

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et  
Automatique

Réf...../2025



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTERA** académique

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** DRAFI Riham

**Thème**

### Analyse de la stabilité de tension d'un réseau électrique

Soutenu publiquement, le 23 / juin /2025, devant le jury composé de:

M. Haddad salim	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. GOUAIDIA Said	MCB	Univ. Guelma	Directeur de mémoire
M. LADJIMI abdelaziz	Professeur	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire :2024/2025**

## **Dédicace**

Avant toute chose, je tiens à remercier Allah, source de toute sagesse et force, sans qui ce travail pu voir le jour.

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chères.

A la compagne de route en tout temps, à la main de fer qui a écarté de mon chemin les difficultés de la vie, toi, chère à mon âme, toi qui es ma mère. Merci à toi, Que dieu te garde pour moi.

### **Ma chère maman**

A ce grand homme dont je suis fier, à celui dont le nom est lié au mien avec honneur. Que dieu te protège et te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi.

### **Mon cher père**

A mon cœur le plus tendre au monde, à mon âme sœur et amie de toujours, merci pour tes paroles qui m'ont donné de la force.

### **Ma chère sœur**

A ceux qui ont été ma force et mon soutien à chaque étape de la vie. Merci d'avoir été la partie la plus solide de mon appui.

### **Mon grand frère et Mon petit frère**

A mon compagnon de route, l'ami de mon cœur. Merci pour ton soutien.

### **Mon mari**

Merci à tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné sur ce chemin, à mes fidèles amis, compagnons de ces années. Louange à dieu pour l'accomplissement et la perfection.

# Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le concours de plusieurs personnes aux quelle je tiens à exprimer toute ma reconnaissance.

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus sincères remerciements à mon encadreur, le Dr. GOUIADIA SAID, pour son aide si précieuse tout au long de ce mémoire. Je lui exprime ici toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Enfin, Je remercie également Le président et les membres du jury de je voir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Notions générales.....</b>	<b>3</b>
Introduction.....	4
1.1 Stabilité des réseaux électriques.....	4
1.2 Définition et classification de la stabilité des réseaux électriques dans IEEE/CIGRE.....	5
1.2.1 Stabilité de l'angle du rotor.....	6
1.2.2 Stabilité de la tension.....	7
1.2.3 Stabilité de la fréquence.....	8
1.3 Causes d'instabilité de tension.....	8
1.3.1 Tension trop basse au niveau des unités de production.....	8
1.3.2 Charge appelée trop importante.....	9
1.3.3 Production trop éloignée à la consommation.....	9
1.3.4 Manque local de la puissance réactive .....	9
1.4 Blackouts dans le monde.....	9
<b>Chapitre 2 : Méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension.....</b>	<b>12</b>
2.1 Analyse statique de la stabilité de la tension.....	13
2.2 Capacité de transmission des réseaux électriques .....	13
2.3 Courbe PV .....	14
2.4 Courbe Q-V.....	17
2.5 Ecoulement de puissance continu.....	18
Correction.....	22

<b>Chapitre 3 : Application de la méthode d'écoulement continu .....</b>	<b>25</b>
Données des jeux de barres .....	27
Données des lignes.....	28
<b>Chapitre 4 : Développement d'un indice de stabilité de tension .....</b>	<b>34</b>
4.1 L'indice P de stabilité de tension.....	35
4.1.1 Système de 2 barres .....	35
4.1.2 Système de n barres .....	37
Conclusion.....	38
Conclusion générale.....	40

**Listes des figures :**

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
Fig.1.1 Classification des types de stabilité des réseaux électriques	5
Fig.2.1 Schéma d'un système à une seule machine et une seule charge	16
Fig.2.2 courbe de PV standardisée	16
Fig.2.3 courbe Q-V pour différents niveaux de puissance active	18
Fig.2.4 diagramme de prédiction –correction du CPF	19
Fig.4.1 Système de deux bus	35

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

L'étude de la stabilité de tension d'un réseau électrique est un sujet crucial pour garantir un fonctionnement fiable et efficace du système d'alimentation électrique. Elle vise à analyser la capacité du réseau à maintenir des niveaux de tension acceptables face à des perturbations ou des changements de charge. Elle implique l'analyse de plusieurs facteurs comme la capacité du réseau à répondre aux changements de charge, la présence de dispositifs de compensation de tension, les caractéristiques des lignes de transmission, les conditions météorologiques.

La stabilité de tension est essentielle pour assurer la qualité de l'alimentation et le bon fonctionnement des équipements électriques. Un réseau instable peut entraîner des fluctuations de la tension, des coupures de courant et des dommages aux appareils électriques.

L'étude de la stabilité de tension implique généralement l'utilisation de simulations informatiques et d'analyses mathématiques pour évaluer le comportement du réseau sous différentes conditions. Les résultats de ces études permettent aux ingénieurs de concevoir des systèmes d'alimentation plus robustes et de prendre des mesures correctives pour améliorer la stabilité de tension.

La sécurité de la tension est reconnue comme clé pour l'exploitation des systèmes électriques. L'augmentation continue des charges, conjuguée aux contraintes économiques et environnementales, a conduit les systèmes à fonctionner près de leurs limites, ce qui inclut la sécurité de la tension limites. Les académiciens ainsi que les ingénieurs en exercice se tournent vers les études.

Des nombreux problèmes associés à la planification et à l'exploitation des grands systèmes électrique interconnectés. Les cours d'analyse du système électrique sont en cours de mise à jour pour refléter l'importance des nouveaux outils tels que l'ordinateur, le contrôle et les systèmes théorie.

Au cours des 30 dernières années de conférences sur le pouvoir la sécurité de la tension du système ont été publiées dans le monde entier, indiquant l'intérêt continu des ingénieurs électriciens pour ce domaine. Durant ces années, ce sous la branche de l'électrotechnique est également entré en contact assez étroit avec un certain nombre de disciplines connexes telles que la théorie du contrôle optimal, les techniques numériques, etc.

Pour maintenir la sécurité des systèmes électriques, il est essentiel de maintenir l'exploitation dans les limites une marge spécifiée de flux de puissance réelle et réactive et cela est généralement obligatoire par les organismes de fiabilité locaux. Ces marges sont calculées hors ligne études, il faut donc beaucoup de temps pour déterminer ces points de marge. Les

## **Introduction générale**

---

opérateurs humains dans les centres de contrôle utilisent ensuite ces données tabulées de manière conservatrice valeurs pour un fonctionnement sécurisé du système électrique.

Différentes approches améliorer ces procédures opérationnelles sont mises en avant. Des avancés remarquables dans la recherche dans le domaine de l'analyse de la sécurité des systèmes électriques pour le calcul des marges de sécurité du système électrique ont été constatées dans 30 dernières années. Entre temps, l'extraordinaire développement du calcul les taux d'utilisation des ordinateurs récents ont rapproché l'étude de la sécurité en ligne d'une utilisation réaliste.

Ces derniers jours, pour satisfaire la demande croissante en énergie des consommateurs, les conditions de fonctionnement du système électrique sont modifiées de manière irrégulière. Pour cela, il est nécessaire de recalculer les marges de sécurité du système avec précision pour confirmer la sécurité fonctionnement des systèmes, ce qui est irréalisable informatiquement. Actuellement, l'utilisation des techniques informatiques douces dans l'étude de la sécurité de la tension ont pris de l'ampleur en raison de sa capacité à effectuer un traitement parallèle des données avec une réponse rapide fois.

# **CHAPITRE1 :**

Notions générales

### Introduction :

La stabilité de tension d'un réseau électrique fait référence à sa capacité à maintenir une tension acceptable à tous les points du réseau, malgré les variations de charge et les perturbations. En termes simples, imaginez un réseau électrique comme un système de plomberie. La tension est comme la pression de l'eau. Un réseau stable a une pression d'eau constante, permettant aux appareils de fonctionner correctement. Si la pression fluctue trop, les appareils peuvent mal fonctionner ou même être endommagés. La stabilité de tension est cruciale pour le bon fonctionnement du réseau électrique. Des fluctuations de tension peuvent entraîner :

-panne d'appareils : les appareils électriques peuvent être endommagés ou ne pas fonctionner correctement si la tension est trop basse.

-perte de puissance : des fluctuations de tension peuvent entraîner des coupures de courant.

-réduction de l'efficacité : les appareils électriques fonctionnent moins efficacement.

### 1.1 Stabilité des réseaux électriques :

La stabilité est une condition d'équilibre entre des forces opposées. Selon la topologie du réseau, les conditions d'exploitation du système et la forme de la perturbation, différents ensembles de forces opposées peuvent connaître un déséquilibre durable à différentes formes d'instabilité. Nous fournissons une base systématique pour la classification de la stabilité du système électrique [1].

La stabilité des réseaux électriques est essentiellement un problème unique ; cependant, les diverses formes d'instabilité que peut subir un réseau électrique ne peuvent être correctement comprises et traitées efficacement. En raison de la dimensionnalité et de la complexité des problèmes de stabilité, il est utile de faire des hypothèses simplificatrices pour analyser des types spécifiques de problèmes en utilisant un degré de détail approprié de la représentation du système et des techniques analytiques appropriées [2]. Il est essentiel d'avoir une classification pour pouvoir effectuer une analyse pratique et significative et même la résolution des problèmes de stabilité du système électrique [3].

La classification de la stabilité du système électrique proposée ici est basée sur les considérations suivantes [1] :

- La nature physique du mode d'instabilité qui en résulte.
- La taille de la perturbation considérée,
- Les dispositifs, les processus et la durée.

La figure (1.1) donne une image globale des différentes formes de stabilité électrique, en identifiant les catégories et les sous-catégories de la stabilité [4].

