

Optimisation du SWER pour l'électrification rurale via la méthode Maximum Power Saving à Fitovinany, Madagascar.

Tsanta Fifaliana Andriamihaja RAMILISON¹, Jean Marc Auguste RAKOTOFIRINGA²,
Solofo Hery RAKOTONIAINA³

- 1- Doctorant, Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation, BP 1500, 101 Antananarivo, Madagascar
- 2- Docteur, Membre du laboratoire Centre d'Etude des Réseaux Electriques et des Système Associés (CERESA)
- 3- Maître de conférences, Mention Génie Electrique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarvo. Responsable du laboratoire Centre d'Etude des Réseaux Electriques et des Système Associés (CERESA) de l'Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation, BP 1500, 101 Antananarivo, Madagascar

Auteur correspondant : Tsanta Fifaliana Andriamihaja RAMILISON

Adresse : Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation,
BP 1500, 101 Antananarivo, Madagascar

E-mail : tsantajainaramili@gmail.com

Téléphone : +261 34 16 022 48

Résumé

Cette étude vise à améliorer le système SWER par le biais de la compensation d'énergie réactive. Les zones rurales de Madagascar sont caractérisées par des villages dispersés et éloignés nécessitant une longueur considérable du réseau de distribution, rendant l'installation d'un réseau de distribution triphasé coûteuse et peu rentable. Le SWER, utilise un seul conducteur aérien et le sol comme conducteur de retour, offre une solution adéquate. L'étude estime les besoins énergétiques des 32 communes rurales de la région Fitovinany, modélise le système SWER à l'aide du modèle mathématique de Carson et calcule les paramètres électriques de la ligne. La méthode Backward-Forward Sweep est utilisée pour l'analyse de flux de charge afin d'identifier les variations de tension. Pour améliorer le profil de tension, la méthode Maximum Power Saving est utilisée pour la compensation d'énergie réactive. Les résultats montrent que le dimensionnement et le placement optimaux du condensateur de compensation permettent de réduire les pertes d'énergie réactive et d'améliorer l'efficacité du système. De plus, le profil de tension respecte une marge de tolérance de $\pm 5\%$, assurant une alimentation électrique de qualité. Cette recherche contribue à l'électrification rurale efficace et abordable à Madagascar. En utilisant le système SWER et en optimisant la compensation d'énergie réactive, il est possible de réduire les pertes d'énergie réactive, d'améliorer le profil de tension et de maximiser l'utilisation de l'énergie. Ces résultats sont essentiels pour le développement de solutions d'électrification rurale durables et répondent à l'intitulé 7 de l'ODD : « Energie propre à un coût abordable ».

Mots-clés

Backward-Forward Sweep, Carson, Maximum Power Saving, Puissance Réactive

1- Introduction

L'accès à une énergie propre et abordable est un élément essentiel pour atteindre les Objectifs de Développement Durable (ODD), en particulier l'Objectif 7, qui vise à garantir à tous l'accès à une énergie fiable, durable, moderne et à un coût abordable. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, en particulier en Afrique, en Océanie et à Madagascar, l'électrification rurale demeure un défi majeur en raison de la dispersion géographique et de l'éloignement des villages, rendant l'installation de réseaux de distribution traditionnels monophasé [1] et triphasés coûteuse et peu rentable [2]. Le système Single Wire Earth Return (SWER) se présente comme une solution prometteuse pour relever ce défi [2]. Conçu pour fournir une alimentation électrique économique aux zones rurales peu peuplées et éloignées, le SWER utilise un seul conducteur aérien et exploite le sol en tant que conducteur de retour, en éliminant le besoin d'un conducteur de retour distinct [3]. Ce système a été développé pour la première fois en Nouvelle-Zélande par l'ingénieur Lloyd Mandeno en 1925, et depuis lors, il a été largement utilisé avec succès en Nouvelle-Zélande et en Australie, avec plus de 200 000 km de lignes installées [2]. Cependant, malgré sa simplicité apparente, le SWER rencontre certaines difficultés qui nécessitent une attention particulière pour améliorer ses performances en matière d'électrification rurale [4]. Le principal défi réside dans la longueur des lignes SWER, qui entraîne une impédance élevée du conducteur aérien et du conducteur de retour par la terre. Cette impédance élevée engendre une chute de tension importante, conduisant à un profil médiocre de tension le long de la ligne, ainsi qu'à des pertes significatives en puissance active et réactive. Cet article présente l'utilisation des condensateurs commutés comme l'une des méthodes efficaces et utiles pour réduire les pertes de puissance dans les réseaux de distribution. Après un calcul de flux de charge en utilisant la méthode d'analyse "Backward/forward sweep", les informations fournies par l'analyse de flux de charge comprennent le flux de puissance actif et réactif dans chaque branche et les pertes de ligne associées et les angles de phase des tensions à chaque nœud. Dans cet article, la méthode proposée "backward and forward sweep" a été utilisée pour calculer les courants des branches et les tensions nodales en utilisant la loi de Kirchhoff. La validité de cette méthode a été testée sur 2 systèmes de distribution radial SWER à 16 nœuds dans 32 communes rurales de la région Fitovinany à Madagascar, qui ont été choisies pour être électrifiées par le système SWER. Les simulations ont été réalisées dans l'environnement de MATLAB R2017. Une fois l'implémentation du flux de puissance effectué, le profil de tension a été déterminé, mettant en évidence la nécessité d'être amélioré. Une méthode d'économie d'énergie maximale, "Maximum Power Saving", a ensuite été utilisée pour déterminer l'emplacement optimal et la dimension du condensateur.

