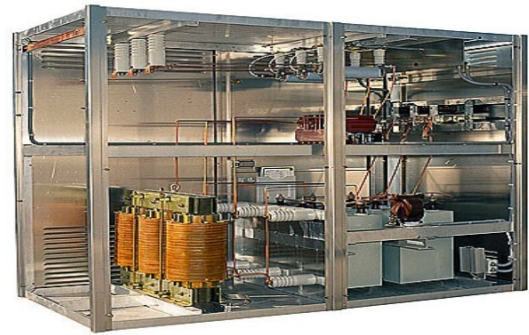


# Cours : Compensation d'Energie Réactive



Mme AITOUARET Née CHEKKAL Samira

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>I - chapitre II : Études Paramétriques de la stabilité de tension</b>	<b>4</b>
1. Introduction .....	4
2. Courbe d'effondrement de tension .....	4
3. Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension .....	8
3.1. Influence du facteur de puissance de la charge sur la stabilité de tension .....	9
3.2. Influence de la nature de charge .....	9
<b>II - Exercice</b>	<b>11</b>
<b>III - Activité d'auto-évaluation</b>	<b>13</b>
<b>Solution des exercices</b>	<b>15</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>16</b>

# *Objectifs*



- Acquérir des notions sur les phénomènes de l'instabilité de tension ;
- La compréhension des phénomènes ayant lieu sur le réseau lors du fonctionnement normal et critique

# chapitre II : Études Paramétriques de la stabilité de tension



Introduction	4
Courbe d'effondrement de tension	4
Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension	8

## 1. Introduction

L'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accroissant au bout de quelques minutes. La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être :

manque de tension, augmentation des pertes réactive du réseau. La défaillance du réglage de la tension, au niveau des bornes des groupes, a pour conséquence une accélération de la dégradation du plan de la tension qui peut aller jusqu'à des déclenchements, en cascade, de groupes et de lignes et un effondrement général du réseau.

Afin d'illustrer quelques aspects de l'analyse, le phénomène d'instabilité de tension peut être analysé à l'aide d'un système simple constitué d'un générateur alimentant une charge électrique à travers une ligne électrique.

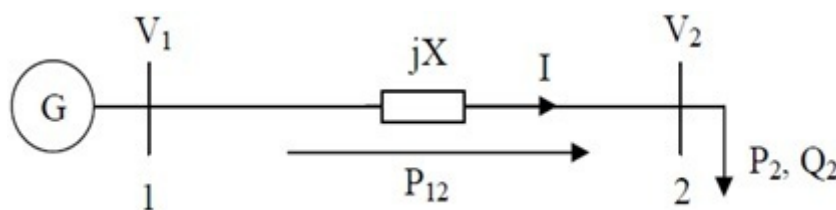


Fig.II.1: Réseau électrique à deux nœuds

## 2. Courbe d'effondrement de tension

La courbe d'effondrement de tension (Courbe PV) est considérée parmi les techniques les plus utilisées dans l'étude et l'analyse de la stabilité statique de tension.

Elle trace l'évolution de la tension en fonction de l'augmentation de la charge dans le nœud. Dans ce qui suit, nous essayons d'élaborer et développer le modèle mathématique qui décrit la variation de la tension en fonction de la charge.

D'après la figure II.1, on peut exprimer la puissance apparente au nœud 2 suivant l'équation :

Dans ce circuit, l'alternateur alimente une charge à travers une ligne de transmission.

Avec :

$V_1$  : tension au début de la ligne

$V_2$  : tension à l'extrémité de la ligne

$X$  : réactance de la ligne

$\Theta$  : angle de charge

$$\vec{S} = P_2 + jQ_2$$

*math*

En considérant la figure II.1, on peut écrire :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{jX}$$

*math\_02*

On aura alors

$$S^* = (V_2 I^*)^* = V_2^* I = V_2^* \frac{V_1 - V_2}{jX}$$

*math\_03*

Avec

$$V_2^* = (V \angle \theta)^* = V \angle -\theta$$

*math\_04*

On aura

$$S^* = P_2 - jQ_2 = \frac{-V_1 V_2}{X} \sin \theta + j \left( \frac{V_2^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \theta \right)$$

*math\_05*

Les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne s'écrivent alors

$$P_{12} = -P_{21} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\theta)$$

*math\_06*

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{-V_2^2}{X} + \frac{V_1 V_2}{X} \cos(\theta)$$