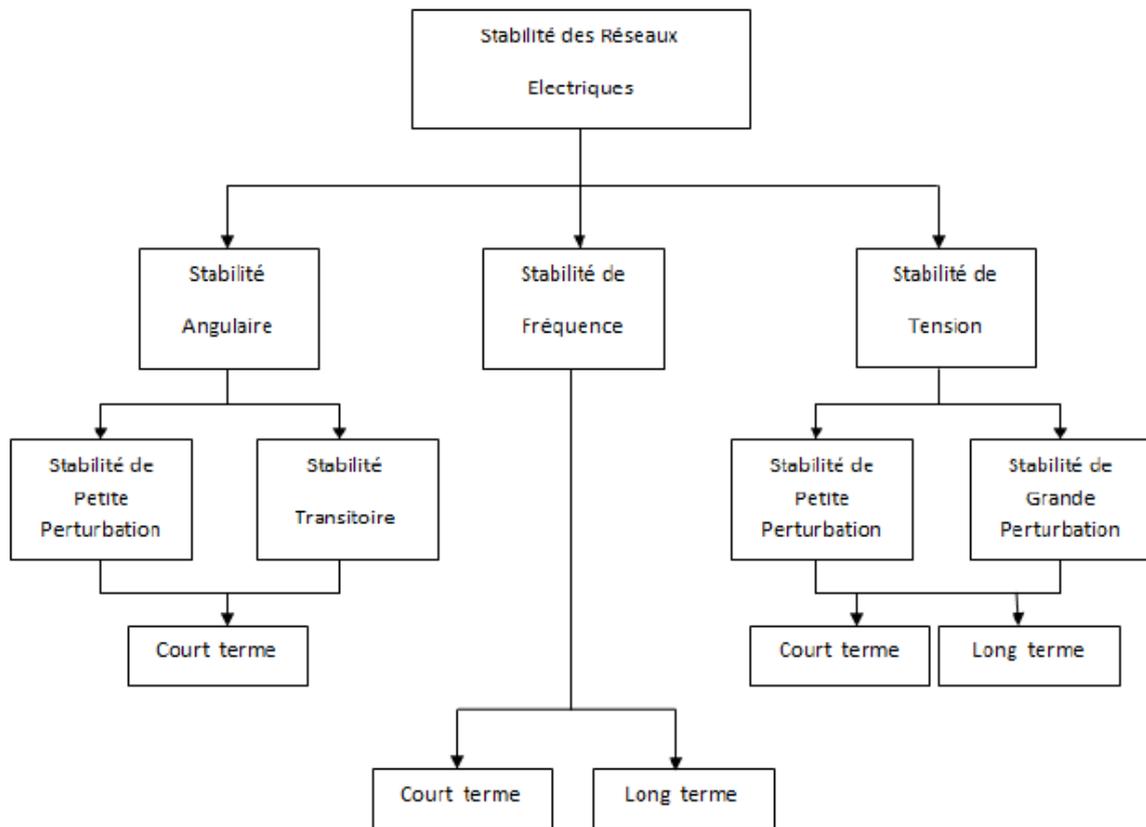


Figure 1.1 – Classification des types de stabilité des réseaux électriques

### 1.2 Définition et classification de la stabilité des réseaux électriques dans IEEE/CIGRE :

La stabilité du système électrique fait référence à la capacité du système à retrouver le point d'équilibre de fonctionnement après une perturbation physique dans le mode de fonctionnement initial donné, sans que la plupart des quantités d'état du système au point d'équilibre ne soient hors limites, de manière à maintenir l'intégrité du système [5].

La définition de la stabilité du groupe de travail conjoint IEEE/CIGRE classe la stabilité du système électrique en trois catégories, à savoir la stabilité de l'angle du rotor, la stabilité de la tension et la stabilité de la fréquence, et de nombreuses sous-catégories, en fonction des propriétés physiques de l'instabilité d'un système électrique, de l'ampleur de la perturbation et des dispositifs, du processus et de l'horizon temporel qui doivent être pris en compte lors de l'étude de la stabilité.

### 1.2.1 Stabilité de l'angle du rotor :

La stabilité de l'angle du rotor fait référence à la capacité des générateurs synchrones d'un système interconnecté à maintenir un fonctionnement synchrone après des perturbations. L'instabilité de l'angle du rotor peut être causée par un couple synchrone et/ou un couple d'amortissement insuffisant, le couple synchrone insuffisant pouvant conduire à une instabilité non périodique, tandis que le couple amorti insuffisant peut conduire à une instabilité oscillatoire. Afin d'analyser et de comprendre les problèmes de stabilité, la stabilité de l'angle du rotor est classée en stabilité de l'angle du rotor en cas de petites perturbations et en stabilité de l'angle du rotor en cas de grandes perturbations, en fonction de l'ampleur des perturbations. Étant donné que les petites perturbations peuvent être suffisamment faibles, pour l'analyse de la stabilité des petites perturbations, l'équation différentielle non linéaire d'un système électrique peut être linéaire au point d'équilibre, afin d'étudier le problème de stabilité. La stabilité des grandes perturbations doit être étudiée à l'aide d'équations différentielles non linéaires.

La stabilité de l'angle du rotor en cas de petites perturbations fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir un fonctionnement synchrone après de petites perturbations, qui est déterminée par l'état de fonctionnement initial du système. La stabilité de l'angle du rotor en cas de petites perturbations peut être l'instabilité non périodique causée par un couple synchrone insuffisant du rotor et l'instabilité oscillatoire de l'augmentation du rotor causée par un couple d'amortissement insuffisant du rotor. L'instabilité oscillatoire comprend le mode local et le mode d'interconnexion. La période d'étude de la stabilité de l'angle du rotor en cas de petites perturbations est généralement de 10-20 s après la perturbation.

La stabilité de l'angle du rotor en cas de grande perturbation, également appelée stabilité transitoire, fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir un fonctionnement synchrone lorsqu'il subit une grande perturbation telle qu'un court-circuit des lignes de transmission, qui est déterminée par l'état de fonctionnement initial du système et la gravité de la perturbation. De la même manière, la stabilité de l'angle du rotor en cas de perturbation importante peut également être exprimée sous deux formes : l'instabilité non périodique (instabilité de la première oscillation) et l'instabilité oscillatoire. Pour la stabilité de l'angle du rotor en cas de fortes perturbations avec une instabilité non périodique, le délai d'étude est généralement de 3 à 5 s après la perturbation ; pour la stabilité de l'angle du rotor en cas de fortes perturbations avec une instabilité oscillatoire, le délai d'étude doit être étendu à 10 à 20 s après la perturbation.

### **1.2.2 Stabilité de la tension :**

La stabilité de la tension fait référence à la capacité de tous les bus à maintenir une tension stable dans un état de fonctionnement initial donné après que le système électrique a été perturbé. Elle dépend de la capacité du système à maintenir/rétablir l'équilibre entre la demande de la charge et l'alimentation de la charge. En fonction de l'ampleur de la perturbation, l'IEEE classe la stabilité de la tension en deux catégories : la stabilité de la tension en cas de petites perturbations et la stabilité de la tension en cas de grandes perturbations. La stabilité de la tension en cas de perturbation importante fait référence à la capacité de tous les bus du système électrique à maintenir une tension stable après que le système ait subi des perturbations importantes, telles qu'une défaillance du système, une perte de générateurs ou de lignes. La réponse non linéaire doit être prise en compte dans l'étude de la stabilité de la tension en cas de fortes perturbations. La période d'étude de la stabilité de la tension en cas de fortes perturbations peut aller de quelques secondes à des dizaines de minutes, selon les besoins.

La stabilité de la tension en cas de petites perturbations fait référence à la capacité de tous les bus du réseau électrique à maintenir une tension stable après que le système a été soumis à de petites perturbations, telles qu'une augmentation de la charge. La stabilité de la tension en cas de petites perturbations peut être à court terme ou à long terme.

### **1.2.3 Stabilité de la fréquence :**

La stabilité de la fréquence fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir une fréquence stable, lorsque le système subit de graves perturbations qui entraînent un déséquilibre important entre la production d'électricité et la demande de la charge. La stabilité de la fréquence peut être un phénomène à court ou à long terme.

### **1.3 Causes d'instabilité de tension :**

Les risques d'apparition des phénomènes d'écroulement de tension sont liés à la difficulté de régler la tension au-dessus d'une certaine valeur, appelée tension critique compte tenu de la puissance à transiter pour alimenter la charge et la distance électrique sur laquelle cette puissance doit être transitée [6]. Cela peut ainsi correspondre soit à une tension critique basse avec un manque de moyens de compensation empêchant d'amener la tension de certains postes consommateurs au-dessus de cette valeur, soit une tension trop élevée pour avoir un fonctionnement normal à une tension supérieure [7].

Généralement, l'effondrement de tension peut se produire en tant que conséquence des interactions entre tous les systèmes rapides et lents dans les réseaux électriques en particulier

les équipements réactifs de production et les équipements de consommation, une séquence possible à un effondrement, ce dernier touche 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 sont limités par des contraintes physiques [8]. 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. Ci-dessus sont exposées les principales raisons de l'instabilité de la tension électrique.

### **1.3.1 Tension trop basse au niveau des unités de production :**

Une tension élevée à l'extrémité d'une unité de production augmente l'écoulement de puissance, donc le réseau de transport consomme plus de puissance réactive, les générateurs doivent augmenter la puissance réactive générée et le point de fonctionnement du générateur peut être trouvé. Mais en raison du limiteur de surexcitation et du limiteur de courant du stator, la tension ne peut être contrôlée.

### **1.3.2 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 n'est d'autant plus grand que la consommation réactive et également plus grande que prévue.

### **1.3.3 Production trop éloignée à la consommation :**

Même si lorsque le système global a des réserves réactives suffisantes nous pouvons faire face à des problèmes locaux de tension, dans la plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de consommation. Cette situation rend difficile le transport de puissance réactive à travers des longues distances à cause des pertes réactives très élevées.

Le transport de puissance à travers de longues distances est dû à plusieurs raisons :

- Les indisponibilités des lignes.
- Difficile d'obtenir des centres de production à proximité des consommateurs.
- L'interconnexion continue des réseaux électriques.
- Il peut se produire que les groupes proches d'un point de consommation soient tous arrêtés.

### 1.3.4 Manque local de la puissance réactive :

L'effondrement de tension liée au manque de la puissance réactive demandée pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise. L'utilisation croissante des lignes très chargées a résulté en un besoin accru de l'aménagement de la puissance réactive et a augmenté les possibilités d'instabilité et d'effondrement de tension, en effet, l'une des causes principales d'instabilité de tension réside dans la limitation de la production et la consommation de la puissance réactive, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge, lorsqu'elle atteint une certaine limite.

### 1.4 Blackouts dans le monde :

Les systèmes de transport d'énergie électrique sont des grands systèmes complexes qui fonctionnent près de leurs limites de capacité et présentent des défaillances en cascade qui entraînent souvent des coupures de courant [9].

La panne du système électrique dans les différents pays a été causée par différentes raisons : surcharge des lignes, courts-circuits et pertes d'un ouvrage, etc. De ce fait, les conséquences économiques, sociales et humaines d'un blackout peuvent être extrêmement nombreuses et grave et sont étroitement liées au degré d'évolution et à l'urbanisation du pays ou de la région. Cependant, si le système électrique peut être amélioré ou si les défaillances en cascade peuvent être prédites, la probabilité d'une panne du système électrique deviendrait plus faible [1].

Le tableau 1.1 résume quelques effondrements de tension dans le monde [10].

