

IDENTIFICATION DES NŒUDS CRITIQUES DU RESEAU HAUTE ET MOYENNE TENSION (HT ET MT) DE LA VILLE DE N'DJAMENA

Abstract

Due to the inductive and capacitive nature of loads, the transmission of reactive power through transmission lines can cause network instability issues. In this work, we seek methods for power distribution and voltage stability analysis in the SNE power grid using the Newton-Raphson method; the study of voltage-reactive sensitivity ($\Delta U/\Delta Q$) and the QU and PU curves. This study shows that nodes T100 and LAM have respective sensitivities of 1.7813% Mvar and 0.6243% Mvar, with a QU curve with a slope resembling a straight line and a PU curve with a steep slope (T100) followed by a moderate slope for the LAM node. Given the voltage sensitivity and node curves, T100 is a critical node, followed by LAM, which is moderately stable; the rest are stable.

Résumé

En raison de la nature inductive et capacitive des charges, la transmission de puissance réactive par les lignes de transmission peut entraîner des problèmes d'instabilité du réseau. Dans ce travail, nous cherchons des méthodes de répartition des puissances et d'analyse de la stabilité de la tension dans le réseau électrique de la SNE par la méthode de Newton-Raphson ; l'étude de la sensibilité tension –réactive($\Delta U/\Delta Q$) et les courbes QU et PU. Il ressort de cette étude que le nœud T100 et LAM ont une sensibilité respective de 1,7813% Mvar et 0,6243 % Mvar avec une courbe QU de pente ressemblant à une droite linéaire et une courbe PU de pente importante (T100) suivie de pente modérée pour celle du nœud LAM. Vue la sensibilité de tension et les courbes des nœuds, T100 est un nœud critique suivie de celui de LAM qui est moyennement stable ; les reste sont stables.

Mots clés : stabilité ; sensibilité ; puissance.

Introduction

Dans de nombreux pays, la consommation d'électricité augmente de jours en jours du fait de l'industrialisation, de l'urbanisation et la croissance démographique[1], [2] créant l'instabilité entre la production et la consommation grâce à la nature inductive et capacitive des charges et des lignes. Les chercheurs et les gestionnaires d'énergie électrique travaillent d'arrachepied pour maintenir constant la stabilité par le développement des équipements de

32 puissance par le biais de l'électronique de puissance qui prend une place important dans la
33 production, le transport et distribution d'énergie électrique[3].

34 La stabilité d'un réseau électrique est un phénomène désignant sa capacité à garder un
35 fonctionnement normal après des perturbations, même s'il y a une surcharge, une défaillance
36 de composant ou une variation de charge[4]. Elle est bonne pour garantir une alimentation
37 fiable et continue aux consommateurs. Partout dans le monde, assurer la stabilité devient un
38 enjeu stratégique pour la sécurité des réseaux. Pour analyser ce phénomène, l'étude de la
39 sensibilité tension –réactive($\Delta U/\Delta Q$) permet d'identifier les nœuds critiques et nous rassure
40 du comportement du réseau face aux variations de charge et de la méthode de newton-
41 raphson pour la résolution de l'équation de l'écoulement de puissance grâce à sa rapidité et sa
42 précision

43 Au Tchad, et dans le pays Africain, le réseau électrique souffre des nombreuses
44 faiblesses telles que : faible capacité de production, pertes technique élevées et croissance
45 rapide de la demande[5]. Ces conditions rendent le réseau particulièrement vulnérable aux
46 instabilités en tension pouvant entrainer des chutes brusques des tensions voir des coupures
47 générale (blackout). Dans cette situation, la stabilité du réseau haute tension (HT) devient
48 inévitable aux chutes des tensions. L'analyse de cette stabilité, en particulier à travers les
49 courbes QU et la sensibilité UQ, permet d'identifier les jeux de barres critique et d'évaluer la
50 capacité du réseau à maintenir des tensions acceptables en présence des perturbations[5], [6]

51 Dans cette études, l'attention est portée sur le réseau de transport de la SNE ou les incidents
52 de chute de tension sont courant. **Comment analyser et améliorer la stabilité du réseau
53 électrique de la SNE face aux perturbation des tensions pour garantir une alimentation
54 électrique fiable et continue aux consommateur ?**

55 Cet article permet une étude de stabilité du réseau HT de la SNE de la ville de N'Djamena,
56 basé sur sa modélisation sous le logiciel NEPLAN ; sur la méthode de Newton-Rapson et la
57 sensibilité de tension-réactive.

58 L'objectif de cette étude est de diagnostiquer les points faibles du réseau c'est-à-dire les jeux
59 de barres sensible, instable et faire de proposer des solutions technique adaptées pour
60 contribuer à l'amélioration de la performeuse globale du système électrique.

61

62

63

64 I) Modélisation du réseau

65 1) Concept d'étude

66 Pour garantir et analyser stabilisation de la tension dans un réseau électrique, il est nécessaire
67 pour nous dans cet article d'utiliser des outils d'analyse moderne talque :

