

## UNE NOUVELLE MÉTHODE DE CONSTRUCTION DE LA COURBE P-V POUR L'ANALYSE DE LA STABILITÉ DE TENSION

Mohammed Adel DJARI<sup>1</sup>, Lahouaria BENASLA<sup>2</sup>, Walid RAHMOUNI<sup>3</sup>

*The conventional power flow solutions (PF) diverge because of the singularity of the jacobian matrix. In continuous power flow method (CPF), divergence problem doesn't arise. The drawback of the CPF is the need for introducing an additional equation. The convergence speed becomes slow when analyzing large power systems. The proposed method is based on the PF. It avoids the slow convergence speed of the CPF and the Jacobian matrix singularity by modifying the initial power flow conditions around the critical point. The method allows to plot the complete P-V curve and is appreciated for its efficiency and its speed of execution*

*L'écoulement de puissance classique (PF) diverge autour du point d'effondrement de tension à cause de la singularité de la matrice jacobienne. L'écoulement de puissance continu (CPF) permet de surmonter cette divergence en introduisant une équation supplémentaire. Sa vitesse de convergence devient lente lors de l'analyse des systèmes importants. La méthode proposée est basée sur le PF. Elle évite la convergence à vitesse lente du CPF et la singularité de la matrice jacobienne en modifiant les conditions initiales autour du point d'effondrement. La méthode permet d'avoir la courbe P-V complète et s'apprécie par son efficacité, sa précision et sa rapidité d'exécution.*

**Mots clés :** Stabilité de tension, Nouvelle méthode, Courbe P-V, Ecoulement de puissance classique, CPF, Facteur de charge

### 1. Introduction

Le problème de stabilité de tension est un phénomène qui est toujours une des préoccupations des exploitants de réseau de transport d'électricité; compte tenu de nombreux incidents qui sont survenus depuis plusieurs années et qui persistent toujours [1].

---

<sup>1</sup> Dept d'Electrotechnique, Laboratoire d'Optimisation des Réseaux Electriques, Université USTO, BP 1505 El Mnaouar, Oran, Algeria, e-mail: mohammedadel.djari@univ-usto.dz

<sup>2</sup> Dept d'Electrotechnique, Laboratoire d'Optimisation des Réseaux Electriques, Université USTO, BP 1505 El Mnaouar, Oran, Algeria, e-mail: jbenasla@yahoo.fr

<sup>3</sup> Dept d'Electrotechnique, Laboratoire d'Optimisation des Réseaux Electriques, Université USTO, BP 1505 El Mnaouar, Oran, Algeria, e-mail: walid.rahmouni@univ-usto.dz

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.

Dans certaines conditions critiques causées par l'augmentation brusque de la charge ou bien par la perte de groupes de production ou de lignes [2], le réseau peut connaître un phénomène d'écroulement de tension. C'est le processus par lequel la séquence des événements accompagnants l'instabilité de tension conduit à un black-out, ou du moins à des tensions anormalement basses [3]. Cette instabilité résulte de l'incapacité du système de production à assurer la puissance demandée par la charge.

Pour évaluer la stabilité statique de la tension d'un réseau électrique, plusieurs méthodes ont été développées, parmi lesquelles, nous citons la méthode des L-indicateurs [4], l'analyse P-V [5], l'analyse Q-V [6] et le CPF [7].

La méthode des courbes P-V basée sur l'écoulement de puissance classique est la technique d'analyse la plus répandue. En fait, de nombreux indicateurs de proximité sont identifiés en utilisant ces courbes et de nombreux phénomènes d'effondrement de la tension peuvent être très commodément expliqués à l'aide de ces mêmes courbes [8].

L'inconvénient de cette méthode, c'est que le problème de l'écoulement de puissance classique devient divergent lorsque le point de fonctionnement s'approche du point critique ou point d'effondrement de tension. La divergence de la méthode qui est due à la singularité de la matrice jacobienne, ne permet pas la construction de la partie inférieure de la courbe P-V, et donc d'avoir la courbe complète [9]. Cette courbe permet de déterminer tous les points stables et instables et donc elle indique le point critique de la limite de stabilité de tension, qui se situe au nez de la courbe.