## Chapitre 1 : notions générales

---

<b>Location</b>	<b>Date</b>	<b>Durée</b>
Etats-Unis	Le 9 novembre 1965	13 heures
New York	Les 13 et 14 juillet 1977	36 heures
France	Le 19 décembre 1978	4 heures
France et Japon	Le 23 juillet 1987	20 minutes
Canada	Le 13 mars 1989	9 heures
France	Fin décembre 1999	19 jours
Etats-Unis	Le 14 août 2003	24 heures
Algérie	Le 03 février 2003	4 heures
Italie	28 septembre 2003	Plusieurs heures
Luxembourg	Le 2 septembre 2004	35 minutes
Suisse	Le 22 juin 2005	11 heures
Europe	Le 4 novembre 2006	30 minutes
Etats-Unis	Le 26 février 2008	4 heures
Inde	Le 31 juillet 2012	2 jours
Argentine	2013-2014	Plusieurs jours
Tunisie	Le 31 août 2014	2 heures
Sénégal	Le 9 septembre 2014	Plusieurs jours
Argentine, Paraguay, Uruguay	Le 16 juin 2019	6 heures
Sri Lanka	Le 17 août 2020	7 heures
Texas	La moitié de février 2021	Plusieurs jours

Table 1.1 – Effondrement de tension dans le monde

## Chapitre 2

# **Méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension**

### **2.1 Analyse statique de la stabilité de la tension :**

La méthode d'analyse statique de la stabilité de la tension consiste à déterminer l'état du système sur différentes périodes de temps le long de la trajectoire temporelle. En supposant que la dérivée des variables d'état du système sur la section est nulle, les équations différentielles-algébriques décrivant le système électrique dynamique non linéaire sont simplifiées en équations algébriques pures. Étant donné que les premiers accidents d'instabilité de la tension sont principalement des processus d'instabilité de la tension à moyen et long terme, qui ont une longue durée et sont généralement causés par une croissance lente de la charge ou un transfert de puissance de sortie du système, La méthode d'analyse statique est devenue dominante dans la recherche sur la stabilisation de la tension pendant une longue période.

La recherche sur la stabilité de la tension statique a été accumulée pendant longtemps et de nombreux résultats de recherche ont été obtenus. Comme cette méthode d'analyse peut refléter le niveau de stabilité de la tension du système dans une certaine mesure, et qu'elle peut fournir l'indice de stabilité de la tension et les informations de sensibilité des variables d'état et des variables de contrôle, elle est pratique pour la surveillance et l'ajustement de l'optimisation du système, et peut mieux répondre aux exigences de l'application pratique. Dans la méthode d'analyse statique, les caractéristiques dynamiques des éléments dynamiques du système électrique sont ignorées, et le modèle d'élément de système requis est relativement simple, généralement un modèle d'état stable ou quasi stable. Avec la compréhension approfondie de la stabilité de la tension, de plus en plus de modèles d'analyse statique prennent en compte les caractéristiques réelles de régulation et de limitation du système [11,12], ce qui rend la méthode d'analyse statique plus cohérente avec la réalité du système électrique.

### **2.2 Capacité de transmission des réseaux électriques :**

Avec le développement continu du système électrique, il est urgent d'utiliser pleinement la capacité de transmission du réseau de transport existant afin de réduire au maximum les coûts d'exploitation et d'améliorer les avantages économiques du fonctionnement du système. Cependant, avec l'augmentation de la puissance de transmission, la capacité d'un réseau électrique à supporter les perturbations est progressivement réduite, ce qui entraîne des risques élevés pour la sécurité du système. Par conséquent, pour un système électrique interconnecté à grande échelle, la manière de déterminer avec précision la capacité de transmission du système électrique et de satisfaire au maximum la demande de la charge électrique sous la contrainte de

## Chapitre 2 : méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension

---

la sécurité et de la fiabilité est devenue un sujet de recherche urgent pour le système électrique moderne.

### 2.3 Courbe PV :

L'instabilité de la tension d'un système électrique se produit souvent pendant la période où le système est proche de la puissance de transmission maximale. Dans l'état critique, si la charge augmente légèrement, la tension du système chute brusquement, ce qui entraîne une instabilité de la tension du système. La courbe PV est un outil de base de l'analyse de la stabilité statique de la tension basée sur le mécanisme de stabilité de la tension, dans lequel P peut être exprimé comme la charge totale d'une certaine zone, ou la puissance de transmission d'une section de transmission ou d'une ligne d'interconnexion régionale, et U est la tension du bus principal. En établissant la relation entre la charge et la tension du nœud, la courbe PV peut montrer visuellement et en continu le processus de réduction et même d'effondrement de la tension du système avec l'augmentation de la charge. Parallèlement, le calcul de la courbe PV de chaque nœud du système permet d'obtenir deux paramètres importants concernant la stabilité de la tension du système : la tension critique et la limite de puissance du point de charge, qui peuvent être utilisées pour indiquer la marge de stabilité de la tension du système et représenter la capacité de chaque nœud de charge à maintenir la stabilité de la tension.

D'après la figure 2.1 :

$$\dot{U} = \dot{E} - (R_s + jX_s)\dot{I} \quad (2.1)$$

La puissance absorbée par la charge peut être calculée à l'aide de la formule suivante

On considère ( $E = E \angle 0$ ,  $U = U \angle \theta$ )

$$S = \dot{U} \frac{\hat{E} - \hat{U}}{R_s - jX_s} = (U \cos \theta + jU \sin \theta) \left( \frac{E - U \cos \theta + jU \sin \theta}{R_s - jX_s} \right) \quad (2.2)$$

P et Q soient obtenus respectivement :

$$P = \frac{U E (R_s \cos \theta - X_s \sin \theta) - U^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{U E (R_s \sin \theta - X_s \cos \theta) - U^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2.4)$$

Il peut être obtenu par transposition :

$$P + \frac{U^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} = \frac{U E (R_s \cos\theta - X_s \sin\theta)}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2.5)$$

$$Q = \frac{U E (R_s \sin\theta - X_s \cos\theta) - U^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2.6)$$

Il peut être obtenu en éliminant  $\theta$  des deux équations ci-dessus :

$$\left(P + \frac{U^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2}\right)^2 + \left(Q + \frac{U^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2}\right)^2 = \frac{U^2 E^2}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2.7)$$

$$(U^2)^2 + (2P R_s + 2Q X_s - E^2)U^2 + Z_s^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.8)$$

La solution de tension peut être obtenue :

$$U = \sqrt{\frac{E^2}{2} - P R_s - Q X_s \pm \sqrt{\left(P R_s + Q X_s - \frac{E^2}{2}\right)^2 - Z_s^2(P^2 + Q^2)}} \quad (2.9)$$

Pour plus de simplicité si la résistance de transmission  $R_s$  est ignorée,

Alors :

$$U = \sqrt{\frac{E^2}{2} - Q X_s \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X_s^2 P^2 - X_s E^2 Q}} \quad (2.10)$$

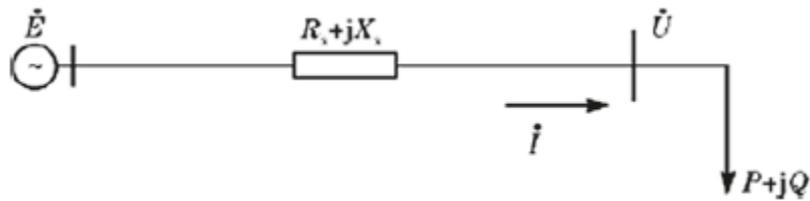


Fig. 2.1 Schéma d'un système à une seule machine et une seule charge

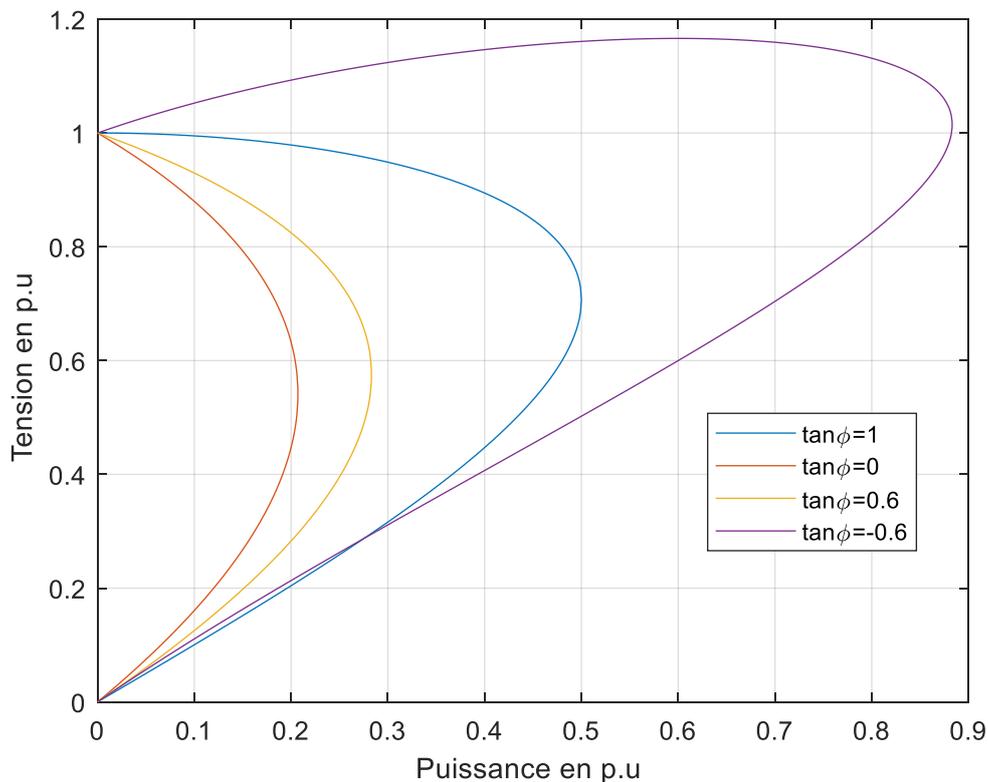


Figure. 2.2 Courbe de PV standardisée

### 2.4 Courbe Q-V

La méthode de la courbe V-Q est l'une des méthodes les plus populaires qui est utilisée pour étudier les problèmes d'instabilité de tension dans les réseaux électriques à long terme. En plus de caractéristiques PV, une caractéristique plus significative est donnée par la courbe QV, qui met en relief la sensibilité et la variation de tension d'un nœud par rapport à l'injection de puissance réactive [13].

La puissance réactive au niveau du nœud est calculée à partir des solutions d'écoulement de puissance et tracée en fonction de la tension spécifiée pour des différentes valeurs de la

## Chapitre 2 : méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension

---

puissance active  $P$ . Le point de fonctionnement correspondant à une puissance réactive nulle représente la condition dans laquelle la source de puissance réactive fictive est retirée du nœud de charge. La sécurité de tension d'un nœud est étroitement liée à la réserve de puissance réactive disponible, qui peut être facilement trouvée à partir de la courbe QV du nœud considéré.

