



Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

TITRE IMPACT DES ENERGIES RENOUVELABLES SUR LES INDICES DE LA STABILITE DE TENSION

Présenté par : *CHADLIA MOUNIA*

FRIHA WAFA

Encadrant : *BENALIA NADIA*

MCB

Université Badji Mokhtar

Jury de Soutenance :

HOCINE LABAR	PROF	Université Badji Mokhtar	Président
BENALIA NADIA	MCB	Université Badji Mokhtar	Encadrant
ABD ELHAMID KSENTINI	MCA	Université Badji Mokhtar	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère qui m'a donné la vie, la tendresse, le courage pour réussir. Elle est mon épaule solide . Tous ce que je peux vous offrir ne pourra jamais exprimer l'amour et la reconnaissance que je lui porte.

Ce travail est le fruit de ses sacrifices depuis des années, que Dieu la protège chère ***MAMA***. A Cher mon père, mon cher frère Abdou et ma chère sœur Nour. A Mme B.Radia qui ma soutenue dans tous mes moments de joie et surtout de tristesse. A ma belle cousine B.Yousra. A ma copine Fatima , toute la famille et les personnes que j'aime et qui m'aiment.

Wafa

Dédicaces :

Je dédie mon succès à la fleur de ma vie, source de tendresse, qui m'a soutenu dans toutes mes décisions et m'a encouragé dans mon Mon parcours de 17 ans d'études, *ma mère* Elle est mon cœur.

Et je la dédie aussi à ma chère grand-mère, à mes tantes, mon oncle, mes cousines, Lina, Karima, Hanane à toute ma famille et DADI ☺.

Un spécial dédicace au team *m.h-collection23* ma deuxième famille et tous et les personnes que j'aime et qui m'aiment.

MOUNIA

Remerciements

Dieu merci, c'est grâce au Dieu qui m'a donné la santé, le courage, la volonté et la patience durant ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade, et de me mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

Mes plus grands remerciements vont à ma directrice de recherche Dr BENALIA Nadia, pour ces précieux conseils, son soutien, sa disponibilité et son encouragement tout au long de la réalisation de mémoire. Je tiens à remercier chaleureusement ma très chère mère en signe de reconnaissance, pour tous les sacrifices et les efforts qu'elle a faits durant toutes ces années, et je remercie également tous les membres de ma famille et mes amis qui m'ont encouragé et soutenu. Je souhaite également remercier le personnel de Sonelgaz Mr Derouiche, Mme A.Nadjet et Dr B. Radia pour leurs soutiens et leurs précieux conseils durant mon stage à SADEG. Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter, d'évaluer ce travail.

Merci à tous et à toute

Liste des figures :

CHAPITRE I :

Figure (I.1) : perturbation de réseau	16
Figure (I.2) : Temps caractéristiques des principales perturbations d'un réseau électrique.....	17
Figure (I.3) : Classification des différents types de stabilités.	18
Figure (I.4) : Réseau électrique à deux nœuds.....	24

CHAPITRE II :

Figure (II.1) : Un seul générateur et une charge.....	36
Figure (II.2) : Circuit équivalent d'une branche.....	37
Figure (II.3) : Circuit équivalent d'une branche.....	37
Figure (II.4) : Circuit équivalent d'une branche.....	38

CHAPITRE III

Figure (III.1) : Schéma d'absorption des rayons solaires.....	41
Figure (III.2) : Energie solaire.....	43
Figure (III.3) : Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur PV.	45
Figure (III.4) : Schéma équivalent de cellule PV.	45
Figure (III.5) : Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série	47
Figure (III.6) : Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle	47
Figure (III.7) : Caractéristiques d'un générateur à n_s, n_p cellules identiques	48
Figure (III.8) : Module photovoltaïque.	48
Figure (III.9) : Structure d'un système PV autonome	49
Figure (III.10) : Exemple de la structure d'un système PV hybride	50

Figure (III.11) : Structure d'un système PV raccordé au réseau.....	50
Figure (III.12) : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.	51
Figure (III.13) : Eoliennes à axe vertical.....	53
Figure (III.14) : Configuration à axe horizontal.....	53
Figure (III.15) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.....	54

CHAPITRE IV

Figure (IV1) : la première fenêtre du PSAT.....	56
Figure (IV2) : la fenêtre principale du PSA.....	57
Figure (IV3) : Modèle d'IEEE 9 Jeux de barres	58
Figure (IV4) : Les courbes PV.....	60
Figure (IV5) : le réseau standard avec système photovoltaïque intégrée dans le jeu de barre 6	61
Figure (IV6) : LPQ pour PV	62
Figure (IV7) : NLSI pour PV.....	63
Figure (IV8) : intégration de source photovoltaïque au jeu de barre 6.....	63
Figure (IV9) : LPQ pour WIND	64
Figure (IV10) : NLSI pour WIND	65
Figure (IV11) : les courbes de comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice LPQ.....	66
Figure (IV12) : les courbes de comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice NLSI.....	67
Figure (IV13.1) : courbe PV	68
Figure (IV13.2) : courbe PV	68
Figure (IV13.3) : courbe PV.....	69
Figure (IV14.1) : courbe PV	70
Figure (IV14.2) : courbe PV	70
Figure (IV14.3) : courbe PV.....	72

Liste des tableaux

CHAPITRE IV

Tableau (IV.1) : les données des lignes	59
Tableau (IV.2) : Données techniques du modèle d'étude.....	59
Tableau (IV.3) : résultats du flux d'énergie.....	60
Tableau (IV.4) : les résultats de calculs d'indice LPQ pour pv	61
Tableau (IV.5) : les résultats de calculs du taux de pénétration du pv en fonction de l'indice NLSI	62
Tableau (IV.6) : les résultats de calculs du taux de pénétration du wind en fonction de l'indice LPQ.....	64
Tableau (IV.7) : les résultats de calculs du taux de pénétration du wind en fonction de l'indice NLSI	65
Tableau (IV.8) : la comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice LPQ.....	66
Tableau (IV.9) : la comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice NLSI	67

SOMMAIRES

INTRODUCTION GENERAL.....	12
---------------------------	----

CHAPITRE I

I.1 Introduction	14
I.2 Définition de la stabilité des systèmes.....	14
I.3 Qualité de la stabilité des systèmes	15
I.3.1 Bosses de tension	15
I.3.2 Chutes de tension	16
I.3.3 Perturbations réseau	17
I.4 Classification de la stabilité	17
I.4.1 Stabilité angulaire	18
I.4.1.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)	19
I.4.1.1 Stabilité angulaire aux grandes perturbations (Stabilité transitoire)	20
I.4.2 Stabilité de fréquence	20
I.4.3 Stabilité de tension	20
I.4.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations	21
I.4.3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations	21
Définitions CIGRE	22
Définition IEEE	22
I.4.3.3 Importance et incidents	22
I.4.3.4 Causes d'instabilité de tension	23
a) Production trop éloignée de la consommation	23
b) Manque local d'énergie réactive	23
c) Charge appelée trop importante	25
d) I.4.3.5 Qualité de la tension	25
I.4.3.6 Dégradation de la qualité de la tension	26
I.4.3.7 Méthodes d'amélioration de la stabilité de la tension	26
I.4.3.8 Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité	26
I.5 Facteurs influençant la stabilité de la tension	27
I.5 Conclusion	27

CHAPITRE II

II.1 Introduction	30
II.2 Etat de l'art	31
II.3 Développement de quelques indices de stabilité	35
II.3.2 Indice de stabilité (L)	35
II.3.2.1 Etude d'un cas élémentaire (un seul générateur et une charge)	35
II.3.3 Indices de stabilité basés sur l'écoulement de puissance	36
II.3.3.2 Indice de la stabilité de tension (SI)	36
II.3.3.3 Indice de stabilité de tension (Li)	37
II.3.3.4 Indice Rapide de Stabilité de Tension FVSI (Fast Volage Stability Index)	38
II.4 Conclusion	39

CHAPITRE III

III.1 Introduction.....	41
III.2 Énergie solaire	41
III.3 Technologies des énergies solaires	42
III.3.1 Solaire à concentration thermodynamique	42
III.3.2 Solaire thermique	42
III.4 Energie photovoltaïque	42
III.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque	43
III.4.2 La cellule photovoltaïque	44
III.4.4 Effet photovoltaïque	44
III.5 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque	44
III.7 Le module photovoltaïque	45
III.7.1 Schéma équivalent d'une cellule Photovoltaïque	45
III.7.2 Association des cellules	46

Association série	46
Association parallèle	47
Association série/parallèle (Association mixte)	47
III.9 Modes d'utilisations d'un système photovoltaïque	48
III.9.1 Système autonome	49
III.9.2 Système hybride	49
III.9.3 Système PV raccordée au réseau	50
III.10 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	51
Avantages	51
Inconvénients	51
Définition du système éolien	51
3. Les différents types d'un système éolien	52
3.1. Les éoliennes à axe vertical	52
3.2. Les éoliennes à axe horizontal	53
Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	54
Asynchrones à cage (MAS)	54
Conclusion	55

CHAPITRE IV

Introduction.....	56
Outils de simulation	56
Le PSAT.....	56
Utilisation de PSAT	57
Problématique	58
Topologie	58
Réseau standard (modèle d'IEEE 9 jeux de barres).....	58
Caractéristique du Modèle d'étude.....	59
Tableau des Données techniques du modèle d'étude.....	59

Méthode d'analyse	60
Résultats de la simulation du réseau standard	60
Les courbes PV du fonctionnement normal	60
L'indice LPQ pour différents taux de pénétration du PV	61
L'indice NLSI pour différents taux de pénétration du PV	62
L'indice LPQ pour différents taux de pénétration du Wind	64
L'indice NLSI pour différents taux de pénétration du Wind	65
Comparaison entre réseau photovoltaïque et éolien en fonction de l'indice (LPQ)	66
Comparaison entre réseau photovoltaïque et éolien en fonction de l'indice (NLSI)...	67
Les courbes PV lors d'intégration de système photovoltaïque	68
Les courbes PV lors d'intégration de système éolien	70
Conclusion	71
CONCLUSION GENERAL	72

Introduction générale :

L'énergie électrique n'est pas stockable à grandes quantités et face à la demande croissante et non contrôlée de la charge, les réseaux électriques modernes ont comme défi d'assurer la liaison entre la production dans les centrales électriques et la consommation et de maintenir une constante tension aux clients. Généralement les réseaux de distribution ont une combinaison de charges (industrielles, commerciales et domestiques) et les changements considérables dans les niveaux de charge qui se produisent à tout moment et dans n'importe quelle partie du réseau qui menacent le réseau sont inévitables. Pendant la charge maximale, un petit changement du profil de la charge peut menacer la stabilité de tension du système. Pour qu'un système de puissance fonctionne d'une façon sûre, tous les états de fonctionnement peu surs doivent être bien identifiés à l'avance pour que les mesures correctives soient prises afin d'éviter la menace possible de l'effondrement de tension.

Dans notre travail nous avons étudié la méthode de calcul de l'indice de stabilité qui est une fonction de la tension au niveau des jeux de barres. Pour calculer cet indice, il faut d'abord calculer les tensions au niveau des jeux de barres. Cet indice permet de connaître à priori le jeu de barres dans lequel la tension du système a la plus grande possibilité de s'écrouler et une solution doit être apportée.

L'étude présentée dans ce mémoire s'organise comme suit :

- Le premier chapitre présente l'évaluation et l'étude de la stabilité tension des réseaux électriques et les méthodes les plus utilise pour faire une analyse de la stabilité de tension.
- Le deuxième chapitre est consacré définition en générale les indices de stabilité de tension.
- Le chapitre troisième présente les deux familles des énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne) et leur intégration aux réseaux électriques.
- Enfin dans le 4ème chapitre représente une simulation d'un réseau électrique de 9 jeux de barre, 3 générateurs et des générateurs d'énergies renouvelables dans des cas spécifique.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale des perspectives.

Chapitre I :

STABILITE DE TENSION

I.1 Introduction :

Malgré l'évolution rapide des dispositifs de régulation et de production, les systèmes électro énergétiques (SEE) sont souvent soumis à des perturbations qui peuvent engendrer des dégâts graves. La fiabilité d'un SEE est définie par ses limites de sécurité d'exploitation ainsi que son comportement vis-à-vis des défauts tels qu'un coup de foudre, un court-circuit, un faux couplage, un changement brusque de la charge, une rupture des circuits d'excitation, un déclenchement des lignes, une perte des unités de production, etc. Toutes ces perturbations conduisent à des contraintes supplémentaires par rapport à celles du régime permanent (contraintes d'ordre mécaniques, thermiques, électriques). En pratique, pour faire face aux incidents graves et limiter leurs conséquences, il est nécessaire d'adopter des mesures curatives et installer des automates spécifiques, qui constituent le plan de défense du système électrique, en limitant la propagation de ces incidents et en facilitant la reconnexion rapide des consommateurs des zones hors tension [1].

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de la stabilité. En donnant leurs définitions, méthodes d'évaluation et leurs méthodes d'amélioration ainsi que la détermination du temps critique d'isolement de défaut.

I.2 Définition de la stabilité des systèmes :

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 définition la plus récente, que nous adopterons, est le résultat d'un groupe de travail IEEE [1] :

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre proche après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact.

On dit qu'un système d'énergie électrique est stable si à la suite d'une perturbation, il peut passer d'un état ou régime stationnaire à un autre régime stationnaire en passant

par le régime transitoire sans la perte du synchronisme. Suivant la nature et l'amplitude de la perturbation.

I.3 Qualité de la stabilité des systèmes :

Un réseau électrique a en général une stabilité globale qui se manifeste par un équilibre à grande échelle dans le temps, et dans l'espace de l'ensemble du système production, transport, consommation [2].

Ainsi la notion de qualité de l'électricité a l'aspect suivant :

La continuité de fourniture de l'énergie électrique en un endroit ou point donné qui peut être interrompue par des coupures brèves ou longues.

- La forme de l'onde de tension fréquence, amplitude, et durée dans ce cas les perturbations sont généralement classées en fonction de leur plage de fréquence [2]:

- phénomènes à haute fréquence (kHz ou MHz) : surtensions dues à la foudre ou à certaines manœuvres (sectionneurs, interrupteurs, certains disjoncteurs),

- phénomènes à basse fréquence (50 Hz ou kHz) : dues aux harmoniques,

- phénomènes autour de la fréquence industrielle (0 à 100 Hz) : fluctuations rapides (20 ms à 1 s) ou lentes (supérieures à la seconde) telles que déséquilibre, creux de tension dus à la mise en service de fortes charges ou à un court-circuit dans la distribution.

La variation de fréquence peut résulter de :

- un court-circuit proche d'une source,

- une très grosse variation de puissance de la source,

- un passage sur une source de remplacement ou de secours.

I.3.1 Bosses de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants .

I.3.2 Chutes de tension :

La circulation du courant dans une ligne provoque une chute tension pendant le transit d'énergie assez important. 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

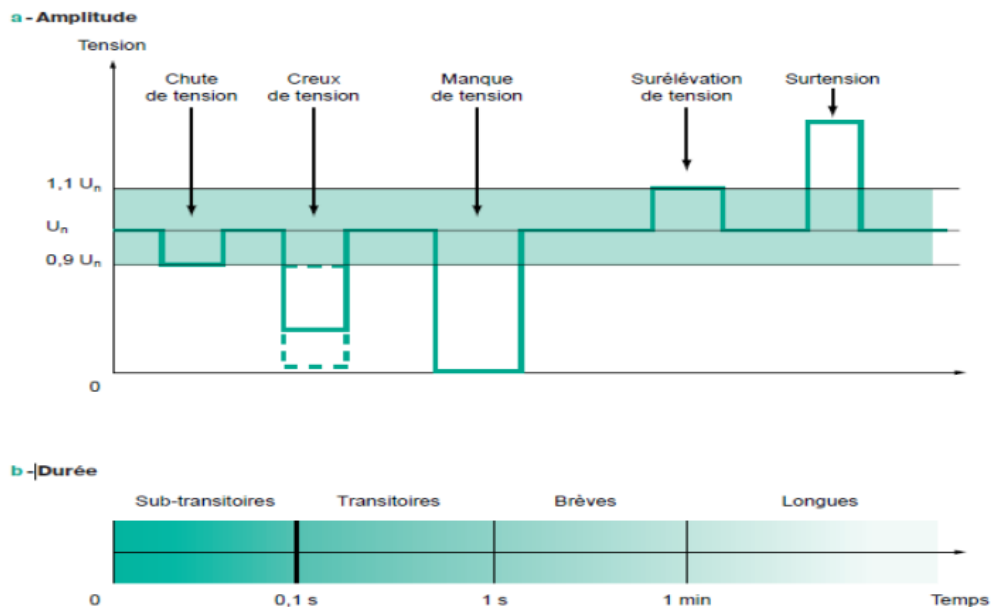


Figure (I.1) : Perturbation de réseau.

I.3.3 Perturbations réseau

Un réseau électrique peut subir une grande variété de perturbations :

- variations de charges
- manœuvres d'équipements
- déclenchements de charges
- court-circuit.

Ces phénomènes physiques sont caractérisés par des fréquences et constantes de temps, afin de faciliter les calculs et la modélisation, les phénomènes sont classifiés de telle sorte qu'à chaque classe corresponde un modèle et des outils d'analyse mathématique. Voir Figure (I-7) [2].

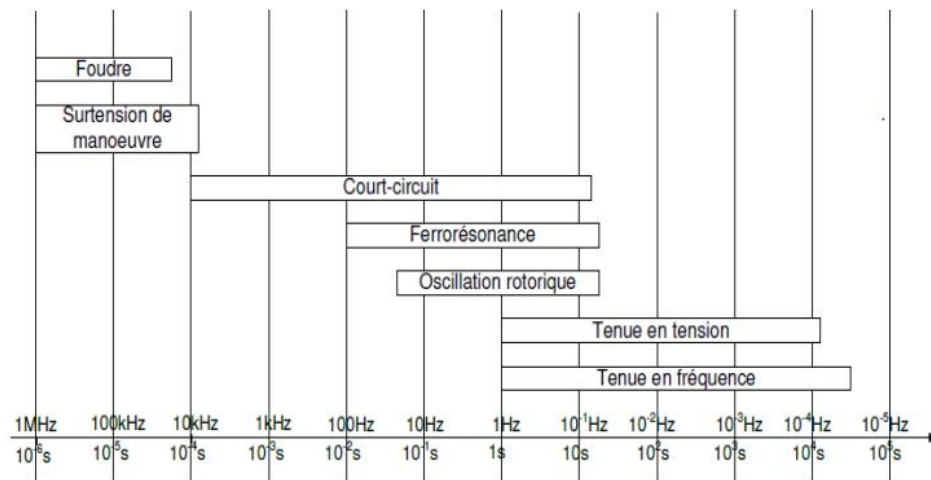


Figure (I.2) : Temps caractéristiques des principales perturbations d'un réseau électrique.

