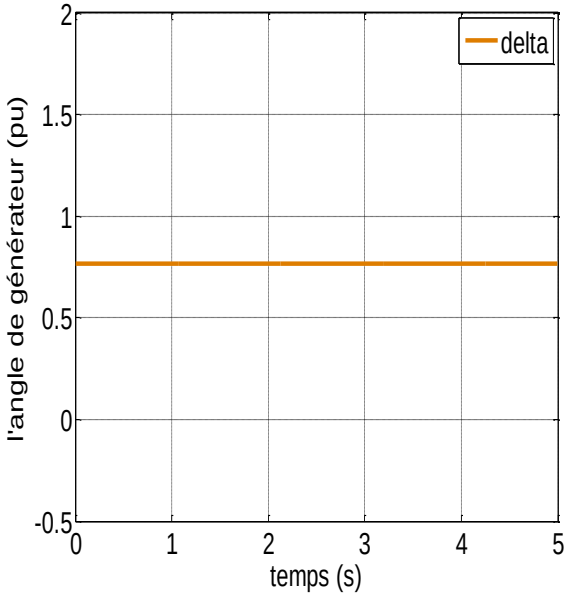


Figure III.2. L'angle.

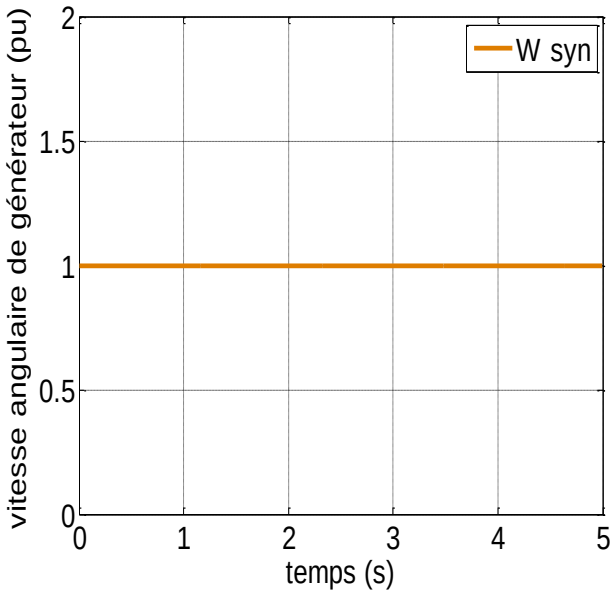


Figure III.3. Vitesse angulaire.

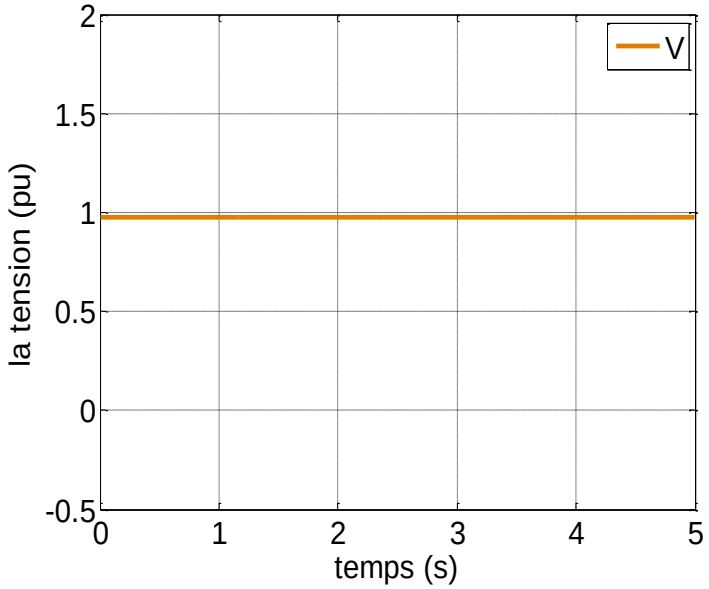


Figure III.4. Tension au jeu de barre.

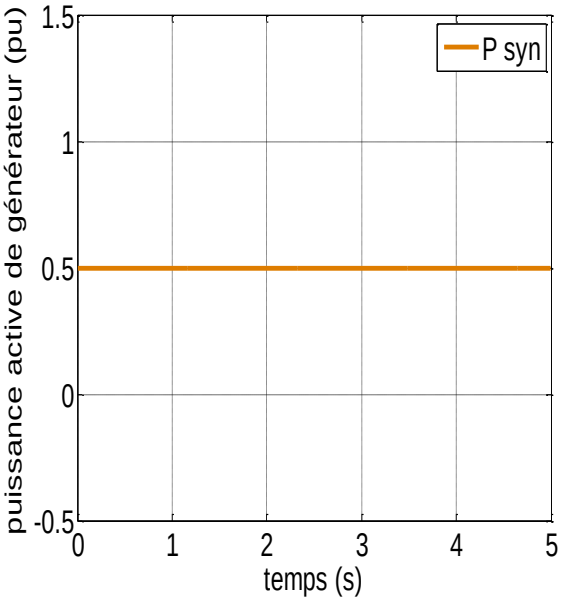


Figure III.5. La puissance active de générateur.

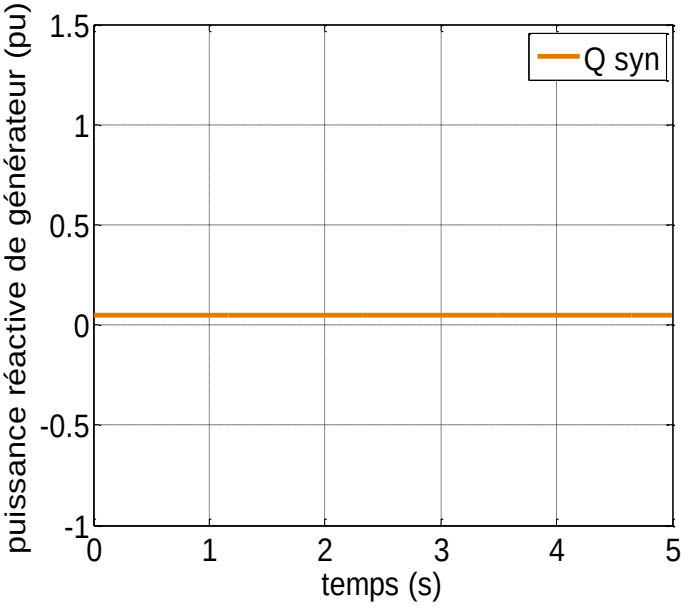


Figure III.6. La puissance réactive de générateur.

III.6.2. Avec défauts (cas N°2) :

Nous avons simulé un défaut au niveau du jeu de barre survenu à t=1s et de durée de 0.15s.