68 ➤ La méthode de Newton-Raphson

69 ➤ Les courbes PV et QV

70 ➤ L'analyse de sensibilité

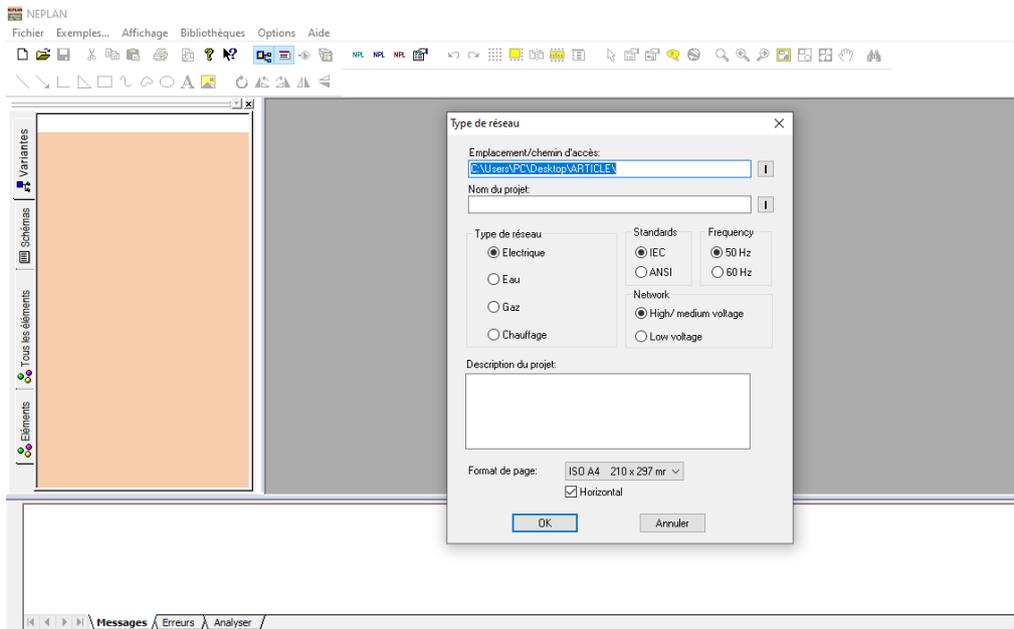
71 2) Présentation du réseau

72 Le réseau haute tension de N'Djamena est un réseau bouclé, il est constitué de quatre (4)
73 sous-stations (N'Djamena, garangouso, lamadji et Gassi), des centrales thermique et solaire
74 de productions (farcha I, II, MBH, catarpilard, djermaya), quatre bobines de réactance de
75 5MVar chacun, quatre réactance de condensateurs de 2.4 MVar chacun; chaque sous-station
76 est équipé de deux transformateurs abaisseur 90/15 KV de capacité de 25 MVA chacun sauf
77 la sous-station de lamadji qui a un transformateur de 90/15 KV de même capacité. Les quatre
78 bobines, deux sont à garangouso , deux sont à N'Djamena et les quatre condensateurs, deux
79 sont à lamadji, deux sont à Gassi . Les réactances sont connectées selon les besoin dans le
80 réseau.

81 3) Présentation du logiciel Nepean

82 C'est un outil de modélisation et d'analyse permettant d'étudier les réseaux de transport, de
83 distribution et industriels en courant alternatif (AC) ou continue (DC). La fugue 1 et 2 est la
84 capture d'écran de la page de création du projet et de l'interface d'utilisateur.

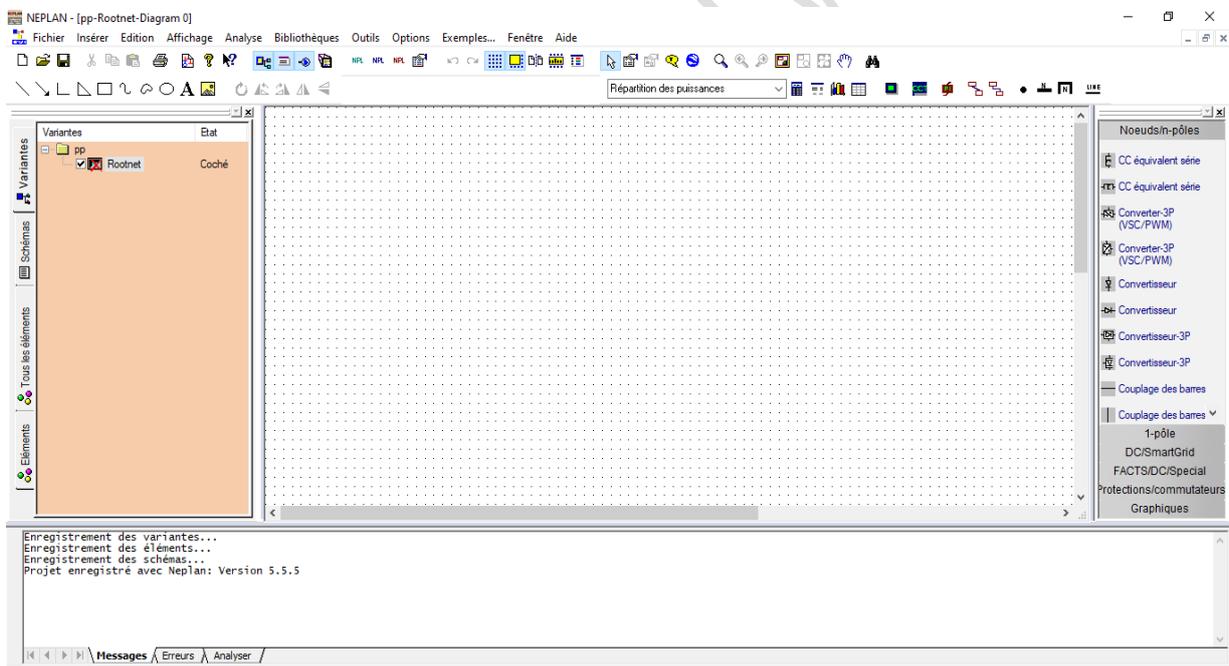
85



86

87

Figure 1: création du projet



88

89

Figure 2: Interface d'utilisateur

90

4) Modélisation du réseau dans Neplan

91

Connaissant les données des machines de chaque centrale, des transformateurs et des lignes,

92

nous obtenons la figure3.

93

a) Données des lignes (Caractéristiques des lignes utilisées)

94 Pour une modélisation du comportement des lignes dans le réseau électrique, il est nécessaire
95 d'utiliser les impédances directes, inverses, homopolaires. Ces valeurs des impédances
96 directes, des impédances inverses, des impédances homopolaires sont nécessaires pour le
97 calcul du courant de court-circuit aux niveaux des jeux de barres et le transit de l'énergie,
98 elles sont exprimés en ohm par kilomètre (Ω/Km) et celles des capacités (C: $\mu\text{F}/\text{Km}$), pour
99 calculer la puissance réactive générée par les lignes et les câbles.

100 b) **Données des transformateurs**

101 Modéliser et sécuriser efficacement le réseau électrique, les données des transformateurs tel
102 que, la tension primaire(U_{n1}), secondaire (U_{n2}), la tension de court-circuit en séquence
103 direct($U_{kr}(1)$), la tension de court-circuit en régime homopolaire($U_{kr}(0)$), les puissances et
104 leur couplage leurs mode de refroidissement (ONAN, ONAF) sont importantes et permettent
105 de :

- 106 ➤ Assurer le bon dimensionnement ;
- 107 ➤ Analyser le flux de puissance ;
- 108 ➤ Evaluer les pertes d'énergie ;
- 109 ➤ Calculer les court-circuit ;
- 110 ➤ Assurer la stabilité du réseau électrique ;
- 111 ➤ Choisir les protections appropriées
- 112 ➤ Assurer la compatibilité des niveaux de tension.