La marge de puissance réactive est la distance en MVAR entre le point de fonctionnement et le point de bifurcation de la courbe QV. La rigidité du nœud peut être évaluée qualitativement à partir de la pente de la partie droite de la courbe V-Q. Plus la pente est grande, plus la rigidité est faible. Plus la pente est grande, moins le nœud est rigide, et donc plus il est vulnérable à l'effondrement de tension. Les nœuds faibles du système peuvent être déterminés à partir de la pente de la courbe QV. Pour le système simple à deux nœuds illustré précédemment, les équations des courbes

V-Q pour des charges de puissance constante peuvent être dérivés comme suit :

$$Q = \frac{EV}{X} \cos \theta - \frac{V^2}{X} \quad (2.11)$$

$$V^2 = \frac{-(2q - 1) \pm \sqrt{(2q - 1)^2 - 4(p^2 + q^2)}}{2} \quad (2.12)$$

Pour une gamme de valeurs de tension et différents niveaux de puissance active, les courbes QV normalisées sont présentées à la figure ci-dessous. Le point critique ou point de bifurcation à des caractéristiques correspond au point où  $dQ/dV$  devient nul [14]. Si le point minimum de la courbe QV est au-dessus de l'axe horizontal, le système présente un manque de puissance réactive. Des sources de puissance réactive supplémentaires sont nécessaires pour éviter un effondrement de la tension.

Dans la figure 2.3, les courbes pour  $p=1,00$  et  $p=0,75$  indiquent des nœuds à puissance réactive insuffisante. Les nœuds dont les courbes QV sont inférieures à l'axe horizontal ont une marge de puissance réactive positive [15].

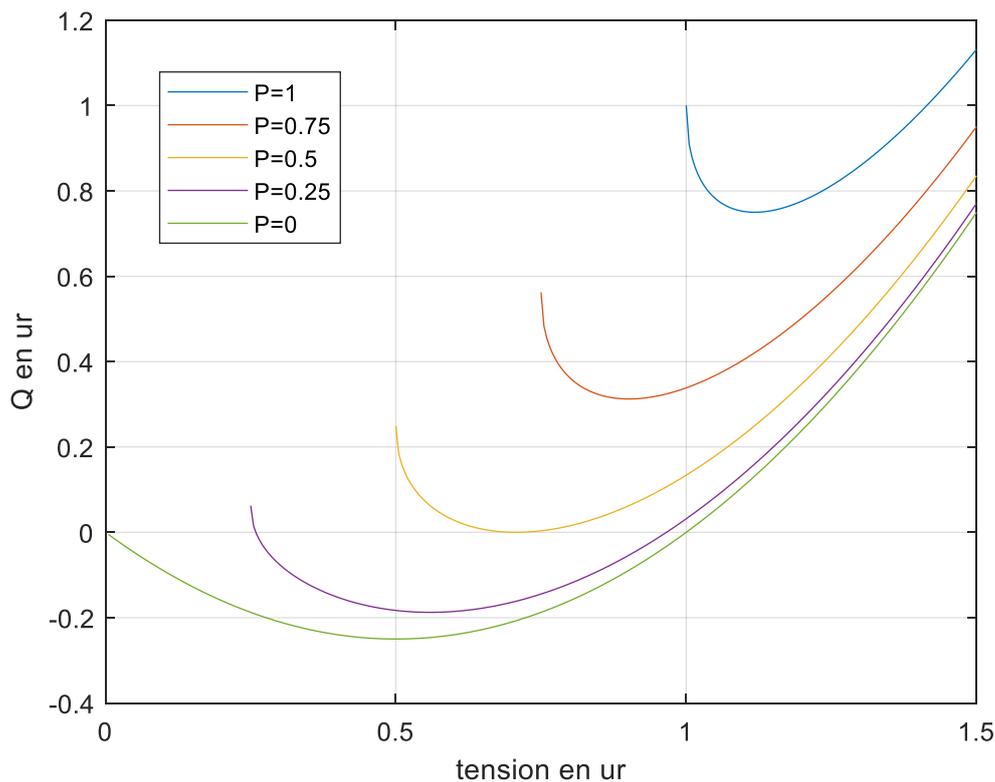


Figure 2.3 – Courbe Q-V pour différents niveaux de puissance active

### 2.5 Ecoulement de puissance continu

La courbe de puissance PV (QV) pouvant fournir des informations de sécurité telles que la marge de transfert de puissance active, la réserve de puissance réactive et le niveau de stabilité de la tension, il est très important de résoudre avec précision la courbe de puissance PV pour étudier la stabilité de la tension statique du système électrique.

Comme la matrice JACOBIENNE près du « nez » de la courbe PV est presque singulière, l'équation du flux de puissance est souvent mal conditionnée, ce qui entraîne une difficulté de convergence du calcul conventionnel du flux de puissance et l'incapacité de déterminer le point critique de l'instabilité de la tension. L'écoulement de puissance continu (CPF) est un outil puissant pour résoudre l'équation d'écoulement de la puissance courbe PV. En mettant continuellement à jour l'équation de flux de puissance, elle permet à l'équation de flux de puissance d'avoir des solutions à tous les états de charge possibles, que ce soit au point d'équilibre stable ou au point d'équilibre instable, et de surmonter le problème de la faible convergence du flux de puissance dans l'état de fonctionnement proche de la limite de stabilité.

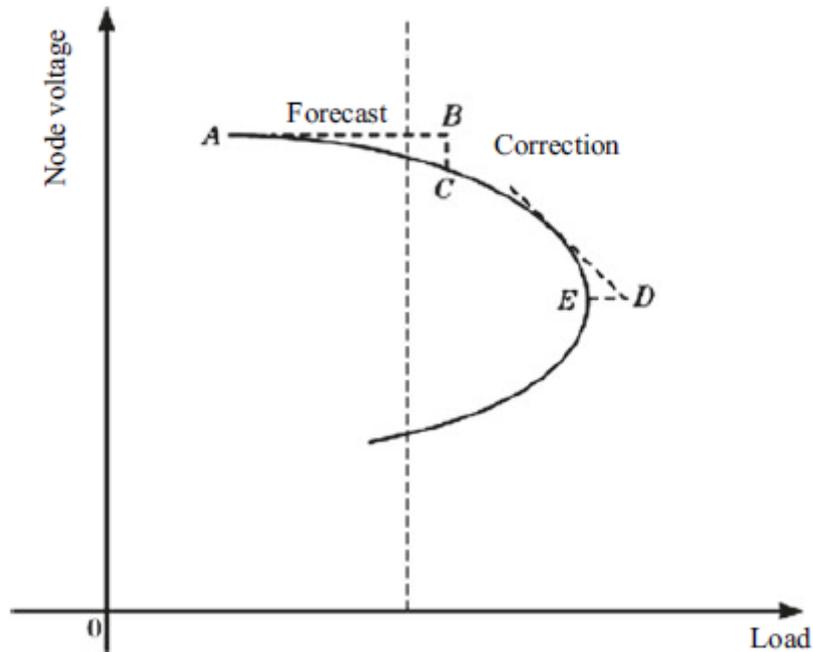


Figure. 2.4 Diagramme de prédiction-corrrection du CPF

### a). Principe de base

Le CPF comprend deux étapes importantes : la prédiction et la correction. À partir du point de fonctionnement initial stable, avec la variation lente de la charge, le point de fonctionnement suivant est estimé et corrigé le long de la courbe PV tracée jusqu'à ce que la courbe PV complète soit tracée, comme le montre la figure 2.4. Les étapes spécifiques sont les suivantes :

- (1) À partir de la solution connue A, estimer la solution B du mode de croissance de la charge dans une direction tangentielle, c'est-à-dire l'étape de prédiction.
- (2) Résoudre la solution précise C en utilisant le flux de puissance conventionnel (la valeur de la charge du système est constante), ce qui constitue l'étape de correction.
- (3) Répéter les étapes ci-dessus au fur et à mesure que la charge augmente.

Si l'estimation de la charge obtenue dépasse la charge maximale de la solution exacte, le calcul de correction basé sur la valeur de la charge ne convergera pas, comme le montre le point D de la figure. À ce moment-là, le calcul de correction basé sur la tension est adopté pour obtenir la solution précise E. Par conséquent, à l'approche de la limite de stabilité de la tension, afin de déterminer la puissance maximale précise, l'incrément de charge doit être progressivement réduit pendant la poursuite de la prédiction.

## Chapitre 2 : méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension

---

Dans la méthode de continuation, un nouveau paramètre d'augmentation de la charge  $\lambda$  est introduit pour générer le vecteur tangent pour l'étape du pré-dicteur. La charge au Bus  $i$  devient  $(P_{Li}(\lambda), Q_{Li}(\lambda))$  et la puissance de génération au Bus  $j$  devient  $P_{Gj}(\lambda)$ .

Les formes générales des nouvelles équations pour chaque NOEUD  $i$  se présentent sous les formes générales suivantes :

$$\Delta P_i = P_{Gi}(\lambda) - P_{Li}(\lambda) - P_{Ti} = 0 \quad (2.13)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi}(\lambda) - Q_{Li}(\lambda) - Q_{Ti} = 0 \quad (2.14)$$

Avec :

$$P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.15)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.16)$$

Soit  $F$  le vecteur qui est défini par :

$$F(\delta, V, \lambda) = 0$$

Avec:

$\delta$ : Vecteur qui contient les phases des tensions.

$V$  : Vecteur qui contient les modules des tensions.

La solution pour la charge de base  $(\delta_0, V_0, \lambda)$  est obtenue en utilisant un calcul d'écoulement de puissance conventionnel pour une gamme de valeurs de  $\lambda$ .

### Prédiction de la solution suivante :

La prédiction est le processus qui consiste à produire une estimation de la solution initiale en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \delta^{j+1} \\ \bar{V}^{j+1} \\ \bar{\lambda}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^j \\ \bar{V}^j \\ \bar{\lambda}^{j+1} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ d\bar{V} \\ d\bar{\lambda} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Où :

$t = [d\delta \ dV \ d\lambda]$  est le vecteur tangent.

"j" désigne l'itération initiale.

"j + 1" présente l'itération suivante.

$\sigma$  : est une constante qui indique la longueur du pas. Le choix de cette variable doit être effectué de manière à ce que la solution anticipée se trouve à l'intérieur du rayon de convergence du correcteur.

Afin d'effectuer cette étape, il est nécessaire de calculer le vecteur tangent qui permet d'obtenir la pente de la courbe qui représente l'évolution de la solution. Il peut être obtenu en prenant la dérivée de l'équation d'écoulement de puissance par rapport à la variable de solution. Le vecteur tangent peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$[F_\delta \ F_V \ F_\lambda] \begin{bmatrix} d\bar{\delta} \\ d\bar{V} \\ d\bar{\lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.18)$$

Dans cette équation, le côté gauche représente la matrice JACOBIENNE conventionnelle de l'écoulement de puissance, augmentée d'une colonne  $F_\lambda$ . Lorsqu'on ajoute un nouveau paramètre inconnu  $\lambda$  sans augmenter le nombre d'équations d'écoulement de puissance, il devient nécessaire de trouver une nouvelle équation pour assurer que la JACOBIENNE augmentée est non singulière au point critique dans la résolution du système. Pour ce faire, on fixe une valeur à l'une des composantes du vecteur tangent et on ajoute une équation qui garantit que le module de ce vecteur ne soit pas nul.