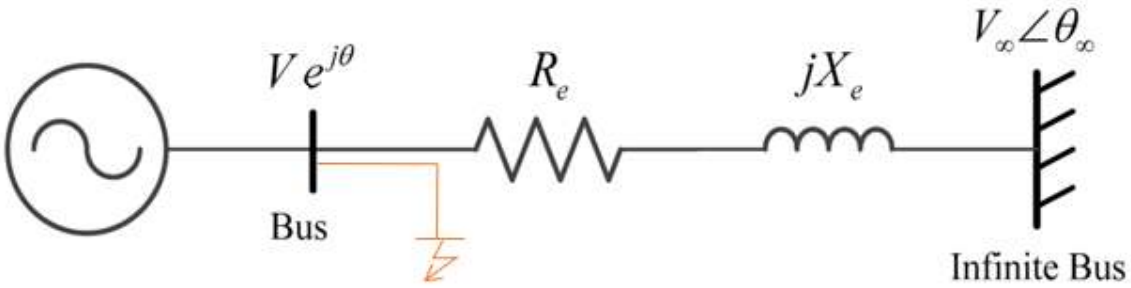


Figure III.7. Application d'un défaut au niveau de jeu de barre.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous :

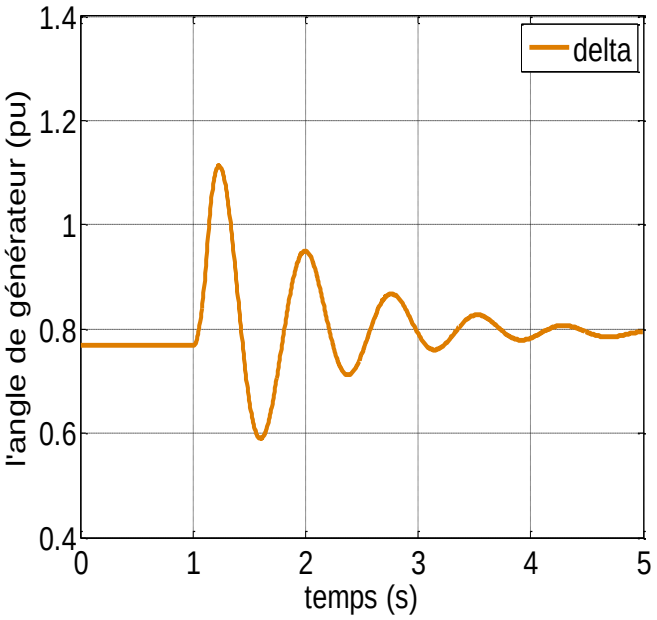


Figure III.8. L'angle à t=0.15s.

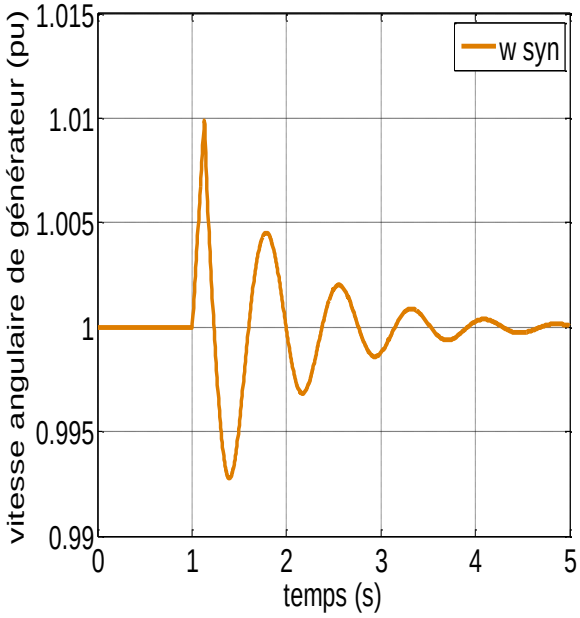


Figure III.9. Vitesse angulaire à t=0.15s.

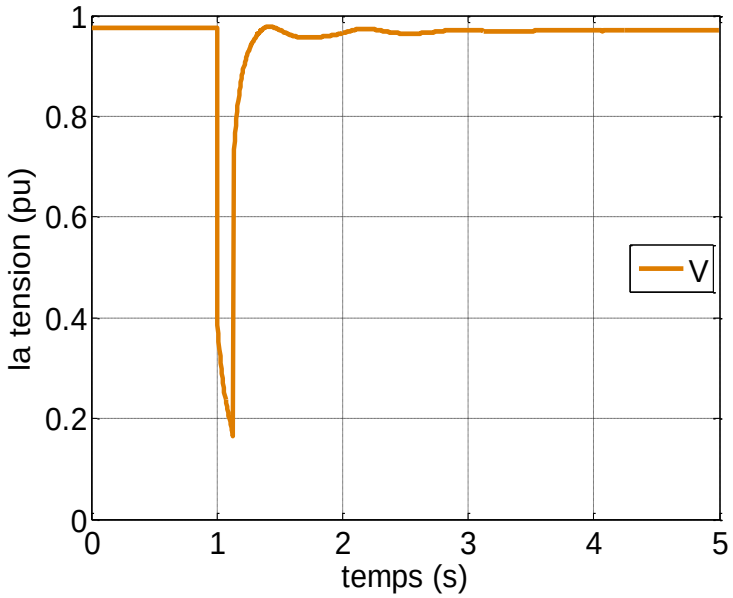


Figure III.10. Tension au jeu de barre à t=0.15s.

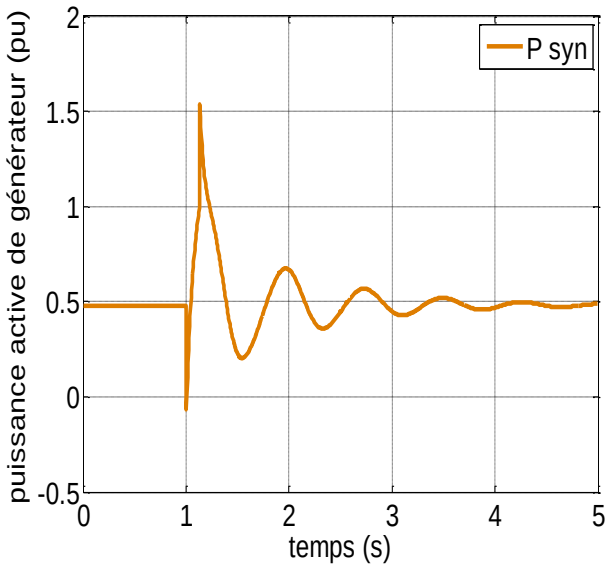


Figure III.11. La puissance active de générateur à t=0.15s.

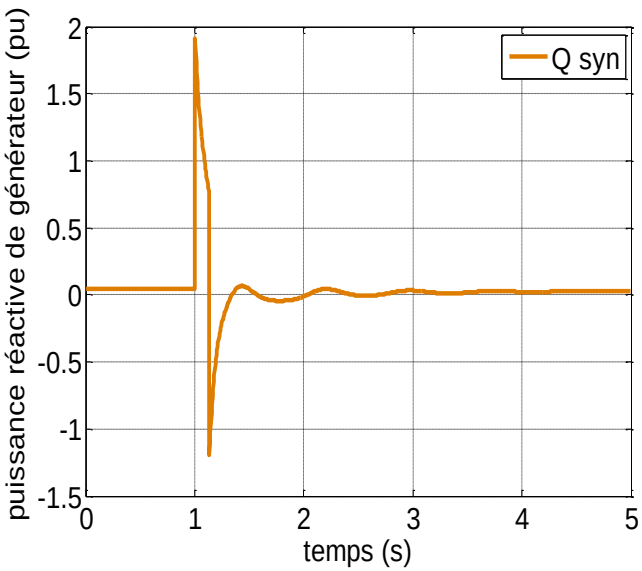


Figure III.12. La puissance réactive de générateur à t=0.15s.

La présence du défaut entraine des oscillations de la vitesse angulaire de générateur qui influent sur les autres paramètres V, P, Q (tension, puissance active et réactive).

Nous avons augmenté la durée d'isolement du défaut d'un pas de t =0.1 s, soit t = 0.25s

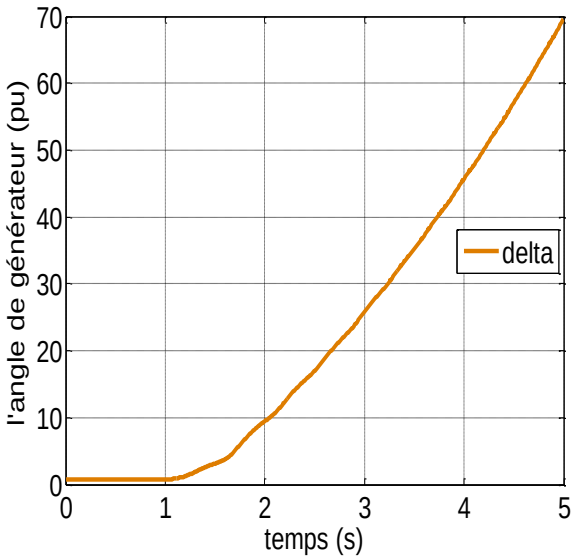


Figure III.13. L'angle à t=0.25s.