Plusieurs méthodes se basant sur la reformulation des équations d'écoulement de puissance, ont été proposées pour construire la courbe P-V complète [10]. Parmi ces méthodes, nous citons l'écoulement de puissance continu (CPF) qui a été proposé par Venkataramana Ajjarapu en 1992. Le CPF est considéré comme étant un outil de base pour obtenir les courbes P-V complètes. Il possède plusieurs techniques parmi lesquelles, nous citons le CPF en coordonnées cartésiennes, le CPF en coordonnées polaires. L'implémentation de la version cartésienne est assez simple et similaire à l'implémentation de la version polaire, nécessitant une modification minimale de la structure de l'algorithme [11].

Malgré les avantages indéniables du CPF, il présente plusieurs inconvénients. Il surmonte la divergence de l'écoulement de puissance classique en introduisant une équation et une variable supplémentaire. Il souffre d'une vitesse de convergence lente, ce qui le rend défavorable pour l'analyse de la stabilité statique de la tension des réseaux électriques de grande taille [12].

Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode qui permet le tracé de la courbe P-V complète. Cette méthode surmonte les inconvénients de l'écoulement de puissance classique (PF) et de l'écoulement de puissance continu (CPF).

La méthode est fondée sur le calcul l'écoulement de puissance classique utilisant la méthode de Newton-Raphson. Elle évite la singularité de la matrice jacobienne en modifiant les tensions initiales autour du point d'effondrement. Pour orienter cette méthode vers les solutions appropriées, les valeurs des tensions initiales doivent être choisies avec beaucoup de soin.

Pour accélérer la vitesse convergence, il était judicieux d'utiliser un incrément et/ou un décrement du facteur de charge  $\Delta\lambda$  variable.

Nous avons appliqué la méthode sur deux réseaux standards (IEEE 14 nœuds et IEEE 9 nœuds). Les résultats de la méthode proposée sont comparés à ceux obtenus par le CPF conventionnel. La méthode proposée est efficace, précise, simple à mettre en œuvre et donne des résultats similaires à ceux obtenus par le CPF mais avec un temps de calcul faible.

## 2. L'écoulement de puissance continu

Il est utilisé pour déterminer les solutions de l'écoulement de puissance continu à partir de la condition de charge initiale jusqu'à la limite de stabilité de la tension [13].

Le problème de l'écoulement de puissance classique, c'est qu'il devient divergent lorsque le point de fonctionnement s'approche d'un point critique. Cette méthode classique ne trace pas la partie inférieure de la courbe de tension. Le CPF permet d'étudier ce genre de point [9].

D'un point de vue mathématique, l'écoulement de puissance continu est une technique d'homotopie et permet d'explorer la stabilité des équations du système électrique en reformulant légèrement les équations d'écoulement de puissance. L'incrément de la charge est considérée comme une nouvelle variable du problème d'écoulement de puissance. Les nouvelles équations de l'écoulement de puissance sont donc exprimées en fonction de la tension  $V$ , de l'angle de tension  $\delta$  et le facteur de charge  $\lambda$ . Les équations des puissances reformulées au nœud  $i$  sont:

$$\Delta P_i = \lambda(P_{Gi} - P_{Li}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = \lambda(Q_{Gi} - Q_{Li}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$  représentent les puissances générées actives et réactives et  $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$  sont des puissances consommées.  $V_i \angle \delta_i$  représente la tension au nœud  $i$  et  $Y_{ij} \angle \theta_{ij}$  est le  $(i, j)^{\text{ème}}$  élément de la matrice d'admittance du système.

Le système d'état stable est représenté par l'équation suivante:

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (3)$$

Le CPF est un processus itératif qui consiste en une étape prédicteur-correcteur pour trouver une trajectoire de solutions pour l'ensemble des équations de l'écoulement de puissance.

Le processus illustré par la Fig. 1, commence à partir d'une solution connue, c'est-à-dire du point «A» qui correspond à la solution de l'écoulement de puissance au régime de fonctionnement normal et utilise un prédicteur tangent pour estimer une solution ultérieure représentée par le point «B». Cette estimation est ensuite corrigée en utilisant l'écoulement de puissance classique pour trouver la solution exacte «C» [14, 15].