2- Méthodologie

Modèle Mathématique de la ligne SWER

La ligne SWER a été conçue suivant le modèle de Carson [5]. Ce modèle permet de présenter les impédances des conducteurs aériens avec un retour de courant par la terre. L'impédance totale, Z_{aa} , comme le montre la figure (1), d'une ligne aérienne où le courant retourne par la terre est décrite dans l'équation (1). Cette impédance comprend à la fois les impédances propres des conducteurs aériens et celle du retour par la terre et les impédances mutuelles entre ces conducteurs. Les détails concernant ces impédances sont définis dans les équations (2), (3) et (4)[6].

$$Z_{aa} = \bar{z}_{aa} + \bar{z}_{gg} - 2\bar{z}_{ag} \text{ [}\Omega \text{ /Km]} \quad (1)$$

$$\bar{z}_{aa} = R_a + j 4\pi 10^{-4} f \ln \left(\frac{2(h_a + \bar{p})}{r_a} \right) \quad (2)$$

$$\bar{z}_{gg} = \pi^2 10^{-4} f - j0.0386 \times 8\pi 10^{-4} f \ln \left(\frac{2}{5.6198 \times 10^{-3}} \right) \quad (3)$$

$$\bar{z}_{ag} = j2\pi \times 10^{-4} \ln \left(\frac{h_a}{\sqrt{\frac{\rho}{f}}} \right) \quad (4)$$

Avec : R_a est la Résistance du conducteur a en [Ω /Km] ; f la fréquence du réseau en [Hz] ; h_a la hauteur du conducteur au-dessus de la surface du sol en [m] ; $\bar{\rho}$ la profondeur du conducteur du retour à la terre au-dessous de la surface du sol en [m] comme définie en et r_a le Rayon Moyen Géométrique en [m].

La Méthode Backward-Forward Sweep pour le système SWER

Le calcul de la répartition de puissance est basé sur la méthode Backward-Forward Sweep [7], dont l'organigramme est représenté sur la figure (2)[8].

Dans le cas du système SWER, l'expression du courant nodal est donnée par[6] :

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ig} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} (S_{ia}/V_{ia}^{k-1})^* \\ -I_{ia} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ig} \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (5)$$

Le backward sweep des branches consiste à calculer le courant j parcourant le branche l est selon :

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lg} \end{bmatrix}^k = - \begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ig} \end{bmatrix}^k + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mg} \end{bmatrix}^k \quad (6)$$

Le forward sweep calcul les tensions nodales par l'équation (16)

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jg} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ig} \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ag} \\ Z_{ag} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lg} \end{bmatrix}^k \quad (7)$$

Où : I_{ia} et I_{ig} sont respectivement le courant éjecté au nœud i pour la ligne aérienne et pour le conducteur de retour à la terre ; S_{ia} est la puissance complexe au nœud i pour la ligne aérienne et V_{ia} et V_{ig} sont respectivement la tension complexe au nœud i pour la ligne aérienne et pour le conducteur de retour par terre ; Y_{ia} est l'admittance shunt de la ligne aérienne k est l'indice d'itération ; j est le nœud au bout du branche l et M est l'ensemble de tous les branches connectés au nœud J .

COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

Il existe plusieurs méthodes permettant de dimensionner et de placer un condensateur dans un réseau radial. Nous avons choisi la méthode **MAXIMUM POWER SAVING**. Cette méthode est basée sur les formules des courants des branches et qui consiste à réduire les pertes de puissance en ligne en considérant les courants qui traverse chaque ligne [9].

Expression mathématique de la perte en puissance réactive

La perte en puissance réactive est exprimée comme :

$$Q_{Tot} = \sum_{j=1}^N I_j^2 X_j \quad (8)$$

Où Q_{Tot} est la perte totale en puissance réactive ; I_j est le courant de branche et X_j est la réactance de la branche e

Le courant I_j a aussi un composant actif et réactive $I_j = I_{aj} + I_{rj}$.