*math\_07*

On élimine l'angle  $\theta$  par l'utilisation de l'équation:

$$\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 = 1$$

math\_08

donc on trouve:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_2^2}{X}\right)^2 = \frac{V_1^2 V_2^2}{X_2^2}$$

math\_09

L'équation précédente peut s'écrire sous la forme d'une équation quadratique en fonction de  $V_2$

$$V_2^4 + (2QX - V_1^2)V_2^2 + (P^2 + Q^2)X^2 = 0$$

math\_11

$$V_2^2 = \frac{1}{2} \left[ V_1^2 - 2QX \pm V_1 \left( V_1^2 - \frac{4P^2 X^2}{V_1^2} - 4QX \right)^{1/2} \right]$$

math\_12

$$Q = \operatorname{tg} \theta \times P = B \times P$$

math\_13

On remplace  $Q$  par son expression. Donc la solution est:

$$V_2^2 = \left[ \frac{V_1^2}{2} - BPX \pm \left( \frac{V_1^4}{4} - PX(PX + BV_1^2) \right)^{1/2} \right]$$

math\_14

D'après l'équation précédente, on peut conclure que, la tension au nœud 2 est une fonction de la puissance active, de la réactance de la ligne, et du facteur de puissance.

La figure II.2 présente la courbe de bifurcation du système étudié. La courbe montre l'évolution de la tension en fonction de la puissance active. La charge est considérée purement active ( $Q = 0$  donc  $B = 0$ ), la réactance de la ligne  $X = 0.5\text{pu}$ .

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{mp} ; Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{mq}$$

math\_10

D'après la figure II.2, on peut remarquer que lorsque la puissance demandée augmente, la tension diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur critique  $V_{\text{crit}}$  qui correspond à la puissance maximale transmissible par la ligne  $P_{\text{max}}$ . Ce point est appelé point de bifurcation de tension (ou point d'effondrement de tension). Au-delà de ce point, la tension chute d'une façon brusque et incontrôlable ; c'est le phénomène d'effondrement de tension. Ce phénomène peut s'expliquer comme suit : lorsque la charge croît, le courant circulant dans la ligne croît ; entraînant une chute de tension d'autant plus importante que le courant est plus grand, donc la tension aux bornes de la charge décroît.

De la figure II.2 une notion très importante et très utilisée dans l'étude et l'évaluation de la stabilité de tension est la marge de stabilité de tension, laquelle est considérée comme un indice efficace de l'évaluation de la stabilité de tension. Elle est définie comme étant la quantité de charge additionnelle de la charge nominale qui conduit le réseau électrique à un effondrement de tension.

Autrement dit, c'est la distance entre le point de fonctionnement nominal du réseau et le point d'effondrement de tension. Dans la conduite et l'exploitation des réseaux électrique, on essaye toujours de garder une marge de stabilité de tension la plus grande possible.

On peut remarquer aussi que, pour une valeur donnée  $P$  de la puissance demandée par la charge, il existe deux solutions de tension. La solution supérieure  $V_H$  correspondant à la valeur qui peut être atteinte en pratique et l'autre solution  $V_L$  est juste mathématiquement ; mais qui ne représente pas une valeur pratique. La justification de cette analyse est présentée comme suit :

On suppose une augmentation incrémentale de la charge qui déplace le point de fonctionnement à droite de la courbe. On peut voir que : la solution supérieure  $V_H$  devient plus faible, ce qui semble naturel ; Donc cette solution correspond à un point de fonctionnement normal ou stable. Par contre la solution inférieure  $V_L$  augmente simultanément avec la charge, ce qui n'est pas naturel. Donc cette solution correspond à un point de fonctionnement dégradé ou instable.

En outre, le courant correspondant à la solution  $V_L$  est beaucoup plus grand que celui correspondant à la solution  $V_H$ . De ce fait les pertes actives sont plus élevées. Par ailleurs, la tension  $V_L$  est beaucoup plus petite que  $V_H$  .

Finalement, on peut conclure que la partie supérieure de la courbe donne la région de fonctionnement stable. En conséquence, dans toute analyse consacrée aux problèmes de la stabilité statique de tension, l'intérêt est porté sur cette partie de la courbe.

### 3. Influence des composants du réseau sur la stabilité de tension

On a évalué la stabilité de tension en utilisant la courbe de bifurcation de tension, sous l'influence de plusieurs composants du réseau, récapitulés dans ce qui suit :

- Influence du facteur de puissance
- Influence de la nature de la charge.