113 c) **Données des machines (Donnée des générateurs)**

114 Dans les années précédant, les chercheurs ont effectuer des études et ont prouvés que les
115 régimes transitoires des alternateurs pour le cas des turboalternateurs, les valeurs des
116 réactances directes, transitoire et subtransitoires sont compris à des intervalles bien connues
117 comme indique [7], [8]. Pour nos valeurs, nous avons choisi des valeurs dans ces intervalles
118 indiqués due à l'indisponibilité et la non -archivage des données de la SNE. Lors de l'analyse
119 de perturbation dans un réseau électrique, ces valeurs jouent un rôle important dans une
120 machine synchrone, elles modélisent le comportement dynamique des machines après un
121 défaut en analysant le courant de défaut, la stabilité transitoire, dimensionnement des
122 protections.

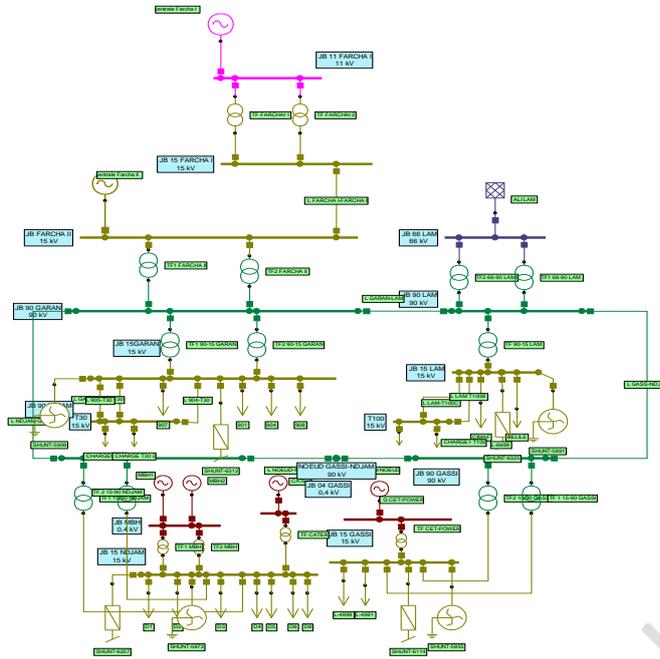


Figure 3: Modélisation du réseau dans Neplan

II) Etude de l'écoulement de puissance

L'analyse de l'écoulement de puissance est une étude importante du système électrique, elle est utilisée pour déterminer les profils de tension, ainsi que les puissances actives et réactives échangées dans divers éléments du réseau électrique. Cela se fait en résolvant l'équation d'écoulement de puissance qui est une équation non linéaire, par le biais de la méthode Newton-Raphson. Cette technique est largement adoptée en raison de sa capacité à converger rapidement et précisément sur la base de linéarisation des équations autour d'un point estimé grâce au calcul de la matrice jacobienne pour corriger les tensions et les angles jusqu'à atteindre la convergence, comme décrit dans [9], [10]. Elle permet de juger le fonctionnement normal du réseau ; d'améliorer son efficacité tout en assurant sa stabilité et sa sécurité.

1) Mise en équation

Pour un réseau à n jeux de barres, les puissances à n'importe quel jeu de barres sont déterminées par les équations de l'écoulement de puissance sous leur forme générale :

$$\begin{cases} P_i = \sum_{m=1}^n |V_i| * |V_m| (G_{im} \cos(\theta_i - \theta_m) + B_{im} \sin(\theta_i - \theta_m)) \\ Q_i = \sum_{m=1}^n |V_i| * |V_m| ((G_{im} \sin(\theta_i - \theta_m) - B_{im} \cos(\theta_i - \theta_m)) \end{cases} \quad (1)$$

Dans un jeu de barres i , d'un réseau électrique de n jeux de barres, le bilan de puissance est la différence de puissance générée S_{Gi} ; P_{Gi} ; Q_{Gi} et celle demandée S_{Di} ; P_{Di} ; Q_{Di} .