Cette nouvelle équation peut être formulée comme suit :

$$e_K^T t = \pm 1 \quad (2.19)$$

Avec  $e_K$  est un vecteur de ligne convenablement dimensionné où tous les éléments sont égaux à zéro excepte le KIME qui est égal à l'unité. Si l'indice k est correctement choisi, le KIME élément impose une norme différente de zéro au vecteur tangent. Le choix du signe (+) ou (-) dépend de la direction du changement de la KIME variable lors du tracé de la solution. Si cette

## Chapitre 2 : méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension

---

variable augmente, on choisit le signe (+), tandis que si elle diminue, on choisit le signe (-). Le vecteur tangent peut être calculé à l'aide de la matrice JACOBIENNE augmentée représentée par la formule suivante :

$$J_{aug} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \delta} & \frac{\partial F}{\partial V} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$J_{aug}[t] = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Lorsque l'équation (2.21) est résolue et que le vecteur tangent est trouvé, il est alors possible de générer une prédiction pertinente à l'aide de l'équation (2.20).

### Correction

Après avoir effectué une prédiction, il est essentiel de procéder à une correction de la solution approchée pour garantir une précision suffisante. Chaque technique de continuation adopte une para-métrisation spécifique pour identifier la solution le long de la trajectoire de traçage.

Dans ce système, nous utilisons une para-métrisation locale, qui consiste à ajouter une équation supplémentaire à l'ensemble initial d'équations pour spécifier la valeur d'une variable d'état. Cette méthode permet de contrôler de manière précise l'évolution de la solution en fonction des paramètres choisis.

Dans le cas des équations reformulées, la para-métrisation locale permet de déterminer l'amplitude de la tension  $V_i$  pour chaque NOEUD  $i$ , l'angle de phase de la tension nodale  $\delta_i$  ou le paramètre de charge  $\lambda$ . Cette approche offre plusieurs avantages, tels qu'une meilleure convergence de la solution, une plus grande stabilité numérique et une réduction des coûts de calcul.

Le nouvel ensemble d'équations implique la nouvelle définition de variables d'état. Ceci peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ \bar{V} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Et aussi :  $x_k = \eta$

Où  $x_k$  représente l'élément KIEME appropriée de  $x$ , Alors la nouvelle série des équations :

$$\begin{bmatrix} F(x) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = 0 \quad (2.23)$$

Après avoir choisi les valeurs appropriées pour  $k$  et  $(\eta)$ , il est possible d'utiliser une méthode de Newton-RAPHSON modifiée qui prend en compte la variable d'état ajouté pour résoudre le système d'équations.

L'indice  $k$  utilisé dans la correction est le même que celui utilisé dans la prédiction et  $\eta$  est égal à  $x^*k$ , qui est la valeur prédite à partir de  $X_k$ . L'application de la méthode de Newton-RAPHSON sur le système se traduit par :

$$J_{aug} * \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Où  $J_{aug}$  est la même matrice jacobienne utilisé précédemment et les éléments  $\Delta P$  et  $\Delta Q$  sont calculées en remplaçant les valeurs obtenues de la prédiction dans les équations (2.13) et (2.14).

Une fois que le  $X_k$  est spécifiée dans l'équation (2.23), les valeurs des autres variables sont dépendantes et ils sont résolus par l'application itérative (2.24).

Après avoir obtenu le vecteur  $[\Delta \delta \ \Delta V \ \Delta \lambda]^T$  en utilisant l'équation 2.24, il convient de vérifier si la condition de convergence pour l'étape de correction est évalué.

Si  $\max(|\Delta \delta|, |\Delta V|, |\Delta \lambda|) \leq \epsilon$ , alors l'étape de correction actuelle a atteint la convergence. Nous pouvons alors utiliser la solution finale convergée comme point de départ pour l'étape de la prédiction et commencer la prochaine étape. Si le critère de convergence de l'étape de correction n'est pas atteint, il faudra procéder à la mise à jour des valeurs de la solution actuelle en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \delta^{\text{Nouveau}} \\ \bar{V}^{\text{Nouveau}} \\ \bar{\lambda}^{\text{Nouveau}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \bar{V} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

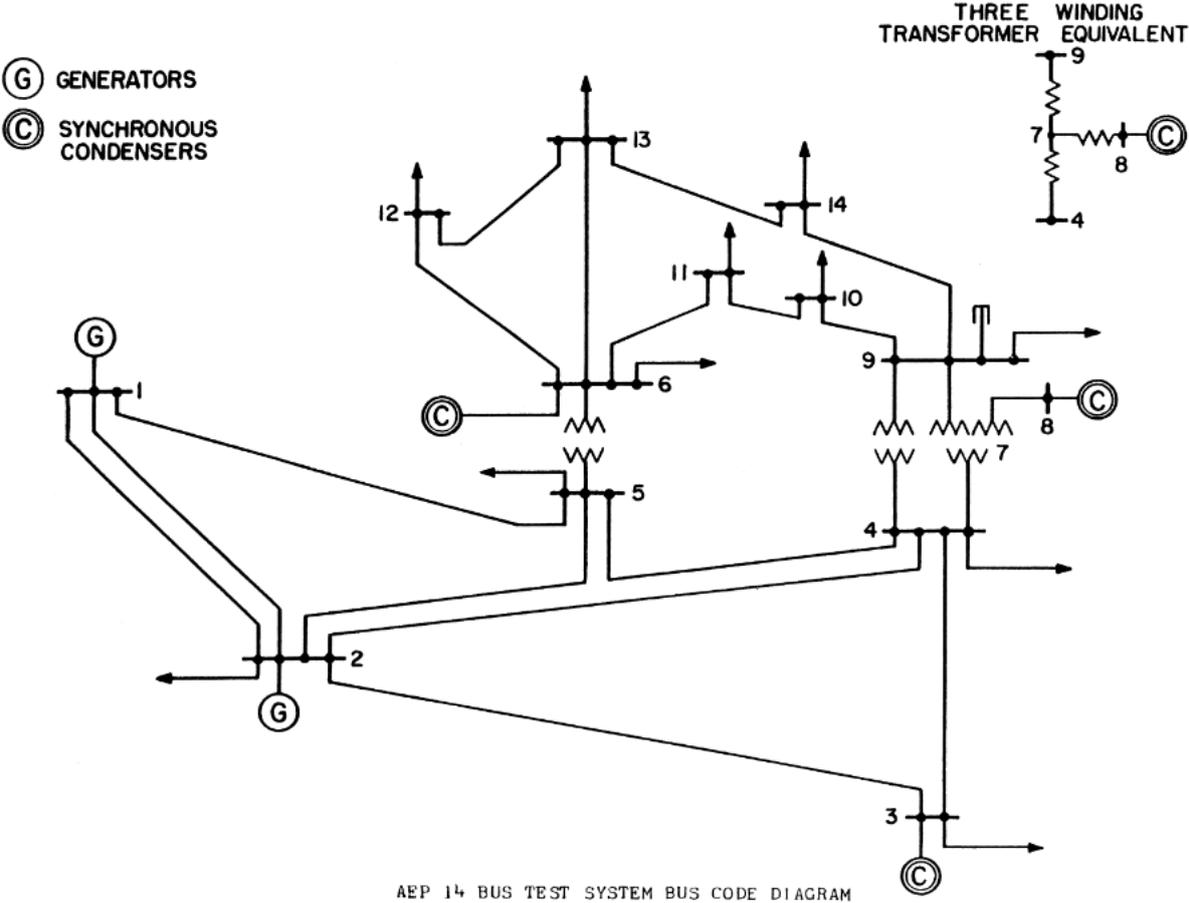
## **Chapitre 2 : méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension**

---

Ensuite, il sera nécessaire de répéter l'itération de correction pour poursuivre le processus de convergence. En effectuant le calcul du vecteur tangent durant l'étape suivante de prédiction, il est possible de vérifier si le système a atteint le point critique. Pour ce faire, il faut savoir que le point critique est atteint lorsque la charge (c'est-à-dire  $\lambda$ ) atteint sa valeur maximale et commence à diminuer. À ce moment-là, la composante tangentielle correspondant à  $\lambda$  est nulle, puis devient négative au-delà de ce point.