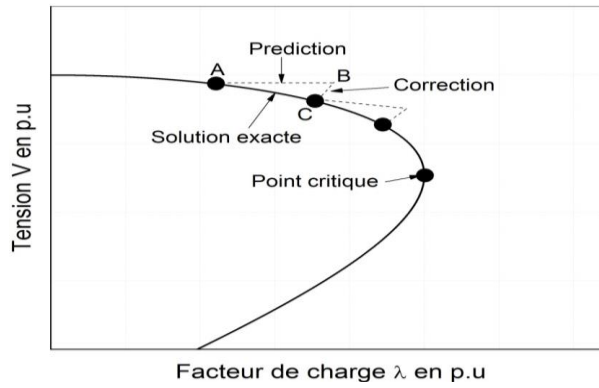


Fig.1. Principe du CPF.

### 3. Description de la nouvelle méthode

La méthode proposée dans cet article est décrite en s'appuyant sur la courbe illustrée par la Fig. 2. Cette courbe se divise en trois zones:

La première zone correspond à la trajectoire du point  $P_{s1}$  au point  $P_{s2}$ . Dans cette zone, la solution  $V_s$  décroît quand le facteur de charge  $\lambda$  augmente, ce qui semble naturel. C'est une zone de fonctionnement stable.

La deuxième zone correspond à la trajectoire du point  $P_{i1}$  au point  $P_{i2}$ . Dans cette zone, la solution  $V_i$  croît avec l'augmentation de  $\lambda$ , ce qui n'est pas naturel. C'est une zone de fonctionnement instable.

La troisième zone correspond à la trajectoire du point  $P_{s2}$  au point  $P_{cr}$  (fonctionnement stable) et du point  $P_{i2}$  au point  $P_{cr}$  (fonctionnement instable). Cette zone contient le point d'effondrement de tension ou point de bifurcation  $P_{cr}$  de coordonnées  $(\lambda_{\max}, V_{cr})$ . En ce point, les deux solutions  $V_s$  et  $V_i$  se juxtaposent pour former une solution unique pour la puissance maximale.

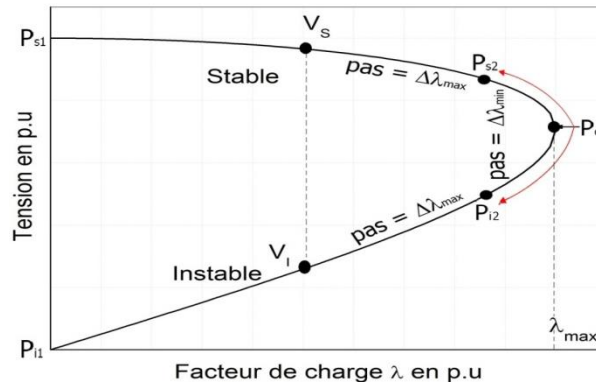


Fig. 2. Principe d'ajustement du pas  $\Delta\lambda$ .

Le calcul d'écoulement de puissance en appliquant la méthode conventionnelle de Newton-Raphson à chaque incrémentation de la charge diverge au point  $P_{cr}$  à cause de singularité de la matrice jacobienne due au mauvais conditionnement autour de la charge maximale. La divergence de la méthode ne permet pas d'avoir la partie inférieure de la courbe P-V [16].

Après avoir atteint le point de bifurcation  $P_{cr}$ , si la charge est progressivement réduite, l'application de l'écoulement de puissance classique ne permettra pas, malheureusement, d'avoir la partie inférieure de la courbe. La trajectoire des courbes P-V retrace la partie supérieure de la courbe.

L'objectif de la méthode proposée est d'améliorer ce conditionnement pour obtenir la courbe P-V complète et exacte en se basant sur l'écoulement de puissance classique. Cette amélioration est réalisée en modifiant les conditions initiales autour du point de charge maximale  $\lambda_{\max}$  qui correspond au niveau de tension critique  $V_{cr}$ .

Cette modification est réalisée en exploitant la faible variation de la tension autour du point de bifurcation.