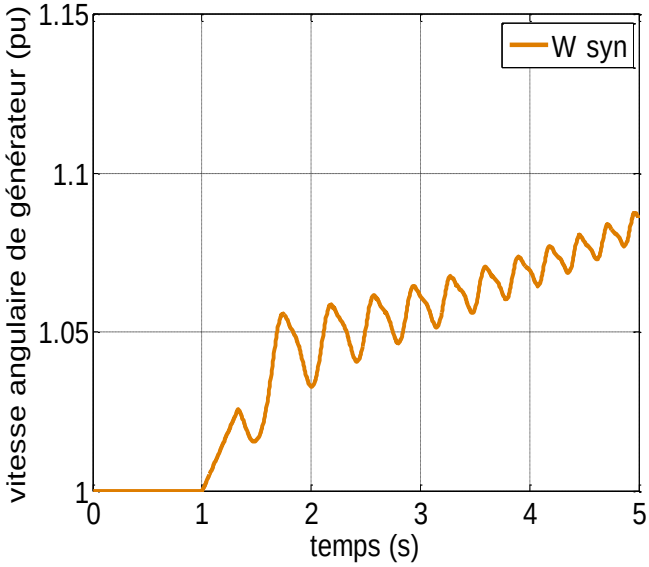


Figure III.14. Vitesse angulaire à t=0.25s.

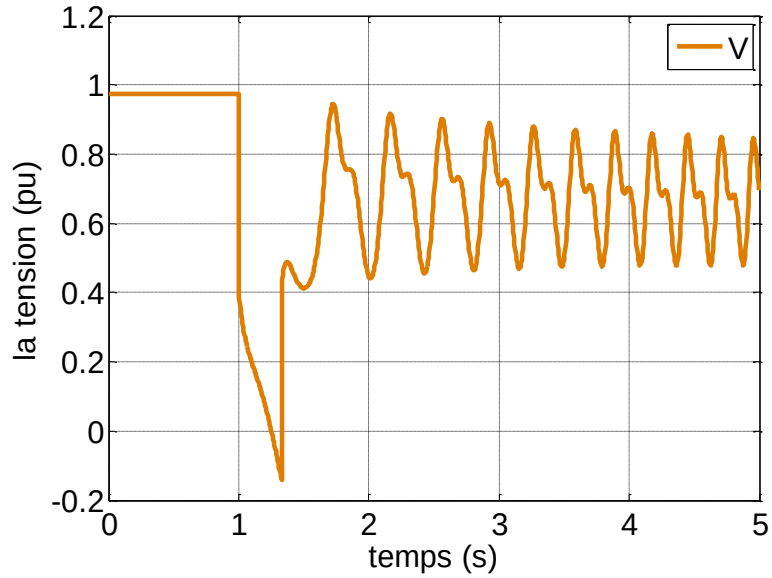


Figure III.15. Tension au jeu de barre à t=0.25s.

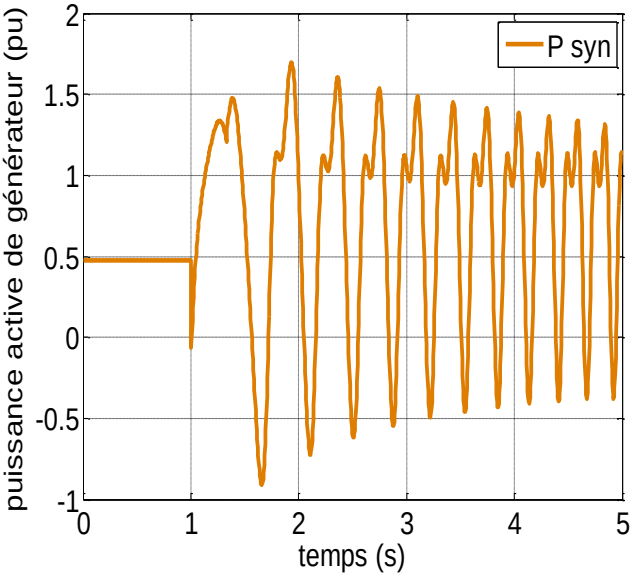


Figure III.16. La puissance active de générateur à t=0.25s.

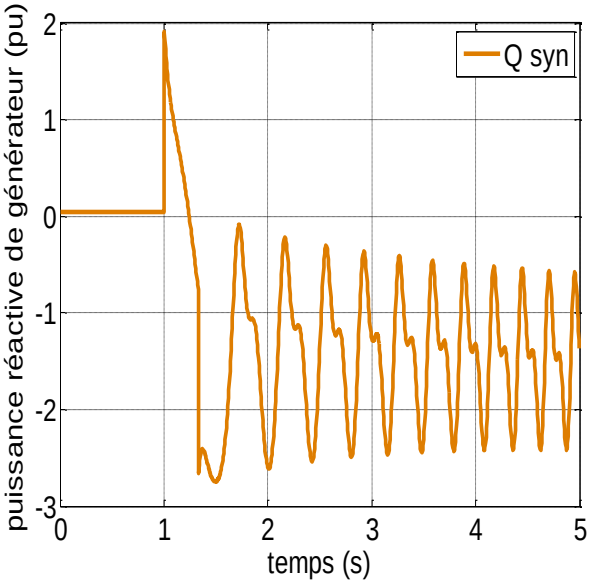


Figure III.17. La puissance réactive de générateur à t=0.25s.

Avec l'augmentation du temps de défaut, la machine perd leur synchronisme et décroche qui entraine aussi l'écroulement de tension.

Dans ce cas on remarque que la vitesse de générateur diverge. Alors le réseau est instable car le générateur diverge. Donc le temps critique d'élimination de défaut doit être inférieur à 0.25s.

III.6.2.1. Analyse des résultats de simulations du cas N°2 :

- Lors du défaut, la vitesse angulaire ω présente des oscillations autour du point d'équilibre. **(Figure III.9)**.
- Durant le défaut, nous avons constaté qu'un creux de tension se présente, une fois que le défaut est éliminé la tension reprend leur allure initiale. **(Figure III.10)**.
- Lors de défaut, des oscillations de la puissance active de générateur apparaissent. **(Figure III.11)**.
- Par analogie, il y a une surproduction de la puissance réactive. **(Figure III.12)**.

Nous avons augmenté la durée d'isolement du défaut d'un pas de t= 0.1s, l'exécution de la simulation nous a permis d'obtenir les résultats qui montrent la perte de la stabilité du système.

- Le générateur a perdu leur synchronisme à partir de (t=1s). **(Figure III.14)**.
- La tension obtenue au niveau du jeu de barre est plus faible par rapport à la tension admissible. **(Figure III.15)**.
- La puissance active au niveau de générateur diminue et la puissance réactive augmente. **(Figure III.16)** ; **(Figure III.17)**.