## Chapitre 3

# **Application de la méthode d'écoulement continu**



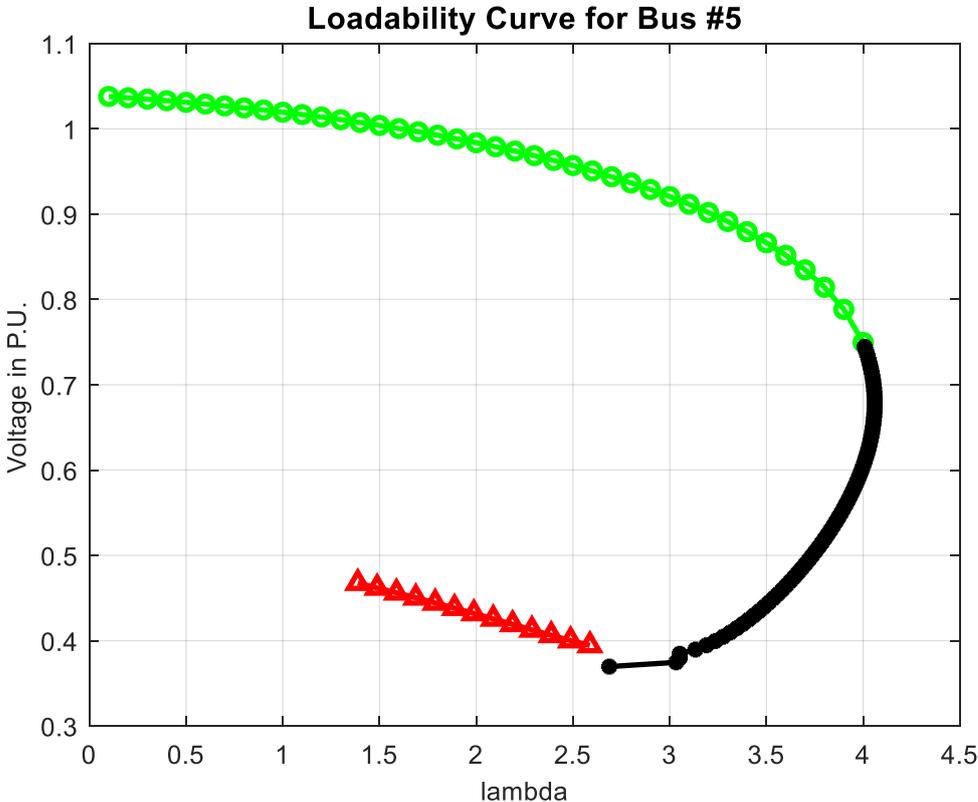
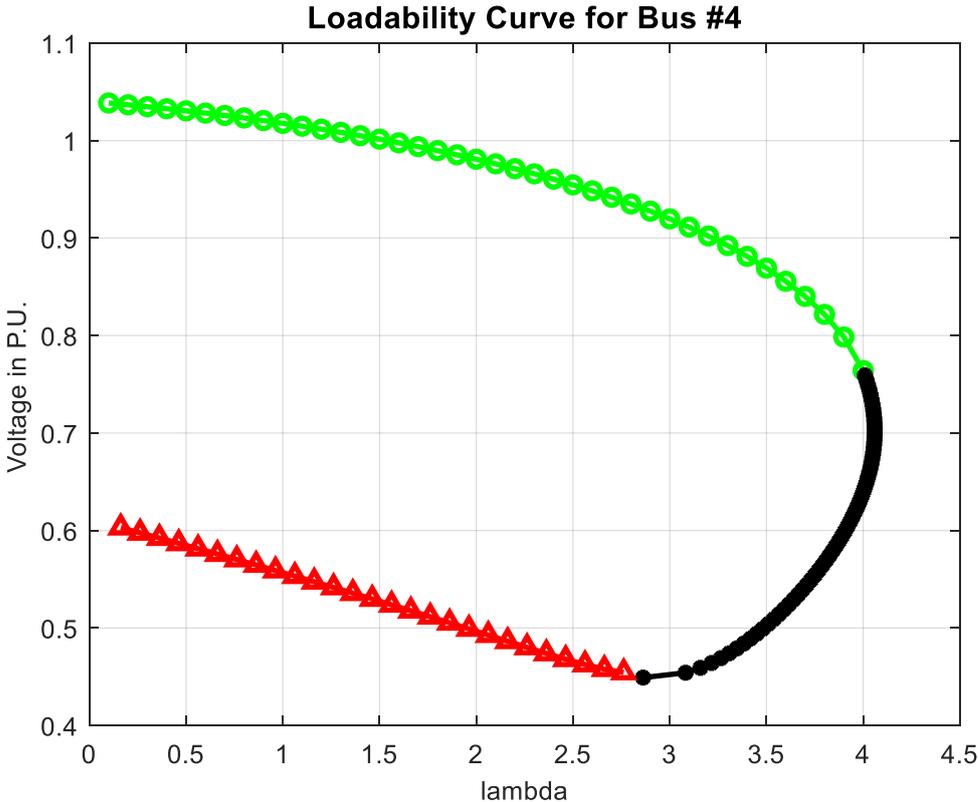
AEP 14 BUS TEST SYSTEM BUS CODE DIAGRAM

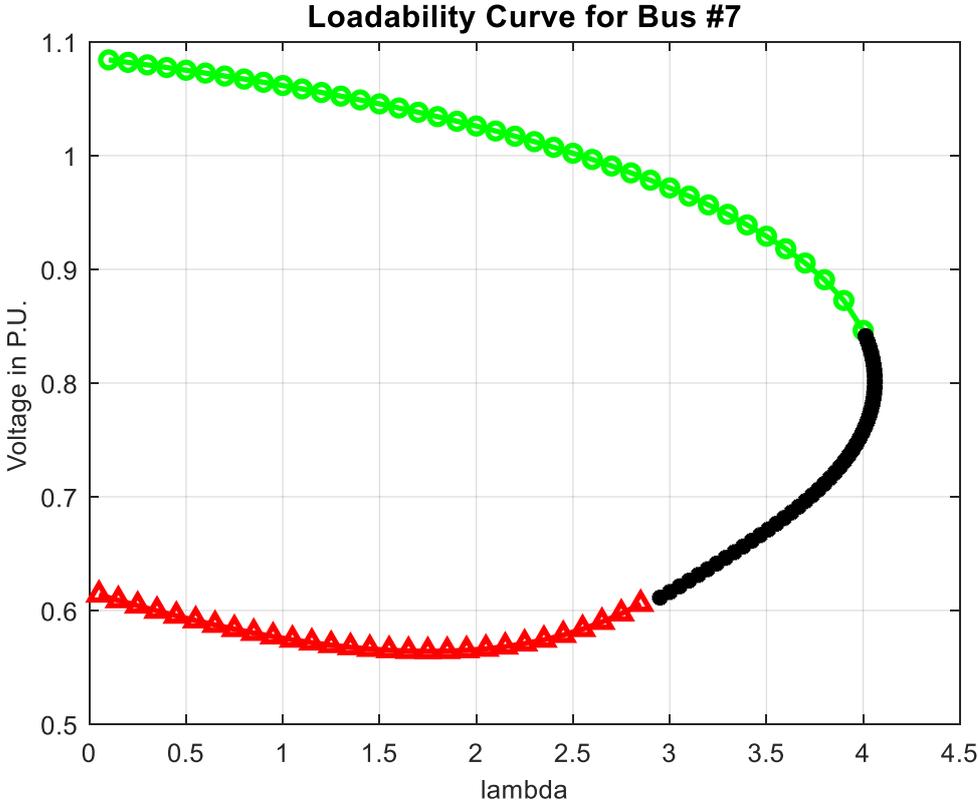
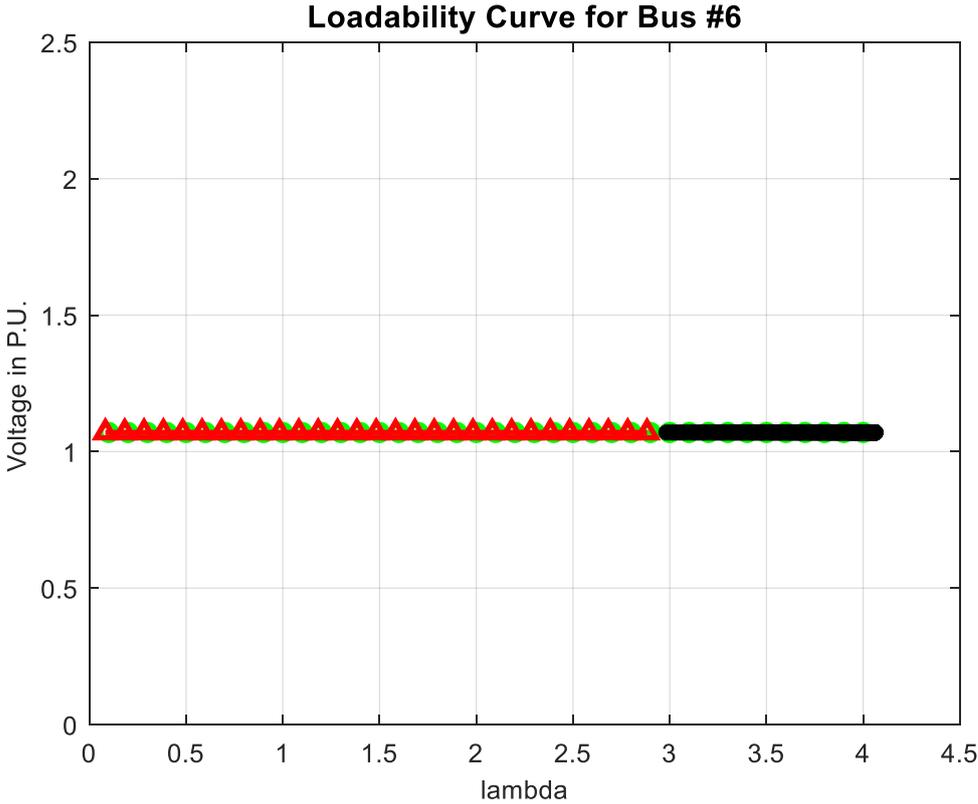
**Données des nœuds**