La question qui se pose est: comment déterminer les conditions appropriées qui permettent d'avoir la partie inférieure de la courbe P-V? L'application des équations suivantes, nous a permis d'identifier les nouveaux points:

$$V_j^{cr+1} = V_j^{cr} - \eta_V \quad (4)$$

$$\delta_i^{cr+1} = \delta_i^{cr} - \eta_\delta \quad (5)$$

Où,  $V_j$  sont les modules des tensions des nœuds de charges,  $\delta_i$  les angles de tension de tous les nœuds sauf le nœud bilan et  $\eta_V$ ,  $\eta_\delta$  sont des constantes qui permettent de déterminer les nouvelles valeurs initiales.

Pour accélérer la convergence du programme, tout en gardant une très grande précision pour construire la courbe complète, il est judicieux de travailler avec un pas  $\Delta\lambda$  variable:

$\Delta\lambda$  doit être grand au départ,  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{\max}$ , lorsque l'on est loin du point d'effondrement  $P_{cr}$ .

$\Delta\lambda$  doit être faible,  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{\min}$ , lorsque l'on se retrouve au voisinage du point  $P_{cr}$ , c'est la trajectoire du point  $P_{s2}$  au point  $P_{i2}$ .

Une fois, on s'éloigne du point critique, le pas est à nouveau augmenté à  $\Delta\lambda_{\max}$ , c'est la trajectoire du point  $P_{i2}$  au point  $P_{il}$  dans la zone d'instabilité.

La détermination des points  $P_{s2}$  et  $P_{i2}$  est basée sur les étapes suivantes:

**Etape 1:** La partie supérieure de la courbe P-V est tracée en faisant un calcul d'écoulement de puissance classique à chaque incrémentation de la charge d'un pas égale à  $\Delta\lambda_{\max}$  jusqu'à la divergence du programme à  $\lambda_{div}$ . Cette divergence est testée par un nombre d'itérations  $n_i$  très important car généralement la méthode itérative de Newton-Raphson converge dans un nombre raisonnable d'itérations (quatre à cinq). Le point d'effondrement  $P_{cr} \in [\lambda_{div} - \Delta\lambda_{\max}, \lambda_{div}]$ . La charge ( $\lambda_{div} - \Delta\lambda_{\max}$ ) correspond à  $P_{s2}$ .

**Etape 2:** Arrivée au point  $P_{s2}$ , et pour obtenir le point exact d'effondrement de tension, c'est-à-dire le point  $P_{cr}$ , le pas d'incrément est réduit à  $\Delta\lambda_{\min}$ . En  $P_{cr}$ , le programme diverge à cause de la singularité de la matrice jacobienne. En ce point et pour garantir la continuité de la courbe P-V, les valeurs des modules et des phases des tensions exprimées par les équations (4) et (5) sont prises comme des nouvelles valeurs initiales pour faire le calcul d'écoulement de puissance classique à chaque décrémentation de la charge avec un pas faible égale à  $\Delta\lambda_{\min}$ . Pour que cette opération ne rend pas le calcul lent, le pas est à nouveau réajusté à  $\Delta\lambda_{\max}$ , une fois le facteur de charge devient inférieur à  $(\lambda_{cri} - c * \Delta\lambda_{\min})$  où  $c$  est une constante. Cette charge correspond à  $P_{i2}$ .

**Etape 3:** Arrivée au point  $P_{i2}$ , le pas de décrémentation de la charge est de nouveau réajusté à  $\Delta\lambda_{\max}$  car le nombre d'itérations requis pour la convergence redevient moins important.

**Etape 4:** Au point  $P_{i1}$ , il faut utiliser un test d'arrêt. Ce test consiste à stopper le processus si le facteur de charge  $\lambda$  devient négatif.

Les étapes précédentes sont décrites par l'organigramme illustré par la Fig. 3.