I.4 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 la tension et stabilité de la 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 I.1) [3].

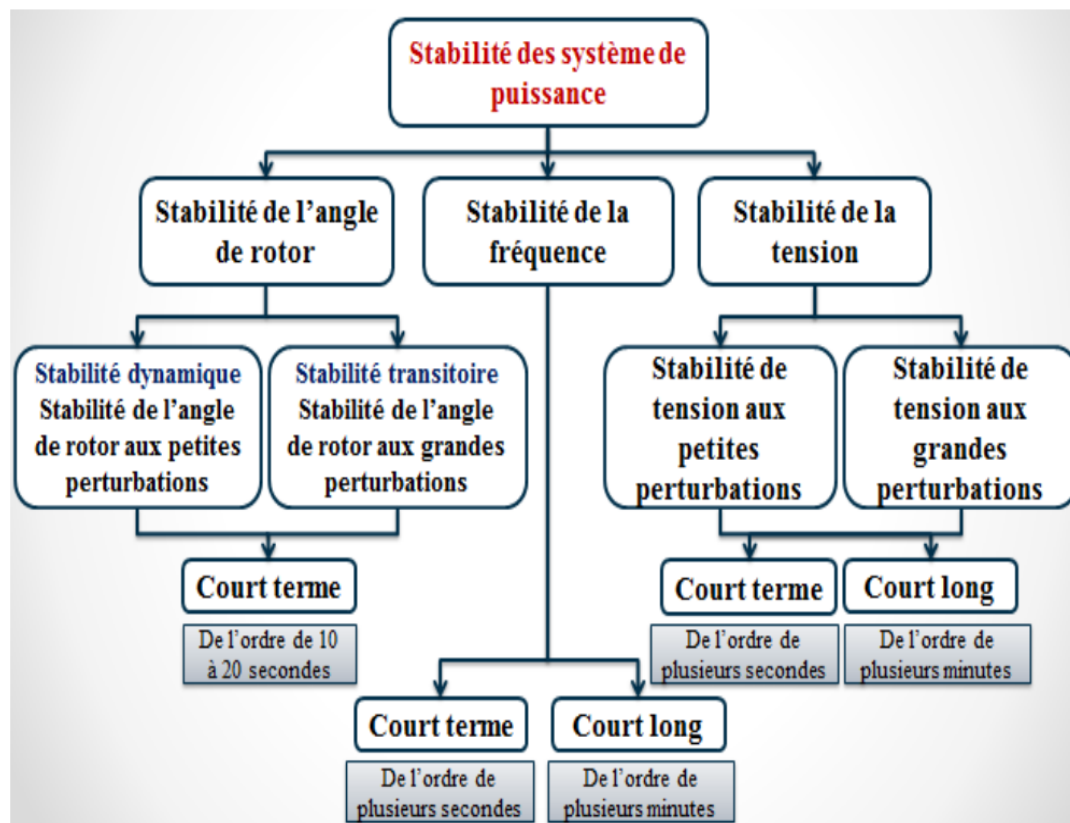


Figure (I.3) : Classification des différents types de stabilités.

I.4.1 Stabilité angulaire :

Quand le système est perturbé, la puissance électrique de la machine varie rapidement, mais la variation de puissance mécanique fournie à la machine est relativement lente. En raison de cette différence de vitesse de réponse, un écart temporaire d'équilibre de puissance a lieu, Par conséquent, ce déséquilibre de puissance entraîne une variation des couples agissant sur le rotor, Ceci entraîne une accélération ou décélération du rotor selon le sens du déséquilibre, en entraînant une perte de synchronisme du générateur avec le reste du système, Si l'équilibre de puissance n'est pas rétabli, la machine est mise hors service par une protection de survitesse ou de perte de synchronisme, et la stabilité du système est mise en danger , Suite à une perturbation, le facteur principal qui détermine l'évolution de l'état du système est l'écart entre les angles de rotor, Nous pouvons dire que les angles de rotor d'un système de puissance peuvent évaluer selon deux scénarios :

- Soit, les angles de rotor s'accroissent ensemble et oscillent à l'unisson, Ils peuvent éventuellement atteindre de nouvelles valeurs stables, Tant que les écarts entre les angles de rotor restent constants, le système reste stable et il demeure au synchronisme.
- Soit, un ou plusieurs angles du rotor s'accroissent plus rapidement que les autres, Alors, les écarts entre les angles de rotor divergent dans le temps, Le système devient par conséquent instable et il perd le synchronisme.

La stabilité angulaire, ou stabilité d'angle rotorique, se rapporte aux capacités des machines synchrones d'un réseau électrique interconnecté à rester dans le synchronisme après avoir été soumis à une perturbation [3]. Elle dépend de la capacité de maintenir ou restaurer l'équilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique de chaque machine synchrone, L'instabilité, qui peut résulter, se produit sous forme d'augmentation d'oscillation angulaire de quelques générateurs menant à leur perte du synchronisme avec d'autres générateurs.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire à la petite perturbation ou de la stabilité transitoire.

I.4.1.1 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.

Pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement proportionnelle à la variation de l'angle Des exemples typiques des petites perturbations peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique appliquée à une machine du système ou sur sa charge, ... L'analyse d'un tel système peut être accomplie par la linéarisation du système d'équations différentielles non linéaires, La stabilité du système peut être évaluée par l'analyse des valeurs propres de la matrice d'état du système [4].

I.4.1.2 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 court-circuit affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines ;
- La perte d'un ouvrage (e.g. une ligne de transmission, débranchement des transformateurs) ;
- La perte d'un groupe de production.

I.4.2 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.

I.4.3 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.

I.4.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations :

La Stabilité de la tension aux petites perturbations c'est la capacité d'un réseau électrique à contrôler la tension aux nœuds suite à de petites perturbations comme l'augmentation progressive de charge du réseau ou de petits changements du réseau. Cette forme de stabilité est déterminée par les caractéristiques des charges et les dispositifs de régulation et de protection à l'instant étudié.

Ce concept est très utilisé pour déterminer comment la réponse de tension évolue en fonction de petites modifications du réseau à n'importe quel instant. Les analyses statiques peuvent être utilisées pour déterminer la marge de stabilité, pour identifier des facteurs influençant la stabilité, pour examiner l'état du système dans un grand nombre de configurations.

Le critère de stabilité aux petites perturbations est satisfait s'il y a l'augmentation de l'amplitude de tension d'un nœud quelconque du réseau lors de l'augmentation de la puissance réactive injectée dans ce même nœud [4].

I.4.3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

La stabilité de tension en grandes perturbations est la capacité du système à maintenir la tension stable à la suite de grandes perturbations telles que les défauts du système ou la perte d'un générateur.

Cette capacité est déterminée par la topologie du système, les caractéristiques des charges et les interactions entre les contrôles continus de tension (réglage primaire et secondaire de tension, compensateurs statiques et tournants d'énergie réactive), les

contrôles discrets (gradins de condensateurs, d'inductances et régulateurs en charge) et les protections.

Le cadre du temps d'étude d'intérêt peut s'étendre de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes [5].

➤ **Définitions CIGRE :**

- Un réseau électrique, à un état de fonctionnement donné, est stable du point de vue stabilité de tension aux petites perturbations, si les tensions près des charges sont identiques ou près de la valeur initiale (pré-perturbation) suite à une faible perturbation.
- Un réseau électrique à un état de fonctionnement donné et sujet à une perturbation, est de tension stable, si la tension près des charges est identique ou près de la valeur initiale de fonctionnement (pré-perturbation).
- Un réseau électrique subit un effondrement de tension si les tensions de post-perturbation sont au-dessus des limites acceptables [5].

➤ **Définition IEEE :**

- La stabilité de tension est la capacité du réseau à maintenir la tension dans les limites permises de sorte que, lorsque l'admittance de charge augmente, la puissance demandée par la charge augmente, dans ce cas la puissance et la tension doivent être contrôlables.
- L'effondrement de tension est le processus par lequel l'instabilité de tension conduit à une tension très faible dans une partie ou dans la totalité du réseau qui cause un effondrement en cascade du réseau, sans détruire nécessairement le synchronisme entre les générateurs.
- D'autre part, la notion de la sécurité de tension est plus large que la stabilité de tension, elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir son fonctionnement stable après chaque perturbation ou changement défavorable du système.

I.4.3.3 Importance et incidents :

Le problème de la stabilité de la tension était associé à un réseau faible et isolé, mais cette question est actuellement devenue source de problèmes dans les réseaux bien développés en raison de l'accroissement de la charge. Des instabilités et effondrements de la tension sont survenus à plusieurs reprises dans des réseaux importants à travers le monde au cours des dernières années.

I.4.3.4 Causes d'instabilité de tension :

Les problèmes d'apparition du phénomène d'écroulement de tension sont toujours liés à la difficulté de régler la tension au-dessus d'une certaine valeur appelée tension critique.

Généralement, l'effondrement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive ; dans cette situation le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge. Ceci est dû à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive, de telle sorte que, la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS est limitée par des contraintes physiques.

En plus la puissance réactive générée par des bancs de condensateur est relativement réduite à des tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées.

Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante [6].

e) Production trop éloignée de la consommation :

Dans la plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de consommation. Cette situation rend le transport de l'énergie réactive très difficile à cause des pertes réactives très élevées. Cette difficulté de transport d'énergie réactive augmente la probabilité d'apparition d'une instabilité ou d'un effondrement de tension.

f) Manque local d'énergie 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 cause des limitations sur la production et la transmission de la celle-ci. La limitation de 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 est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique. Sans la limitation thermique, l'instabilité et l'effondrement de tension sont souvent impossibles. Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension.

Pour bien comprendre l'influence de la puissance réactive sur l'effondrement de tension, on considère un réseau simple à deux nœuds de la (Figure I.2).

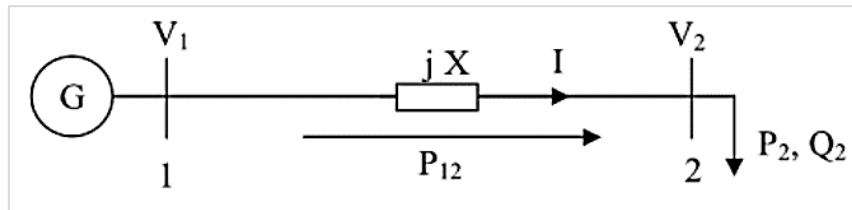


Figure (I.4) : Réseau électrique à deux nœuds.

$$\begin{aligned}
 \bar{S}_2 &= P_2 + jQ_2 \\
 &= V_2 \left[\frac{V_1 \cos \delta + jV_1 \sin \delta - V_2}{jX} \right] \\
 &= \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \right] \\
 P_2 &= \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \\
 Q_2 &= \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X}
 \end{aligned}$$

De même pour le nœud 1 :

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta$$

$$Q_1 = \frac{-V_1 V_2 \cos \delta + V_1^2}{X}$$

Pour la puissance active au bus 2, l'équation (3.2) montre clairement que lorsque la puissance P_2 augmente, la turbine doit fournir plus d'énergie pour augmenter l'angle de puissance δ afin de satisfaire la demande de la charge. Par conséquent, la puissance réactive Q_2 diminuera ou même reviendra négative à cause de la diminution du $\cos \delta$. Autrement, l'équation (3.5) montre que la puissance réactive Q_1 augmentera brusquement. Donc la différence entre la puissance réactive aux nœuds 1 et 2 (pertes réactives) augmentera rapidement. On peut conclure que le transport de la puissance réactive n'est pas économique à cause de l'augmentation des pertes réactives à des niveaux de charge relativement élevés. La meilleure solution de ce problème est de produire cette énergie localement, proche de la consommation, par l'installation de batteries de condensateurs, de compensateurs synchrones (génératrices synchrones avec $P = 0$) ou des compensateurs statiques (FACTS).

g) 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 [6].

I.4.3.5 Qualité de la tension :

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles de la manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie. Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence. [7]

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- les creux de tension et coupures brèves.
- les variations rapides de tension (flicker).
- les surtensions temporaires ou transitoires.

I.4.3.6 Dégradation de la qualité de la tension :

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble etc... Ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques : (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...)
- Installations perturbatrices : Fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils etc...

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension, lorsque celle-ci est présente, sont brièvement décrits ci-après

I.4.3.7 Méthodes d'amélioration de la stabilité de la tension :

Il y a des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels que :

- Un contrôle automatique des condensateurs shunts ;
- Un blocage des régulateurs en charge automatique ;
- Une nouvelle répartition de la génération ;
- Une régulation de tension secondaire, et un plan de délestage .

I.4.3.8 Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité.

Afin d'éviter cela, on fait recourir à la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation machines synchrones, batteries de condensateurs.

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive pour améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts :

- Correction du facteur de puissance.
- Amélioration de la régulation de la tension.
- Equilibre des charges.
- Aider au retour à la stabilité en cas de perturbation .

I.5 Facteurs influençant la stabilité de la tension :

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de Tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau.

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- Les changeurs de prises en charge (OLTC) et les transformateurs fixes.
- Les relais de protection.
- Les caractéristiques de la charge.

Parmi ces éléments qui influent sur la stabilité de la tension, on retrouve les lignes de transport d'énergie. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais [8].

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. Les études ont montré qu'un fort taux de pénétration de la production décentralisée impacte l'exploitation future des réseaux de distribution. En particulier, le plan de tension peut être grandement modifié par la présence de GED. Au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure dans certains nœuds du réseau, alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source.

Chapitre II :

LES INDICES DE STABILITE

II.1 Introduction :

La stabilité de la tension dans un réseau électrique est une des préoccupations dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques. Le problème de la stabilité de tension est à l'origine de plusieurs grands black-out durant les dernières années. Son explication la plus simple est que la courbe (p-v) ne suffit plus une fois que l'on s'attaque à la dynamique des réseaux de plus grandes tailles et d'autres méthodes de calcul plus puissantes sont nécessaires. Les modèles de charges statiques et dynamiques ainsi que les régulateurs sont d'une importance capitale pour étudier le phénomène d'effondrement de la tension [9].

Généralement, les réseaux de distribution ont une combinaison de charges (industrielle, commerciale et domestique) et les changements considérables dans les niveaux de charges se produisent à tout moment et dans n'importe quelle partie du réseau. Aux heures de pointe, un petit changement du profil de la charge peut menacer la stabilité de la tension du système.

La stabilité de tension porte sur la capacité d'un système de puissance de maintenir des tensions acceptables à tous les nœuds du système dans des conditions normales et après avoir été sujet à une perturbation. La cause principale de l'effondrement de tension peut être due à l'incapacité du système d'alimentation d'assurer la puissance réactive ou une absorption excessive de la puissance réactive par le système lui-même. Pendant les dernières décennies, une attention particulière a été accordée au problème de stabilité de la tension et cette suite au nombre d'accidents dû à l'effondrement de la tension qui se sont produits dans divers pays. L'effondrement de tension se produit quand un système fortement chargé ne peut pas maintenir son programme de génération et de transmission.

Le réglage et le contrôle de la tension dans les réseaux électriques consistent à maintenir en régime permanent des tensions stables et dans des plages spécifiques à chaque

niveau. Ce réglage est d'une importance capitale pour garantir un bon fonctionnement des différents équipements du réseau (lignes, transformateurs, systèmes de protection, charges . . . etc.). En effet, une tension plus élevée conduit souvent à une usure prématurée du matériel, alors qu'une tension plus basse par rapport à la plage spécifiée conduit à un mauvais fonctionnement des équipements et des charges. La stabilité de la tension est, une étape indispensable pour la conception de tout réseau électrique car assure que celui-ci dispose de l'énergie suffisante pour répondre à la demande de la charge.

II.2 Etat de l'art :

Gubina et autres [10], Nagao et autres [11] et Suzuki et ses coauteurs [12] ont analysé la stabilité de la tension dans les réseaux de distribution. Dans leurs modèles, le réseau de distribution est réduit à un système unifilaire équivalent. Ce dernier n'est cependant valide qu'au point de fonctionnement auquel il est obtenu. Le modèle pourrait être suffisant pour un petit changement de modèle de charge autour du point de fonctionnement. L'écoulement de puissance étant fortement non linéaire, même dans un système radial, le schéma équivalent unifilaire ne serait pas suffisant pour évaluer la limite de stabilité de tension. Une autre limitation de la technique est qu'il ne convient pas à un modèle changeant de charge qui influe considérablement sur le point d'effondrement de tension. Chakravorty et Das [8] ont proposé une nouvelle technique d'analyse de sensibilité de la tension et calculent l'indice de chaque nœud pouvant identifier le nœud le plus sensible susceptible de conduire à un effondrement de la tension. Néanmoins, leur indice de sensibilité met en jeu un modèle mathématique complexe. La recherche d'un indice qui prévoit le point d'effondrement de tension (ou bifurcation) de manière simple a été largement adressée dans la littérature. L'idée est d'estimer la variation de charge pour un point connu de fonctionnement auquel le système demeure stable. Claudio et autres [13] comparent plusieurs indices de stabilité statique de tension et concluent cela quand des limites de puissance réactive sont considérées. Une autre méthode qui produit des résultats assez précis en un temps de calcul raisonnable est proposé par Zambroni de Souza et autres [13]. Une telle méthode est basée sur le comportement de la plus grande composante du vecteur tangente en fonction de l'augmentation de charge. Le vecteur tangent est calculé comme étape prévue dans la continuité des écoulements de puissance. L'application de ce vecteur

comme indice de sécurité de tension est récente et les résultats rapportés dans [14] montrent que cette technique est très attrayante, même lorsque on traite de grands systèmes. Cette technique est utilisée quand différents scénarios de fonctionnement de charge sont considérés. La technique du vecteur tangente peut être facilement incorporée à n'importe quel programme de l'écoulement de puissance. Elle identifie le jeu ou les jeux de barres où l'installation de condensateur est à prévoir pour réduire les pertes de puissance du système global. Ils ont rapporté un enregistrement réel du phénomène d'écoulement périodique de la tension et où une compensation réactive est impérative pour éviter cet effondrement de tension à répétition.

Sydulu [15] présente une méthode pour déterminer les nœuds appropriés dans des systèmes de distribution pour l'installation de condensateurs. Une approche basée sur un indice des pertes de puissance est employée pour déterminer la convenance de placement de condensateur à chaque nœud. Les plus susceptibles jeux de barres à recevoir des condensateurs shunts sont identifiés. Les réductions des pertes sont alors linéairement normalisées dans la gamme [0,1] avec une valeur de 1 pour la plus grande réduction des pertes de puissance et de zéro pour la petite. Le pourcentage de réduction des pertes de puissance due à la composante réactive du courant branche suite au placement des condensateurs est de plus de 50% ce qui est très significatif pour un système radial de distribution.