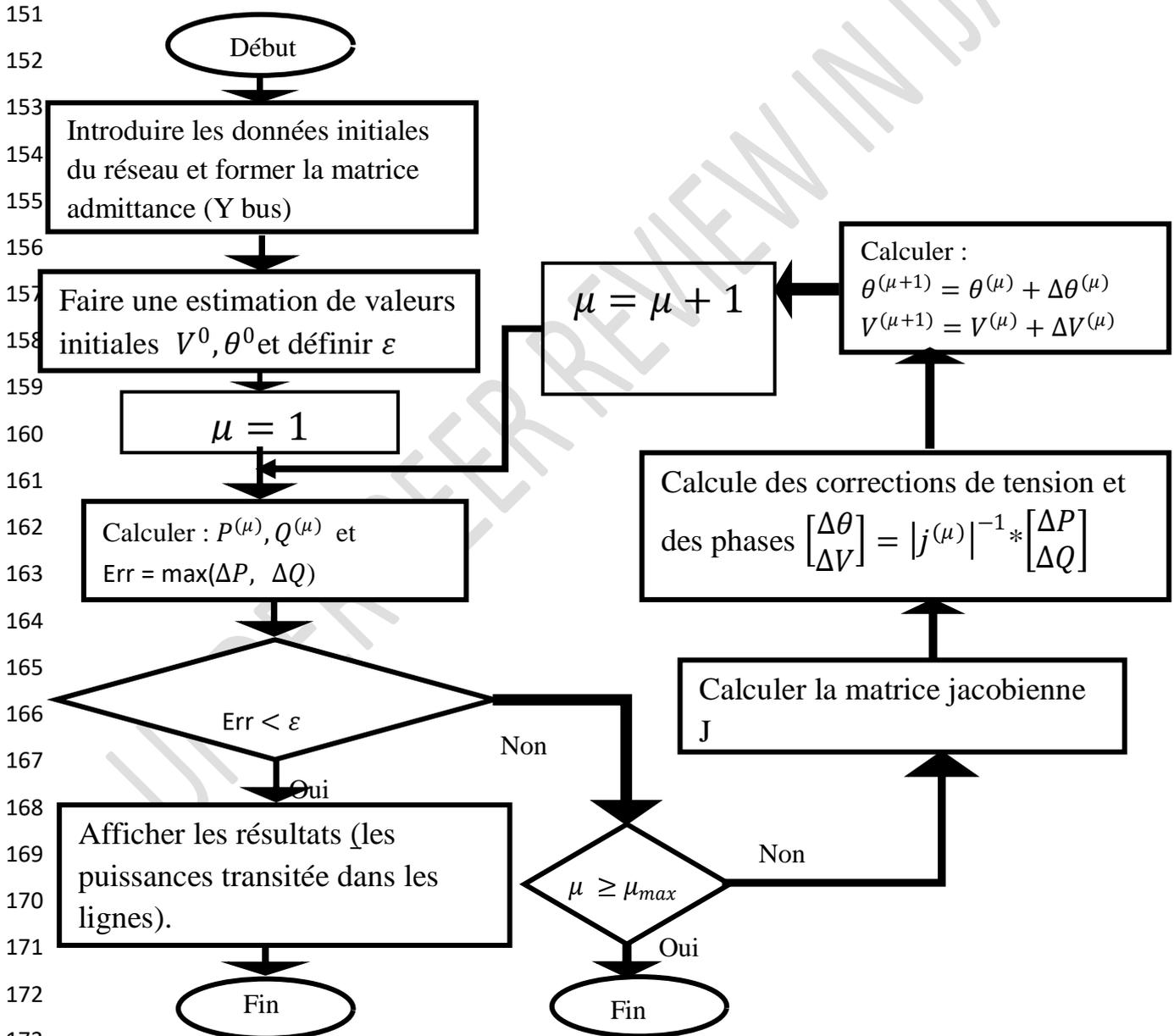
$$\begin{cases} S_i = S_{Gi} - S_{Di} \\ P_i = P_{Gi} - P_{Di} \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \end{cases} \quad (2)$$

142 La différence entre la puissance générée et la puissance demandée aux jeux de barres
 143 détermine les pertes des puissances dans la ligne (i-m). Pour calculer les pertes, on calcule
 144 d'abord les pertes des lignes (i-m) et (m-i) puis la somme algébrique donne les pertes

$$145 \begin{cases} P_{Lim} = P_{im} + P_{mi} \\ Q_{Li} = Q_{im} + Q_{mi} \end{cases} \quad (3)$$

146 **2) Méthode**

147 Il y a plusieurs méthodes de résolutions de l'équation de l'écoulement de puissance ; parmi les
 148 méthodes des résolutions des équations non linéaires pour une solution numérique, avons
 149 sollicité celle de la méthode de Netons-Rapson décrite dans l'article et thèses [9], [11] avec
 150 l'algorithme.



173 *Figure 4: Organigramme de la méthode de N-R*

176 **III) Etude de stabilité en tension**

177 L'étude de tension dans les réseaux électriques est essentielle pour assurer la stabilité et la
178 fiabilité de l'alimentation en énergie. Elle implique l'analyse de la variation de la tension aux
179 différents nœud du réseau en réponse au changement des charges et au perturbation. Pour
180 cette étude, plusieurs méthode sont utilisés dans[12]. Parmi ces méthodes, nous optons pour la
181 méthode de sensibilité de Tension. Elle permet d'évaluer l'impact des variations de
182 puissances réactive sur la tension aux nœuds d'un réseau électrique

183 **IV)Sensibilité de la Tension**

184 C'est une approximation linéaire du fonctionnement du système électrique autour d'un point
185 en régime permanent, défini à partir de la convergence d'une étude de flux de puissance par
186 La méthode Newton-Rapson , elle est fréquemment utilisée pour résoudre les flux de
187 puissance, grâce à sa convergence rapide et aux informations qu'elle délivre pour diverses
188 applications. Le principe de base est généralement exprimée par le facteur $\frac{\partial U}{\partial Q}$ décrit dans[13],
189 représentant la variation de la tension (U) en fonction de la variation de puissance réactive
190 (Q) ; elle est souvent obtenue à partir de l'inverse de la matrice jacobienne issue des équations
191 d'écoulement de puissances dans[14] [13], [5] .

192 **➤ Mise en équation**

193 D'après le développement de Taylor de l'équation (1) de puissance de nœud d'un réseau,
194 nous obtenons l'équation

195
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (4)$$

196 Avec $J_1 = \frac{\partial P}{\partial \theta}, J_2 = \frac{\partial P}{\partial U}, J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \theta}, J_4 = \frac{\partial Q}{\partial U}$

197 Lors que nous supposons la variation de la puissance active nulle

198
$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

199 On obtient deux équations

200
$$\begin{cases} J_1 \Delta \theta + J_2 \Delta U = 0 & (1) \\ J_3 \Delta \theta + J_4 \Delta U = \Delta Q & (2) \end{cases} \quad (6)$$

201
$$(1) \rightarrow \Delta \theta = -J_1^{-1} J_2 \Delta U \quad (7)$$

202 (2) devient $(-J_1^{-1}J_2J_3 + J_4)\Delta U = \Delta Q$ (8)

203 $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{1}{(J_4 - J_1^{-1}J_2J_3)}$ (10)

204 Idem démonstration ci-haut, lors que nous supposons la variation de la puissance réactive
205 nulle

206 $\frac{\Delta U}{\Delta P} = \frac{1}{(J_2 - J_3^{-1}J_4J_1)}$ (11)

207 **V) Critère de la sensibilité de la tension**

208 La sensibilité de la tension des jeux de barres est un critère clé pour évaluer la stabilité et la
209 sécurité des réseaux électriques. Ce critère permet d'identifier les points faibles du système et
210 d'orienter les gestionnaires des réseaux aux actions de compensation ou d'optimisation pour
211 éviter des chutes de tension ou des effondrements.[15] [16]. Les valeurs de la sensibilité
212 déterminent la stabilité de la tension d'un système : lors qu'elle est positive, le système est
213 stable dans le cas contraire, elle devient instable.