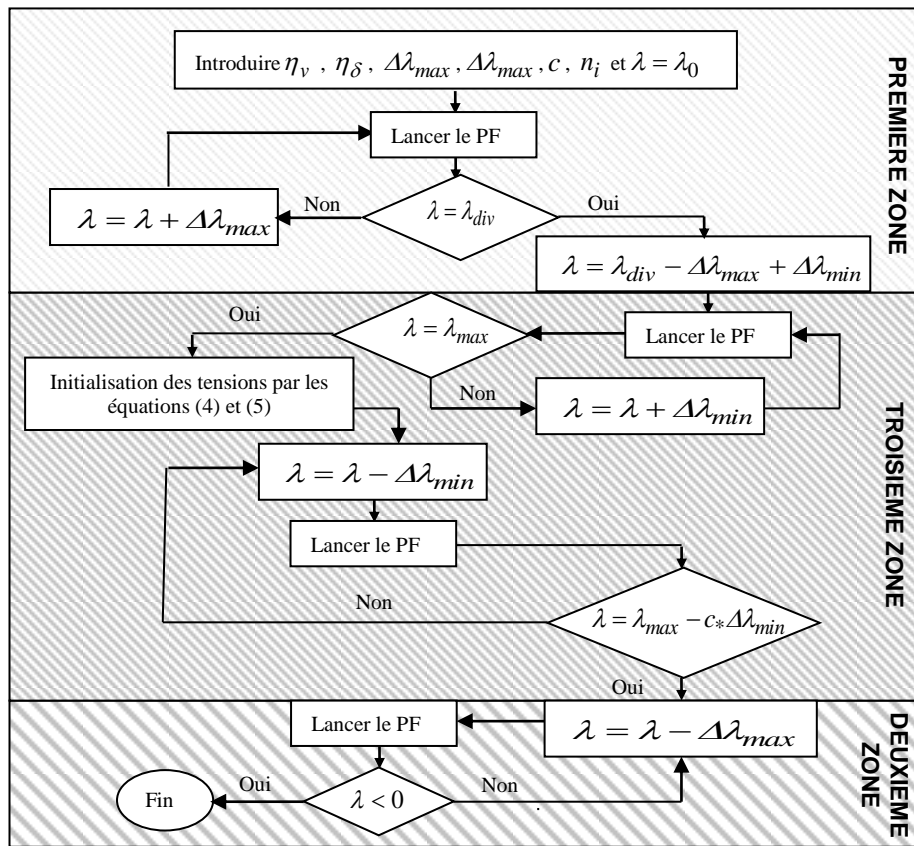


Fig. 3. Organigramme de la méthode proposée

#### 4. Simulations

Comme mentionné auparavant, les tests sont portés respectivement sur deux réseaux standards: le réseau IEEE 9 nœuds et le réseau IEEE 14 nœuds.

Le réseau IEEE-14 nœuds, dont la structure est illustrée par la Fig. 5, est composé de cinq générateurs, trois sont utilisés uniquement en compensateur synchrone et les deux autres, sont des générateurs synchrones. Il comporte onze charges et 20 lignes de transmission [19]. Ses paramètres sont définis dans [20].

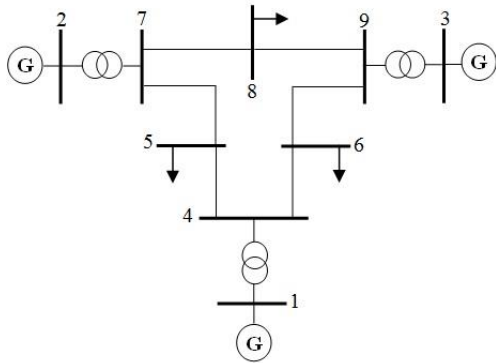


Fig. 4. Réseau IEEE 9-nœuds.

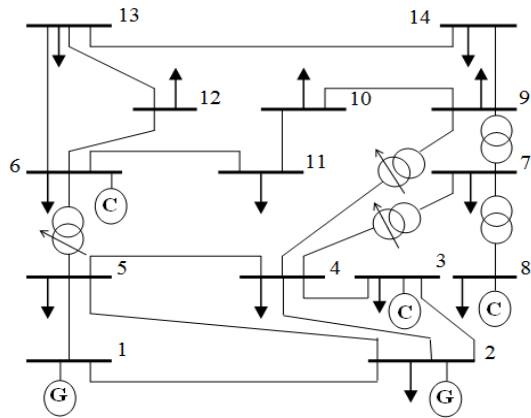


Fig. 5. Réseau IEEE 14-nœuds.

Les paramètres de la méthode proposée sont :

$$\eta_\nu = 0.1 \, p.u., \, \eta_\delta = 0.1 \, p.u., \, \Delta\lambda_{\min} = 10^{-4} \, p.u., \, \Delta\lambda_{\max} = 10^{-1} \, p.u., \, c = 100 \text{ et } n_i = 10.$$

Pour le réseau IEEE-9 nœuds  $\lambda_{div} = 2.7 p.u$  et pour le réseau IEEE-14 nœuds  $\lambda_{div} = 4 p.u$ .