En effet, l'équation (9) peut s'écrire comme suit :

$$Q_{Tot} = \sum_{j=1}^N I_{aj}^2 X_j + \sum_{j=1}^N I_{rj}^2 X_j \quad (9)$$

La tension limite au nœud

La tolérance pour les tensions au nœud est $\pm 5\%$ de la tension initiale [10].

$$|V_{jmin}| \leq |V_j| \leq |V_{jmax}| \quad (10)$$

Intensité du courant de branche

L'intensité du courant qui traverse chaque branche doit-être inférieure ou égale à la valeur estimée maximale de l'intensité de courant du condensateur en respectant la capacité thermique limite de la ligne.

$$|I_j| = I_{jmax}, j = 1,2,3 \dots N \quad (11)$$

Puissance réactive totale injectée

La puissance réactive totale injectée par le condensateur Q_{jcond} doit-être égale à la somme de la perte en puissance réactive Q_{perte} et les puissances réactives des charges Q_{charge} [9].

Si le courant du condensateur est injecté au nœud k , le courant parcourant la ligne depuis le nœud source jusqu'à ce nœud est affecté par ce courant mais au-delà de k , les courants restent les mêmes.

L'expression mathématiques est comme ci-dessous :

$$Q_{Totcondk} = \sum_{j=1}^N (I_{aj} + I_{condk})^2 X_j + \sum_{j=k+1}^N I_{aj}^2 X_j + \sum_{j=1}^N (I_{rj} + a_k I_{condk})^2 X_j + \sum_{j=k+1}^N (I_{rj} + I_{condk})^2 X_j + \sum_{j=k+1}^N I_{rj}^2 X_j \quad (12)$$

Avec : $Q_{Totcondk}$ est la perte totale en puissance réactive avec injection de courant du condensateur ; I_{condk} est le courant du condensateur injecté au nœud k ; $a_k = (\text{signe}) \tan(\cos^{-1}(PF_{cond}))$, $\text{signe} = +1$ si le condensateur injecte de la puissance réactive, $\text{signe} = -1$ si le condensateur consomme de la puissance réactive.

Nous obtenons la puissance conservée en chaque nœud en soustrayant la perte totale avec le condensateur à celle sans condensateur

$$\text{Puissance Conservée } PC = Q_{Tot} - Q_{Totcond} \quad (13)$$

Pour trouver la valeur maximale de la puissance conservée, il suffit d'égaliser à zéro sa dérivée en considérant son courant de condensateur équivalent injecté au nœud k . Et il est à préciser que seule la partie imaginaire du courant complexe parcourant la branche pour la puissance réactive est considérée.

$$\frac{\delta PC}{\delta I_{condk}} = 0 \quad (14)$$

$$PC = -2I_{condk} \sum_{j=1}^k I_{rj} X_j - I_{condk}^2 \sum_{j=1}^k X_j \quad (15)$$

$$\Rightarrow -2 \sum_{j=1}^k I_{rj} X_j - 2I_{condk} \sum_{j=1}^k X_j = 0 \quad (16)$$

Le maximum de la fonction est obtenu à partir de cette fonction dérivée et nous pouvons en déduire respectivement les valeurs des intensités des courants à injecter pour chaque

nœud. Ces courants précédemment calculés seront remplacés par leur valeurs équivalent au puissance maximal conservée et le nœud qui aura la plus grande valeur maximale de puissance conservée sera sélectionner comme emplacement optimal/idéal du condensateur [9].

L'expression du courant de condensateur à injecter pour chaque nœud est comme suit :

$$I_{condk} = - \frac{\sum_{j=1}^k G I_{rj} X_j}{\sum_{j=1}^k X_j} \quad (17)$$

Dimensionnement du condensateur

Pour le condensateur, sa dimension optimale au nœud k sélectionné est calculée à partir du courant I_{condk} , où k est le nœud d'emplacement optimal déterminé précédemment, et la tension correspondante.

$$Q_{condk} = I_{condk} |V_k| = - \frac{\sum_{j=1}^k I_{rj} X_j}{\sum_{j=1}^k X_j} |V_k| \quad (18)$$

Organigramme proposé pour l'amélioration du profil de la tension

Après avoir déterminer le courant injecté au nœud k, la méthode est combinée à la Backward-Forward Sweep. La condition pour que le programme mette en œuvre l'amélioration du profil de la tension est évidemment la convergence de la tension mentionnée par l'équation (20). C'est-à-dire que la tension ne doit pas dépasser 1.05pu et ne peut pas être inférieure à 0.95 pu [10]. (Voir Figure 3)

Étapes proposées pour l'étude

Les suivantes sont les étapes proposées pour mener à terme l'étude statique d'un système SWER, dont nous allons utiliser dans cet article.

Étape 1 : Evaluer les demandes en puissance des zones à électrifier.

Étape 2 : Former la matrice des nœuds DN

La matrice des nœuds est une matrice de dimension DN (n,4) où la première colonne contient le numéro des nœuds, la deuxième contient les puissances Apparentes, la troisième les puissances actives des charges en ce nœud, et dans la quatrième colonne y figure les puissances réactives des charges en ce nœud. Et n est le nombre de nœud du réseau considéré.

$$DN = \begin{pmatrix} DN_{11} & \cdots & DN_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DN_{n1} & \cdots & DN_{n4} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Étape 3 : Calculer les Impédances de Carson pour le système.