214 Pour le réseau électrique de la ville de N'Djamena, nous avons utilisé le critère de la
215 sensibilité et des valeurs propres :

216 $\frac{\partial U}{\partial Q} < 0.2\%MVar$, le bus est tres stable

217 $0.2 < \frac{\partial U}{\partial Q} \leq 0.5 \%MVar$, le bus est stable

218 $0.5 < \frac{\partial U}{\partial Q} \leq 1 \%MVar$ le bus est moyennement stable

219 $\frac{\partial U}{\partial Q} > 1 \%MVar$ le bus est critique (risque d'effondrement en cas de perturbation)

220 $\frac{\partial U}{\partial Q} < 0$ le bus est instable

221

222

223

224

225 **VI) Résultats**

226 **1) Résultat de l'écoulement de puissance des lignes**

227 Tableau 1: Ecoulement de puissance du réseau 90 et 15 KV de TchadElect de la ville de
228 Ndjamena

ID	Noeud	Elément	Type	P	Q	I	Angle I	P perte	Q perte
	Nom	Nom		MW	MVar	kA	°	MW	MVar
1230798644	JB T30	L 902 T30	Ligne	-6,3	-1,992	0,258	165,7	0,036	0,3664
1230798644	JB 15 GARAN	L 902 T30	Ligne	6,336	2,358	0,257	-13,9	0,036	0,3664
1230798663	JB 90 LAM	L GARAN- LAM	Ligne	- 53,985	- 4,323	 0,354	 -177,4	0,2719	1,5124
1230798663	JB 90 GARAN	L GARAN- LAM	Ligne	54,257	5,835	0,354	2,9	0,2719	1,5124
1230798677	JB 90 NDJAM	L NDJAM- GARAN	Ligne	-2,73	-6,177	0,044	122,8	0,0009	- 5,8703
1230798677	JB 90 GARAN	L NDJAM- GARAN	Ligne	2,731	0,306	0,018	2,7	0,0009	- 5,8703
1230798689	JB 90 LAM	L- LAM- GASSI	Ligne	- 28,771	- 0,574	 0,188	 -173,9	0,1382	0,3974
1230798689	JB 90 GASSI	L- LAM- GASSI	Ligne	28,909	0,971	0,188	7,1	0,1382	0,3974
1230798693	JB 90 GASSI	L GASS- NDJAM	Ligne	3,149	0,14	0,021	6,5	0,0004	- 3,2099
1230798693	JB 90 NDJAM	L GASS- NDJAM	Ligne	-3,149	-3,349	0,03	142,2	0,0004	- 3,2099
1230798763	JB T30	L 905 T30	Ligne	-6,3	-1,992	0,258	165,7	0,036	0,3664
1230798763	JB 15 GARAN	L 905 T30	Ligne	6,336	2,358	0,257	-13,9	0,036	0,3664

1230798766	JB T30	L 904-T30	Ligne	-6,3	-1,992	0,258	165,7	0,036	0,3664
1230798766	JB 15 GARAN	L 904-T30	Ligne	6,336	2,358	0,257	-13,9	0,036	0,3664
1230798770	JB 15 LAM	L LAM-100C	Ligne	10,336	4,81	0,449	-24	0,8857	1,8224
1230798770	JB T100	L LAM-100C	Ligne	-9,45	-2,988	0,449	155,9	0,8857	1,8224
1230798773	JB T100	L-LAM-T100B	Ligne	-9,45	-2,988	0,449	155,9	0,8857	1,8224
1230798773	JB 15 LAM	L-LAM-T100B	Ligne	10,336	4,81	0,449	-24	0,8857	1,8224
1230798627	JB F2 15	L F1-F2	Ligne	23,932	10,647	1,008	167,2	0,0127	0,0441
1230798627	JB15 F1	L F1-F2	Ligne	23,945	10,691	1,007	-12,7	0,0127	0,0441