III.6.3. Avec intégration d'une source photovoltaïque (PV) (cas N°3) :

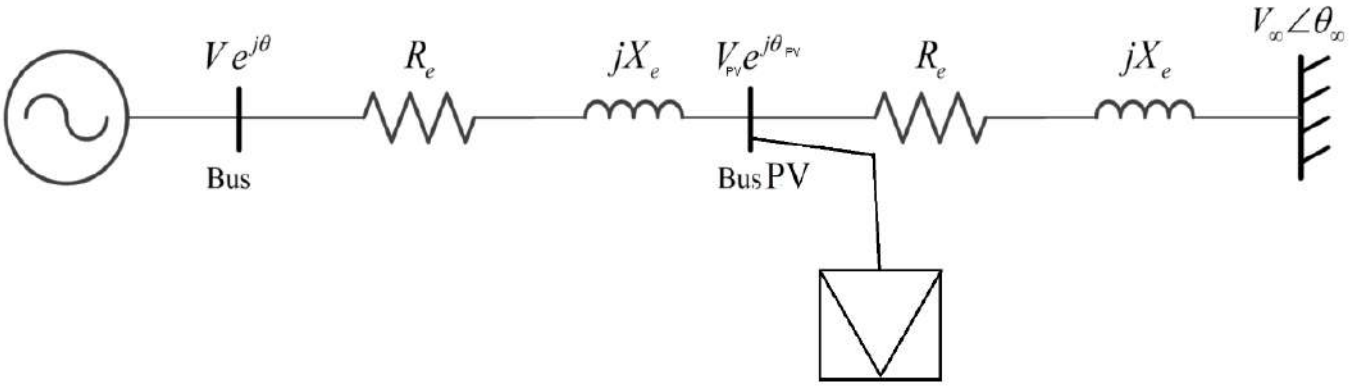


Figure III.18. Intégration d'une source PV.

Nous avons simulé un défaut au niveau du jeu de barre survenu à t=1s et de durée de 0.12s.

On obtient les résultats suivants :

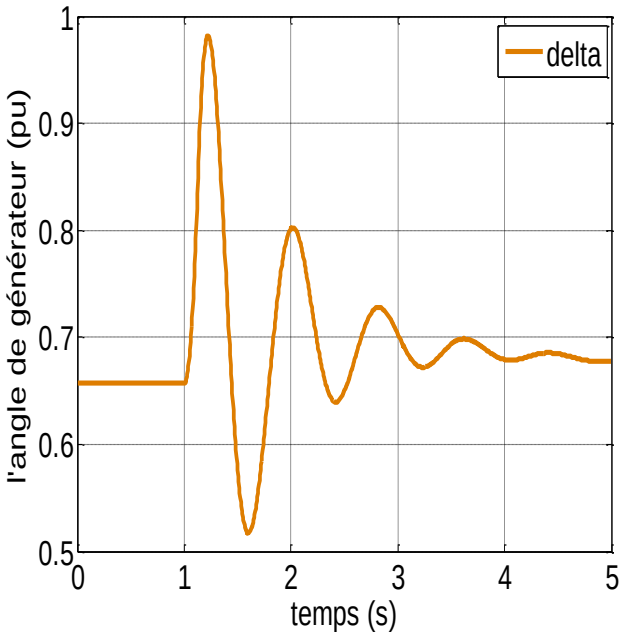


Figure III.19. L'angle à t=0.12s.

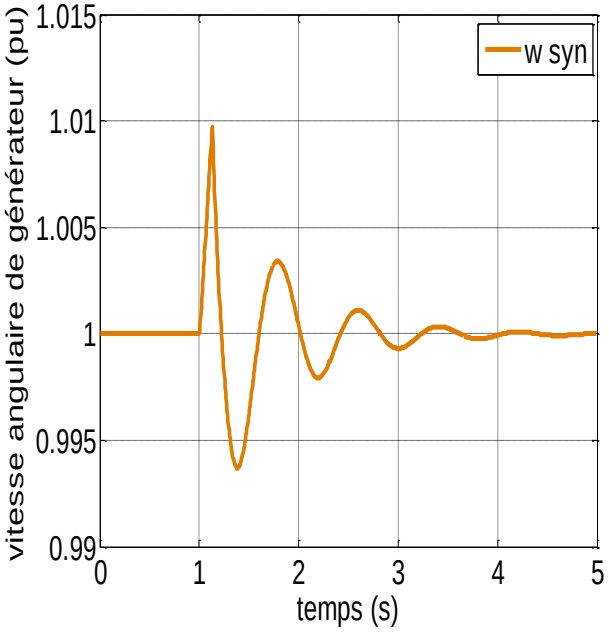


Figure III.20. Vitesse angulaire à t=0.12s.

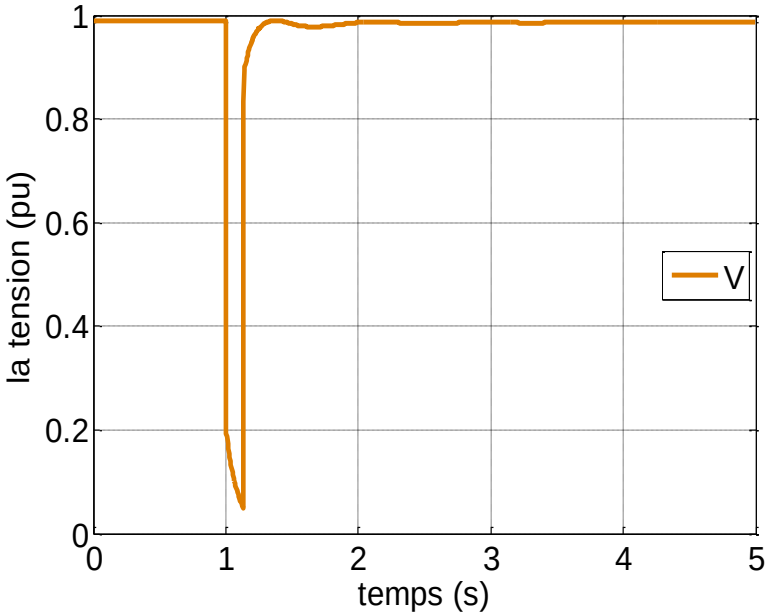


Figure III.21. Tension au jeu de barre à t=0.12s.

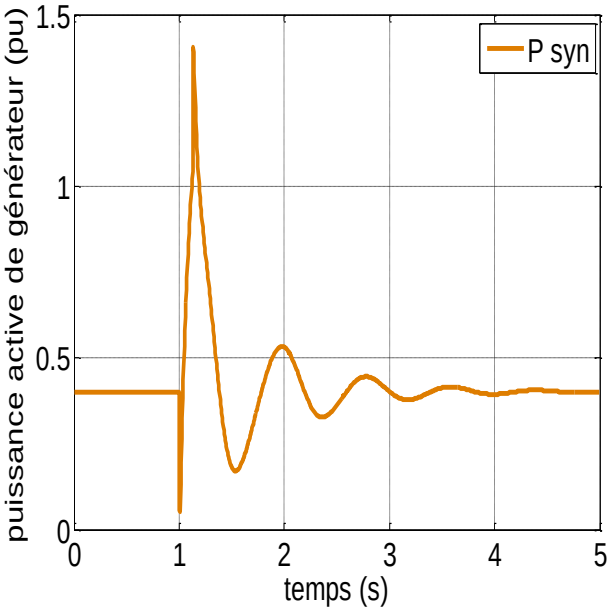


Figure III.22. La puissance active de générateur à t= 0.12s.

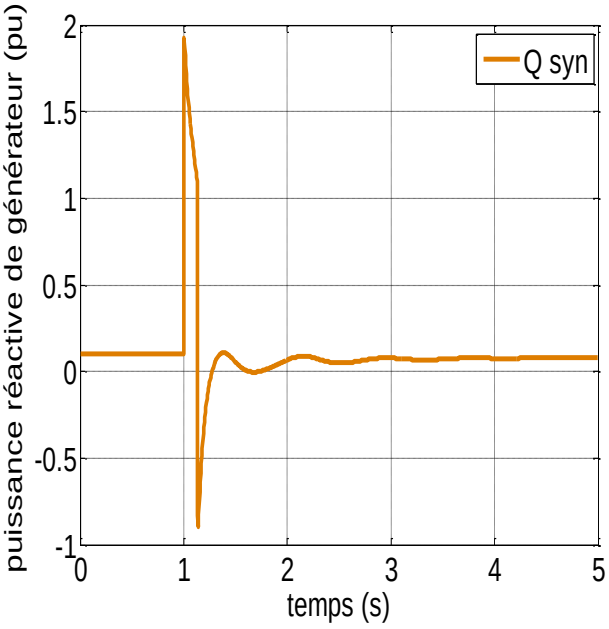


Figure III.23. La puissance réactive de générateur à t=0.12s.