Étape 4 : Former la matrice des lignes DL

La matrice des lignes est une matrice de dimension DL (b,5) où la première colonne contient le numéro de branche, la deuxième colonne, les nœuds origines, la troisième colonne, les nœuds extrémités d'une branche, la colonne numéro quatre contient la résistance R des lignes et dans la colonne numéro cinq y figure les réactances X des lignes. Et b est le nombre de branche.

$$DL = \begin{pmatrix} DL_{11} & \cdots & DL_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DL_{b1} & \cdots & DL_{b5} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Étape 5 : Implémenter le calcul de répartition des charges

Étape 6 : Afficher les résultats et le profil de la tension.

Étude de cas

Dans cette étude, 32 communes rurales de la région Fitovinany sont sélectionnées. Chaque commune rurale représente un nœud pour le réseau.

Les deux départs sont représentés dans les figures 5 et 6.

Un transformateur d'isolement 22/12,7 kV est utilisé pour connecter deux phases d'un circuit d'alimentation de 22 kV à un circuit d'alimentation SWER. Ce transformateur empêche les courants de retour de la terre d'interagir avec le circuit d'alimentation de 22 kV. La Figure 4 montre un schéma détaillé d'une connexion de circuit SWER et des connexions de charge des clients associées La Figure 9 nous offre un aperçu du paysage d'un système SWER existant à Madagascar

Paramètres considérés pour l'étude

Sept principaux points sont à considérer concernant les paramètres du réseau. Pour les deux départs, SWER est tiré du réseau triphasé 22 kV.

Les paramètres que nous allons considérer sont les suivants :

Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

Tension de référence du transformateur isolateur : $V_{Base} = 12.7 \text{ kV}$

Puissance de base : $S_{Base} = 100 \text{ kVA}$

Facteur de puissance : $\cos \varphi = 0.9$

Conducteur : 3/2.45 SC/AC []

Résistivité du sol : $\rho = 250 \text{ } \Omega \text{ m}$

Hauteur du conducteur aérien par rapport à la surface du sol : $H_a = 10 \text{ m}$

3- Résultats

Dans le cadre de notre étude visant à optimiser la planification et l'exploitation des réseaux électriques pour les zones rurales, nous avons recueilli et analysé des données cruciales pour éclairer notre approche.

Les demandes en puissance des zones à électrifier

Les tableaux 1 et 2 montrent les demandes en puissance de chaque commune rurale qui représente un nœud dans le réseau. Pour le départ 1, la demande totale en puissance est de 2,4 MW dont la demande maximale se situe au nœud numéro 9 (Voir photo 5) qui est de 329 kW. La puissance totale à fournir par le départ numéro 2 est égale à 3,6 MW. Pour cette ligne, c'est le nœud numéro 10 qui représente la demande la plus grande égale à 643 kW (Voir photo 6).

Les données des nœuds

Les données des nœuds nécessaires pour le calcul du flux de puissance sont la puissance active P et la puissance réactive Q. La puissance active P est obtenue par l'estimation des puissances demandées par les communes à partir de leurs appareils électroménagers. La puissance réactive est obtenue soit par calcul direct avec $\tan \varphi$ et P, soit en passant par la puissance apparente S en utilisant $\sin \varphi$ (Voir tableau 3 et 4). Ces données nous sont utiles pour former la matrice des nœuds représentée par l'équation (27).

Les Impédances de Carson

Les impédances d'une ligne SWER sont calculés en utilisant l'approche de Carson.

- La profondeur : $\bar{p} = 1476,46 \text{ [m]}$
- Le rayon moyen géométrique : $r_a = 1,40778 \text{ [m]}$
- L'impédance propre du conducteur aérien :

$$\bar{z}_{aa} = 5,75 + j 4\pi 10^{-4} f \ln \left(\frac{2(10+1476,46)}{1,40778} \right)$$

$$\bar{z}_{aa} = 5,75 + j 0,46504 \text{ [}\Omega\text{/km]}$$
- L'impédance propre du conducteur de retour par la terre :

$$\bar{z}_{gg} = \pi^2 10^{-4} (50) - j 0.0386 \times 8\pi 10^{-4} f \ln \left(\frac{2}{5.6198 \times 10^{-3}} \right)$$

$$\bar{z}_{gg} = 0,0493 - j 0,02708 \text{ [}\Omega\text{/km]}$$

- L'impédance mutuelle entre le conducteur aérien et le conducteur de retour par la terre

$$\bar{z}_{ag} = j2\pi \times 10^{-4} \ln \left(\frac{10}{\sqrt{\frac{250}{50}}} \right)$$

$$\bar{z}_{ag} = j0,2529[\Omega/\text{km}]$$

L'impédance de Carson de la ligne SWER

L'impédance résultante pour notre ligne est donc égale

$$\mathbf{Z}_{aa} = \mathbf{5.7993} + \mathbf{j0.24154} \quad [\Omega/\text{km}]$$

La profondeur \bar{p} de 1476,46 m et le rayon moyen géométrique r_a de 1,40778 m sont des paramètres clés dans la détermination des impédances. Ces valeurs sont le reflet de la manière dont la configuration physique influe sur les caractéristiques électriques. Une profondeur plus importante pourrait entraîner une plus grande atténuation du signal, ce qui est traduit dans les impédances calculées.