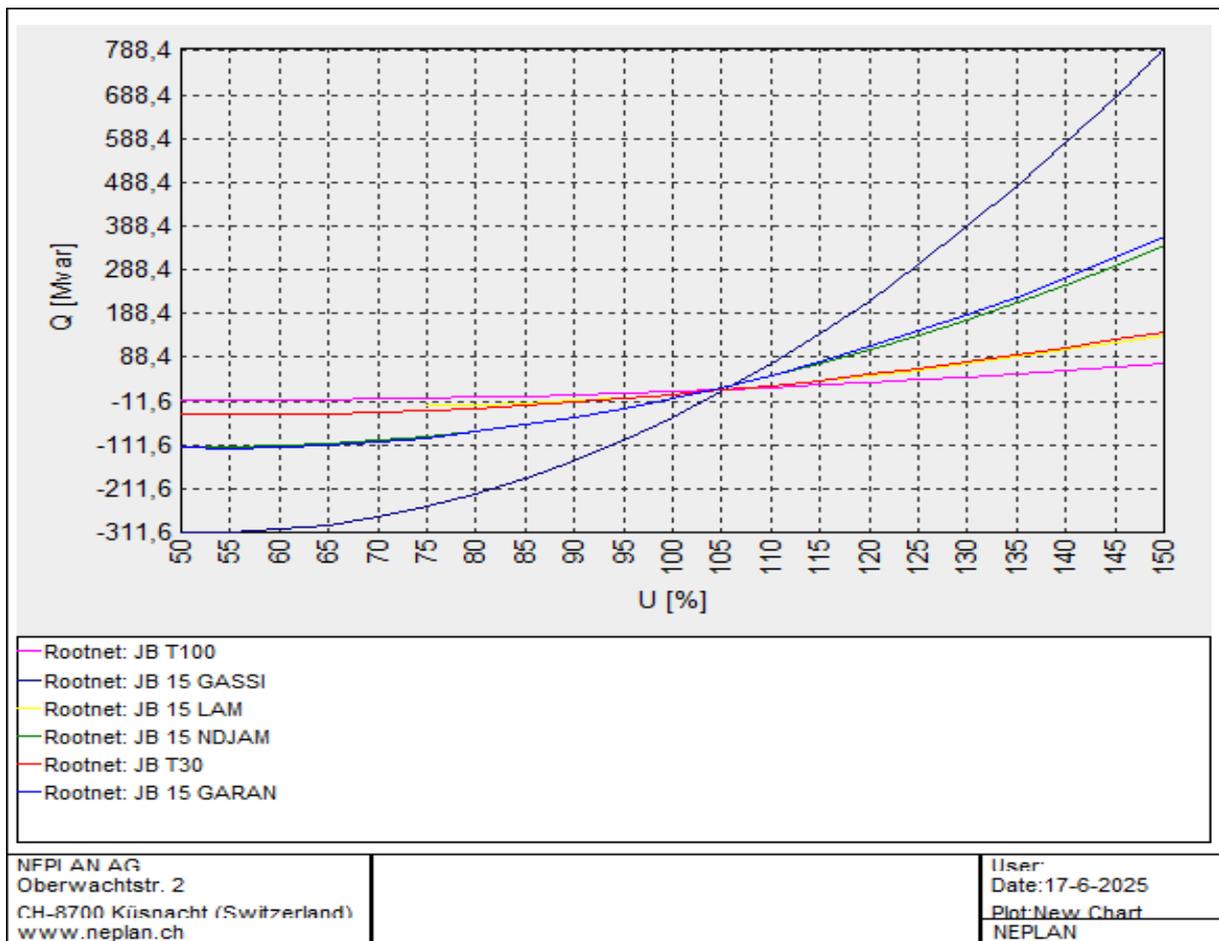
229

230 Le tableau des pertes des puissances sur les lignes indique les mouvements des flux des
231 puissances dans un réseau électrique ; les puissances négatives signalent la circulation en sens
232 inverse défini conventionnellement dans le modèle de notre réseau ; ces mouvements des flux
233 permettent le calcul des pertes des puissances.

234 Dans cette analyse, nous cherchons la ligne critique à optimiser, à planifier la compensation
235 de puissance réactive afin d'améliorer la stabilité du réseau. D'après l'écoulement de
236 puissance des lignes, nous constatons que les lignes qui existes entre les jeux de barres de 15
237 KV de LAMADJI et T100 ont plus des pertes de puissance actives de 0,8857 MW et
238 puissance réactive 1,8224 MVar, Due à la surcharge du jeu de barre.

239 2) Courbe QU

240 Elle montre l'évolution de la puissance réactive en fonction de la tension en pourcentage pour
241 une évaluation, amélioration et anticipation du comportement des réseaux face aux
242 perturbations et aux variation des charges.



243

244 Figure 5: courbe QU

245 L'étude de la stabilité dans cette courbe réside sur la pente de la courbe, si la pente est
 246 modérée, ce nœud peut être critique du point de vue de la détermination de la variation de la
 247 tension sur la variation de la puissance réactive.

248 3) Courbe PU

249 C'est une évolution de la tension en pourcentage en fonction de la charge, elle permet
 250 d'évaluer la stabilité de tension dans un réseau électrique et prévenir l'effondrement du réseau
 251 en tension.

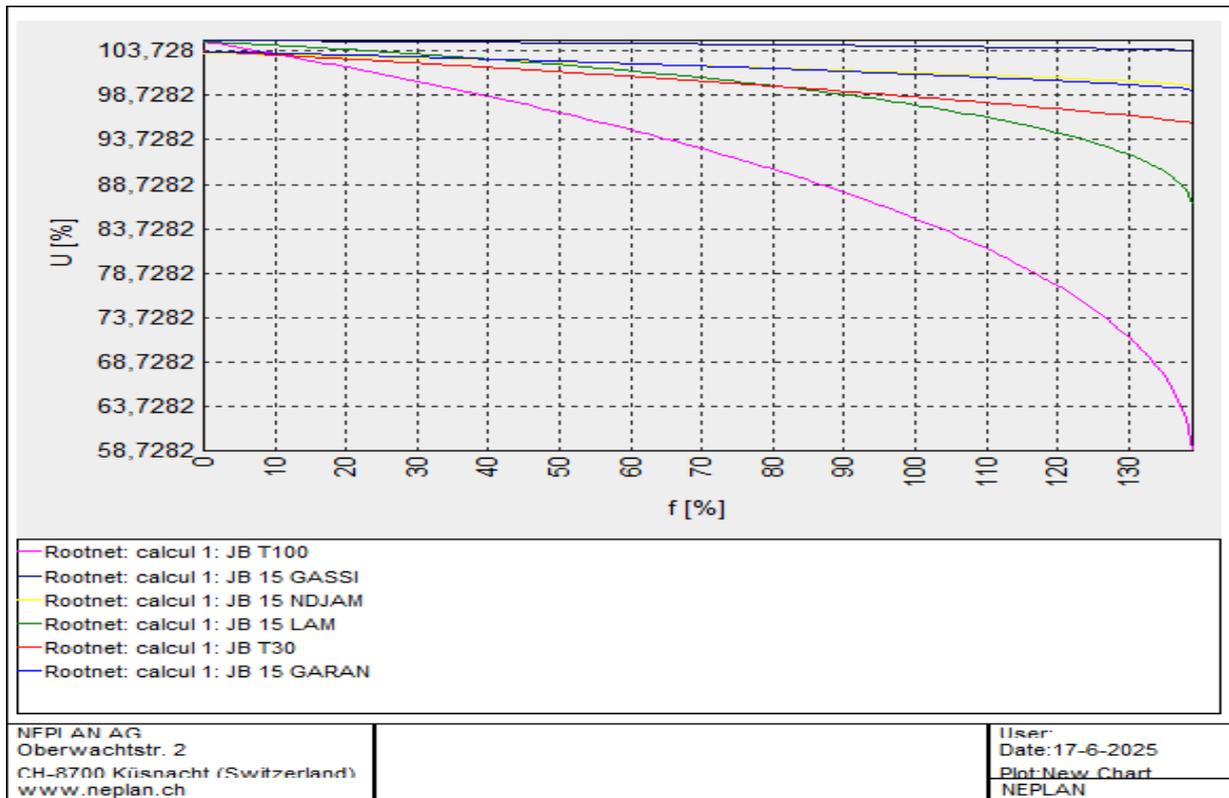


Figure 6: courbe PV au jeux de barres 15 KV

Ce résultat nous montre l'évolution de la tension en pourcentage en fonction de la charge aux niveaux des jeux de barres. La courbe du jeu de barres T100 à une chute importante suivie du nœud LAM ce qui indique un nœud critique et modérer de stabilité en tension.