Nous avons augmenté la durée d'isolement du défaut d'un pas de t =0.1 s, soit t = 0.22s.

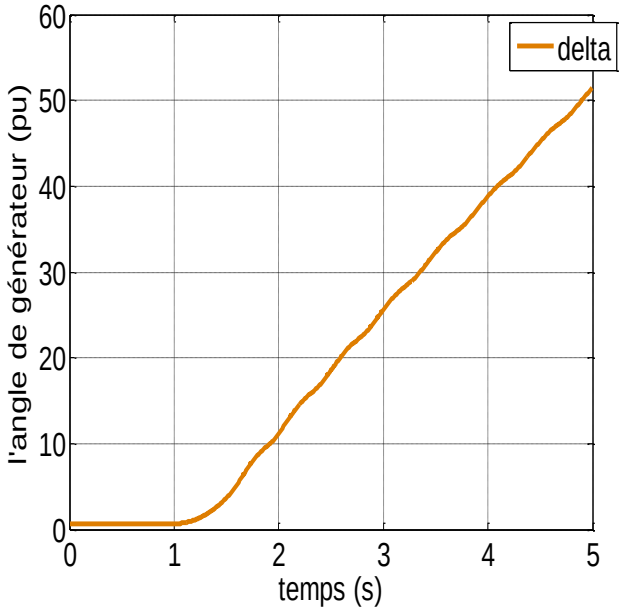


Figure III.24. L'angle à t=0.22s.

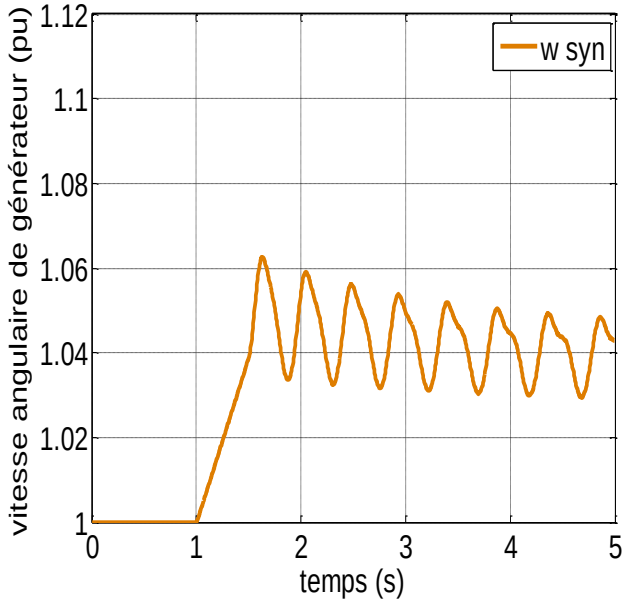


Figure III.25. Vitesse angulaire à t=0.22s.

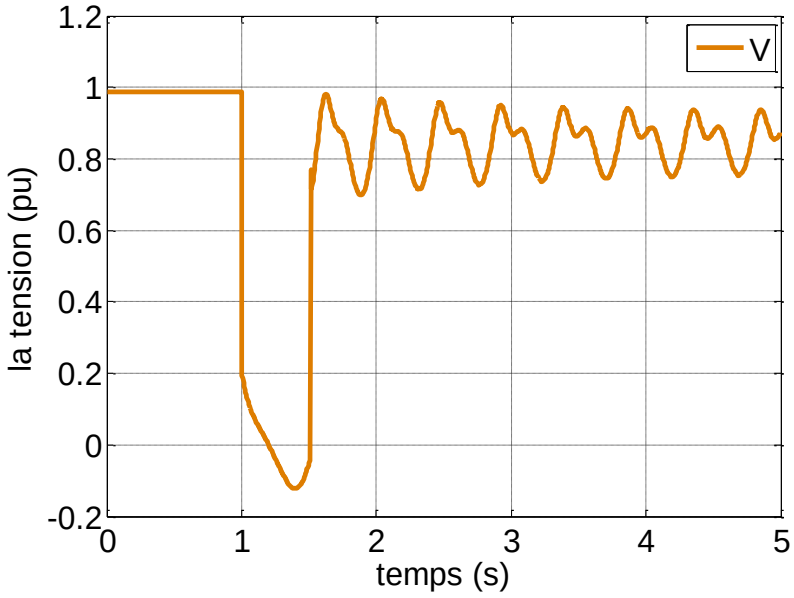


Figure III.26. Tension au jeu de barre à t=0.22s.

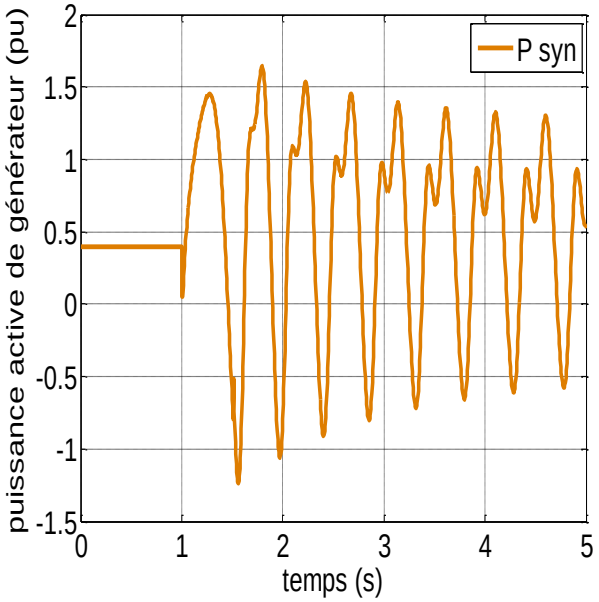


Figure III.27. La puissance active de générateur à t= 0.22s.

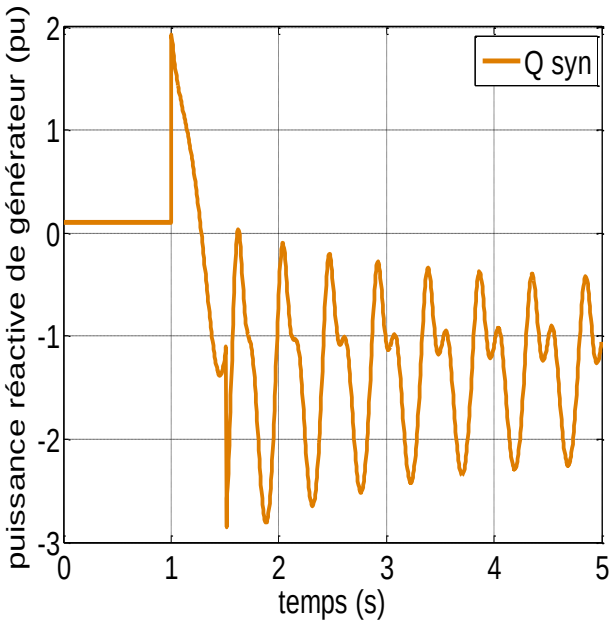


Figure III.28. La puissance réactive de générateur à t=0.22s.