Khothari [16] et Ajjparapu [17] présentent une nouvelle méthodologie pour le perfectionnement de la sécurité de tension en utilisant un indice de stabilité de tension qui peut être mis en application en temps réel. L'objectif est alors la minimisation des pertes de puissance en injectant de la puissance réactive, ce qui est d'importance primordiale pour maintenir le niveau désiré de la sécurité de tension. Le modèle linéaire par accroissement a été employé. Il est également vrai que, en augmentant l'indice de stabilité de tension, la tension des jeux de barres de charge augmente de manière significative.

Une autre approche pour calculer les sensibilités des pertes de puissance active et réactive et de tension en régulant la puissance réactive injectée à n'importe analyser la stabilité de tension. Jusqu'ici, l'ensemble des investigations appliquant la méthode équivalente de Thevenin ont été employés pour l'analyse des systèmes de

transmission où, l'impédance des transformateurs et des lignes de distribution ne sont pas prises en considération. Ce qui n'est pas le cas dans les réseaux de distribution.

K. Prakash, M. Sydulu [18] et Das [19] présentent une approche qui détermine l'endroit et la taille optimale des condensateurs sur les systèmes de distribution pour améliorer le profil de tension et pour réduire les pertes de puissance active. Le placement et le classement par taille de condensateur sont faits par des facteurs de sensibilité des pertes de puissance. Le concept des facteurs de sensibilité des pertes peut être considérés comme une nouvelle contribution dans les systèmes de distribution. Ces facteurs de sensibilité des pertes offrent des informations importantes sur les tensions des nœuds pour le placement de condensateurs. Ces facteurs sont déterminés en utilisant l'étude simple de l'écoulement de charge. Le concept est bien appliqué et s'est avéré très efficace dans les systèmes radiaux de distribution.

Les réseaux neuronaux artificiels ont aussi fait leur entrée dans l'étude des systèmes énergétiques. En effet, Hamada et ses coauteurs [20] tout comme F.M. El Kady [21] ont présenté une technique s'appuyant sur les réseaux de neurone artificiels (ANN) pour prévoir la stabilité de tension des systèmes radiaux de distribution. La technique est basée sur un nouvel indice de stabilité de tension pour l'évaluation des systèmes de distribution. Les résultats obtenus sont fiables et prometteurs. Les ANN ont d'ailleurs été appliqués ces dernières années à d'autres problèmes dans les systèmes énergétiques tel la commande en temps réel des condensateurs shunts, la protection et les prévisions de charge.

L'effondrement de tension est aussi associé à la singularité de la matrice Jacobienne de l'écoulement de puissance. Quand la charge du système approche la valeur critique, la matrice Jacobienne de l'écoulement de charge devient presque singulier. Morison [22] et Anderson et Liu [23] ont employé la valeur singulière minimale du Jacobien de l'écoulement de puissance comme un indice pour déterminer indirectement la distance entre le point actuel de fonctionnement et où l'effondrement de tension se dirige. C'est le point où la charge du système est maximale. Ce phénomène est connu en tant que nœud de bifurcation.

Jasmon et autres dans [24] présentent une nouvelle technique pour déterminer la stabilité statique de tension des jeux de barres de charge dans un système de puissance

pour une certaine condition de fonctionnement. Ils identifient les jeux de barres de charge qui sont près de l'effondrement de tension. L'indice de stabilité de tension relatif à un jeu de barre de charge est déduit de l'équation de la dérivée de la tension du réseau radial en question. Un nouveau facteur de stabilité de tension tiré de la dérivée de l'équation de tension est calculé et appliqué à un circuit équivalent de Thevenin. Les jeux de barres ayant des facteurs de stabilité de tension proche de 1.0 sont identifiés comme des jeux de barres critiques. Cet indice indique à quelle distance les jeux de barres de charge sont de leurs limites de stabilité de tension d'où l'identification des jeux de barres critiques. Une comparaison est également faite entre cet indice et le rapport d'impédance employé par sterling et autres dans [25] comme indicateur d'effondrement de tension. Sterling a étudié l'effondrement de tension à un jeu de barres de charge à l'aide du circuit équivalent de Thevenin. Beaucoup de chercheurs se sont basés sur le circuit équivalent de Thevenin pour analyser le problème de stabilité de tension ces dernières années. Gubina [25], Haque [26] ont aussi déterminé l'indice de stabilité de tension en utilisant la méthode de Thevenin.

B. Milosevic [27], A. Wiszniewski [28] et Deng [29] ont mis en application la prévision et la protection de stabilité de tension avec les paramètres du circuit équivalent de Thevenin. Vu K, Begovic [30] a proposé une méthode simple pour déterminer la marge de stabilité de tension d'un système de puissance maillé en utilisant quelques mesures locales. Les données mesurées sont employées pour obtenir l'équivalent de Thévenin du système qui, à son tour, est employé pour déterminer un indice de stabilité. L'équivalent de Thevenin est une bonne et rapide méthode pour analyser la stabilité de tension. Jusqu'ici, l'ensemble des investigations appliquant la méthode équivalente de Thevenin ont été employés pour l'analyse des systèmes de transmission où, l'impédance des transformateurs et des lignes de distribution ne sont pas prises en considération. Ce qui n'est pas le cas dans les réseaux de distribution.

Suganyadevia et Parizad [31] présentent une méthode pour la réduction au minimum, des pertes de puissance d'un réseau de distribution. Ils ont considéré l'indice de stabilité de tension (SI) pour trouver l'emplacement optimal de condensateur et améliorer la puissance transférée. Ils présentent deux indices de stabilité de la ligne, L'indice rapide de stabilité de tension (FVSI) et le facteur de stabilité de la ligne

(LQP). Ce sont des méthodes efficaces pour l'amélioration du profil de tension, la réduction des pertes de puissance et également l'augmentation de la capacité de transfert de puissance.

Le problème de stabilité de la tension est devenu un souci majeur lors de la planification et l'opération des systèmes énergétiques. De ce fait et pour mener une étude comparative sur l'efficacité de l'utilisation des indices de stabilité.

II.3 Développement de quelques indices de stabilité :

La plupart de ces méthodes utilisent l'analyse de l'écoulement de puissance.

Il peut toujours arriver, dans l'exploitation du réseau, des événements non prévus qui mènent à une catastrophe. Malgré la puissance des logiciels de simulation des réseaux, les études de planification ne suffisent pas. On ne peut en effet jamais être exhaustif dans le choix des scénarios et les modélisations ne sont jamais parfaites. La tendance actuelle est donc d'ajouter aux outils de planification des outils d'exploitation qui permettent de voir, en temps réel les problèmes de stabilité qui peuvent survenir dans le réseau.

La stabilité de tension est devenue un des facteurs dominants dans la détermination des limites de fonctionnement des systèmes électriques. Ce chapitre discute quelques indices importants de stabilité de tension dans des systèmes d'énergie électrique,

II.3.2 Indice de stabilité (L)

Il faut bien signaler que l'étude de la stabilité de tension dans notre système ne concerne que les jeux de barres où sont branchées les charges, puisque on considère que le générateur est capable de maintenir une tension dans les limites admissibles. Pour cela on essaie de proposer une méthode qui repose sur la surveillance en temps réel de puissance qui circule dans le réseau par un système de mesure, qui peut nous aider à prédéterminer l'approche du point d'effondrement de la tension [32].

➤ II.3.2.1 Etude d'un cas élémentaire (un seul générateur et une charge)

On considère un système énergétique simple, à travers lequel on va démontrer l'élément utile dans notre étude c'est-à-dire, l'indicateur qui nous permet de surveiller notre réseau [32], il est alors nécessaire de passer par un cas simple avant de généraliser à un système complet. Comme il est montré dans la fig.2.1, le jeu de barre 1 est considéré comme un jeu de barre de génération et le numéro 2 est un jeu de barre de charge, dont le comportement de la tension nous intéresse.

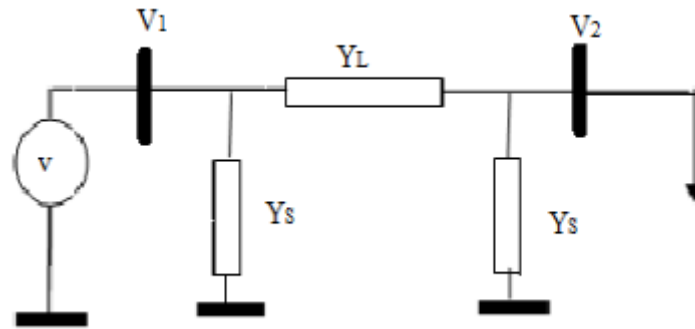


Figure (II.1) : Un seul générateur et une charge

Ce système simple peut être défini par les équations complexes suivantes :

$$\bar{I}_2 = \bar{V}_2 \bar{Y}_s + (\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \bar{Y}_L = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_2^*}$$

Et qu'on note :

$$L = \frac{S_2}{V_2^2 Y_{22}}$$

Cet indicateur peut être utilisé pour expliquer le problème de la stabilité de la tension dans les systèmes électriques, et évaluer le niveau du risque d'effondrement de la tension.

La valeur de cet indicateur se situe dans l'intervalle zéro à un. S'il n'y a aucune charge au niveau du jeu de barre, l'indicateur est égal à zéro, si le système est complètement instable l'indicateur en question sera égal à un.

II.3.3 Indices de stabilité basés sur l'écoulement de puissance

Dans le présent paragraphe, nous nous pencherons sur la définition de trois nouveaux indices tirés d'un même modèle de ligne. Le premier indice est proposé par Ranjan et Venkatesh [33] qui est symbolisé par SI pour stabilité index. L'expression

mathématique de ce premier indice de stabilité est très simple. Le second indice noté Li est proposé par Jasmon [33]. Le troisième noté FVSI est donné par Musirin [34].

II.3.3.2 Indice de la stabilité de tension (SI)

Pour développer l'indice SI, on considère un tronçon de ligne compris entre les jeux de barres 1 et 2 et dont la représentation est donnée par Fig.2.2.

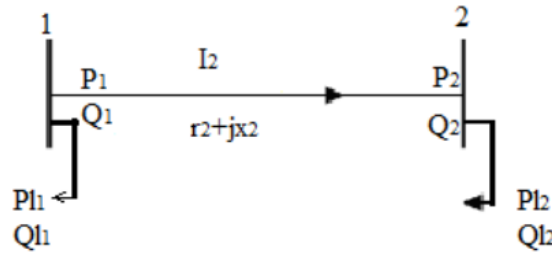


Figure (II.2) : Circuit équivalent d'une branche

Dans le schéma de la figure Fig.2.2 , 1 et 2 sont respectivement les nœuds source et récepteur de la branche.

$$\overline{V}_1 = V_1 e^{j\delta_1}$$

$$\overline{V}_2 = V_2 e^{j\delta_2}$$

Pour un système à n jeux de barres, l'indice de stabilité de la tension pour un jeu de barre quelconque j est donné par :

$$SI_j = 0.5 |V_{j-1}|^2 - P_j r_j - Q_j x_j$$

Pour un fonctionnement sûr et stable il faut que $SI_j > 0$ pour tous les jeux de barres. Le nœud pour lequel la valeur du SI_j est minimale est le nœud le plus proche de l'effondrement.

II.3.3.3 Indice de stabilité de tension (Li).

Cet indice développé par Jasmon et autres [23]. Partant d'un schéma identifié à celui de la figure.2.2 et que nous reproduisons ici, on peut tirer les équations suivantes :

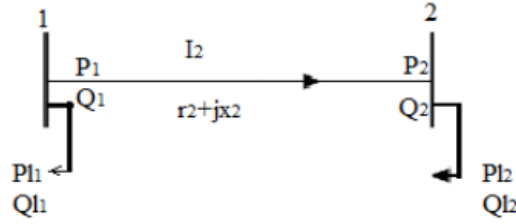


Figure (II.3) : Circuit équivalent d'une branche.

L'indice de stabilité d'un jeu de barre j quelconque sera donné par :

$$L_{ij} = \frac{4[V_{j-1}^2 (P_j r_j + Q_j x_j) + (P_j x_j - Q_j r_j)^2]}{V_{j-1}^4}$$

Les jeux de barres critiques seront identifiés par leurs indices de stabilité L_i approchant 1. Ceci permettra alors d'entreprendre les actions appropriées pour maintenir la stabilité du système et donc éviter n'importe quelle incidence de l'effondrement de tension.

II.3.3.4 Indice Rapide de Stabilité de Tension FVSI (Fast Volage Stability Index)

:

L'indice rapide de stabilité de tension proposé par I. Musirin et autres [34] est formulée pour une ligne de transport d'énergie électrique. Partant d'un schéma identifié à celui de la figure.2.3 et que nous reproduisons ici, on peut tirer les équations suivantes :

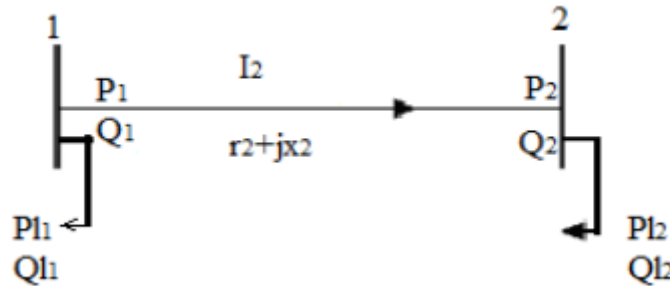


Figure (II.4) : Circuit équivalent d'une branche.

L'expression précédente nous mène à la forme suivante :

$$FVSI = \frac{4Z_2^2 Q_2}{V_1^2 x_2^2} \leq 1.0$$

Appelée aussi indice rapide de stabilité de la tension, ou en anglais « Fast Voltage Stability Index ».

Où Z_2 est le module de l'impédance de la branche2.

V_1 : est la tension à son nœud source.

Q_2 : la puissance réactive à son extrémité réceptrice.

Quand FVSI est proche de 1.0 le système est à la limite de stabilité, et le jeu de barre pour lequel est calculé cet indice est dit le plus sensible du système.

II.4 Conclusion

La technique de l'indice de stabilité étudiée dans ce travail nécessite en premier lieu l'étude de la méthode de la chute de tension qui assure la convergence pour tous les types de réseaux de distribution radiaux contrairement aux méthodes itératives classiques (GaussSeidel, Newton-Raphson).

Elle est basée sur une expression algébrique simple des amplitudes des tensions (en négligeant les arguments qui ne changent que de quelques degrés de la sous-station jusqu'au dernier jeu de barres) sans avoir à recourir aux fonctions trigonométriques ou de longs calculs matriciels pour l'obtention du Jacobien.

Chapitre III :

LES ENERGIES

RENOUVELABLES

III.1 Introduction :

Les cinq formes d'énergies renouvelables les plus importants sont la géothermie, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque, c'est la dernière (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.

Dans ce chapitre, nous commencerons par la définition de l'énergie solaire, suivie de la construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement. Puis, nous nous présenterons les différents types des cellules photovoltaïques. Enfin, les Avantages et inconvénients de photovoltaïque.

III.2 Énergie solaire :

Le soleil est une source d'énergie extrêmement puissante. Son rayonnement peut générer de la chaleur, provoquer des réactions chimiques ou générer de l'électricité.

Cette énergie est la plus grande source acceptée par la terre, mais son intensité à la surface de la terre est en réalité très faible. Ceci est principalement dû à l'énorme propagation radiale du rayonnement solaire. La lumière du soleil qui atteint le sol est composée de près de 50 % de lumière visible, de 45 % de rayonnement infrarouge et d'une petite quantité de rayonnement ultraviolet et d'autres formes de rayonnement électromagnétique : les chercheurs ont utilisé un capteur spécifique pour « absorber l'énergie de la lumière du soleil ». Les rayons sont réaffectés selon les trois principaux modes de fonctionnement [35].

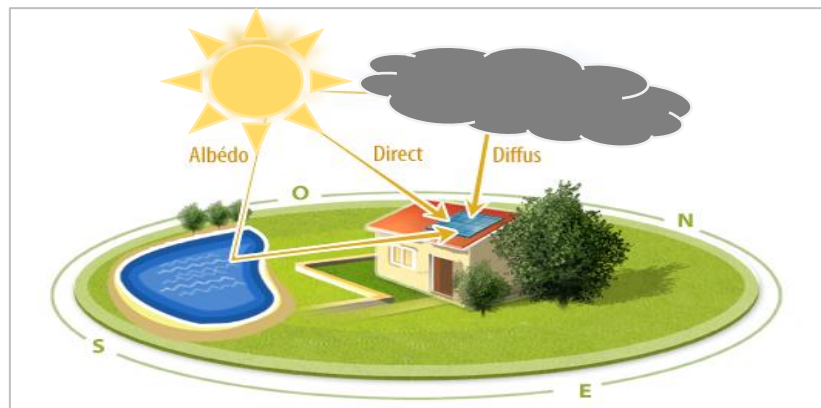


Figure (III.1) : Schéma d'absorption des rayons solaires

III.3 Technologies des énergies solaires :

L'utilisation de cette énergie est à travers un capteur spécifique afin d'absorber l'énergie des rayons du solaire et de la rediffuser selon les trois principaux modes de fonctionnement.

III.3.1 Solaire à concentration thermodynamique :

L'énergie solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs pour concentrer l'énergie solaire dans un tube contenant un fluide caloporteur pouvant être chauffé à 500°C. La chaleur obtenue est transférée au circuit d'eau, et la vapeur générée active la turbine reliée à l'alternateur pour produire de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [35].

III.3.2 Solaire thermique :

L'énergie solaire thermique (EST) est une technologie permettant d'exploiter l'énergie solaire pour en faire de la chaleur. Elle absorbe chaleur générée par la radiation solaire, cette énergie est utilisée dans des applications industrielles, commerciales et résidentielles, les systèmes de chauffage, et même la production d'électricité. L'énergie solaire thermique utilise diverses technologies comme les chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques [35].

III.4 Energie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [35].



Figure (III.2) : Energie solaire.

III.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est découvert par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". Mais, c'est vers les années 1940 que débute l'utilisation des cellules solaires. Quelques dates importantes dans l'histoire de la photovoltaïque :

- ✓ 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- ✓ 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✓ 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement.
- ✓ 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✓ 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- ✓ 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- ✓ "*Lem*" et "*Heweliusz* ", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITE, décolleront en 2013.

III.4.2 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, qui exposé à la lumière (photons), génère une tension. Le courant obtenu est un courant continu (CC), les semi-conducteurs qui constituent les cellules photovoltaïques sont à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre [36].

III.4.4 Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette

cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure I.4 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes

industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11% à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [36].

III.5 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

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.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n.