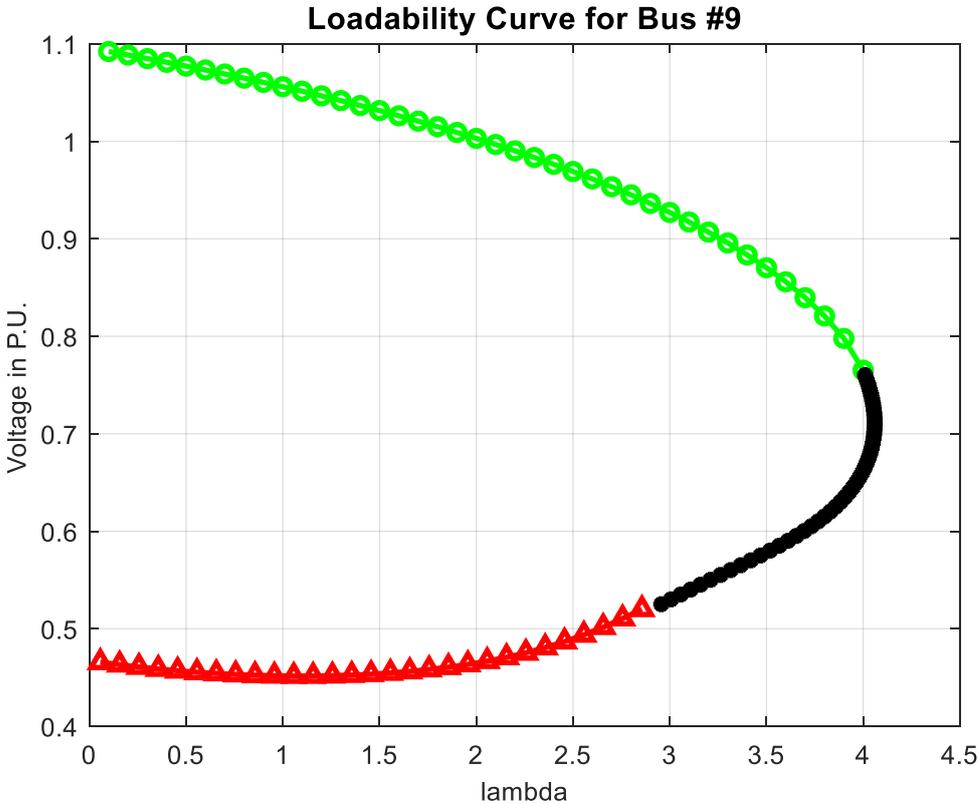
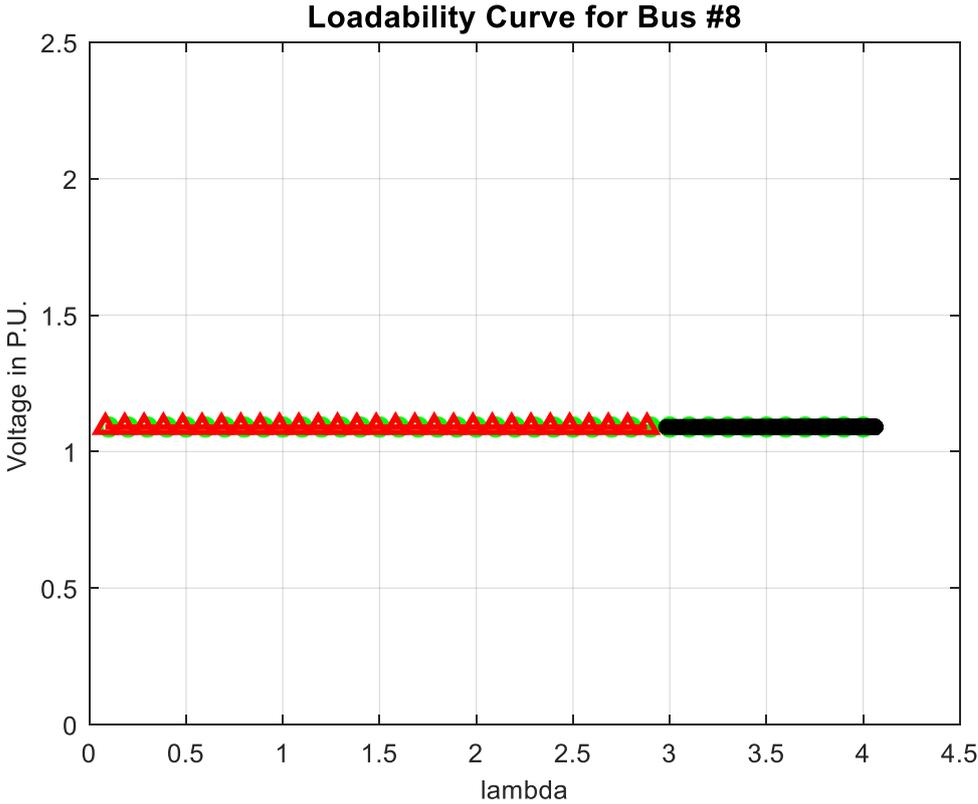
Noeud	Type	Tension pu	Pd MW	Qd MVAR	Pg MW	Qg Mvar	Qmin MVAR	Qmax MVAR	Qshunt MVAR
1	<i>Slack</i>	1.060	0	0	232.4	-16.9	-	-	0
2	<i>PV</i>	1.045	21.7	12.7	40	42.4	-40	50	0
3	<i>PV</i>	1.040	94.2	19.0	0	23.4	0	40	0
4	<i>PQ</i>	1.000	47.8	-3.90	0	0	0	0	0
5	<i>PQ</i>	1.019	7.60	1.60	0	0	0	0	0
6	<i>PV</i>	1.070	11.2	7.50	0	12.2	-6	24	0
7	<i>PQ</i>	1.000	0	0	0	0	0	0	0
8	<i>PV</i>	1.090	0	0	0	17.4	-6	24	0
9	<i>PQ</i>	1.000	29.5	16.6	0	0	0	0	19
10	<i>PQ</i>	1.000	9.00	5.80	0	0	0	0	0
11	<i>PQ</i>	1.000	3.50	1.80	0	0	0	0	0
12	<i>PQ</i>	1.000	6.10	1.60	0	0	0	0	0
13	<i>PQ</i>	1.000	13.5	5.8	0	0	0	0	0
14	<i>PQ</i>	1.000	14.9	5.0	0	0	0	0	0

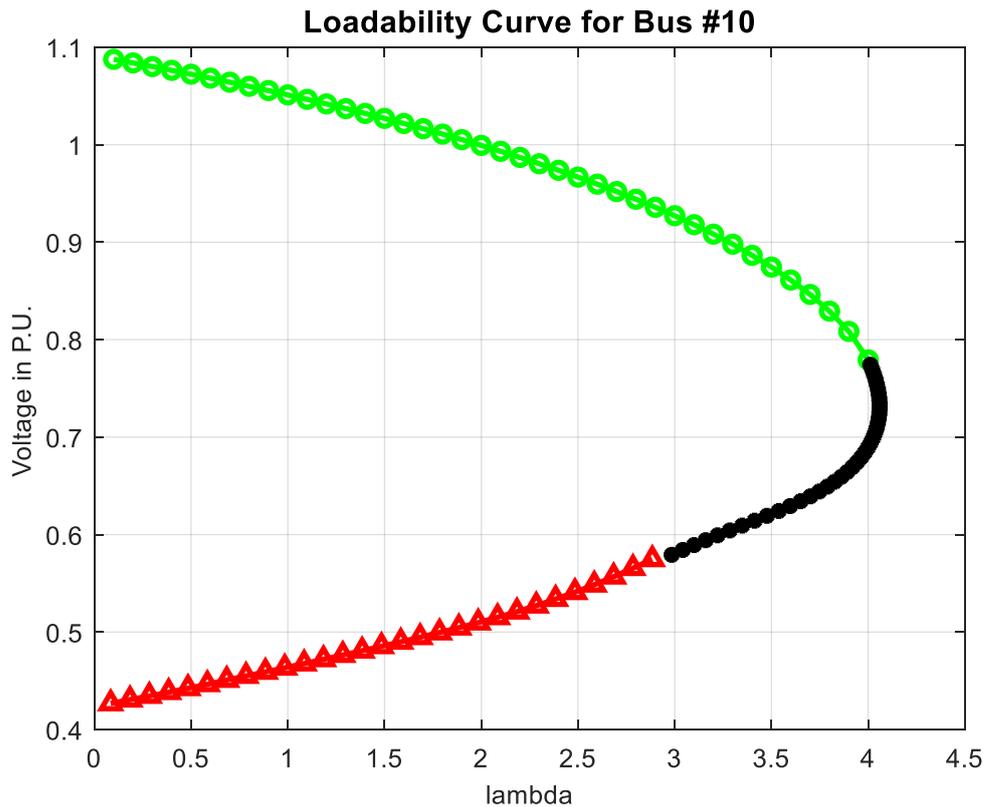
Données des lignes

Ligne	Noeud 1	Noeud 2	R (pu)	X (pu)	$\frac{1}{2}B$ (pu)	a
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
4	2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
5	2	5	0.05695	0.17388	0.034	1
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
7	4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
8	4	7	0	0.20912	0	0.978
9	4	9	0	0.55618	0	0.969
10	5	6	0	0.25202	0	0.932
11	6	11	0.09498	0.1989	0	1
12	6	12	0.12291	0.25581	0	1
13	6	13	0.06615	0.13027	0	1
14	7	8	0	0.17615	0	1
15	7	9	0	0.11001	0	1
16	9	10	0.03181	0.0845	0	1
17	9	14	0.12711	0.27038	0	1
18	10	11	0.08205	0.19207	0	1
19	12	13	0.22092	0.19988	0	1
20	13	14	0.17093	0.34802	0	1









**Analyse les courbes :**

D'après les données du réseau, nous avons 20 lignes et 14 nœuds, où nous avons 5 jeux de barres de génération (1, 2, 3, 6 et 8) et le reste des jeux de barres de charge. Nous avons considéré les jeux de barres des compensateurs synchrones comme des jeux de barres PV.

L'application du CPF aux bus 3,6 et 8 la tension reste constante.

L'application du CPF aux bus 4,5,9 et 10 qui sont des jeux de barres de charge on constate que lors de l'augmentation du facteur de charge  $\lambda$  la tension diminue jusqu'à la valeur max  $\lambda=4$  (l'effondrement de la tension).

Donc pour

$\lambda < 2.5$  : Bonne marge de stabilité.

$\lambda > 2.5$  : Faible marge de stabilité système proche de la limite,

La tension au point de nez  $< 0.9 pu$ .

## Chapitre 4 :

# **Développement d'un indice de stabilité de tension**

## 4.1 L'indice P de stabilité de tension

### 4.1.1 Système de 2 barres

Un système radial simple est utilisé dans un premier temps pour expliquer le concept de l'indicateur proposé. Considérons le système à deux bus illustré à la figure (3.1) où la charge au bus 2 est  $P_L + jQ_L$  et l'amplitude de la tension est  $V$ .

L'admittance de charge équivalente est  $Y_L = G_L - jB_L$

Tel que

$$G_L = \frac{P_L}{V^2} \quad \text{et} \quad B_L = \frac{Q_L}{V^2} \quad (4.1)$$

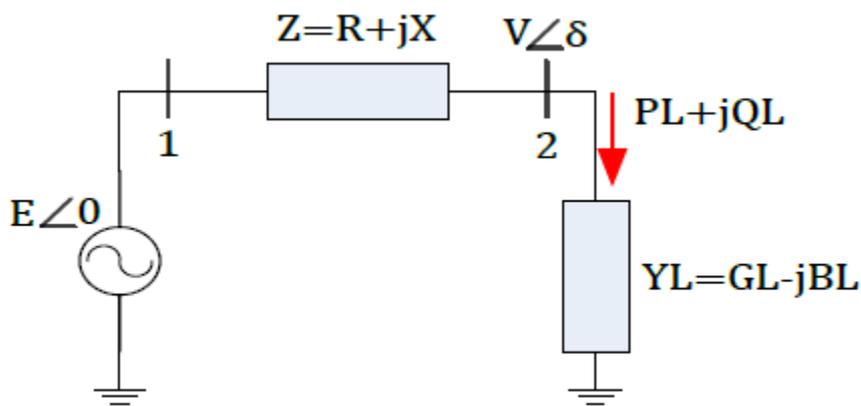


Figure 4.1 : Système de deux bus

Si la charge augmente progressivement sans changement de facteur de puissance par les quantités  $\Delta P$  et  $\Delta Q$ , l'augmentation correspondante de l'admittance est  $\Delta G_L$  et  $\Delta B_L$

La charge entraîne une baisse de tension d'une quantité  $\Delta V$  négative. Donc la nouvelle tension au jeu de barres est  $V + \Delta V$  qui peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= (V + \Delta V)^2 (G_L + \Delta G_L) - V^2 G_L \\ &= (V + \Delta V)^2 \Delta G_L + (2V + \Delta V) G_L \Delta V \end{aligned} \quad (4.2)$$

La signification physique des deux termes de l'équation (4.2) est la suivante : le premier terme (qui est positif) représente la puissance gagnée en raison de la connexion de la charge supplémentaire  $\Delta G_L$ , tandis que le second terme (négatif) est la puissance perdue de la charge

originale  $G_L$  en raison de la chute de tension  $\Delta V$  [15]. La puissance active nette gagnée au niveau du bus est l'équilibre de ces termes opposés. Au point de limite de stabilité, ces deux termes s'annulent et l'augmentation nette de puissance est nulle. Ce point représente la puissance maximale possible sur la courbe V-P du flux de puissance continu. Toute nouvelle tentative d'augmenter la puissance en connectant une admittance supplémentaire  $\Delta G_L$ ,  $\Delta B_L$  se traduira en fait par une réduction nette de la puissance, le second terme plus grand que le premier. Cela représente un fonctionnement dans la moitié inférieure (instable) de la courbe de puissance continu.