III.6.3.1. Analyse des résultats de simulations du cas N°3 :

Lors du défaut, nous observons :

- Une augmentation de vitesse angulaire ω de générateur, ce dernier reprend leur allure initiale après l'élimination du défaut. **(Figure III.20)**.
- Un creux de tension au niveau de jeu de barre. Un temps d'isolement du défaut inférieur du cas N°2 avec moins d'oscillation. La tension reprend leur allure initiale à partir de (t= 2s). **(Figure III.21)**.
- Durant le défaut, une diminution de puissance active de générateur. Lors de l'isolement de défaut, on constate des oscillations. Elle se stabilise à un temps inférieur du cas N°2. **(Figure III.22)**.
- Durant le défaut, une augmentation des puissance réactive et le système se stabilise à un temps inférieur du cas N°2. **(Figure III.23)**.

Nous avons augmenté la durée d'isolement du défaut d'un pas de t= 0.1s, les résultats obtenus montrent la perte de stabilité du système.

- Le générateur a perdu leur synchronisme à partir de (t=1s). **(Figure III.25)**.
- La tension obtenue au niveau de jeu de barre est plus faible par rapport à la tension admissible. **(Figure III.26)**.
- La puissance active au niveau de générateur diminue et la puissance réactive augmente. **(Figure III.27)** ; **(Figure III.28)**.

III.6.4. Avec différentes puissances de source photovoltaïque (PV) (cas N°4) :

Nous avons simulé un défaut au niveau du jeu de barre survenu à t=1s et de durée de 0.3s, avec différentes puissances de source photovoltaïque (PV) injecté.

On obtient les résultats suivants :

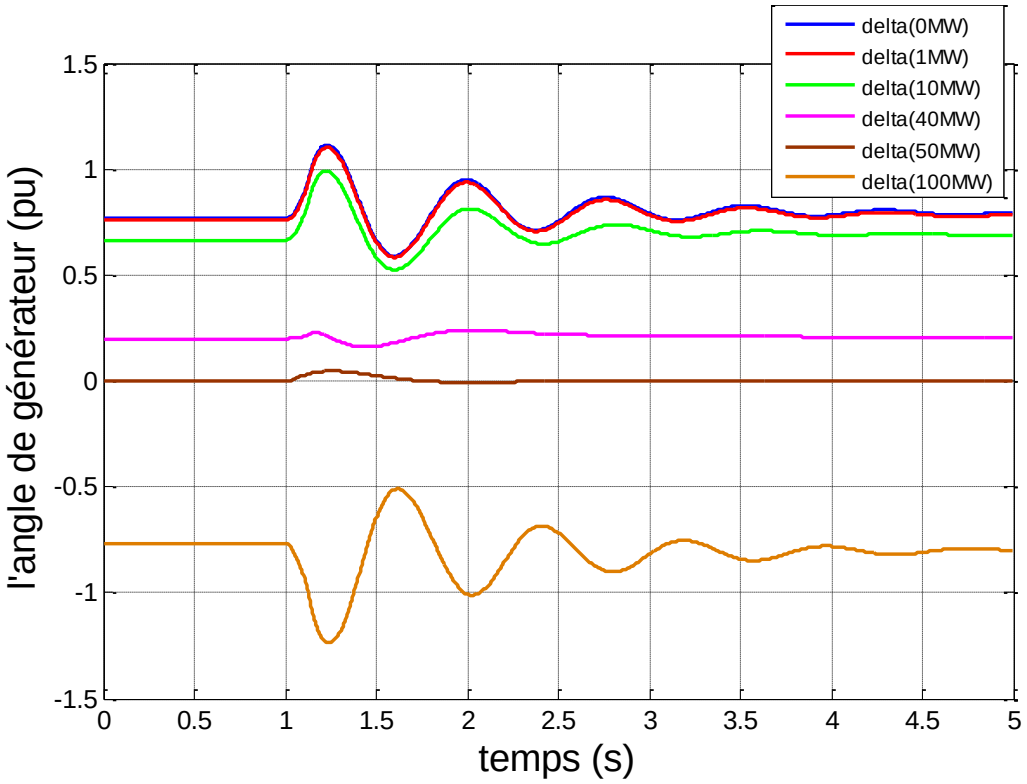


Figure III.29. L'angle à t=0.3s.

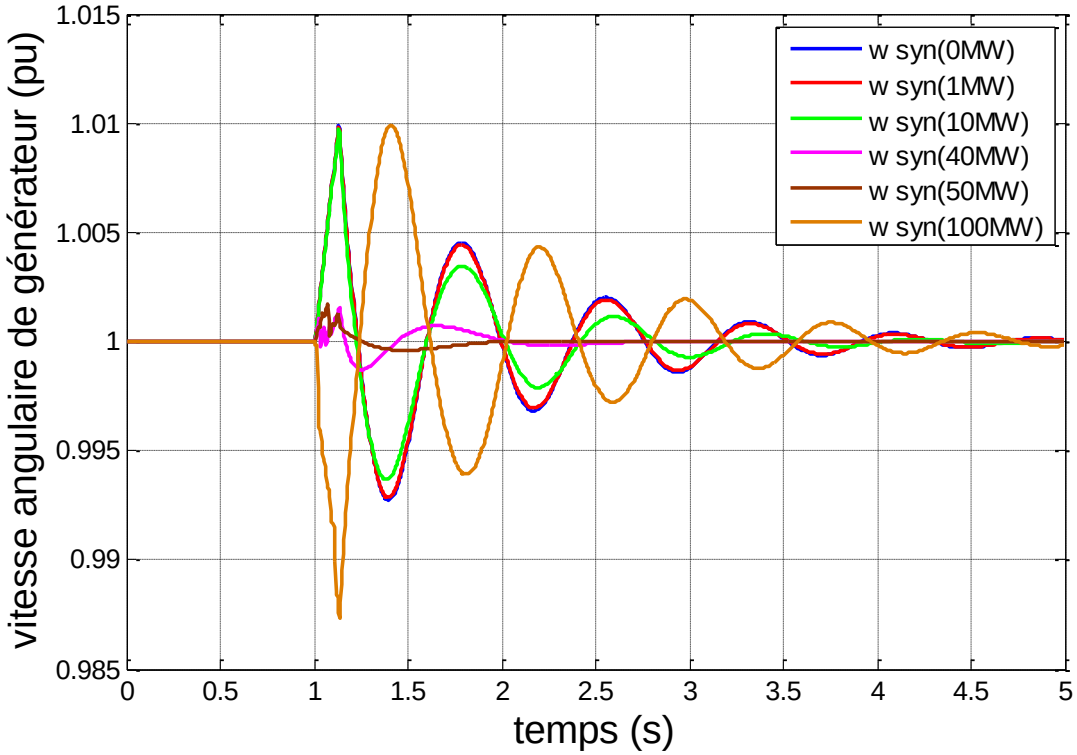


Figure III.30. Vitesse angulaire à t=0.3s.