D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (III.4)

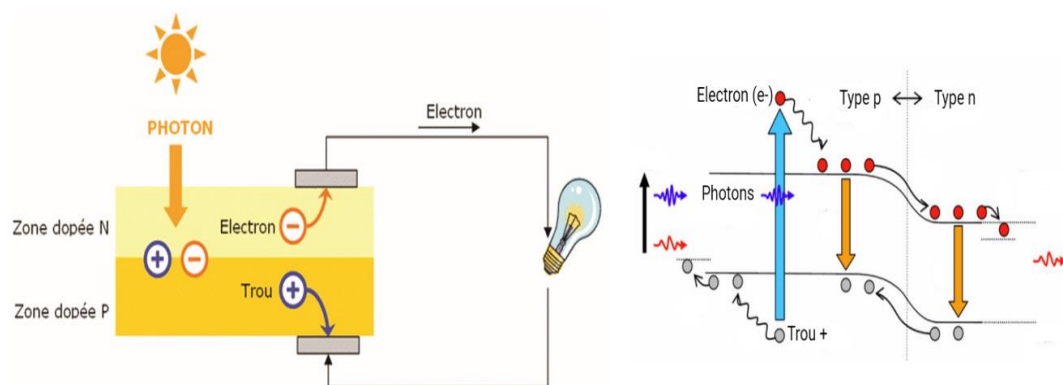


Figure (III.3) : Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur PV

III.7 Le module photovoltaïque

III.7.1 Schéma équivalent d'une cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure suivant :

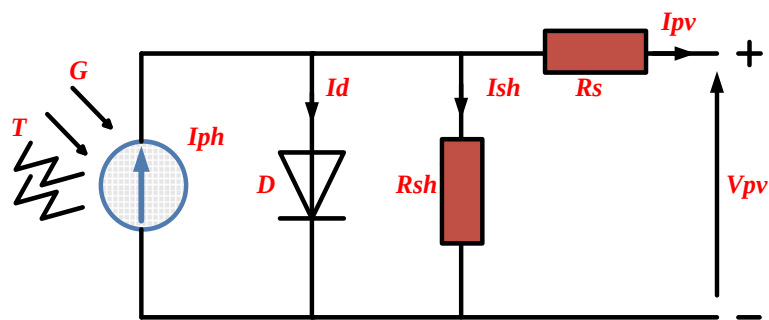


Figure (III.4) : Schéma équivalent de cellule PV

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

III.7.2 Association des cellules :

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour n_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes n_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

Avec :

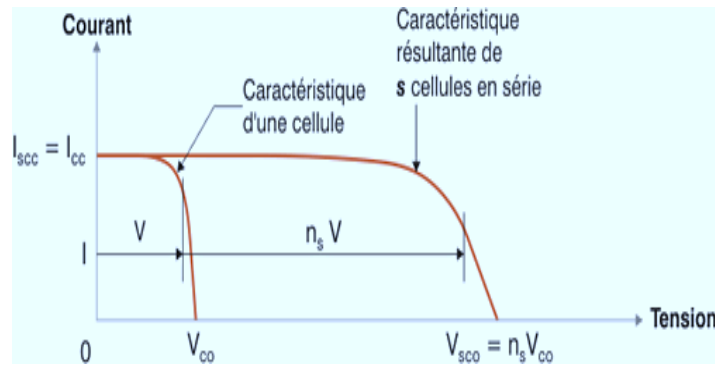
P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

- **Association série :**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné [35]. La figure (III.10) montre la caractéristique résultante courant-tension (I_{sc}, V_{sco}) obtenue en associant en série n_s cellules identiques dont la caractéristique courant-tension est (I_{cc}, V_{co}) [37]:

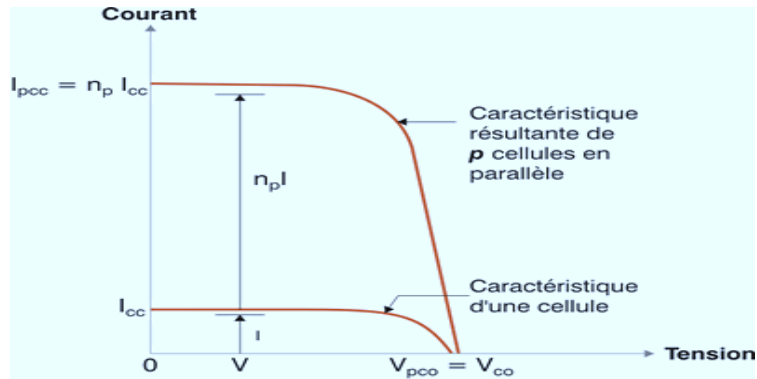


$$V_{sco} = n_s V_{co} I_{sc} = I_{cc}$$

Figure (III.5) : Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série

- **Association parallèle :**

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [37]. La figure (III.11) montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) obtenue en associant en parallèle n_p cellules identiques (I_{pcc}, V_{pco}) :



$$V_{pco} = V_{co} I_{pcc} = n_p I_{cc}$$

Figure (III.6) : Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

- **Association série/parallèle (Association mixte) :**

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

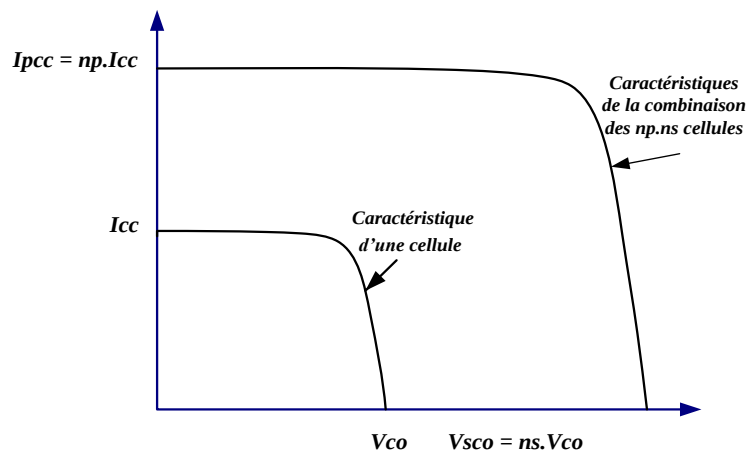


Figure (III.7) : Caractéristiques d'un générateur à n_s , n_p cellules identiques.

L'association mixte de plusieurs cellules photovoltaïque forme un module (appelé aussi panneau solaire).



Figure (III.8) : Module photovoltaïque.

III.9 Modes d'utilisations d'un système photovoltaïque :

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome
- Hybride
- Raccordée au réseau

III.9.1 Système autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (III.15) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement.

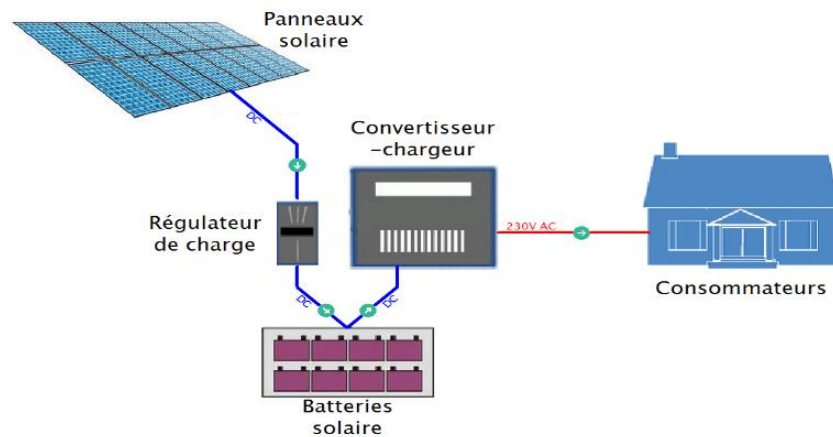


Figure (III.9) : Structure d'un système PV autonome.

III.9.2 Système hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [38].

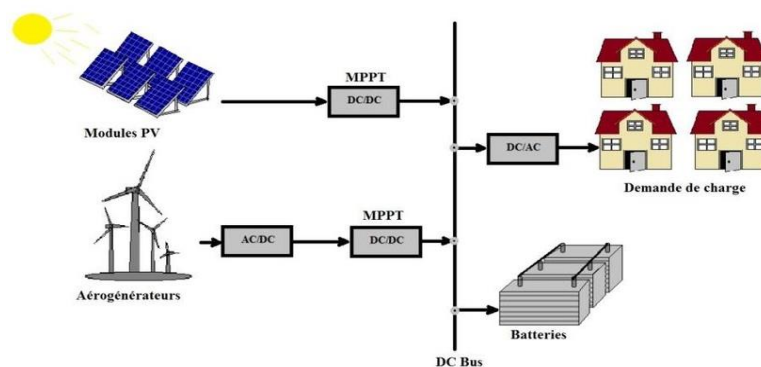


Figure (III.10) : Exemple de la structure d'un système PV hybride.

III.9.3 Système PV raccordée au réseau :

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu

sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [38].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

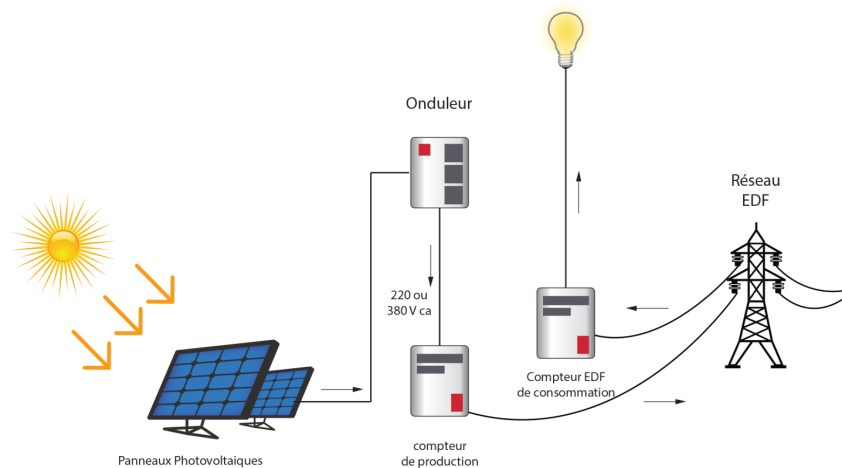


Figure (III.11) : Structure d'un système PV raccordé au réseau.

III.10 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :

➤ Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- Source d'énergie gratuite (le soleil)
- Pas de gaz polluant, ni de bruit
- Entretien minimal pour un bon fonctionnement
- Pas de parties mobiles, peu d'usure dans le temps
- Systèmes modulaires fonction du besoin, faciles à monter
- Autonomie

➤ Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Technologie à ces débuts, encore peu diffusée, donc chère

- Energivore à la fabrication
- Production non continue d'énergie (jour/nuit, été/hiver), énergie intermittente
- Intégration au bâti (forme, couleur)

Définition du système éolien :

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [39].

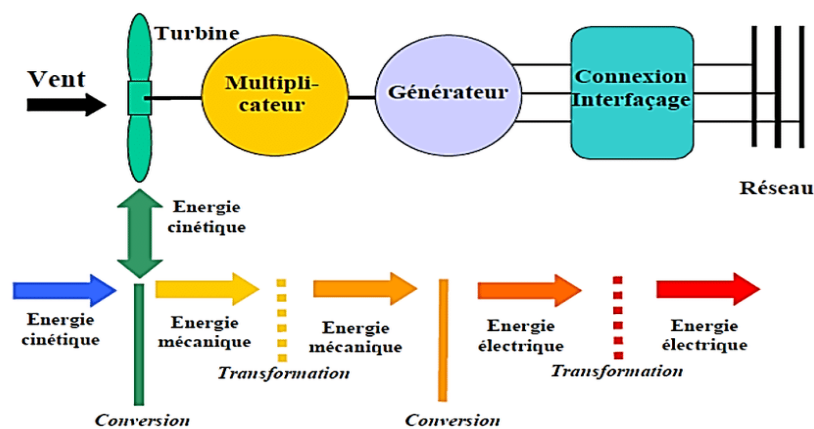


Figure (III.12) : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée. De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement de turbulences. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [39]. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux [40].

3. Les différents types d'un système éolien :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

3.1. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe

horizontal .Ce type d'éolienne (Figure 2.2) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [41].



Figure (III.13) : Eoliennes à axe vertical.

3.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent.
- Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple [42].

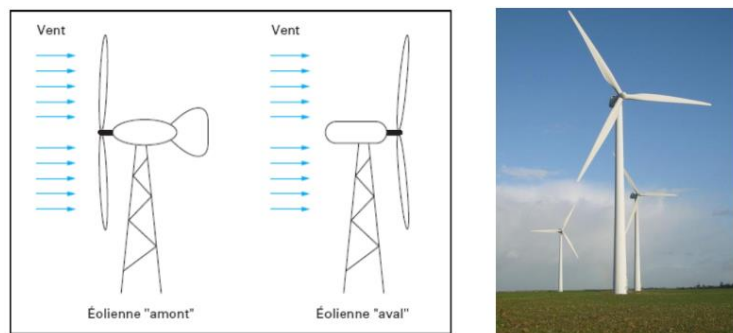


Figure (III.14) : Configuration à axe horizontal.

Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [43]. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

Asynchrones à cage (MAS) :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en terme d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de

concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.[43]

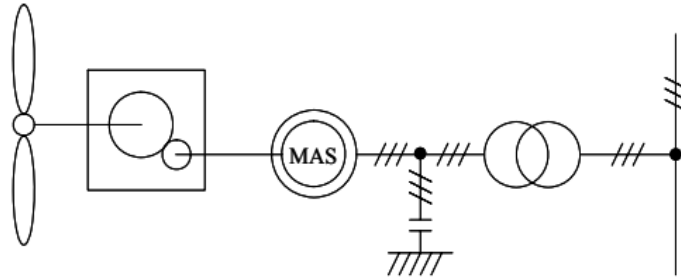


Figure (III.15) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes solaires et les systèmes éoliens.

La première partie et après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension du système photovoltaïque. La seconde partie du chapitre a été consacrée les différents types d'éoliennes et La machine qui sera utilisée.

Chapitre IV:

Simulation des résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de l'intégration des ressources d'énergie renouvelables (l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne) sur les indices de stabilité de tension dans un réseaux électriques IEEE.

D'abord sur le réseau modèle qui est composé de neuf nœuds. L'intégration est mise sur le jeu de barre 6. L'exécution du programme PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations nous permettant de tracer la dépendance des indices de stabilité en fondant les figures qui représentent respectivement les Tension au niveau des différents taux de pénétration des sources d'énergie.

1- Outils de simulation :

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour l'analyse de la stabilité de tension, tels que (Matlab, Etap, 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 PSAT comme outil de simulation.

2- Le PSAT :

Développé, en 2001, par FEDERICO MILANO, PSAT est une boîte à outils qui s'exécute sous environnement Matlab. Elle est dédiée pour l'analyse statique et dynamique et le contrôle des réseaux électriques.

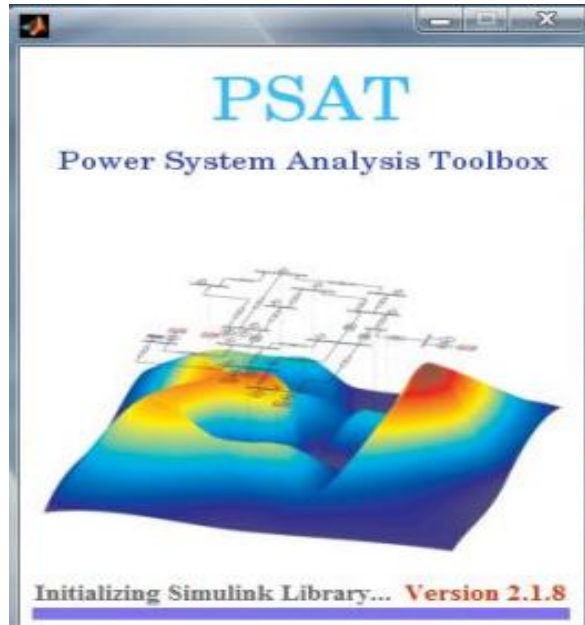


Figure (IV.1) : la première fenêtre du PSAT.

Toutes les opérations de PSAT sont réparties en deux types d'analyse :

- La première analyse est le calcul de l'écoulement de puissance. Cette applications'effectue dans une page de commande ou un éditeur.
- La seconde opération consiste à construire le réseau à étudier en utilisant unebibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèles unifilaires.

3.1- Utilisation de PSAT :

Les étapes d'utilisation de PSAT se résument comme suit :

- Ouvrir un nouveau fichier ;
- Créer un réseau électrique à étudier ;
- Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation ;

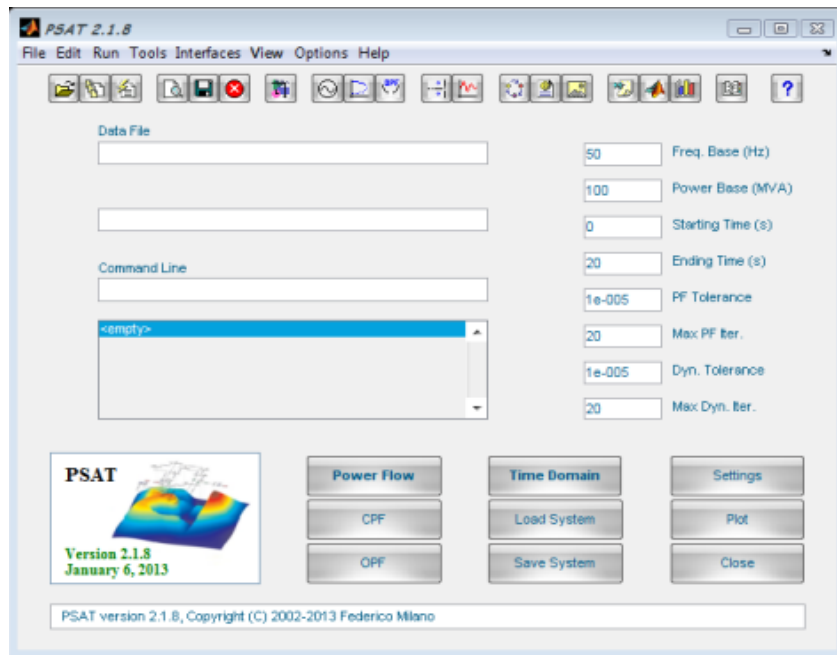


Figure (IV.2) : la fenêtre principale du PSAT.

- Introduire les données numériques des éléments (pv, éolienne, lignes, transfos) ;
- Exécuter l'écoulement de puissances ;
- Obtenir un rapport bien détaillé.

L'exécution du programme PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations sous forme d'un rapport qui représentent respectivement les Tension aux différents jeux de barre, les puissances actives et réactives produites.