#### Réseau d'application

La figure II.3, illustre le schéma synoptique du système d'application utilisée dans cette étude. Le réseau est composé d'un générateur qui alimente une charge via une ligne électrique d'une réactance de 0.15 pu. Le réseau comprend aussi des équipements de contrôle à savoir les dispositifs FACTS et d'un transformateur régleur en charge. La tension à la sortie du générateur est considérée fixe égale à 1pu.

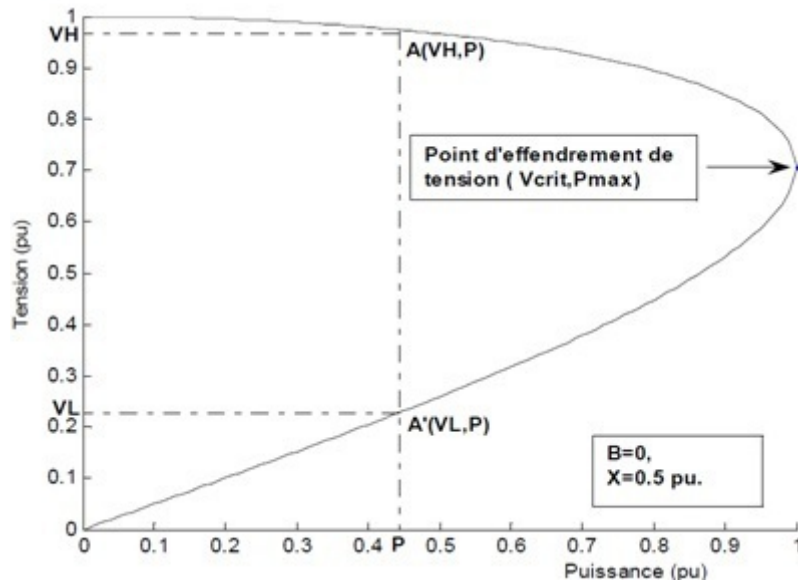


Fig II.2 Courbe de bifurcation de tension.



### 3.1. Influence du facteur de puissance de la charge sur la stabilité de tension

La figure II.4, représente la courbe de bifurcation de la tension pour différentes valeurs de  $B = \tan \vartheta$ . Il est clair que lorsque le facteur  $B$  diminue (c'est-à-dire  $\vartheta$  diminue) la puissance maximale transmise par la ligne augmente. Cette situation semble très logique, car lorsque la compensation de l'énergie réactive de la charge augmente (c'est-à-dire  $\vartheta$  diminue) ; la puissance maximale transmissible (marge de stabilité) augmente. La courbe en pointillé de la figure II.4 représente l'évolution du point critique (point d'effondrement de tension) en fonction du facteur  $B$ . Il est clair que la tension critique augmente quand le facteur  $B$  diminue ; de ce fait, une surcompensation de l'énergie réactive risque d'amener la valeur de la tension critique dans la région de fonctionnement normale. Ainsi on peut conclure que le facteur de puissance a un impact très significatif sur la caractéristique PV et donc sur la stabilité de tension. La puissance maximale transmissible par la ligne augmente avec le facteur de puissance. Donc la charge, qui possède un facteur de puissance relativement élevé, offre une marge de stabilité de tension satisfaisante.

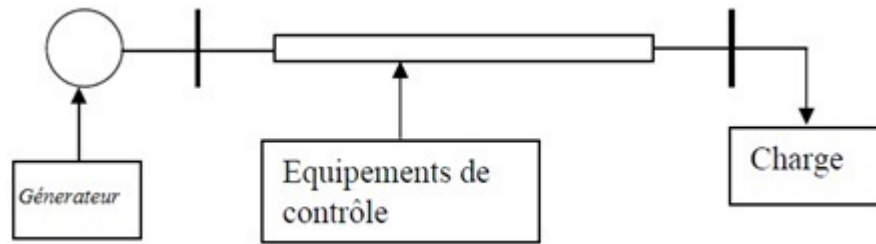


Fig II.3 Schéma synoptique du réseau d'application.

### 3.2. Influence de la nature de charge

Comme déjà mentionné précédemment, la stabilité de tension est très sensible à la nature de la charge. La modélisation standard des charges par le modèle PQ (puissance active et réactive constante) ne représente pas les caractéristiques réelles de celle-ci. Il existe d'autres modèles statiques (modèle du courant constant et d'impédance constante) qui représentent les puissances active et réactive consommées par la charge en fonction de la tension aux bornes de celle-ci.