Une analyse rationnelle nécessite une comparaison entre les résultats obtenus respectivement par le CPF et la nouvelle méthode proposée dans cet article. Nous avons reporté sur les mêmes Figs., les courbes P-V pour les deux réseaux (Fig. 6.a et 6.b):

- Avec le CPF, les graphes sont en trait continu.
- Avec la nouvelle méthode, les graphes sont en pointillés.



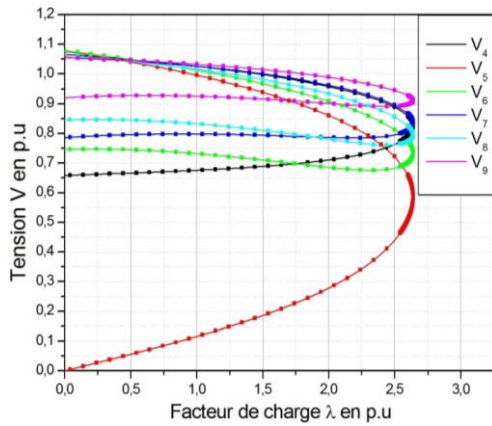


Fig 6.a Courbes P-V pour tous les nœuds du système IEEE 9 nœuds

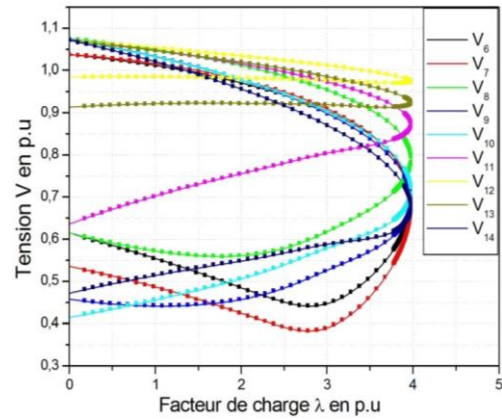


Fig 6.b Courbes P-V pour tous les nœuds du système IEEE 14 nœuds.

Les graphiques des Figs. 6.a et 6.b ne peuvent pas être aisément comparés, donc deux autres graphiques 7.a et 7.b, n'illustrant que les variations des tensions des deux nœuds les plus sensibles à l'augmentation de la charge, sont tracés pour vérifier la performance de la méthode proposée.

La Fig. 7.a représente les caractéristiques de bifurcation pour les deux nœuds critiques du réseau IEEE 9, à savoir le nœud 5 et le nœud 6. Le Point d'effondrement de tension de ce réseau est estimé respectivement à  $(\lambda_{cri} = 2.6413 \text{ p.u.}, V_{cri} = 0.5597 \text{ p.u.})$  en appliquant le CPF et à  $(\lambda_{cri} = 2.6412 \text{ p.u.}, V_{cri} = 0.5597 \text{ p.u.})$  en utilisant la nouvelle méthode.

La courbe, illustrée par la Fig. 7.b, montre l'évolution de la tension des deux nœuds du réseau IEEE-14 bus les plus sensibles à l'augmentation de la charge en fonction du facteur de charge  $\lambda$ , à savoir les nœuds 10 et 14.

Le Point d'effondrement de tension est évalué à  $(\lambda_{cri} = 3.9773 \text{ p.u.}, V_{cri} = 0.6777 \text{ p.u.})$  en appliquant le CPF conventionnel et à  $(\lambda_{cri} = 3.9768 \text{ p.u.}, V_{cri} = 0.677 \text{ p.u.})$  en utilisant la nouvelle méthode.

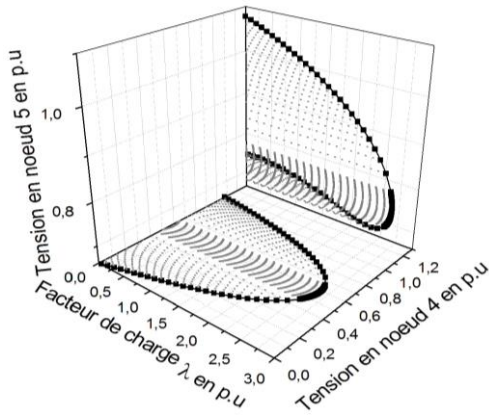


Fig 7.a Courbes P-V pour les deux nœuds les plus sensibles du système IEEE 9 nœuds.