4- Problématique :

Dans ce travail nous avons considéré 3 cas :

1Cas : fonctionnement normal.

2Cas : intégration d'une source photovoltaïque (PV).

3Cas : intégration d'une source éolienne (WT).

Nous avons déterminé les indices de stabilité de tension aux niveaux des jeux de barres du réseau standard (modèle d'IEEE 9 jeux de barres) pour chaque cas

- Topologie :

4.1- Réseau standard (modèle d'IEEE 9 jeux de barres) :

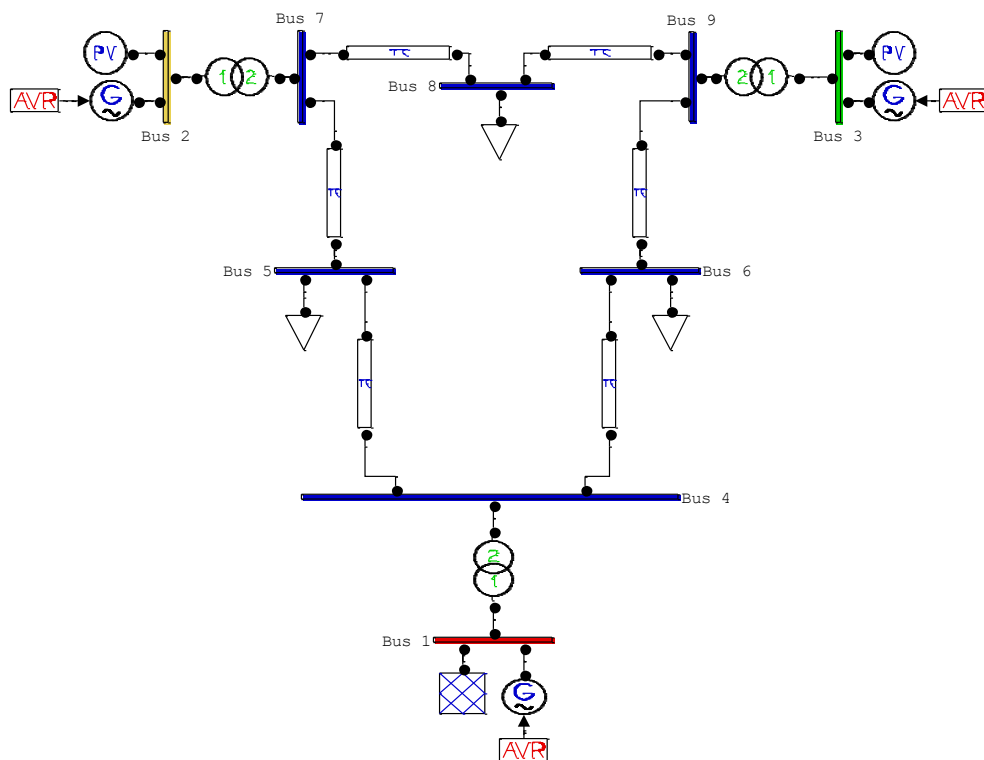


Figure (IV.3) : Modèle d'IEEE 9 Jeux de barres.

4.2- Caractéristique du Modèle d'étude :

<u>Lignes</u>	<u>Resistance (Ω/km)</u>	<u>Réactance (H/km)</u>
<u>BUS 4/BUS 5</u>	0.01	0.085
<u>BUS 4/BUS 6</u>	0.017	0.092

<u>BUS 7/BUS 5</u>	0.032	0.161
<u>BUS 7/BUS 8</u>	0.0085	0.072
<u>BUS 9/BUS 8</u>	0.0119	0.1008

Tableau (IV.1) : les données des lignes.

4.3- Tableau des Données techniques du modèle d'étude :

Nombre de jeux de barres	Nombre de ligne de transmission	Nombre de Charges
9	6	3

Tableau (IV.2) : Données techniques du modèle d'étude.

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 1	1.04	0	0.71641	0.27046	0	0
Bus 2	1.025	0.16197	1.63	0.06654	0	0
Bus 3	1.025	0.08142	0.85	-0.1086	0	0
Bus 4	1.0258	-0.03869	0	0	0	0
Bus 5	0.99563	-0.06962	0	0	1.25	0.5
Bus 6	1.0127	-0.06436	0	0	0.9	0.3
Bus 7	1.0258	0.06492	0	0	0	0
Bus 8	1.0159	0.0127	0	0	1	0.35
Bus 9	1.0324	0.03433	0	0	0	0

Tableau (IV.3) : résultats du flux d'énergie.

4.4- Méthode d'analyse :

Pour examiner l'influence de Taux de pénétration de la source photovoltaïque (PV) et la source éolienne (WT) injectée dans le réseau électrique sur la stabilité de tension, nous avons calculé les indices de stabilité de tension pour chaque taux de pénétration : 10% ;20% ; 30% puis on a procédé à une étude comparative entre deux indices.

5- Résultats de la simulation du réseau standard :

5.1- Les courbes PV du fonctionnement normal :

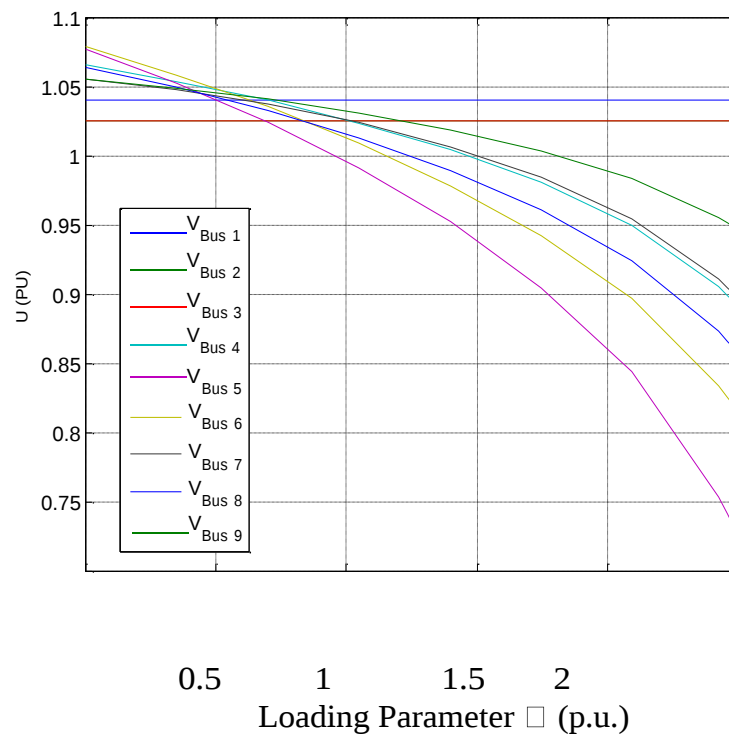


Figure (IV.4) : Les courbes PV.

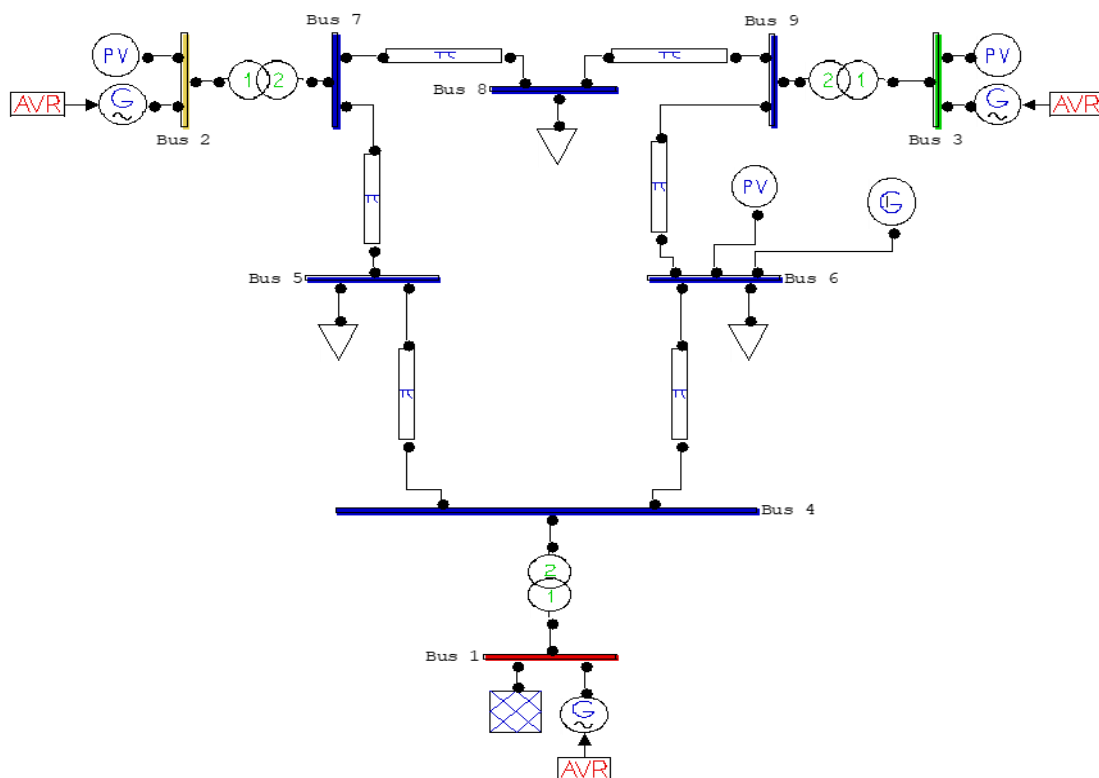


Figure (IV.5) : le réseau standard avec système photovoltaïque intégrée dans le jeu de barre 6.

5.2- L'indice LPQ pour différents taux de pénétration du pv :

From/ to	0%	10%	20%	30%
LPQ 78	0.073369	0.072023	0.072023	0.073235
LPQ98	0.174532	0.173173	0.173173	0.171588
LPQ 64	0.064892	0.063449	0.063449	0.064734
LPQ 75	0.242678	0.241418	0.24478	0.241418
LPQ 96	0.300568	0.309159	0.309159	0.316741
LPQ 45	0.188263	0.187678	0.187698	0.189767

Tableau (IV.4) : les résultats de calculs d'indice LPQ pour pv

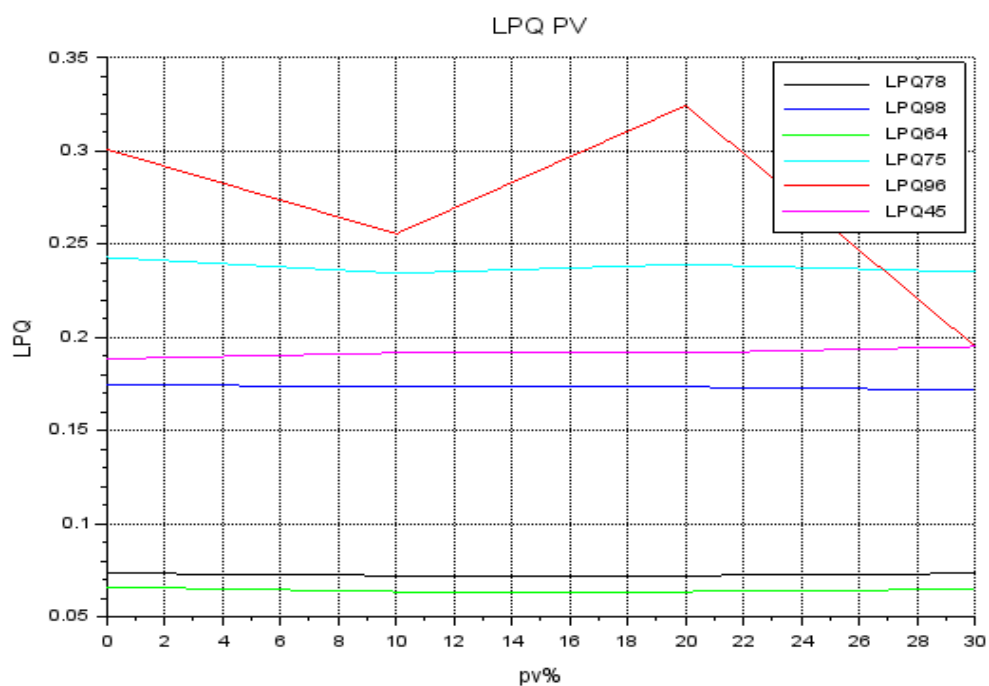


Figure (IV.6) : LPQ pour PV.

5.3- L'indice NLSI pour différents taux de pénétration du pv:

From/to	0%	10%	20%	30%
NLSI 78	0.128189	0.12798	0.12798	0.12798
NLSI 98	0.177896	0.176206	0.176206	0.176206
NLSI 64	0.065895	0.064213	0.064231	0.064231
NLSI 75	0.322531	0.321563	0.321563	0.321563
NLSI 96	0.458123	0.457613	0.457613	0.457613
NLSI 45	0.209315	0.208666	0.208666	0.208666

Tableau (IV.5) : les résultats de calculs du taux de pénétration du pv en fonction de l'indice NLSI.

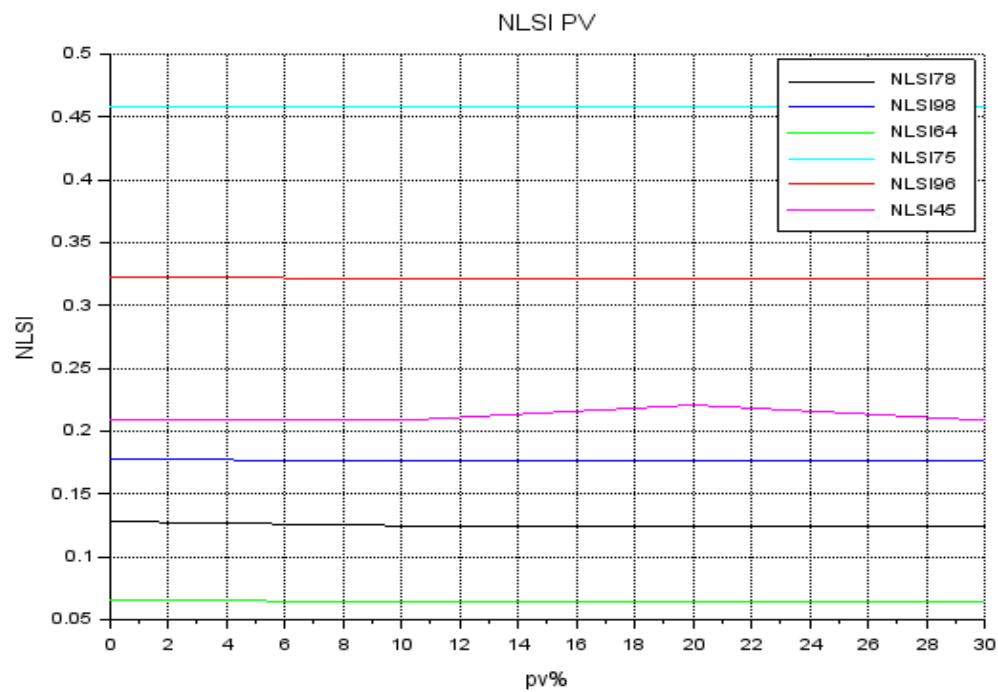


Figure (IV.7) : NLSI pour PV.

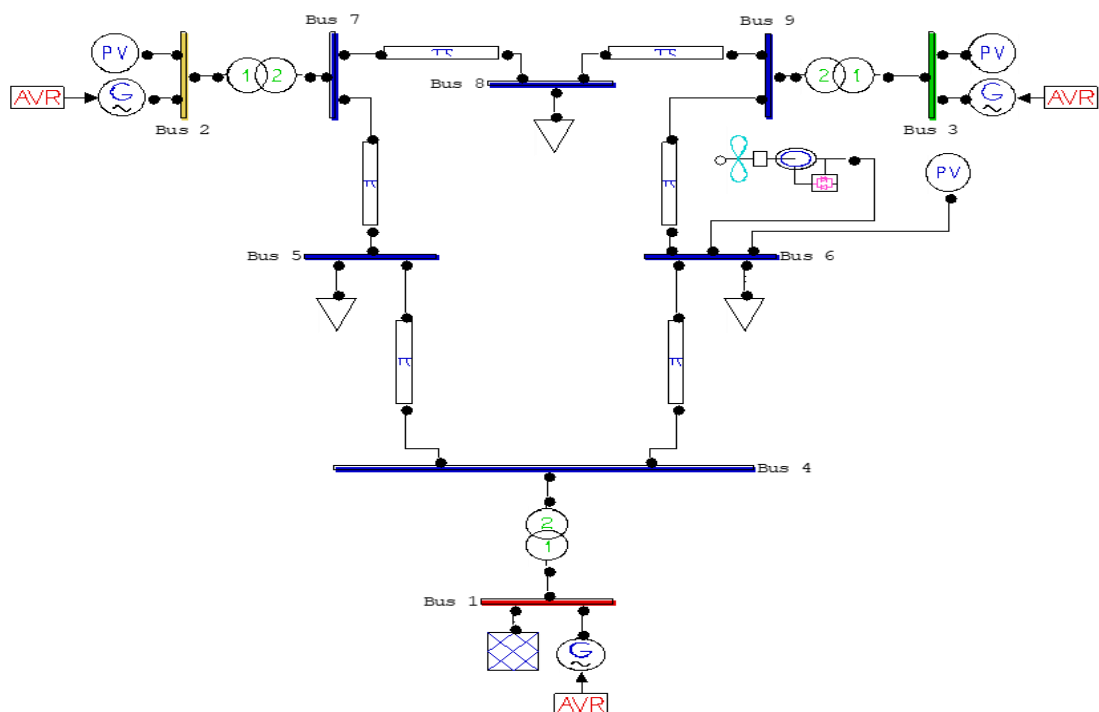


Figure (IV.8) : intégration de source photovoltaïque au jeu de barre 6.

4.5- L'indice LPQ pour différents taux de pénétration du wind :

From/to	0%	10%	20%	30%
LPQ 78	0.073369	0.072023	0.072023	0.073235
LPQ98	0.174532	0.173173	0.173173	0.171588
LPQ 64	0.064892	0.063449	0.063449	0.064734
LPQ 75	0.242678	0.241418	0.24478	0.241418
LPQ 96	0.300568	0.309159	0.309159	0.316741
LPQ 45	0.188263	0.187678	0.187698	0.189767

Tableau (IV.6) : les résultats de calculs du taux de pénétration du wind en fonction de l'indice LPQ.