L'impédance de Carson \mathbf{Z}_{aa} combine toutes ces informations en une seule valeur. Cette impédance résultante pour la ligne SWER, telle que $\mathbf{Z}_{aa} = 5.7993 + j0.24154 \Omega/\text{km}$, met en relief l'effet cumulatif de la profondeur, du rayon géométrique moyen, des impédances propres et mutuelles. Elle représente la résistance totale rencontrée par le flux électrique dans la ligne [11].

Les données des lignes

L'aspect scientifique sous-jacent dans le processus de calcul du flux de puissance se cristallise à travers l'analyse des données des lignes. Les données des lignes nécessaires pour le calcul du Load Flow sont les résistances R et les réactances X de chaque branche de la ligne. Ces deux paramètres sont obtenus en multipliant, l'impédance résultante SWER \mathbf{Z}_{aa} du réseau par la longueur de chaque branche. Pour notre étude, le programme permet de ramasser ces données pour en former la matrice des lignes DL représentée par l'équation (28).

Résultats implémentation de la répartition de puissance

L'analyse du Load Flow et de la compensation d'énergie réactive constitue une étape cruciale dans la planification et l'exploitation efficace des réseaux électriques. Dans cette section, nous présentons en détail les résultats obtenus à l'aide de la méthode Backward-Forward Sweep (BFS) en conjonction avec la méthode de Puissance Maximale (MPS) pour la compensation d'énergie réactive.

- **Résultats de la calculé du Load Flow sans compensation**

Perte en Puissance

La méthode Backward-Forward Sweep est programmée en MATLAB. L'organigramme utilisé est développé dans la partie méthode. Pour cette partie, aucune intervention n'est faite, le programme exécute tout simplement les étapes de la méthode Backward-Forward Sweep, celles illustrés par la figure 2.

Sans compensation d'énergie réactive, nous avons une perte de 447.34 kVAr pour le départ 1 et 503,35 kVAr pour le départ numéro 2.

Profil de la tension

Pour faciliter la lecture et la compréhension des valeurs de la tension, elles sont exprimées en pu. Pour les départs de notre étude, les tensions maximales et minimales sont respectivement 1 pu et 0,71 pu pour le départ 1 et 1pu et 0,87pu pour le départ 2.

▪ Résultats de la calcul du Load Flow avec compensation

L'analyse du Load Flow et de la compensation d'énergie réactive constitue une étape cruciale dans la planification et l'exploitation efficace des réseaux électriques. Dans cette section, nous présentons en détail les résultats obtenus à l'aide de la méthode Backward-Forward Sweep (BFS) en conjonction avec la méthode de Puissance Maximale (MPS) pour la compensation d'énergie réactive.

Perte en puissance

Dans cette section, la méthode MPS est combinée avec la BFS pour la compensation d'énergie réactive. L'organigramme utilisée pour l'implémentation est celle développer dans la figure 3. Les pertes totales en puissance réactive pour les deux départs 1 et 2 sont respectivement 82.2252 kVAr et 118.62454 kVAr

Profil de la tension

La combinaison de la méthode BFS et de la méthode MPS permet de réduire les pertes en puissance réactive, d'améliorer la stabilité du réseau et d'optimiser la qualité de fourniture d'énergie. Ces résultats soulignent la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de gestion proactive pour garantir un fonctionnement optimal et fiable du réseau électrique.

4- Discussion

L'efficacité et la performance de la méthode MPS ont été démontrées précédemment pour les deux départs de 16 nœuds chacun. Les comparaisons des résultats obtenus sans et avec compensation de puissance réactive pour ces deux départs sont représentées dans les tableaux 15 et 16. Les figures 7 et 8 mettent en évidence la disparité discernable entre les deux simulations, intégrant et excluant la compensation d'énergie réactive. Dans le premier départ, l'application de la méthode Maximum Power Saving a considérablement réduit les pertes en puissance réactive de 447 kVAr à 82 kVAr. Cette amélioration est attribuée à l'efficacité des condensateurs commutés pour réguler les chutes de tension tout au long de la ligne SWER. De plus, la tension minimale dans le réseau électrique a été notablement améliorée, passant de 0.71551 pu à 0.95068 pu après la compensation. Cette augmentation de la tension minimale est cruciale pour maintenir la stabilité du système et améliorer la qualité de tension dans le réseau. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'approche utilisant la méthode MPS pour réduire les pertes de puissance réactive dans les réseaux de distribution SWER. En diminuant les pertes de puissance réactive, le système devient plus efficace et offre une meilleure qualité de tension, ce qui contribue à l'amélioration de l'électrification rurale à Madagascar.