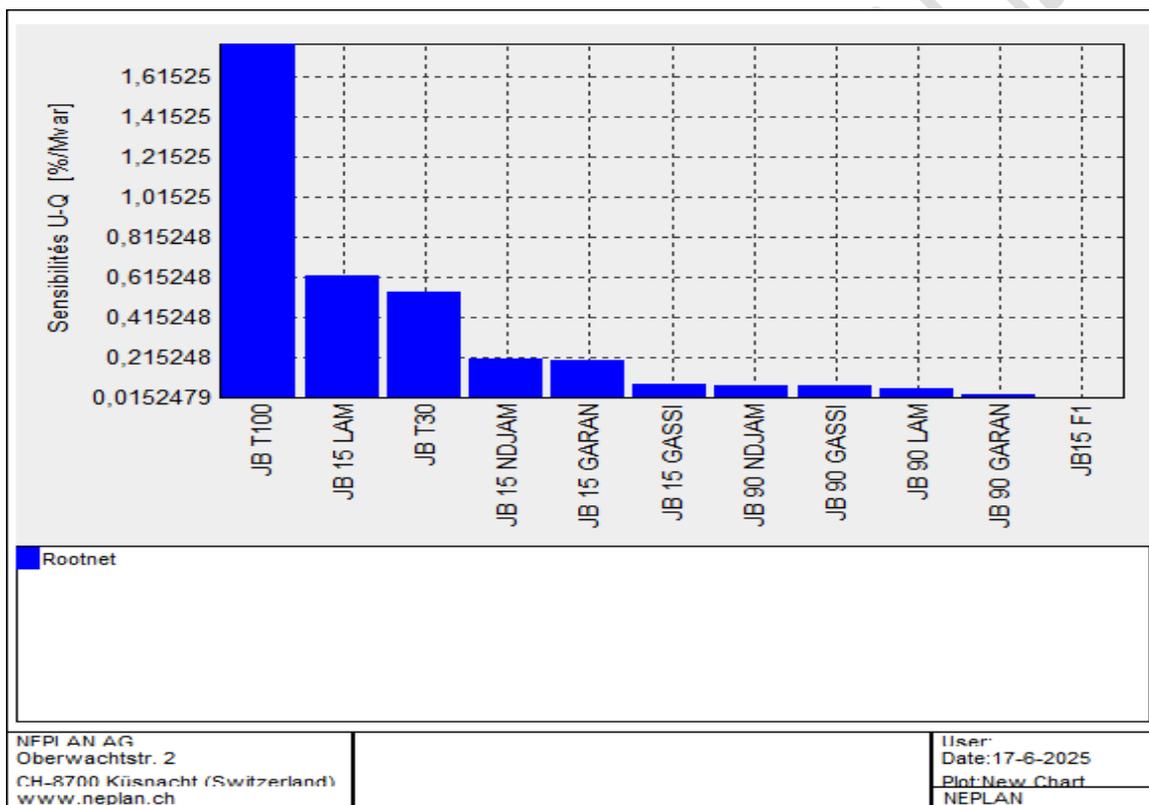
4) Valeurs de Sensibilité UQ

Tableau 2: sensibilité des jeux barres 15 KV

N°	ID	NOM DU Jeux de barres	Sensibilité
1	1230798762	JB T100	1,7813
2	1230798659	JB 15 LAM	0,6243
3	1230798643	JB T30	0,5412
4	1230798668	JB 15 NDJAM	0,2114
5	1230798636	JB 15 GARAN	0,2008
6	1230798681	JB 15 GASSI	0,083
7	1230798674	JB 90 NDJAM	0,0779
8	1230798687	JB 90 GASSI	0,0773
9	1230798651	JB 90 LAM	0,0588
10	1230798630	JB 90 GARAN	0,0334

259

260 Les données de ce tableau confirment les critères de la sensibilité décrit au point V. Parmi les
 261 jeux de barres de la SNE, le jeu de barre T100 avec une sensibilité la plus élevée des autres de
 262 1,7813%Mvar ; cela signifie que lors d'une injection ou retrait de puissance réactive sur ce
 263 jeu de barres, la tension varie fortement. C'est un jeu de barre critique qui demande une
 264 surveillance. Ce jeu de barre est suivi de celui de LAMADJI et T30 avec une sensibilité
 265 modère de 0,6243 et 0,5412 % Mvar ; les restent, leurs sensibilités sont faibles ; ils sont plus
 266 stables. Pour confirme les valeurs numériques de la sensibilité (U/Q) de notre tableau, nous
 267 représentons le graphe ci-dessous.



268

269 Figure 7: Graphe de la sensibilité des jeux de barres 15 KV

270 De tout qui précède le tableau de la sensibilité vient confirmer, les courbes et les graphes de
 271 chaque nœud 'un réseau. Lors que la sensibilité est élevée à un nœud, une petite variation de
 272 la puissance réactive cause une grande variation de la tension; une surveillance en ce point est
 273 recommandée.

274

275

276 Conclusion

277 Dans ce document, nous avons modélisé le réseau électrique HT de la SNE de la ville de
278 Ndjamena en appliquant la méthode de Newton-Raphson pour la résolution de l'équation de
279 l'écoulement de puissance dans l'outil NEPLAN. Cette modélisation nous a permis d'analyser
280 les profils de tensions, d'identifier les flux d'énergie actives et réactives et localiser les jeux
281 de barres(JB) à risque (c'est un JB où la sensibilité U/Q est menacée en cas de perturbation)
282 du réseau par les courbes de variation de tension en fonction de la puissance active (PU) et de
283 variation de tension en fonction de la puissance réactive (QU)

284 L'analyse de ces courbes, nous a aidé d'identifier les JB à risque. Lorsque la sensibilité en ce
285 point est élevée, le JB est montré un risque d'écroulement de tension.

286 Dans la suite de notre travail, nous souhaiterions modéliser un compensateur comme l'UPFC
287 au nœud qui présente des risques d'écroulement de tension.