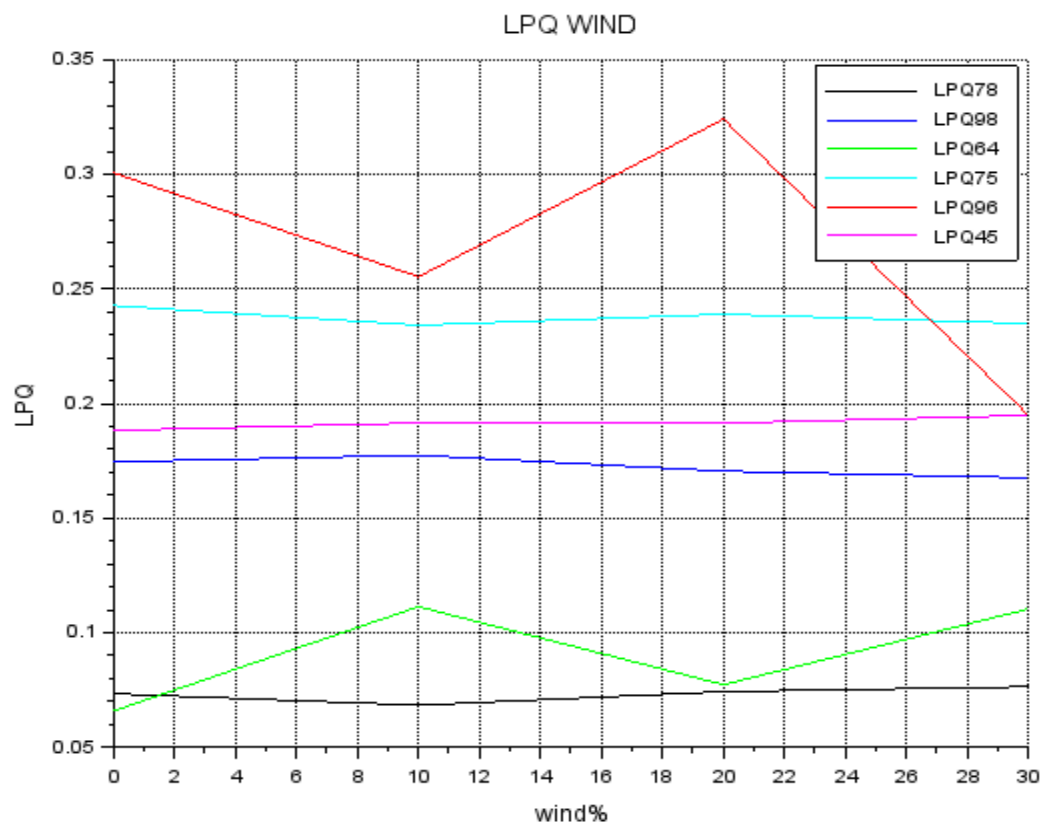


Figure (IV.9) : LPQ pour WIND.

L'analyse :

4.6- L'indice NLSI pour différents taux de pénétration du wind :

From/to	0%	10%	20%	30%
NLSI 78	0.128189	0.127408	0.176513	0.128807
NLSI 98	0.177896	0.17465	0.458775	0.176513
NLSI 64	0.065895	0.11566	0.07121	0.11566
NLSI 75	0.322531	0.480557	0.458775	0.46057
NLSI 96	0.458123	0.318724	0.322123	0.322123
NLSI 45	0.209315	0.20573	0.21063	0.213546

Tableau (IV.7) : les résultats de calculs du taux de pénétration du wind en fonction de l'indice NLSI.

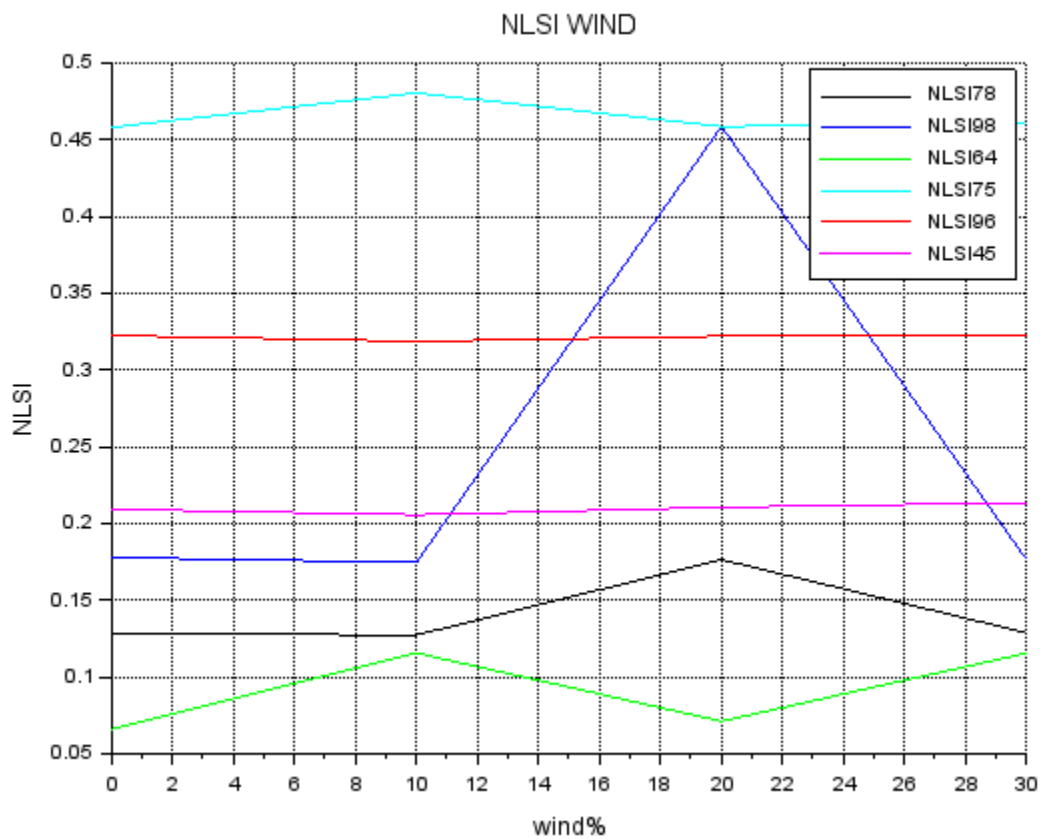


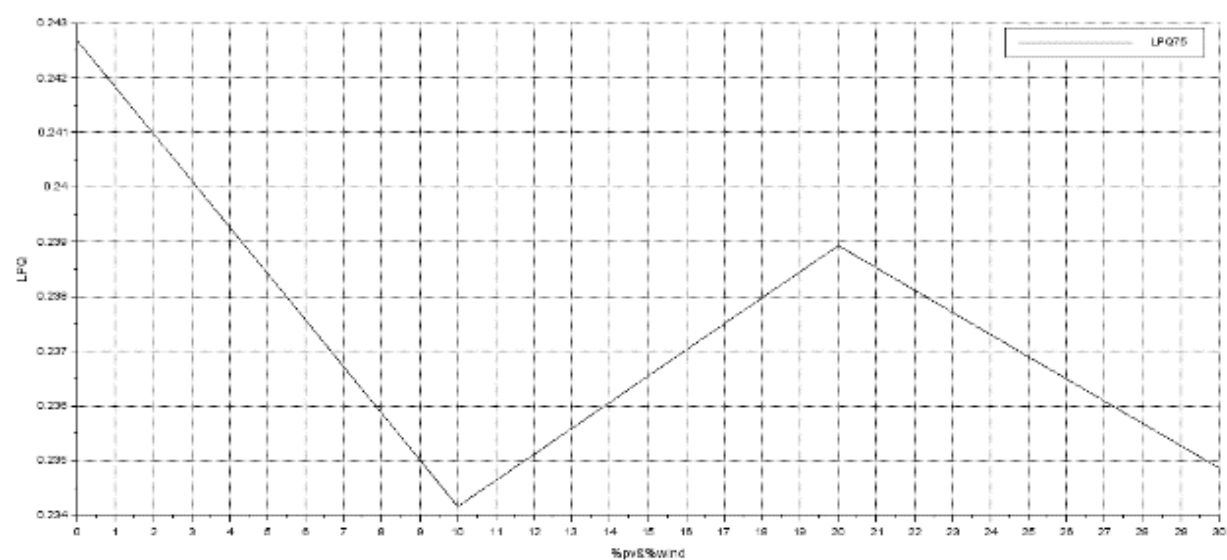
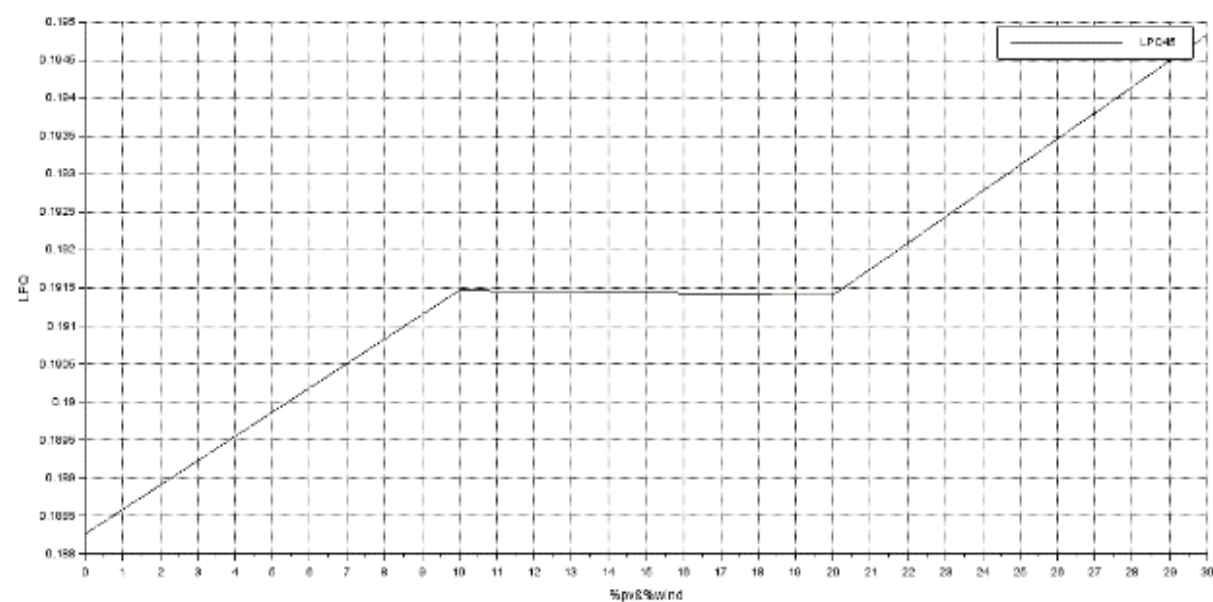
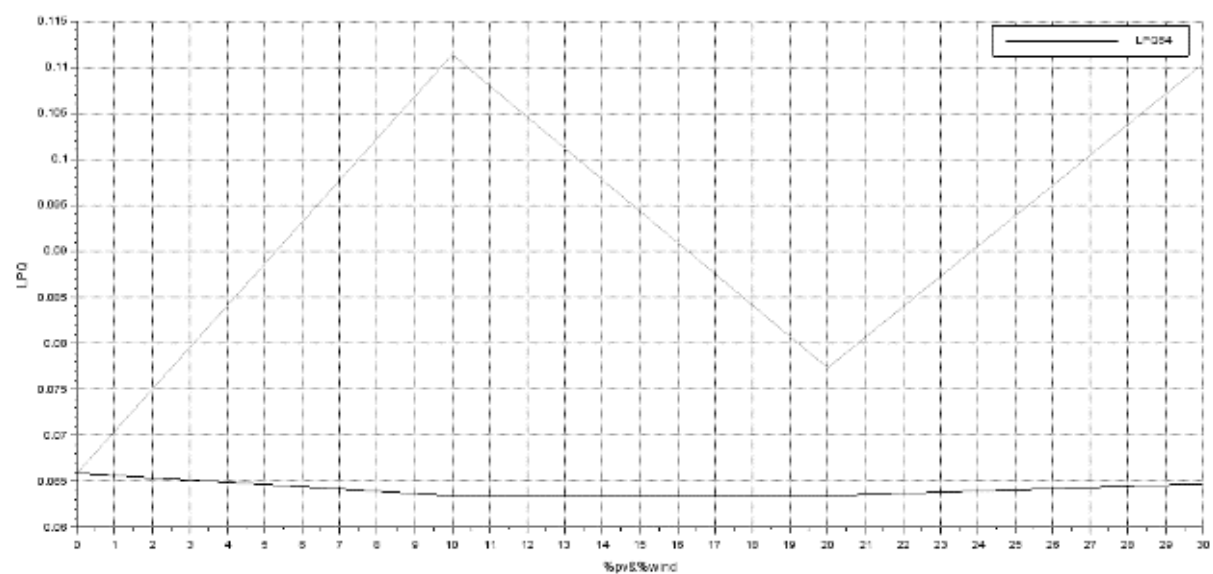
Figure (IV.10) : NLSI pour WIND.

L'analyse :

4.7- Comparaison entre réseau photovoltaïque et éolien en fonction de l'indice (LPQ) :

PV bus 6	0%	10%	20%	30%	WIND Bus 6	0%	10%	20%	30%
LPQ 78	0.073369	0.072023	0.072023	0.073235	LPQ 78	0.073369	0.068384	0.074314	0.076437
LPQ98	0.174532	0.173173	0.173173	0.171588	LPQ98	0.174532	0.177423	0.170459	0.167595
LPQ 64	0.064892	0.063449	0.063449	0.064734	LPQ 64	0.065892	0.111364	0.077339	0.110359
LPQ 75	0.242678	0.234157	0.23893	0.234867	LPQ 75	0.242678	0.234157	0.23893	0.234867
LPQ 96	0.300568	0.255283	0.324053	0.194832	LPQ 96	0.300568	0.255283	0.324053	0.194832
LPQ 45	0.188263	0.191467	0.191407	0.194832	LPQ 45	0.188263	0.191467	0.191407	0.194832

Tableau (IV.8) : la comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice LPQ.



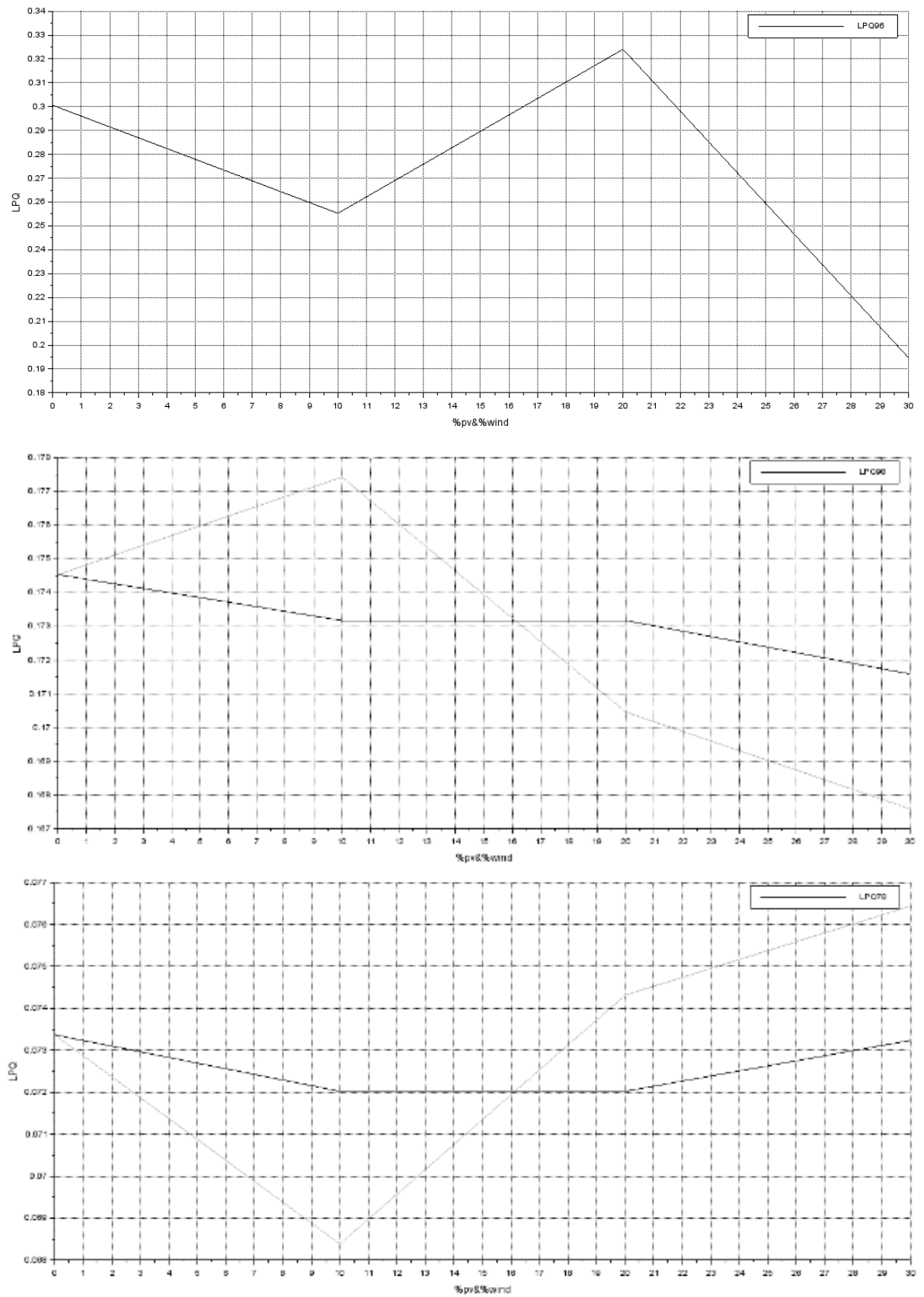


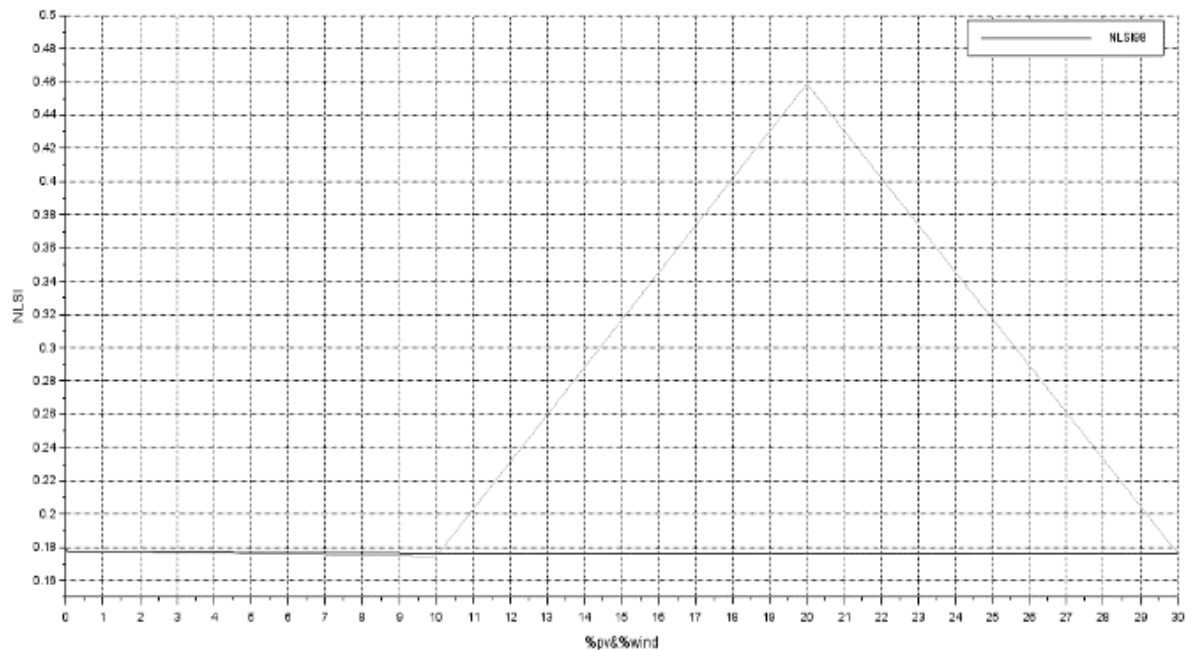
Figure (IV.11) : les courbes de comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice LPQ.