Les trois modèles statiques sont réunis dans les deux équations :

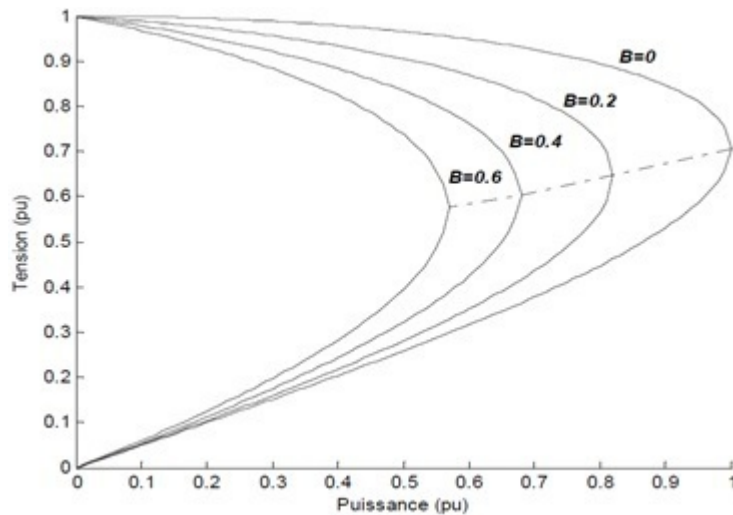


Fig II.4 Caractéristique PV pour différentes valeurs de  $B = \tan \vartheta$

Suivant les valeurs de  $n_p$  et  $n_q$ , on peut citer les trois modèles statiques suivants :

### 3.2.1. Modèle à puissance constante

C'est le modèle classique utilisé dans le calcul d'écoulement de puissance. Dans ce modèle, les puissances active et réactive sont considérées constante, elle ne dépend pas de la tension ( $n_p = n_q = 0$ ). La charge électrique est modélisée par les deux équations suivantes :

### 3.2.2. Modèle à courant constant

Dans ce modèle de charge, les puissances active et réactive dépendent directement de la tension. De ce fait, les exposants  $n_p$  et  $n_q$  sont égaux à 1. Les équations deviennent :

### 3.2.3. Modèle à admittance constante

Les puissances consommées par la charge sont fonction du carré de la tension, en remplaçant  $n_p$  et  $n_q$ , on trouve :

La figure II.5 montre la sensibilité de la courbe de bifurcation de la tension vis-à-vis de la nature de la charge. Le modèle à puissance constante ( $n=0$ ) est le cas le plus néfaste sur la stabilité statique de tension. Il possède le point d'effondrement le plus critique parmi les trois cas de simulation.

Les charges à courant constant ( $n=1$ ) ont un point critique plus éloigné que les charges à puissance constante. Avec ces charges, la probabilité d'occurrence d'un effondrement de tension est faible.

Pour les charges à admittance constante, il n'existe pas un point d'effondrement de tension. Donc il y a toujours un point de fonctionnement théoriquement stable.

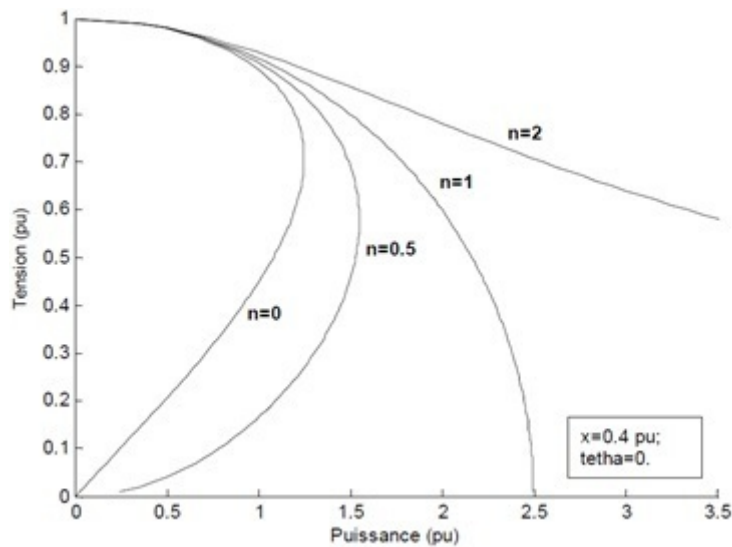


Fig II.5 Influence des modèles de charge sur la caractéristique PV

L'étude paramétrique de la stabilité de tension a montré que la nature de la charge est un paramètre essentiel dans l'étude de la stabilité de tension. Une charge de puissance constante ( $P=Q=\text{cte}$ ) est la plus pessimiste sur la stabilité de tension.