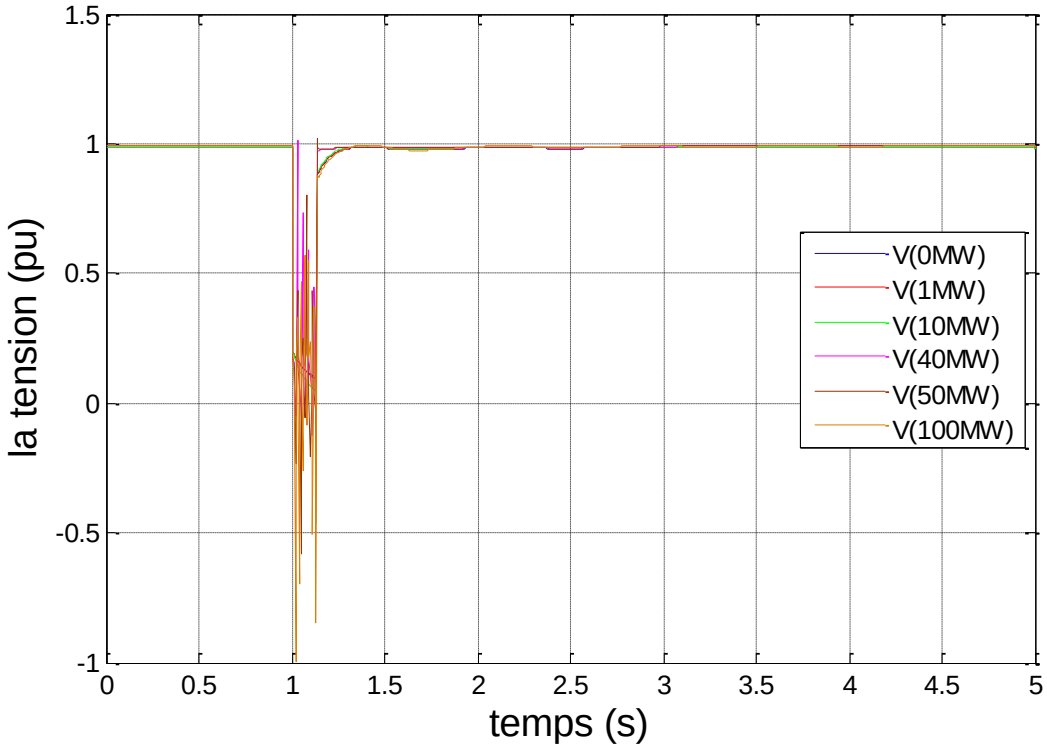


Figure III.31. Tension au jeu de barre à t=0.3s.

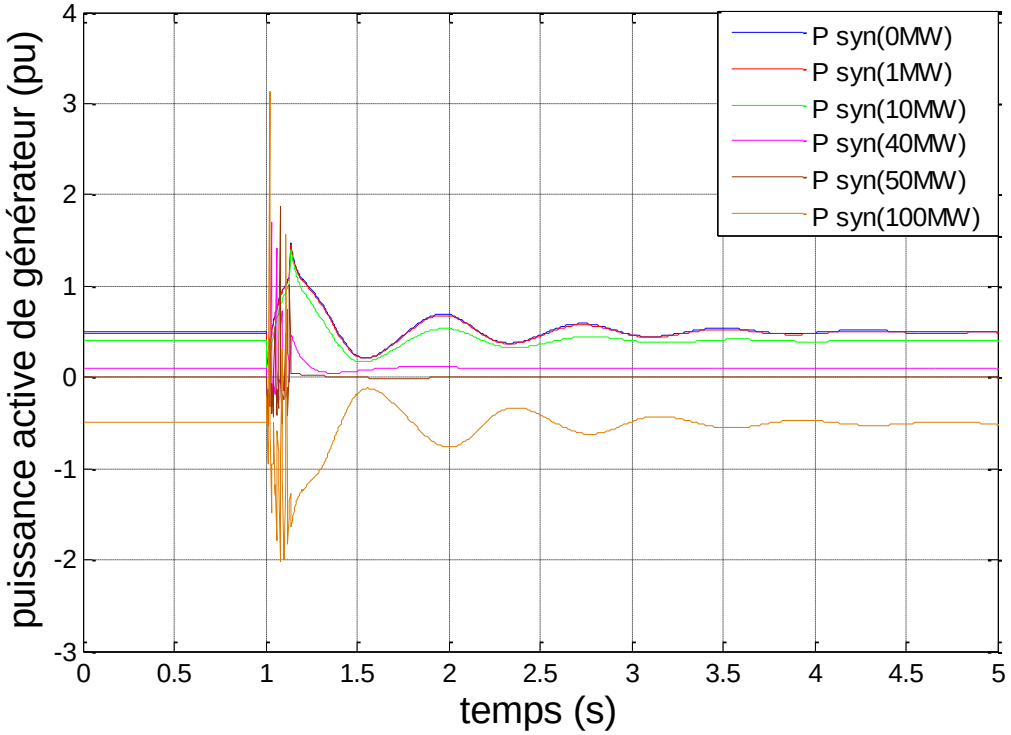


Figure III.32. La puissance active de générateur à t=0.3s.

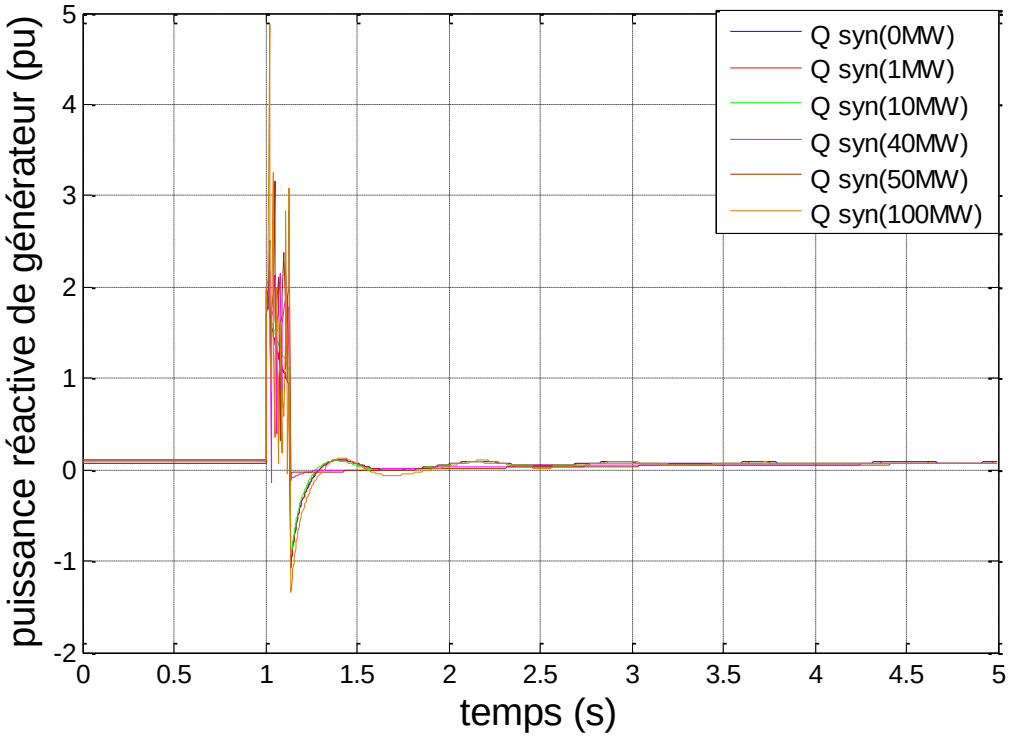


Figure III.33. La puissance réactive de générateur à t=0.3s.

III.6.4.1. Analyse des résultats de simulations du cas N°4 :

Selon les figures précédentes **(Figure III.30)** ; **(Figure III.31)** ; **(Figure III.32)** ; **(Figure III.33)**. Nous avons constaté qu'après chaque augmentation de la puissance PV injecté au réseau, une diminution des oscillations de la vitesse angulaire de générateur, de la tension au jeu de barre ainsi que la puissance active et réactive de générateur.

Mais ; il faut prendre en compte qu'il y a une valeur optimale de puissance PV injecté qui donne le bon apport de stabilité. Dans notre cas, c'est au voisinage de 50 MW.

Donc l'énergie PV injecté au réseau peut constituer un élément important de l'amortissement des oscillations dans le réseau électrique.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré comparativement et d'après les résultats obtenus que l'intégration des sources photovoltaïques dans le réseau ont une influence sur la stabilité transitoire de ce dernier.

Les résultats des simulations montrent que l'augmentation de la puissance injectée diminue et amortie les oscillations.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

La stabilité des réseaux électriques est un paramètre très important. En étudiant ce paramètre, nous arrivons à déterminer le temps maximal d'isolement de défaut et d'éviter l'instabilité du réseau, et son effondrement (Blackout).