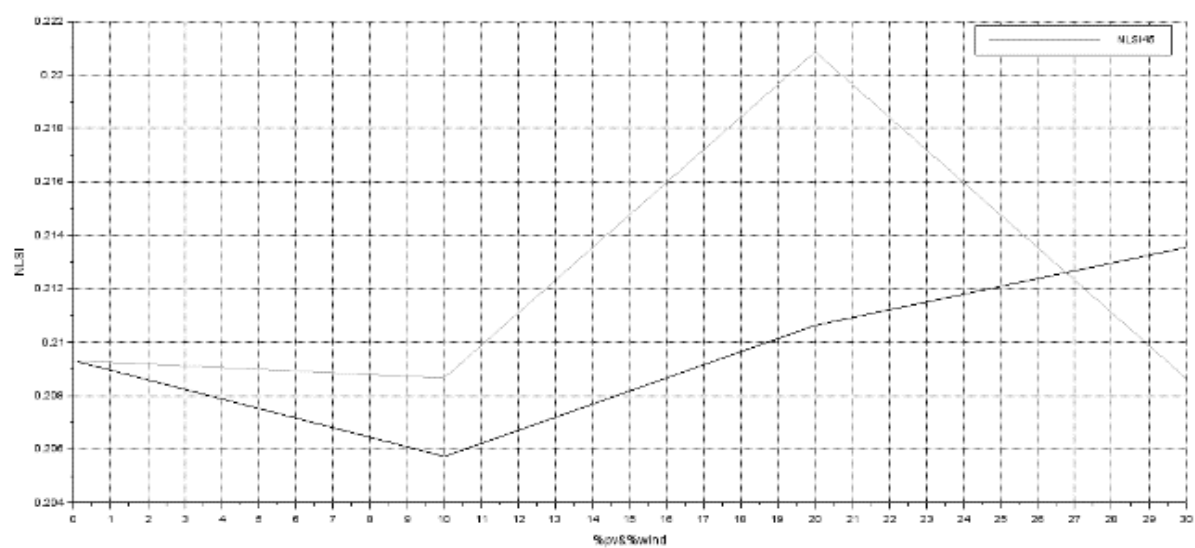
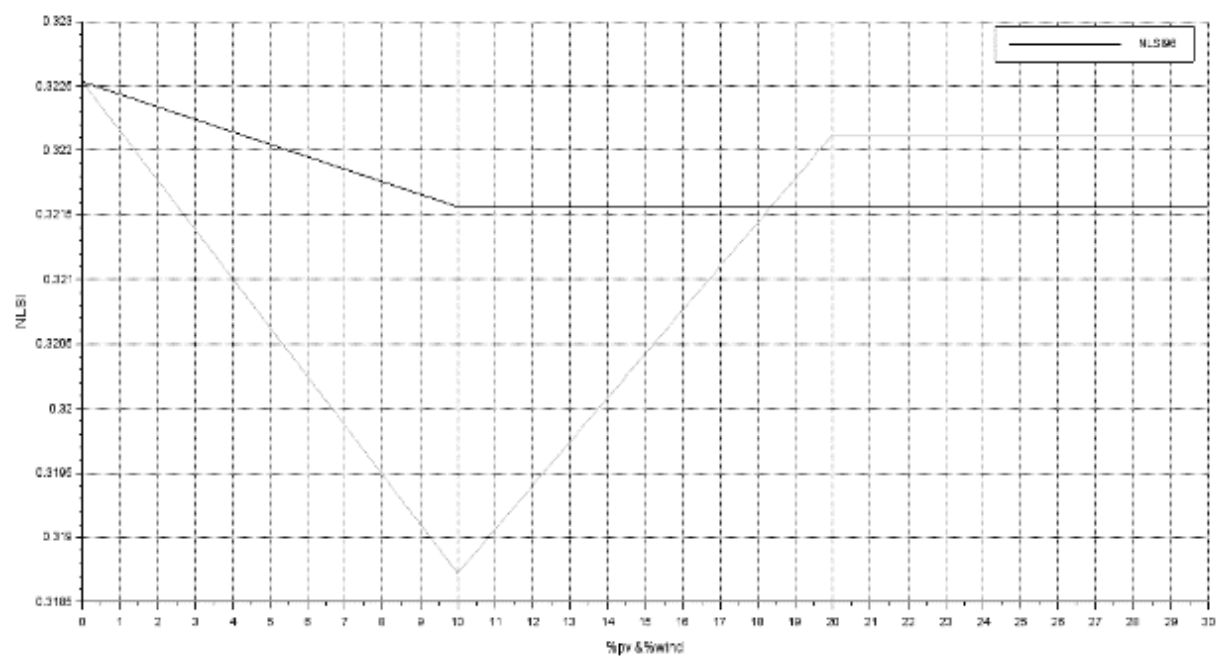
L'analyse :

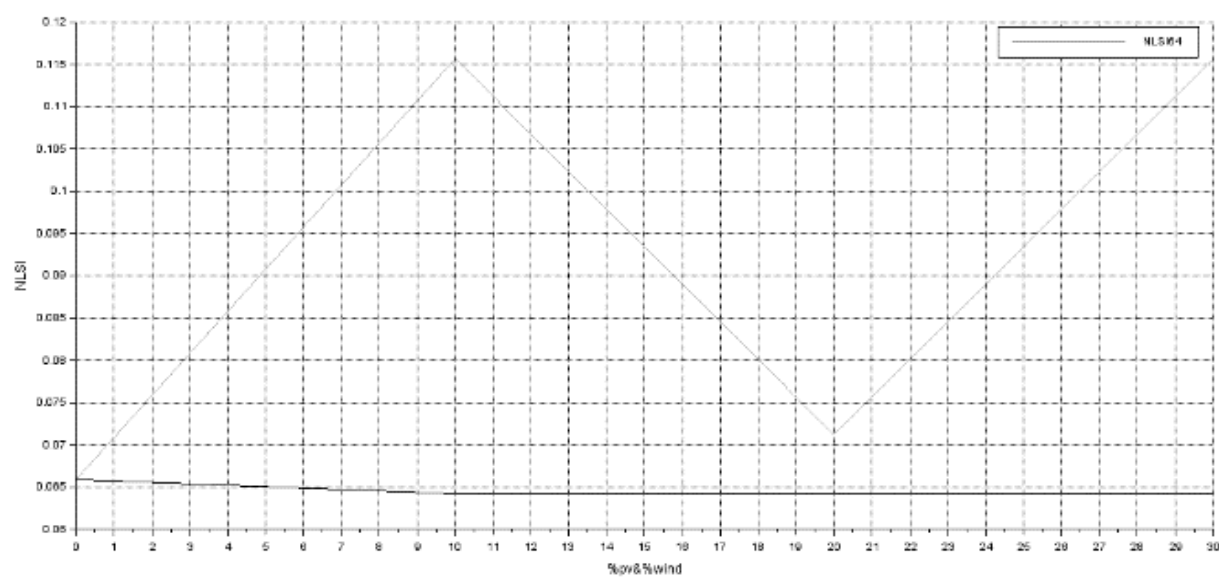
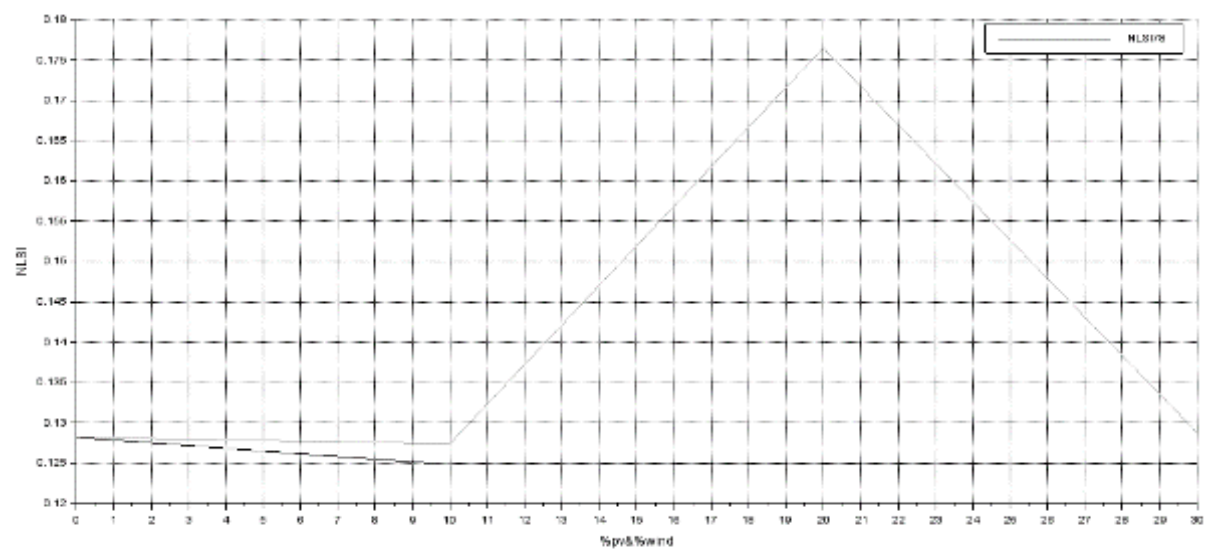
4.8- Comparaison entre réseau photovoltaïque et éolien en fonction de l'indice (NLSI)

PV Bus 6	0%	10%	20%	30%	WIND Bus 6	0%	10%	20%	30%
NLSI 78	0.128189	0.12798	0.12798	0.12798	NLSI 78	0.128189	0.127408	0.176513	0.128807
NLSI 98	0.177896	0.176206	0.176206	0.176206	NLSI 98	0.177896	0.17465	0.458775	0.176513
NLSI 64	0.065895	0.064213	0.064231	0.064231	NLSI 64	0.065895	0.11566	0.07121	0.11566
NLSI 75	0.458123	0.457613	0.457613	0.457613	NLSI 75	0.458123	0.480557	0.458775	0.46057
NLSI 96	0.322531	0.321563	0.321563	0.321563	NLSI 96	0.322531	0.318724	0.322123	0.322123
NLSI 45	0.209315	0.208666	0.2208665	0.208665	NLSI 45	0.209315	0.20573	0.21063	0.213546

Tableau (IV.9) : la comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice NLSI.







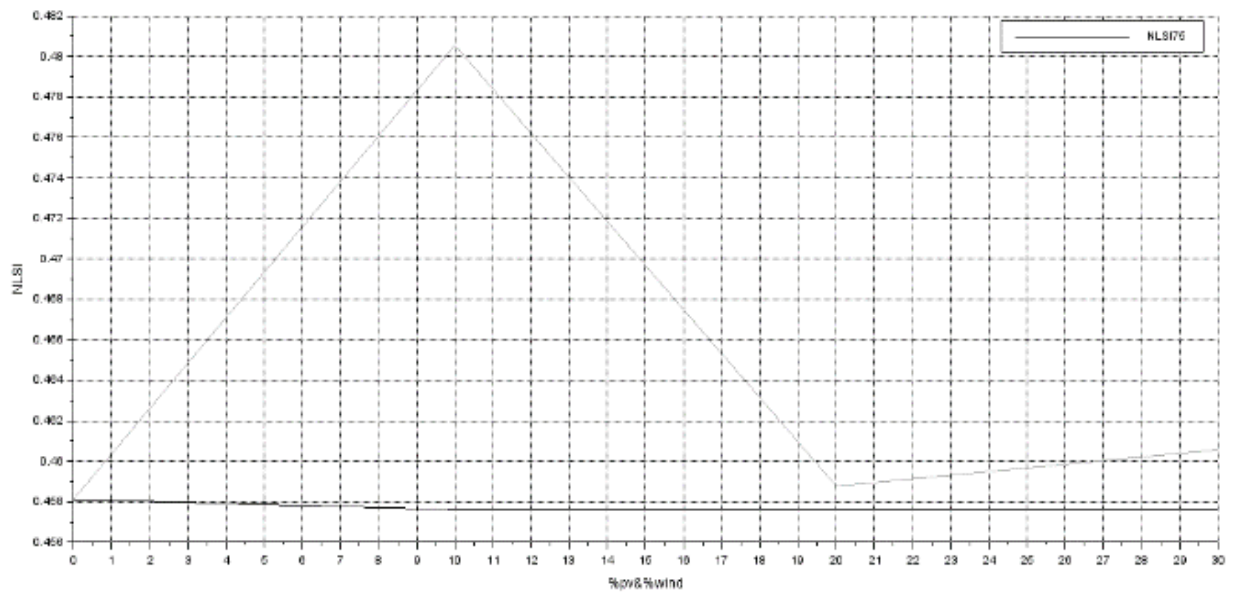


Figure (IV.12) : les courbes de comparaison entre pv et wind en fonction de l'indice NLSI.

L'analyse :

4.9- Les courbes PV lors d'intégration de système photovoltaïque

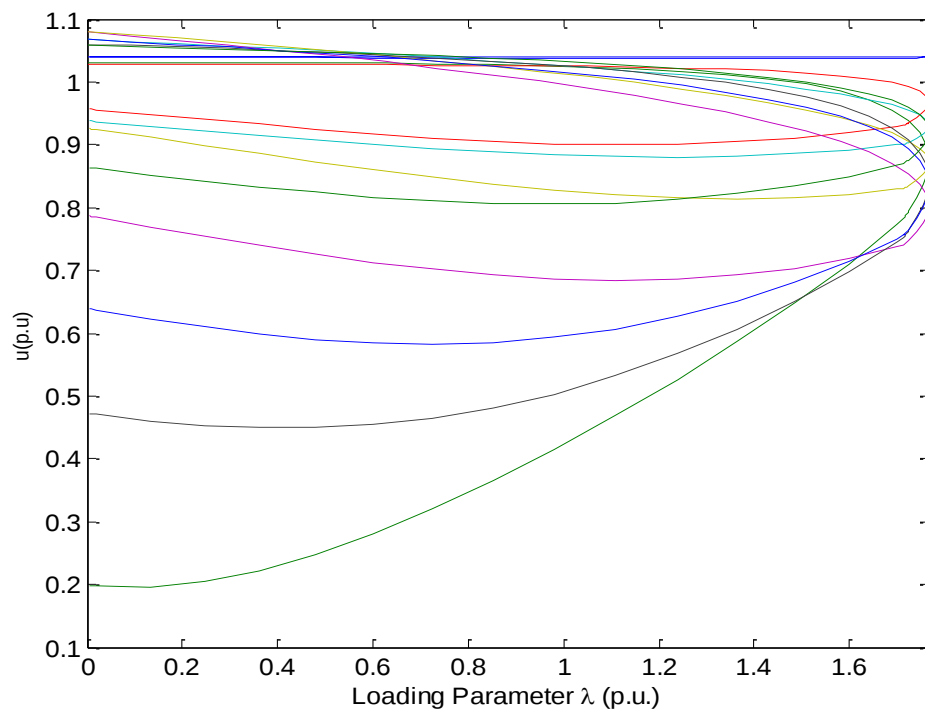


Figure (IV.13.1) :courbe PV.

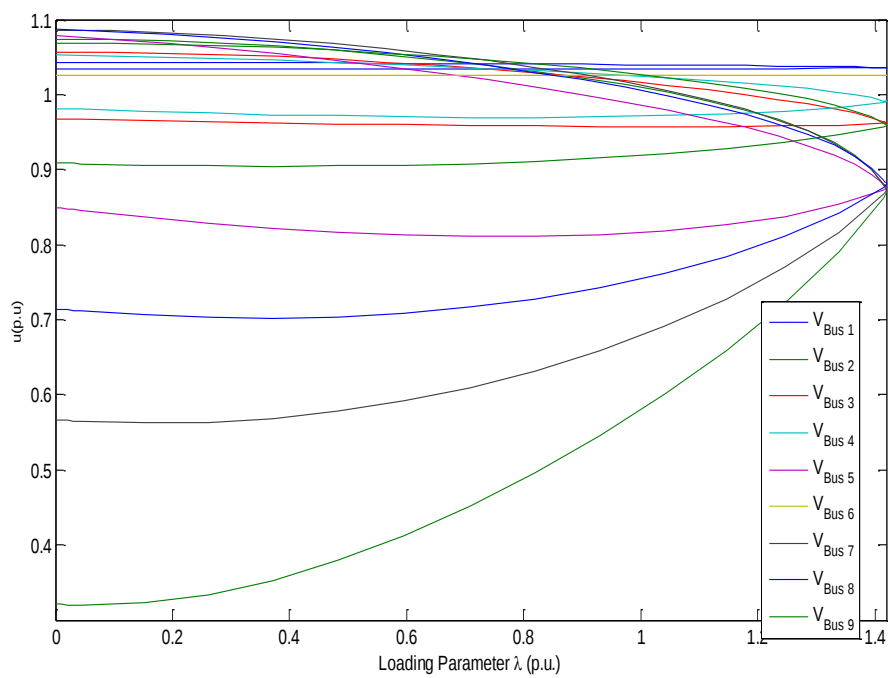


Figure (IV.13.2) : courbe PV.