# Exercice

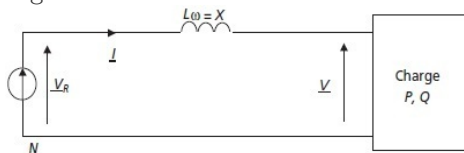


Série de TD

Exo n°1

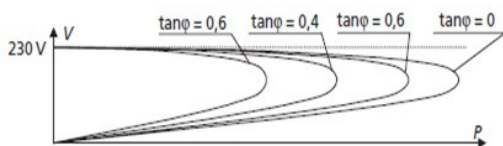
On s'intéresse à présent au schéma équivalent monophasé correspondant à la figure 1. On considèrera que la tension  $V_R$  est produite par une source de tension idéale et on utilisera dans les expressions la valeur de la réactance  $X = L\omega$ . On s'intéresse tout particulièrement à caractériser l'évolution de la valeur efficace  $V$  en fonction des puissances appelées par la charge  $P$  et  $Q$ .

Figure 1



1. Représenter le diagramme de Fresnel sans échelle reliant les complexes  $V_R$ ,  $V$  et  $I$  (supposé en déphasage arrière par rapport à  $V$ ). Faire apparaître sur ce diagramme l'angle  $\varphi = (I, V)$ .
2. Écrire les expressions littérales de  $\cos\varphi$  et  $\sin\varphi$  en fonction de  $V$ ,  $I$ ,  $P$  et  $Q$ .
3. En appliquant le théorème de Pythagore aux formes géométriques du diagramme de Fresnel de la question 1, former une équation regroupant uniquement  $V$ ,  $V_R$ ,  $X$ ,  $P$  et  $Q$ .
4. Proposer un changement de variable facilitant la résolution de cette équation. Résoudre alors cette équation en exprimant toutes les solutions possibles.
5. Que vaut  $V$  si  $P = Q = 0$  ? Exclure alors une des deux solutions et donner l'expression unique de la tension  $V$  en fonction de  $V_R$ ,  $X$ ,  $P$  et  $\tan\varphi$ .
6. Montrer qu'il existe une puissance maximale  $P_{\max}$ , pour chaque valeur de  $V_R$ ,  $X$  et  $\tan\varphi$ , au-dessus de laquelle la fonction  $V(P)$  n'est pas définie. Donner l'expression de  $P_{\max}$  en fonction de  $V_R$ ,  $X$  et  $\tan\varphi$ .
7. Calculer l'expression littérale de  $P_{\max}$  pour  $\cos\varphi = 1$ ,  $\cos\varphi = 0,8$  AR. Faire le lien avec la puissance apparente de court-circuit du réseau, c'est à dire la puissance apparente fournie lorsque la charge présente une impédance nulle.
8. Si le réseau considéré fournit 1 MW à sa charge sous 230 V, et ce avec un  $\cos\varphi$  de 0,9 AR, quelle est la valeur maximale de la réactance  $X$  que doit présenter ce réseau ?
9. La figure 2 représente la famille des courbes  $V(P)$  paramétrée par les valeurs de  $\tan\varphi$ . Repérer sur ces courbes les valeurs remarquables mises en œuvre précédemment.

Figure 2



Préciser la nature du phénomène. Ce phénomène s'exprime-t-il en réalité dans la distribution d'énergie électrique ?

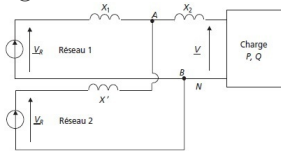
Exo n° 2;

Afin de palier le phénomène d'effondrement de la tension du réseau, il est nécessaire d'interconnecter au maximum les différents réseaux de distribution. Cette partie permet de justifier cette nécessité et présente quelques caractéristiques de sa réalisation. On considère à présent le réseau conforme au schéma de la figure 3 où on voit apparaître une connexion à mi-distance du réseau 2 sur le réseau 1. On note encore les réactances de lignes  $X$  (subdivisée en  $X_1$  et  $X_2$ ) et  $X'$ .

1. Le réseau 1 étant celui de l'exo1, quelle relation relie  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X$  ?
  2. Représenter le schéma équivalent de Thévenin du circuit situé à gauche des points A et B.
- Représenter alors le schéma équivalent total du circuit. On notera  $X_T$  la réactance totale équivalente aux imperfections des réseaux.