De manière similaire, dans le deuxième départ, l'efficacité de la méthode MPS est mise en évidence par la réduction des pertes de puissance réactive de 503 kVAr à 118.6 kVAr. Cette optimisation démontre clairement la capacité de la méthode MPS à gérer efficacement la puissance réactive et à améliorer les performances du réseau électrique. La tension minimale a également été améliorée de 0.8747 pu à 0.95744 pu, renforçant ainsi la stabilité du système.

Dimensionnement et emplacement optimal du condensateur shunt

Les résultats sur l'emplacement optimale des condensateurs commuté ont également permis de déterminer le dimensionnement et l'emplacement optimal du condensateur shunt dans chaque départ. Dans le départ 1, le condensateur shunt doit être dimensionné à 1106.107 kVAr et placé au nœud 13 pour obtenir une puissance conservée maximale de 173.502 kVAr. Dans le départ 2, le dimensionnement optimal du condensateur est de 373.3501 kVAr, et il doit être situé au nœud 15 pour obtenir une puissance conservée maximale de 58.7111 kVAr. Ces résultats confirment l'efficacité de la méthode MPS pour déterminer les paramètres optimaux pour la compensation de puissance réactive.

5- Conclusion

En conclusion, cette étude a mis en lumière le potentiel prometteur de l'amélioration du système Single Wire Earth Return (SWER) grâce à la compensation d'énergie réactive pour l'électrification rurale, particulièrement dans la région Fitovinany de Madagascar. Le défi persistant de l'électrification rurale est d'autant plus complexe dans les zones géographiquement dispersées, et le SWER se présente comme une solution viable pour surmonter ces obstacles, notamment dans le contexte du sud de Madagascar. Les résultats obtenus s'inscrivent pleinement dans l'Objectif de Développement Durable 7, en offrant une perspective concrète pour la fourniture d'une énergie propre et accessible. Cette recherche contribue ainsi à l'effort mondial visant à garantir à tous un accès durable à une énergie moderne et économiquement viable. Néanmoins, il est crucial de reconnaître que plusieurs problématiques subsistent pour rendre cette solution encore plus efficace et réaliste. Parmi celles-ci, les recherches futures pourraient explorer davantage les variations des résistivités des sols dans les zones d'étude, en tenant compte de leur impact sur les performances du SWER. De plus, l'attention portée à des aspects tels que la mise à la terre et l'équilibrage des phases aux départs des réseaux SWER pourrait grandement influencer l'efficacité et la stabilité de ces systèmes.

6- Références

- [1] : Michael E, Irechukwu, Aviti T. Mushi, Department of Electrical Engineering University of Dar es Salaam, Tanzania , « Proposal for Single Wire Earth Return Distribution System for Hombaza Village Electrification » International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC) ISSN :2305-0543, Jan 2021
- [2] : R. Karhammar, A. Sanghvi, E. Fernstrom, M. Aissa, J. Arthur, J. Tul-loch, I. Davies, S. Bergman, and S. Mathur, "Sub-saharan africa: Introducing low cost methods in electricity distribution networks," Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Tech. Rep. 104/06, October 2006.
- [3] Sani Sabo Mohammed, Nura Musa Tahir, Usman Bature Isyaku, Ahmad Bala Alhssan, Abdulrazak Sabo, Feasibility analysis of single wire earth return system for potential application in rural electrification in Nigeria. International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS) ISSN : 2252-8814, DOI 10.11591/ijaas. pp88-96 March 2022
- [4] Peter Wolfs, Steven Senini, Nasser Hoessein Zadeh, Dawit Seyoum Central Queensland University Rockhamptom,; Anthonu Loveday, Jon Turner Ergon Energy Rockhamptom, Australia « Thyristor Controlled Reactor Méthodes to Increase the Capacity of single Wire Earth Return Systems ».
- [5] JR Carson, « Wave Propagation in Overhead Wires with Earth Return » Bell Syst. Tech J 1926
- [6] : Bakkabulindi, G., Hesamzadeh, M. R., Amelin, M., & Da Silva, I. P. (2012). Planning Algorithm for Single Wire Earth Return Distribution Networks. Proceedings of the IEEE (ISBN : 978-1-4673-2729-9/12/\$31.00).
- [7] Kabir A. M.1, Abubakar A. S.2, Abdulrahman O.3, Salisu S, 4; A Matlab Based Backward-forward Sweep Algorithm for Radial Distribution Network Power Flow Analysis, article scientifique, 4 Department of Electrical and Computer Engineering, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 2015
- [8] BHAVANA, Load Flow Analysis using backward Forward Sweep Methode, International Journal of Computer Applications ICAET 2017
- [9] : Nirere, M. S., Muriithi, C. M., & Wekesa, C. (2017). Voltage Profile Improvement using Switched Capacitors: Case of Single Wire Earth Return Distribution Network.