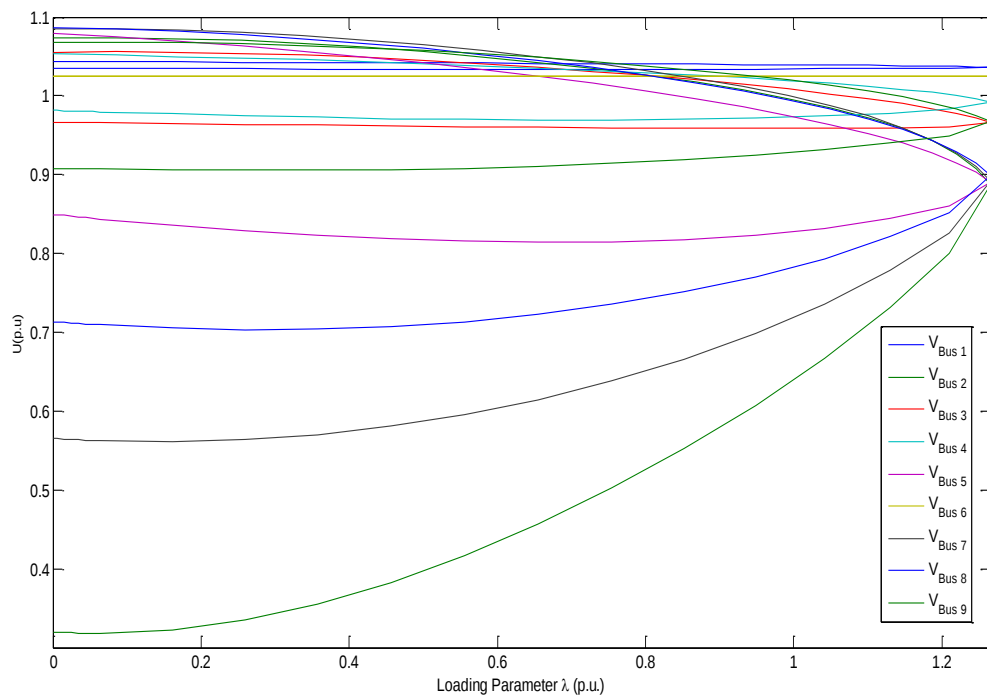


Figure (IV.13.3) : courbe PV.

- **Analyse :**

D'après les courbes Pv pour différentes injections des puissances par le système photovoltaïque ; on constate que le taux de pénétration présente une influence sur le loading margin, on remarque que λ diminue à chaque injection . il est passé de 2.5 à 1.2 .

4.10- Les courbes PV lors d'intégration de système éolien

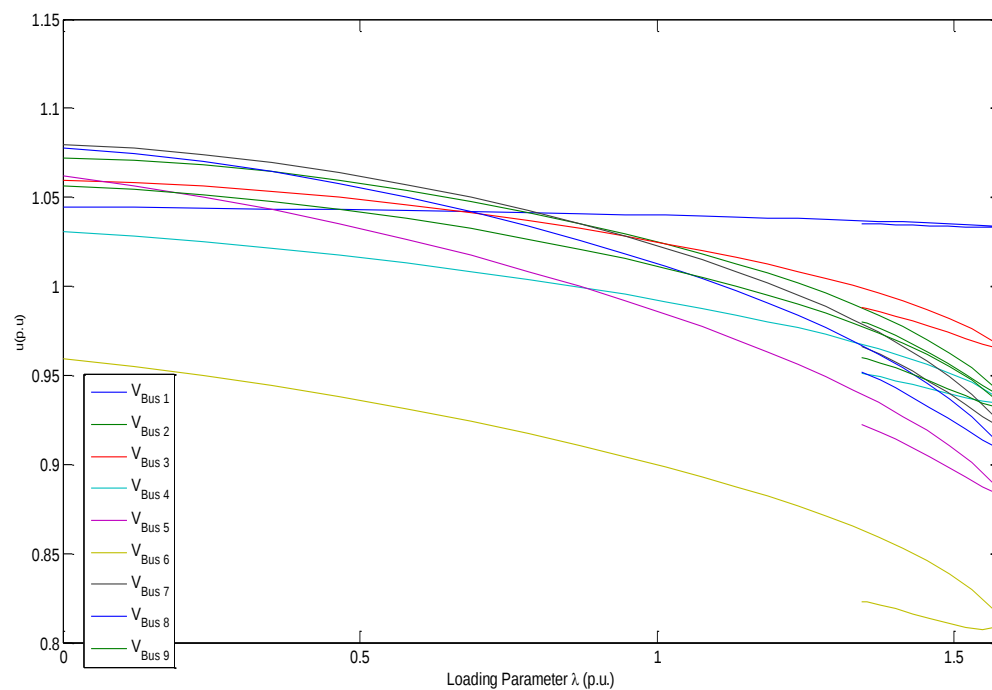


Figure (IV.14.1) : courbe PV.

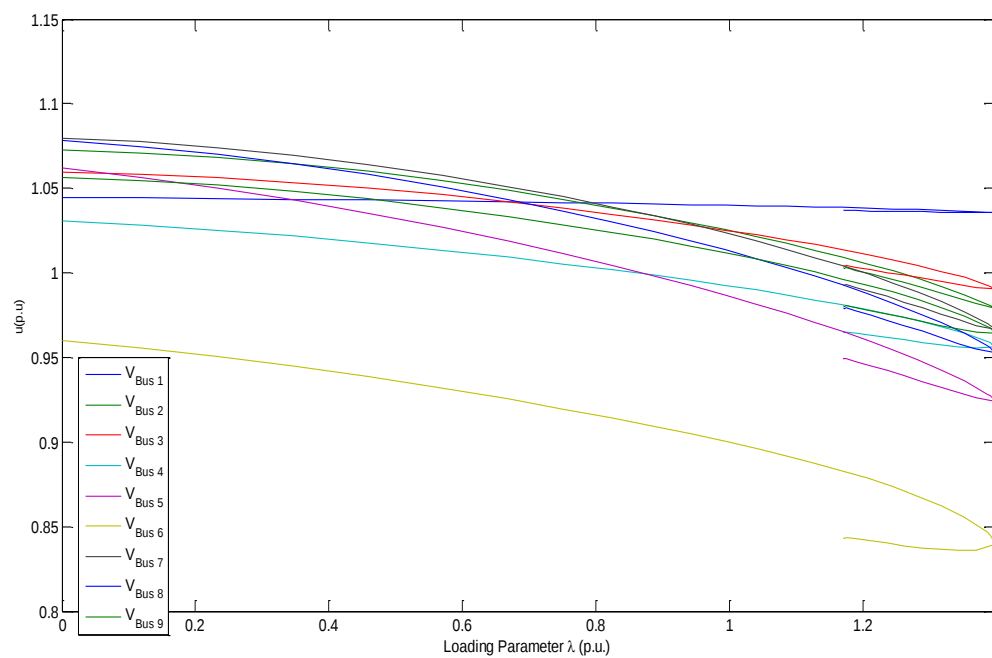


Figure (IV.14.2) : courbe PV.

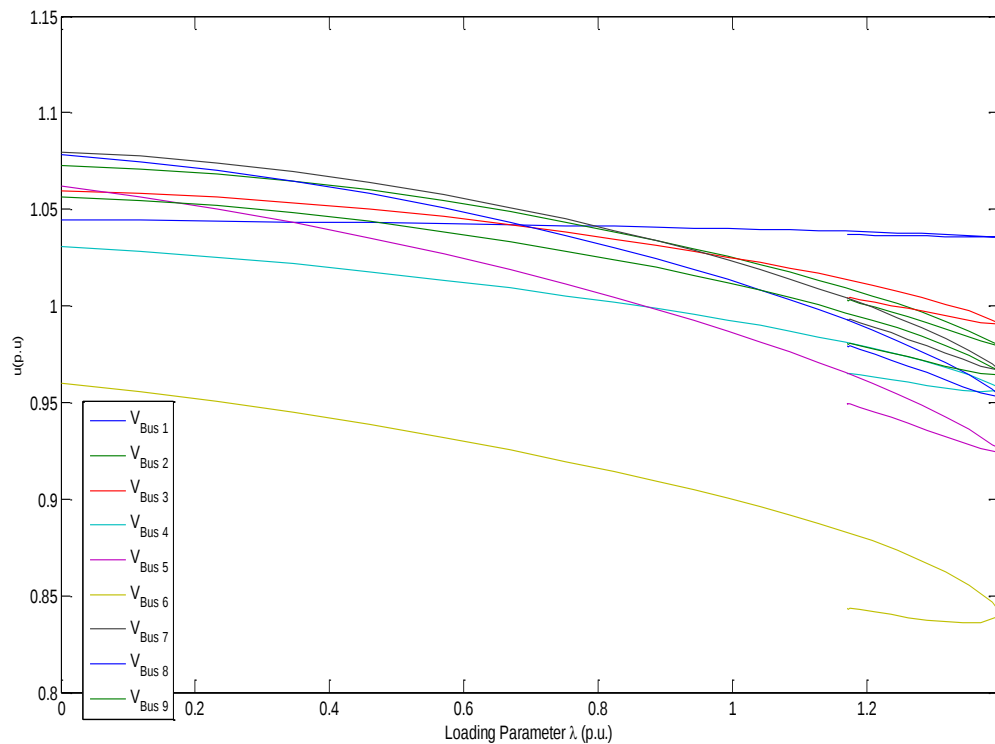


Figure (IV.14.3) : courbe PV.

- **Analyse:**

On présence des éoliennes le taux de pénétration présente une influence qui n'est pas du même degré que le système photovoltaïque. Le taux de pénétration présente toujours une influence c'est à dire diminution de la marge de la stabilité et le passage de $\lambda = 2.5$ à 1.2.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel PSAT qui s'exécute sous environnement Matlab, pour la détermination des indices de stabilité de tension aux niveaux des jeux de barres du réseau standard (modèle d'IEEE 9 jeux de barres) et précisément après l'intégration des ressources renouvelables dans le jeu de barre 6 avec des différents taux de pénétrations ont une influence sur la stabilité de tension de ce dernier.

Les résultats des simulations montreront que

Conclusion générale :

Le fonctionnement, le contrôle de la stabilité des réseaux électrique actuel ont été fortement affectés par les pénétrations croissantes des sources d'énergies renouvelables, la demande qui ne cesse d'augmenter et le marché du système électrique déréglementé la stabilité de tension des réseaux électrique est l'un des paramètres importants affecté par la pénétration des énergies renouvelables et la production distribuée.

Dans cette mémoire, nous avons présenté Stabilité de tension dans le réseau électrique, classification de la stabilité et causes d'instabilité de tension. Nous avons mentionné définition en générale les indices de stabilité de tension et on a choisi deux type (l'indice LPQ et l'indice NLSI) pour les tester dans l'amélioration de la stabilité.

Les énergies Photovoltaïque et éolienne sont dans le chapitre troisième pour les intégrer aux réseaux électriques. Où nous avons simulé cet écoulement et extrait beaucoup de résultats et fait de nombreuses analyses, et tout cela à l'aide d'un logiciel gratuit, PSAT et nous avons détaillé ce dernier pour les nouveaux utilisateurs et débutants de cette application, pour le but d'étudier l'influence de cette intégration.

REFERENCES :

- [1] Camilo Apraez Etude comparative de méthodes de simulation de la stabilité transitoire Université du QUEBEC 2012.
- [2] Alkhatib H, “Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimization de la régulation par une méthode métaheuristique”, Thèse de doctorat, Université Paul Cezanne D’aix-Marseille Faculté des Sciences et Techniques, 5 décembre 2008.
- [3] Javad Morsali, Hossein Morsali, “Novel Coordination of Dual-channel PSS, AVR and TCSC Damping Controller to Enhance Power System Overall Stability”, 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, (ICEE2012), May 15-17, Tehran, Iran.
- [4] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers and M.S. Zywno, “Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, May 1989, pp. 614-626.
- [5] Ziad Bouchama, “ Stabilisateurs Synergétiques des Systèmes de Puissance”, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas– Setif 1, Faculté de Technologie, 12 décembre 2013.
- [6] G.Y.Rajaa Vikhram, S.Latha “Design of Power System Stabilizer for Power System Damping Improvement with Multiple Design Requirements”. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN : 2231-2307, Volume-2, Issue-5, November 2012.
- [7] E. Z. Zhout, O. P. Malik, and G. S. Hope, “Theory and method for selection of power system stabilizer location”, IEEE Trans, on Energy Conversion, 6(1)(1991) 170-176.
- [8] M. Pavella et P. G. Murthy, "Transient stability of power systems: theory and practice", Library of congress cataloguing in publication, 1994.
- [9] P.M. Anderson and A.A. Fouad, “Power system control and stability”, IEEE Press, New York, 1977.
- [10]- Garng M. Huang, Liang Zhao “measurement based voltage stability monitoring of power system”, College Station, TX 77843-3128.
- [11]- A.C. Zambroni de Souza “tangent vector applied to voltage collapse and loss sensitivity studies”, Electrical Power Systems. Research. 47(1),pp. 65-70. 1998.

- [12]- A.R. Phadke, S.K. Bansal, K.R. Niazi, "A Comparison of Voltage Stability Indices for placing shunt FACTS controllers" First International conference on Emerging Trends In Engineering and Technology, 2008.
- [13]- Santiago P. Torres, Carlos A. Castro, "Power system Loading margin Estimation using a Neuro-Fuzzy Approach", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.22, No.4, Nov 2007.
- [14]- Gubina, F. and Strmcnik, B. "Voltage Collapse Proximity Index Determination Using Voltage Phasors Approach", IEEE Trans. On Power Systems Vol. 10, No. 5, pp.788-794, May 1995.
- [15] -T. Nagao, K. Tanaka and K. Takenaka. "Development of static and simulation programs for voltage stability studies of bulk power system," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, pp: 273-281, Jan. 1997.
- [16]- L. H. Suzuki, M. Egawa, et al. "Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method," IEEE Trans on Power Systems, vol. 6, pp: 584-593, May. 1991.
- [17]- M. Chakravorty and D. Das. "Voltage stability analysis of radial distribution network" Electrical Power and Energy Systems, Vol, 2, no.3, pp.31-35, 1989.
- [18]- Claudio et autres "comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse". IEEE. Trans. Power syst. 11(3) 1441-1447. 1996.
- [19]- A.C. Zambroni de Souza, C.A. Canizares, V.H. Quintana, "Critical bus and point of collapse determination using tangent vectors", 28th North American Power Symp., Cambridge, MA, pp. 329-333. November 10-12, 1996.
- [20]- V.V.K. Reddy, M. Sydulu "Index and GA based Optimal Location and Sizing of Distribution System Capacitors", . IEEE. Trans. Power syst. 2009.
- [21]- L. D. Arya , S.C. Choube , D.P. Khothari. "Reactive Power Optimization Using Static Voltage Stability Index". Electric Power Components and Systems, pp. 615-628, 2001.
- [22] -B. Lee and V. Ajjparapu. "Invariant subspace parametric sensitivity (ISPS) of structure-preserving power system models," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 11, pp: 845-850, Feb. 1996.
- [23]- Dheeraj Kumar Khatod, Vinay Pant, and Jaydev Sharma, "A Novel Approach for Sensitivity Calculations in the Radial Distribution System", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp.2048-2057, October 2006.

- [24]- K. Prakash, and M. Sydulu “A Novel Approach for Optimal Location and Sizing of Capacitors on Radial Distribution Systems Using Loss Sensitivity Factors and α -Coefficients”, 2006 IEEE, PSCE 2006.
- [25]- M. Charkravorty and D. Das, "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks," Electrical Power & Energy Systems, Vol. 23, PP. 129- 135, 2001.
- [26] - Mohamed M. Hamada, Mohamed A. A. Wahab, Nasser G. A. Hemdan “Artificial Neural Network Modeling Technique For Voltage Stability Assessment Of Radial Distribution Systems”, Electrical Power Systems , Al-Mina University, Egypt
- [27] -F. M. El-Kady and A.Y. Abd El-Aziz, "Voltage Stability Assessment of Electrical Power System Using Artificial Neural Networks," Journal of Engineering and Applied Science, Faculty of Engineering, Cairo University, Vol. 48, No. 4, PP. 727-743, August 2001.
- [28] - Lof PA, Smed T, Anderson G, Hill DJ. “Fast calculation of a voltage stability index”. IEEE Trans Power Syst ;7(1):pp.54–60. 1992.
- [29] - Gao B, Morison GK, Kundur P. “Voltage stability evaluation using modal analysis”. IEEE Trans Power Syst ;7(4) , pp.1524–1535. 1992.
- [30] -Feng Zhihong, Liu Qu, Ni Yixin, et al. "Analysis steady-state voltage stability in multi-machine power systems by singular value decomposition method," Proceedings of the CSEE, vol. 12, pp: 10-18, Mar. 1992.
- [31]- Jasmon et al. “stability of load flow techniques for distribution system voltage stability analysis” IEE proceedings C, Vol. 138, N°6, pp. 479-484. Nov 1991.
- [32]- T.K. Abdul Rahman, G.B. Jasmon, “a new technique for voltage stability analysis in a power system and improved load flow algorithm for distribution network” Transa IEEE, pp.714-719.1995.
- [33]- Sterling, M. J. H, et al. “voltage collapse proximity indicator behaviour and implications”, IEE Proceedings C, Vol. 139, No. 3, pp. 241-252. May 1992.
- [34]- I. Musirin, T.K.A. Rahman “Novel Fast Voltage Stability Analysis In Power Transmission System” 2002 student conference on Research and development proceeding, Shah Alam, Malaysia, July 2002.
- [35]. N. Kehoul et K. Khentache, “Etude comparative des modèles d’une cellule photovoltaïque,” Mémoire de Master en Electrotechnique, Département de Génie Electrique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2012.

[36] Madahi Mohamed, « Les énergies renouvelables comme option stratégique à la lumière de la responsabilité de protéger l'environnement », une étude de cas de l'Algérie Mémoire de Master, Université de Chlef (2012)

[37] Abu Bakr El-Gendy, « Étudier l'avenir de l'énergie solaire en Égypte », Agence centrale pour la mobilisation publique et la presse statistique (2015)

[38] Ahmed Bahush, Zarara Battash, « Les énergies renouvelables comme alternative au secteur pétrolier : une étude de cas de la recherche appliquée d'Oujda dans le domaine des énergies renouvelables ARAER Ghardaia » Mémoire soumis pour remplir les exigences d'un baccalauréat en économie, Kasdi Université Merbah, Ouargla, p. 03-04

[39] Énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) [archive] Driee Ile-de- France, consulté en mars.

[40] Salmi Rachid Fellaq sur les énergies renouvelables comme porte d'entrée pour parvenir au développement durable, en référence à l'Algérie et à certains pays arabes,

[41] H. KANCHEV :« Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de France2014.

[42] Données ADEME 2004 - Électricité, contenu moyen : Note ADEME/EDF 2005 - Électricité, contenu marginal : Note ADEME/RTE 2007

[43] A. Henriot et J.M. Glachant, “Design des marchés d'électricité pour l'intégration des renouvelables”, Revue d'économie industrielle, Vol. 148, pp. 31-51, 2014.