Si nous n'arrivons pas à gérer la période transitoire, le comportement des machines devient incontrôlable (réseau instable).

Ces dernières années, l'échauffement terrestre a pris une grande ampleur vue plusieurs raisons y compris, les gaz toxiques dégagés par les différentes centrales électriques classiques implantées à travers toute la planète.

L'intégration des énergies renouvelables dans la production électrique est une solution idéale pour réduire cette pollution.

Le travail présent dans ce mémoire a été structuré en trois parties :

Dans la première partie, nous avons présentés une description générale du système photovoltaïque. En donnant des généralités sur les composants de ce dernier.

La deuxième étape de notre travail a été établi sur une vue générale sur les différents types de stabilité de système de puissance et plus précisément la stabilité transitoire et les méthodes d'analyse de ce dernier. Ainsi on a présenté les modèles mathématiques des éléments du système de puissance.

Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudie sous un outil de simulation MATLAB, afin de voir le comportement de source photovoltaïque sur la stabilité transitoire de réseau.

Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées mis en évidence l'influence de l'intégration d'une source photovoltaïque sur le temps d'isolement de défaut. Nous constatons une diminution du TCID qui est un avantage pour le réseau et nous protégeons la durée de vie des générateurs des centrales de production d'une part et pour éviter l'effondrement du réseau d'une autre part.

Lors l'augmentation de la durée d'application des défauts au-delà de ces valeurs (valeurs critique), les générateurs correspondants basculent vers l'instabilité et l'effondrement brusque.

Les valeurs des TCID obtenues nous aident pour paramétrer les protections afin d'isoler les défauts et le maintien de la stabilité du système.

Enfin, nous pouvons dire que l'énergie photovoltaïque injecté au réseau peut constituer un élément important de l'amortissement des oscillations et l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau.

Des perspectives intéressantes pouvant contribuées à l'amélioration du fonctionnement du système proposé sont envisageables :

- ✓ Evaluation du coût d'installation des centrales photovoltaïques dans le réseau étudié.
- ✓ Etude de la stabilité transitoire en présence des déséquilibres du réseau.

Référence bibliographique

[1] Tan YT, Kirschen DS, Jenkins N. "A model of PV generation suitable for stability analysis". IEEE Transactions on Energy Conversion 2004.

[2] Wang L, Lin T. "Dynamic stability and transient responses of multiple grid connected PV systems". Proceedings of IEEE PES T&D Conference 1–8 2008.

[3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Définitions, ≪Definition and Classification of Power System Stability≫, IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp. 1387-1401, May 2004.

[4] Crappe M., Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique, Ed. Bermes Science Publication, Lavoisier, 2003.

[5] Tan YT, Kirschen DS, Jenkins N. "A model of PV generation suitable for stability analysis". IEEE Transactions on Energy Conversion 2004 ; 19(4) : 748–755.

[6] A. Cid-Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[7] BOUNACEUR Amin « Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie » mémoire de master de l'université Kasdi Merbah.Ouargla, Algérie 2014.

[8] « Photovoltaïc energy baromèter », Baromèter prepared by Observ'ER in the Scop of EurObserv'ER project, N° 160, pp 69-83, April 2004.

[9] « La photovoltomania », Marie-Françoise Lefevre, numéro spécial, avril 2008.

[10] MATALLAH Sorya « Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla » » mémoire de master de l'université KasdiMerbah.Ouargla, Algérie 2015.

BIBLIOGRAPHIE

[11] S. Rabih, "Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques", thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2008.

[12] ZIGHA Ali « étude et simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien » mémoire de master de l'université Constantine I, Algérie 2013.

[13] Ayach Khedidja « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique » mémoire de magister de l'université de Souk-Ahras,2014.

[14] Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of Cali-fornia Polytechnic State University, 2005.

[15] A. Bouden, "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", mémoire de magister, université de Constantine, 2008.

[16] Site Internet : www.web-libre.org/.../centrale-solaire-photovoltaïque.

[17] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT » Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[18] C. Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III, 2003.

[19] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V.G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview", in Proc. IEEE PESC'02, vol. 2, pp. 1995– 2000, 2002.

[20] Jain S, Agarwal V."Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-phase grid-connected photovoltaic systems". IEE Proceedings. Electric Power Applications 2007 ; pages : 753–762.

BIBLIOGRAPHIE

[21] BELGHITRI Houda « modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » mémoire de magister de l'université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie 2010.

[22] Site Internet : https://fr.scribd.com/document/160286876/4597291-Generalites-SurLes-Reseaux-Electriques, Génie électrique, « Réseaux électriques », Généralités sur les réseaux électriques, chapitre 1, extrait.pdf.

[23] Site Internet : www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics, « Description générale des réseaux d'électricité », Commission de Régulation de l'Energie (CRE).

[24] T. WILDI, G. SYBILLE « ELECTROTECHNIQUE », 4éme édition .2005.

[25] OUDAYA Mohamed Bachir, DRISSI Mohamed El Hadi « Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS », mémoire de master de l'université de Tahar Moulay Saida ,2017.

[26] AISSAT Nadjia, BENZERROUK Widad « Amélioration de la stabilité transitoire de réseau par les dispositifs FACTS », mémoire de master de l'université de Yahia Fares Médéa, 2019.

[27] Farid Hamoudi, « Architectures des réseaux électriques, Power system », cours UEF, 10 novembre 2015.

[28] Noui Issam, « Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 08 décembre 2015.

[29] Site Internet : http://www.sig-ge.ch/professionnels/les-energies/votreelectricite/qualite-de-l-electricite.

[30] Lilien. J. l, « Transport et Distribution de l'Energie Electrique », cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore, Université de liège, 2010.

BIBLIOGRAPHIE

[31] B. Belmessaoud and T. Mahni. Évaluation de la stabilité statique en tension utilisant la méthode de load flow continu. Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP, juin 2009.

[32] 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 FOURIER, 20 Octobre 2006.

[33] Bulletin sur la qualité de l'électricité, « Le déséquilibre de tension et de courant », N° G1546F, Hydro Quebec 2014.

[34] Rabah Benahid, Mohamed Boudour, « Amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électrique », Ouvrage, édition universitaires européennes, 2014.

[35] 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.

[36] Harkat Said « Amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant les systèmes PID et PSS réglés avec l'algorithme PSO » 31 Janvier 2018.

[37] BOUNOUIRA Adlane « Etude de la stabilité transitoire des réseaux électriques » mémoire de master de l'université Constantine I, Algérie 2013.

[38] Rabah BENABID « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » le 04/09/2007.

[39] MERZOUGUI Hadjer « Etude de la stabilité transitoire d'un réseau avec intégration des sources renouvelables » juin 2018.

[40] MEHDI MERAD-BOUDIA « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique » mémoire de magister de l'université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie 2009.

BIBLIOGRAPHIE

[41] MALEK Mounia, BALI Mohand Said « Etude comparative sur les méthodes d'analyse de la stabilité des réseaux électriques » 2016.

[42] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Définitions, ≪Definition and Classification of Power System Stability≫, IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp. 1387-1401, May 2004.

[43] Alkhatib H « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques optimisation de la régulation par une méthode méta-heuristique » Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne D'Aix-Marseille, 2008.

[44] Moudjahid M., Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique au moyen d'une bobine supraconductrice, Thèse de Doctorat, Université De Franche Comte, Octobre 1996.

[45] Bernard P., Pavard M. et Testut G., Réseaux d'Interconnexion et de Transport : Réglages et Stabilité, Techniques de l'Ingénieur, Traite Génie Electrique, D4-092, 2005.

[46] Besanger Y. ≪ Vers L'amélioration De La Sécurité Des Réseaux Electriques De Puissance ≫ Habilitation a Dirigé des Recherches de l'Institut National Polytechnique de Grenoble04 Décembre 2006.