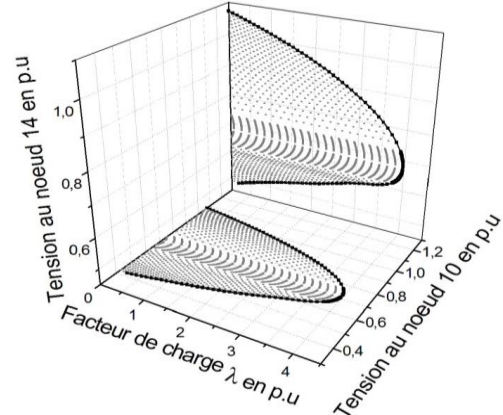


Fig 7.b Courbes P-V pour les deux nœuds les plus sensibles du système IEEE 14 nœuds

Nous pouvons remarquer d'après la Fig. 7.a ou 7.b, que la variation de la tension dans les deux courbes est différente, ce qui explique que les deux nœuds donnent des réponses différentes en termes d'instabilité de tension.

Le nombre de points est important quand la courbe tracée par la nouvelle méthode approche de la charge maximale. Ce qui nous a conduits à une détermination précise des points d'effondrement des deux réseaux.

Le principal critère pour différencier deux méthodes concerne le temps de calculs. En terme de ce temps, nous avons comparé les résultats obtenus avec notre méthode et ceux obtenus avec le CPF.

La Fig. 8 compare les temps relatifs aux deux méthodes.

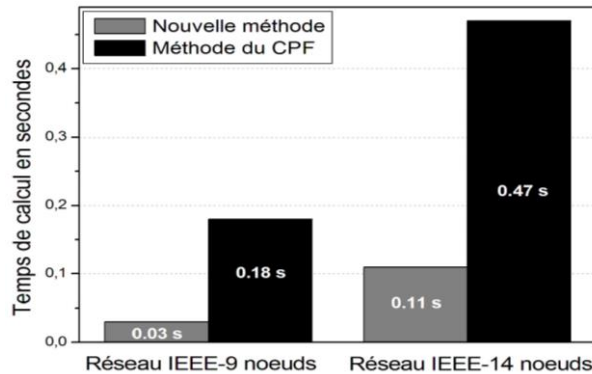


Fig. 8. Temps de calcul de la nouvelle méthode et le CPF.

Il ressort clairement de cette figure que notre méthode présente l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul et que le CPF est plus lourd en termes de temps.

Les résultats obtenus pour le réseau IEEE-9 nœuds avec notre méthode, prennent un temps approximatif de 0.03 s. L'utilisation du CPF prend un temps

qui dépasse les 0.18 secondes. L'amélioration du temps de calcul grâce à notre méthode par rapport au CPF est alors de 83.33 %.

Pour le réseau IEEE-14 nœuds, le temps de calcul estimé en appliquant notre méthode est environ 0.11s et pour le CPF autour de 0.47 s. Nous avons donc réalisé, en considérant la nouvelle méthode, une diminution de 0.36 s, ce qui implique un gain en temps égal à 76.6 %.

Les chiffres présentés démontrent la pertinence de notre méthode en termes de temps de résolution.

## 5. Conclusions

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle méthode simple pour construire la courbe P-V complète. Le tracé de cette dernière aide à analyser la limite de la stabilité de la tension d'un réseau d'énergie électrique.

L'objectif de la méthode est d'améliorer le conditionnement de la matrice jacobienne autour du point d'effondrement pour obtenir la courbe P-V complète et exacte en se basant sur l'écoulement de puissance classique. Cette amélioration est accomplie en modifiant les conditions initiales d'écoulement de puissance au point de bifurcation.

Pour accélérer la convergence de la méthode, tout en gardant une très grande précision pour construire la courbe complète, il était judicieux de travailler avec un pas  $\Delta\lambda$  variable.