International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol. 7, Iss. 2, Feb. 2017, 78. ISSN : 2249–6645.

[10] : Wolfs, P. J. (Senior Member, IEEE). Capacity Improvements for Rural Single Wire Earth Return Systems.

[11] : Hosseinzadeh, N., Mayer, J. E., & Wolfs, P. J. (2010). Rural Single Wire Earth Return distribution networks – Associated problems and cost-effective solutions. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 32(9), 983-990. DOI : 10.1016/j.ijepes.2010.08.009.

1- Tableaux

Tableau 1 : Demande en puissance du départ 1

Nœud	Commune	PUISSANCE [kW]	PUISSANCE [MW]
2	Bekatra	231	0,2307744
3	Ambalaroka	168	0,1683708
4	Lokomby	244	0,243555
5	Ambandrika	88	0,087546
6	Lanivo	131	0,1310286
7	Andemaka	251	0,2512662
8	Ankarimbary	126	0,1256022
9	Mahazoarivo	329	0,329235
10	Ilakatra	225	0,225348
11	Antananabo	93	0,0929724
12	Ifatsy	148	0,1481646
13	vohitsindry	206	0,2062128
14	Mahabo	138	0,137526
15	Ivato	78	0,0784068
16	Vohilany	41	0,0406362
Total		2497	2,496645

Tableau 2 : Demande en puissance du départ 2

Nœud	Commune	Total [kW]	Puissance [MW]
2	Sahalanona	168	0,1679424
3	Tanankambana	146	0,1456656
4	Antondinga	282	0,2821824
5	Ifanirea	267	0,267474
6	Ankarimbelo	190	0,1902906
7	Kalafotsy	294	0,2944632
8	Ambolomadinika	314	0,3144552
9	Ampasimpotsy	128	0,1284582
10	Ikongo	643	0,6431094
11	Belemoka	145	0,1445232
12	Ambatofotsy	249	0,2490528
13	Maromiandra	220	0,2198502
14	Manampatrana	186	0,185721
15	Ambinanitromby	183	0,1829364
16	Tongoina	283	0,282825
Total		3699	3,6989496

Tableau 3 : Données des nœuds du départ 1

Nœud N°	S [MVA]	P [MW]	Q[MVAr]
1	0	0	0
2	0.25642	0.23074	0.11177
3	0.18702	0.168371	0.08156
4	0.27062	0.243555	0.11796
5	0.097273	0.087546	0.0424
6	0.14556	0.131	0.063448
7	0.27918	0.251266	0.12169
8	0.13956	0.125602	0.060833
9	0.36582	0.329235	0.15946
10	0.25039	0.225348	0.10914
11	0.1033	0.0929724	0.045027
12	0.16463	0.148165	0.071761
13	0.22913	0.206213	0.099875
14	0.15281	0.137526	0.066608
15	0.087119	0.0784068	0.037974
16	0.044444	0.04	0.019373

Tableau 4 : Données des nœuds du départ 2

Nœud N°	S [MVA]	P [MW]	Q[MVAr]
1	0	0	0
2	0.18556	0.167	0.080884
3	0.16111	0.145	0.070226
4	0.24667	0.222	0.10752
5	0.29667	0.267	0.12932
6	0.21111	0.19	0.092021
7	0.32667	0.294	0.14239
8	0.34889	0.314	0.15208
9	0.14222	0.128	0.061992
10	0.71444	0.643	0.31142
11	0.16	0.144	0.069792
12	0.27667	0.249	0.1206
13	0.24333	0.219	0.10607
14	0.20556	0.185	0.089602
15	0.20222	0.182	0.088146
16	0.31333	0.282	0.13658

Tableau 5 : Données des lignes du départ 1

Branche N°	Origine	Extrémité	Longueur [km]	R[Ω]	X[Ω]
1	1	2	2	11.5987	0.48629
2	2	3	12.5	72.4919	3.0393
3	3	4	15	86.9902	3.6472
4	4	5	9	52.1941	2.1883
5	5	6	26	150.7831	6.3218
6	5	7	24.1	139.7643	5.8598
7	7	8	20	115.987	4.8629
8	8	9	16	92.7896	3.8903
9	8	10	10	57.9935	2.4314
10	10	11	13.5	78.2912	3.2825
11	8	12	20	115.987	4.8629
12	12	13	23	133.385	5.5923
13	13	14	24	139.1844	5.8355
14	13	15	17	98.5889	4.1335
15	15	16	5	28.9967	1.2157