3. Quelle est l'expression littérale de  $X_T$  en fonction de  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X$ .

Figure 3



4. Calculer alors l'expression de la puissance maximale que peut fournir cette installation.
5. Que valent les puissances maximales que peuvent fournir les réseaux seuls, c'est à-dire s'ils n'étaient pas connectés. Comparer alors la puissance maximale disponible en réseaux connectés par rapport aux réseaux indépendants.

# Activité d'auto-évaluation



## Exercice 1

---

[Solution p 15]

*L'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes*

- Vraie
- Faux

## Exercice 2

---

[Solution p 15]

*Le phénomène de l'effondrement de tension est caractérisé par une augmentation progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices.*

- Vraie
- Faux

## Exercice 3

---

[Solution p 15]

*Le phénomène de l'effondrement de tension est caractérisé par une augmentation progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices*

- Vraie
- Faux

## Exercice 4

---

[Solution p 15]

*La figure suivante présente la courbe de bifurcation du système étudié. La courbe montre l'évolution de la tension en fonction de la puissance active.*

*D'après la figure on peut remarquer que lorsque la puissance demandée augmente, la tension augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur critique  $V_{crit}$*

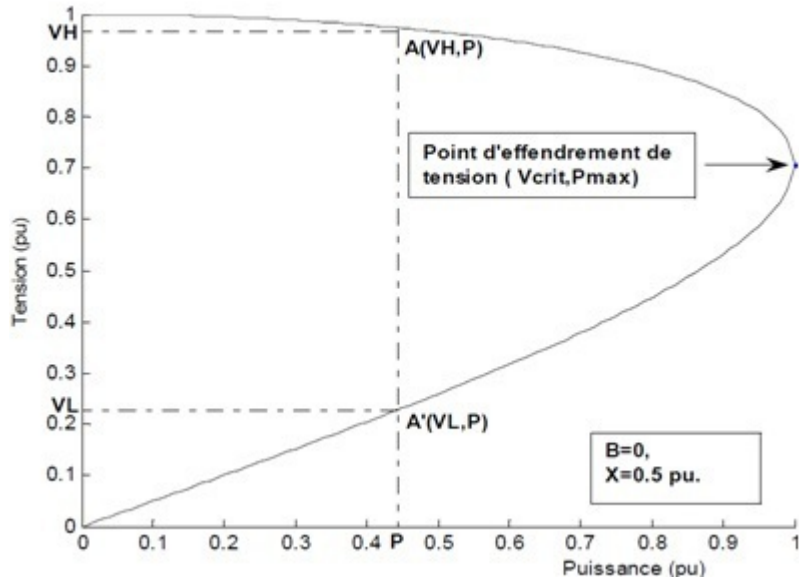


Fig II.2 Courbe de bifurcation de tension.

- Vraie  
 Faux

## Exercice 5

[Solution p 15]

L'étude paramétrique de la stabilité de tension a montré que la nature de la charge est un paramètre essentiel dans l'étude de la stabilité de tension.

- Vraie  
 Faux

## Exercice 6

[Solution p 15]

La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être :

- Manque de tension  
 Diminution des pertes réactive du réseau.

# Solution des exercices



## > Solution n° 1

- Vraie
- Faux

## > Solution n° 2

- Vraie
- Faux

## > Solution n° 3

- Vraie
- Faux

## > Solution n° 4

- Vraie
- Faux

## > Solution n° 5

- Vraie
- Faux

## > Solution n° 6

- Manque de tension
- Diminution des pertes réactive du réseau.

# Bibliographie



- [1] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations Part 2 : Voltage Dips and Short Interruptions Working Group UIE Power Quality 1996
- [2] A. Kusko, M-T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, Mc Graw Hill, 2007.
- [3] F. Ewald Fuchs, M.A.S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008
- [4] R.C. Dugan, Mark F. Granaghan, Electrical Power System Quality, McGraw Hill, 2001
- [5] Cahiers techniques Schneider N° CT199, CT152, CT159, CT160 et CT1
- [6] Qualité de l'énergie, Cours de Delphine RIU, INP Grenoble
- [7] Marceau, R.J., Sirandi, M., Soumaré, S., Do, X.-D., Galiana, F., Mailhot, R., , A review of signal energy analysis for the rapid determination of dynamic security limits (Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering - IEEE Canada - October 1996, Volume 21, Number 4)
- [8] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, ERPI Power System Engineering Series, ISBN 007035958X