Nous avons montré, par des simulations faites sur les réseaux standards IEEE-9 et IEEE-14 nœuds, que la nouvelle méthode est précise et beaucoup plus facile à mettre en œuvre que celle du CPF. Elle présente aussi l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul.

Nous constatons que, sans aucune exception, les graphes obtenus par la nouvelle méthode sont identiques à ceux obtenus en utilisant le CPF.

La confrontation des résultats de la nouvelle méthode avec les résultats obtenus en appliquant le CPF atteste d'un bon accord et la valide.

## REFERENCES

- [1] O. Alizadeh Mousavi, R. Cherkaoui, Literature Survey on Fundamental Issues of Voltage and Reactive Power Control, *thèse de doctorat soutenue à l'Ecole polytechnique de lausanne en 10. June 2011.*
- [2] J.Modarresi, E. Gholipour, A.Khodabakhshian, A comprehensive review of the voltage stability indices, *elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 63, p 1-12, 2016.
- [3] L. wein, Le délestage optimal pour la prévention des grandes pannes d'électricité, *thèse de doctorat soutenue à l'Ecole polytechnique DE GRENOBLE en 6 Juillet 2009.*
- [4] M. Kamel , A.A Karrar , A.H. Eltom, Development and Application of a New Voltage Stability Index for On-Line Monitoring and Shedding, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 33, p 1231 – 1241, 2018.

- [5] X. Chen D. Bromberg, X. Li, L. Pileggi; G. Hug, Development and Application of a New Voltage Stability Index for On-Line Monitoring and Shedding, *IEEE conference North American Power Symposium*, 2015.
- [6] A. K. Ramasamy, R. Verayiah, I. Zainal Abidin, etc, Study on P-V Curve and V-Q Curve of an Unbalanced ThreePhase System with Different Static Loads, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016.
- [7] V. Ajjarapu, C. Christy, The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 7, p 416- 423, 2018.
- [8] L. D. ARYA, H. K. VERMA, A method for tracing pv curve for voltage stability analysis with voltage dependent loads, *Taylor & Francis*, 2014.
- [9] L. Lenoir, Operateur auto ma tique de réseau électrique, *thèse de doctorat soutenue à l'Ecole de technologie supérieure université du Québec en 2009*.
- [10] M. Z. Laton, I. Musirin, T. K. Abdul Rahman, Voltage Stability Assessment via Continuation Power Flow Method, *Int journal of electrical and electronic systems research*, vol 1, 2008.
- [11] N. Acharya ; R. G. Kavasseri, A faster continuation power flow in rectangular coordinates for voltage stability assessment, *conference de Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston USA, 2016 .
- [12] I.u. Axente, I. Stratan, Power flow in complex form based loadability assessment, *Meridian Ingineresc*, Vol 2, 2012.
- [13] C.M. Reddy, Power System Voltage Stability Analysis, *thèse de master soutenue à Indian institue en 10. June 2011*
- [14] M. Beiraghi, A.Rabii, S. Mobaieen, etc, A Modified Approach for Continuation Power Flow, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2012.
- [15] P. Mehta, P. Bhatt, V. Pandya , Optimal selection of distributed generating units and its placement for voltage stability enhancement and energy loss minimization, *Elsevier Ain Shams Engineering Journal*, 2015.
- [16] J. Jasni, H. Hizam, M.Z.A Kadir, N. Marium S. Bahari, Steady-state voltage stability analysis using continuation power flow : a review, *Journal of Industrial Technolog en 2008*.
- [17] D.H Zerigat, L. Benasla, A. Belmadani, M. Rahli, Galaxy-based search algorithm to solve combined economic and emission dispatch, *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, Vol. 78, 2016.
- [18] S. Kumar, M.K. Kirar, G. Agnihotri, Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol 1, 2012.
- [19] R. Aazami, S. Daniar, V. Talaeizadeh, Transmission loss allocation in pool-based electricity market based on incremental loss index, *U.P.B. Sci. Bull, Series C*, Vol. 79, Iss. 1, 2017.
- [20] V. Holkar, A. Choubey, Enhancement of voltage profile for IEEE-14 Bus System by Using STATIC-VAR Compensation (SVC) when Subjected to Various Changes in Load, *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, vol 1, 2014.