288 Remerciements

289 Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour la santé, la force et la persévérance qu'il
290 m'a accordée tout au long de cette étape.

291 J'adresse ensuite mes remerciements au Pr ABAKAR MAHAMAT TAHIR, pour ses
292 conseils, encouragements, sa disponibilité, qui ont grandement contribué.

293 Je remercie aussi l'équipe de la production, de transport et distribution de la SNE pour leur
294 accueil chaleureux et leur collaboration tout au long de mon stage. Un remerciement tout
295 particulier à Abdelhakim Idriss, Abakar sidick abdoulaye, Ali ahamat choroma, djibrine saleh
296 mahamat, Methone Hermann, sineo, Ampere et tous ceux qui ont, de près ou loin, facilité
297 mon intégration et enrichi mon apprentissage.

298 Références

- 299 [1] D. Sambalaye et S. Ramatou, « Étude Comparative des Performances de Prévion de la
300 Consommation d'Énergie: Modèle Global vs Modèle d'Intelligence Artificielle. », *Sci.*
301 *Appliquées Ing.*, vol. 6, n° 1, p. 108-115, 2025.
- 302 [2] V. Ajjarapu et C. Christy, « The continuation power flow: a tool for steady state voltage
303 stability analysis », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, n° 1, p. 416-423, févr. 1992, doi:
304 10.1109/59.141737.

- 305 [3] Larouci Benyekhlef, « Contribution à l'étude d'un contrôleur universel de
306 puissance(UPFC) pour l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique », 2021, doi:
307 10.13140/RG.2.2.18482.94406.
- 308 [4] R. Cozzolino et G. Bella, « A review of electrolyzer-based systems providing grid
309 ancillary services: current status, market, challenges and future directions », *Front.*
310 *Energy Res.*, vol. 12, p. 1358333, 2024.
- 311 [5] F. Ruiz-Tipán, C. Barrera-Singaña, et A. Valenzuela, « Reactive Power Compensation
312 Using Power Flow Sensitivity Analysis and QV Curves », *2020 IEEE ANDESCON*, p.
313 1-6, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272113.
- 314 [6] M. A. Djari, L. Benasla, et W. Rahmouni, « Voltage stability assessment using the VQ
315 sensitivity and modal analyses methods », in *2017 5th International Conference on*
316 *Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, IEEE, 2017, p. 1-6. Consulté le: 6 juin
317 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8192086/>
- 318 [7] « Le Calcul Pratique des Courants de Court-Circuit Entre Phases », *Houille Blanche*,
319 vol. 31, n° 1, p. 9-21, janv. 1936, doi: 10.1051/lhb/1936002.
- 320 [8] J. C. Das, *Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics*. CRC press,
321 2002. Consulté le: 7 juillet 2025. [En ligne]. Disponible sur:
322 [https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203908952/power-system-](https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203908952/power-system-analysis-das)
323 [analysis-das](https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203908952/power-system-analysis-das)
- 324 [9] C. O. Ahiakwo, D. C. Idoniboyeobu, S. L. Braide, et C. L. Onita, « Investigation of
325 voltage stability of the Nigerian 330kV transmission network using Newton Raphson
326 Method », *Int. J. Res. Eng. Sci. IJRES*, vol. 10, n° 6, p. 122-129, 2022.
- 327 [10] Y. Wang, H. Wu, H. Xu, Q. Li, et S. Liu, « A general fast power flow algorithm for
328 transmission and distribution networks », *IEEE Access*, vol. 8, p. 23284-23293, 2020.
- 329 [11] H. Marothia, M. T. Scholar, et J. K. Sharma, « Development and Analysis of Voltage
330 Stability Indices for Power System Assessment », Consulté le: 13 juin 2025. [En ligne].
331 Disponible sur: [https://www.ijereas.in/uploads/pdf/ijereas-V2-4-paper3-](https://www.ijereas.in/uploads/pdf/ijereas-V2-4-paper3-Development%20and%20Analysis%20of%20Voltage%20Stability%20Indices%20for%20Power%20System%20Assessment.pdf)
332 [Development%20and%20Analysis%20of%20Voltage%20Stability%20Indices%20for%](https://www.ijereas.in/uploads/pdf/ijereas-V2-4-paper3-Development%20and%20Analysis%20of%20Voltage%20Stability%20Indices%20for%20Power%20System%20Assessment.pdf)
333 [20Power%20System%20Assessment.pdf](https://www.ijereas.in/uploads/pdf/ijereas-V2-4-paper3-Development%20and%20Analysis%20of%20Voltage%20Stability%20Indices%20for%20Power%20System%20Assessment.pdf)
- 334 [12] M. S. Saddique *et al.*, « Solution to optimal reactive power dispatch in transmission
335 system using meta-heuristic techniques—Status and technological review », *Electr.*
336 *Power Syst. Res.*, vol. 178, p. 106031, 2020.
- 337 [13] F. W. Mohn et A. Z. De Souza, « Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC
338 continuation method », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, n° 3, p. 1115-1122, 2006.

- 339 [14] A. Z. De Souza, F. W. Mohn, I. F. Borges, et T. R. Ocariz, « Using PV and QV curves
340 with the meaning of static contingency screening and planning », *Electr. Power Syst.*
341 *Res.*, vol. 81, n° 7, p. 1491-1498, 2011.
- 342 [15] N. Rayfield et A. Cook, « A Voltage Contingency Selection Technique for Transmission
343 Planning Studies », 1985, Consulté le: 3 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur:
344 [https://consensus.app/papers/a-voltage-contingency-selection-technique-for-rayfield-](https://consensus.app/papers/a-voltage-contingency-selection-technique-for-rayfield-cook/dae6ec4b99ac56c391ac169bda760796/)
345 [cook/dae6ec4b99ac56c391ac169bda760796/](https://consensus.app/papers/a-voltage-contingency-selection-technique-for-rayfield-cook/dae6ec4b99ac56c391ac169bda760796/)
- 346 [16] Y. A. Mobarak, « Voltage collapse prediction for Egyptian interconnected electrical grid
347 EIEG », *Int. J. Electr. Eng. Inform.*, vol. 7, n° 1, p. 79, 2015.
- 348

UNDER PEER REVIEW IN IJAR