Le nouvel indice de stabilité est basé sur le quotient des deux termes de l'équation (4.2) c.a.d le rapport la puissance perdue et la puissance gagnée. Le signe moins est introduite pour rendre le signe de l'indice positif lorsqu'il y a une chute de tension négative pour un  $\Delta G_L$  positif.

$$P_{index} = - \frac{(2V + \Delta V)G_L}{(V + \Delta V)^2} \frac{\Delta V}{\Delta G_L} \quad (4.3)$$

Dans le cas limite  $\Delta G_L, \Delta V \rightarrow 0$

$$P_{index} = - \frac{2G_L}{V} \frac{dV}{dG_L} \quad (4.4)$$

On peut écrire

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{dV}{dP_L} \frac{dP_L}{dG_L} \quad (4.5)$$

Puisque

$$P_L = V^2 G_L$$

$$dP_L = V^2 dG_L + 2V G_L dV \quad (4.6)$$

Ou

$$\frac{dP_L}{dG_L} = V^2 + 2V G_L \frac{dV}{dG_L} \quad (4.7)$$

On remplace dans (4.5)

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{dV}{dP_L} \left( V^2 + 2V G_L \frac{dV}{dG_L} \right) \quad (4.8)$$

Après manipulation

$$\frac{dV}{dG_L} = \frac{V^2 \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2VG_L \frac{dV}{dP_L}} \quad (4.9)$$

En remplace dans  $P_{index}$  défini dans (4.3)

$$P_{index} = \frac{-2VG_L \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2VG_L \frac{dV}{dP_L}} \quad (4.10)$$

En puissance active

$$P_{index} = \frac{-2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}} \quad (4.11)$$

L'indice est défini en fonction de la sensibilité de la tension et de la puissance. L'indice de la stabilité a une valeur théorique de 1 à la limite de la stabilité lorsque  $\frac{dV}{dP_L} \rightarrow \infty$ .

La figure 4.2 montre la variation de l'indice P du système de deux jeux de barres, avec  $Z=0.0+j0.2$  et un facteur de puissance 0.8.

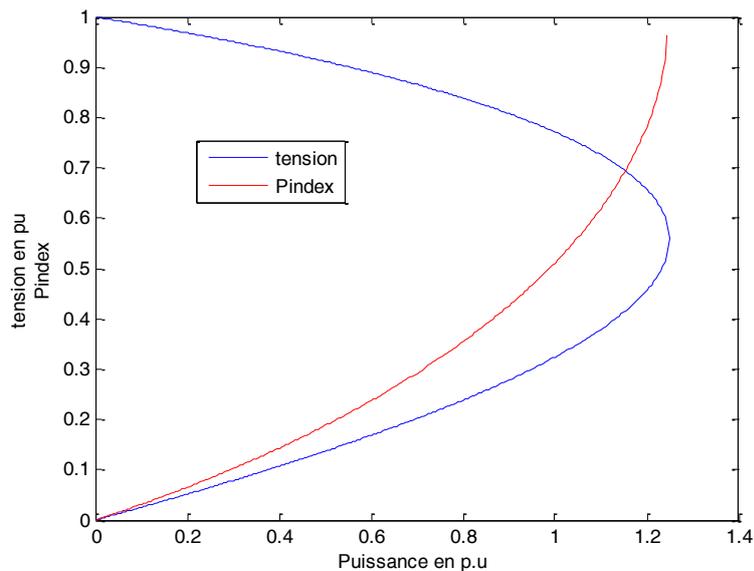


Figure 4.2 Tension et  $P_{index}$  réseau 2 bus

#### 4.1.2 Système de n barres

Pour calculer l'indice P tel que défini dans (4.11) pour chaque jeu de barres pour le cas

général d'un système de n jeux de barres. Il est nécessaire de déterminer  $\frac{dV_j}{dP_{Lj}}$ .

Cette valeur peut être déterminée à partir du système de la matrice jacobienne.

Si les équations de la matrice jacobienne inverse sont définies comme suit :

En supposant que la charge augmente à partir d'une valeur initiale  $P_{L0j}, Q_{L0j}$  d'une manière cohérente avec le flux de puissance continu, c.a.d en multipliant la charge initiale du système par un multiplicateur de charge  $\lambda$  aux valeurs  $P_{Lj}, Q_{Lj}$  en suite cette charge est augmentée de manière incrémentale de  $\Delta P_{Lj}$  et  $\Delta Q_{Lj}$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

On peut écrire pour le jeu de barre j

$$\Delta V_j = \sum_{i \in L} j_{ji} \Delta P_{Li} + \sum_{i \in L} l_{ji} \Delta Q_{Li} \quad (4.13)$$

Ou

$$\frac{dV_j}{dP_{Lj}} \rightarrow \frac{dV_j}{dP_{Lj}} = \sum_{i \in L} j_{ji} \alpha_{ji} + \sum_{i \in L} l_{ji} \alpha_{ji} \beta_i \quad (4.14)$$

Tel que

$$\alpha_{ji} = \frac{dP_{Li}}{dP_{Lj}} = \frac{dP_{L0i}}{dP_{L0j}}$$

En supposant que l'augmentation de la charge est de même proportion de la charge initiale.

$$\beta_i = \frac{dQ_{Li}}{dP_{Li}} = \frac{dQ_{L0i}}{dP_{L0i}} = \tan(\phi)$$

$\phi_i$  angle de facteur de puissance du jeu de barres i.

On convient de souligner que les incréments des jeux de barres de charge sont négatifs tandis que les incréments des générateurs seront positifs.

L'indice P du jeu de barres j est donc :

$$P_{index-j} = \frac{-2 \frac{dP_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}}{1 - 2 \frac{dP_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}} \quad (4.15)$$

En effet l'indice P peut être exprimé en substituant  $P_{Lj} = \lambda \cdot P_{L0j}$

$$P_{index-j} = \frac{-2 \frac{\lambda}{V_j} \frac{dV_j}{d\lambda}}{1 - 2 \frac{\lambda}{V_j} \frac{dV_j}{d\lambda}} \quad (4.16)$$

## Conclusion

L'indice P peut être utilisé pour estimer la marge de stabilité du système. Cette marge est calculée en supposant que la production et la charge du système évoluent de même proportion, c'est-à-dire que le point de fonctionnement du système évolue le long de la même courbe V-P.

L'indice P peut être utilisé à des fins de délestage. Cependant, l'indice P est défini sur la base du même concept de courbes V-P de continuation. Par conséquent, si l'indice P doit être utilisé tel qu'il est défini, le délestage doit être effectué sur tous les bus proportionnellement à leur charge. Néanmoins, l'indice P peut être défini différemment dans l'intention de ne modifier que la charge d'un seul bus. La quantité de charge à délester est facilement estimée en fonction des indices P calculés et souhaités.

## **Conclusion générale**

### **Conclusion générale**

Dans le travail que nous avons réalisé, nous avons traité le problème de la stabilité de la tension des systèmes électriques.

Après avoir introduit quelques généralités et définitions concernant la stabilité des réseaux électriques, nous avons pu définir le problème de l'instabilité et l'effondrement de tension. Nous avons mis l'accent sur les causes pouvant conduire à des instabilités de tension et citer des Blackouts dans le monde.

Par la suite, nous avons présenté les méthodes d'évaluation de la stabilité de la tension, permettant de diagnostiquer la capacité d'un réseau électrique à résister aux variations de charge sans subir de dégradation de la tension. Parmi les approches les plus utilisées, on distingue les méthodes statiques comme le flux de puissance continu (CPF) et les méthodes dynamiques basées sur la simulation temporelle.

Après avoir défini la méthode d'écoulement de puissance continu (CPF), qui permet l'analyse avec précision la stabilité de tension d'un réseau électrique, en particulier dans les situations de charge croissante. Contrairement aux méthodes classiques, nous avons illustré l'application de cette méthode sur un réseau de 14 jeux de barres. En fin nous avons développé l'indice de stabilité de tension P qui permet d'estimer la marge de stabilité du système.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

### Bibliographie

- [1] P.Kundur. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. en. IEEE Transactions on Power Systems 19, 1387-1401. issn: 0885-8950. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1318675/> (2023) (août 2004).
- [2] Bourzami, A. Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue. Thèse de doctorat, Univ. Ferhat Abbas-Setif 1
- [3] J.Paserba. Control of Power System Oscillations. en. IFAC Proceedings Volumes 30, 75-83. issn: 14746670. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667017463890> (2023) (août 1997).
- [4] Benasla, M. Apport du SMES comme stockage d'énergie aux performances de l'HVDC pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique. fr.Publisher : Unpublished. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.35802.34245> (2023) (2011).
- [5] Tang, Yong. Voltage stability analysis of power system. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2021.
- [6] Laifa, A. Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité. thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique (juin 1995).
- [7] Benabid. Optimisation Multiobjective De La Synthèse Des Facts Par Les Particules En ESSAIM Pour Le Contrôle De La Stabilité De Tension Des Réseaux Electriques, Magister (Université Amar Thelidji LAGHOUAT - 2007).
- [8] Kazemi, A. & Badrzadeh, B. Modeling and simulation of SVC and TCSC to study their limits on maximum loadability point. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 26, 381-388. issn: 01420615. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061503001364> (2023) (juin 2004).

## Bibliographie

- [9] Dobson, I., Department, E., Carreras, B. A., Lynch, V. E. & Newman, D. E. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts, Hawaii International Conference on System Sciences, (January 2001), Maui, Hawaii. en.
- [10] Lu, W., Bésanger, Y., Zamaï, E. & Radu, D. Blackouts : Description, Analysis and Classification September 2006 Lisbon, Portugal. 434 p. en.
- [11] Zhang Y, Zhou S, Wang L et al (2000) Dynamic element model and its implementation in static voltage stability analysis. Proc Chin Soc Electr Eng 20(3):66–70
- [12] Kundur P (2002) Power system stability and control. China Electric Power Press, Beijing
- [13] Hellal, A. Analyse de la stabilité de tension. fr. Polycopié du cours, Ecole Nationale Polytechnique, Alger (2022).
- [14] Chakrabarti, S. Notes on Power System Voltage Stability, Dept of EE, IIT, Kanpur.
- [15] KAMEL, Mariana, KARRAR, Abdelrahman A., et ELTOM, Ahmed H. Development and application of a new voltage stability index for on-line monitoring and shedding. IEEE Transactions on power systems, 2017, vol. 33, no 2, p. 1231-1241.