Tableau 6 : Données des lignes du départ 2

Branche N°	Origine	Extrémité	Longueur [km]	R [Ω]	X[Ω]
1	1	2	8.9	51.6142	2.1497
2	2	3	11	63.7928	2.657
3	1	4	10.5	60.8932	2.5362
4	4	5	14.5	84.0906	3.5024
5	5	6	9.5	55.0938	2.2946
6	4	7	16.2	93.9495	3.913
7	7	8	24.3	140.9242	5.8695
8	7	9	26	150.7831	6.2801
9	7	10	20	115.987	4.8308
10	10	11	21	121.7863	5.0724
11	10	12	20	115.987	7.2463
12	12	13	17	98.5889	4.1062
13	13	14	20.8	120.6265	5.0241
14	13	15	15.5	89.8899	3.7439
15	15	16	19.6	113.6673	4.7342

Tableau 7 : Perte en puissance sans compensation du départ 1

Branche N°	Origine	Extrémité	Perte en P [KW]	Perte en Q[kVAr]
1	1	2	117.3656	136.3696
2	2	3	183.3837	213.0776
3	3	4	53.8923	62.61857
4	4	5	7.841196	9.110854
5	5	6	0.0057753	0.006710346
6	5	7	17.91292	20.81342
7	7	8	3.526593	4.097622
8	8	9	0.007315415	0.008500139
9	8	10	0.17622954	0.2048421
10	10	11	0.01986891	0.02308557
11	8	12	0.8128396	0.9444602
12	12	13	0.01463338	0.01700325
13	12	14	0.4394975	0.5106642
14	14	15	0.04268501	0.04959668
15	15	16	0.0008908563	0.001035093
Total			385.44417	447.34149

Tableau 8 : Perte en puissance sans compensation du départ 2

Branche N°	Origine	Extrémité	Perte en P [KW]	Perte en Q[kVAr]
1	1	2	0.2877445	0.3343484
2	2	3	0.08890978	0.1033099
3	1	4	139.8452	162.4919
4	4	5	2.401786	2.790817
5	5	6	0.1962754	0.228017
6	4	7	123.1749	143.1209
7	7	8	0.6087408	0.7072985
8	7	9	0.7429488	0.8632671
9	7	10	94.1386	109.383
10	10	11	2.516348	2.923792
11	10	12	59.5008	69.1368
12	12	13	7.526824	8.745781
13	13	14	0.2891176	0.33594669
14	13	15	1.353959	1.573195
15	15	16	0.1881616	0.218625
Total			432.4478	503.35

Tableau 9 : Profil de la tension sans compensation d'énergie réactive pour le départ 1

Nœud N°	Tension [pu]	Angle [degré]
1	1.00000	0
2	0.96709	0.014809
3	0.86583	0.068255
4	0.80709	0.10628
5	0.78999	0.11859
6	0.78920	0.11917
7	0.74823	0.15144
8	0.73159	0.16678
9	0.73092	0.16638
10	0.72898	0.16810
11	0.72796	0.16902
12	0.72366	0.17289
13	0.72253	0.17393
14	0.7173	0.17874
15	0.71564	0.18029
16	0.71551	0.18041

Tableau 10 : Profil de la tension sans compensation d'énergie réactive pour le départ 2

Noeud N°	Tension [pu]	Angle [degré]
1	1.00000	0
2	0.99891	0.00047367
3	0.99824	0.00076691
4	0.97396	0.011633
5	0.96996	0.01348
6	0.96903	0.013909
7	0.94377	0.026002
8	0.94118	0.027282
9	0.94081	0.027465
10	0.91465	0.040864
11	0.90979	0.043447
12	0.8865	0.056271
13	0.879	0.060563
14	0.87738	0.061503
15	0.87597	0.062322
16	0.8747	0.063063

Tableau 11 : Perte en puissance avec compensation du départ 1

Branche N°	Origine	Extrémité	Perte en P[kW]	Perte en Q [kVAr]
1	1	2	2.5063	2.91213
2	2	3	15.66440	18.2008
3	3	4	15.4307	17.9293
4	4	5	7.91034	9.19121
5	5	6	0.0254771	0.0296017
6	5	7	14.9114	17.3259
7	7	8	10.5672	12.2783
8	8	9	0.0524401	0.0609328
9	8	10	0.638977	0.742451
10	10	11	0.142429	0.165488
11	8	12	1.82802	2.12403
12	12	13	0.104899	0.121887
13	13	14	0.888564	1.03245
14	13	15	0.164679	0.191346
15	15	16	0.006385	0.00742
Total			70.84221	82.2252

Tableau 12 : Perte en puissance avec compensation du départ 2

Branche N°	Origine	Extrémité	Perte en P[kW]	Perte en Q [kVAr]
1	1	2	0.06865	0.0797738
2	2	3	0.722073	0.5319954
3	1	4	1.72807	14.6874
4	4	5	15.01178	3.49611
5	5	6	7.12807	0.95349
6	4	7	26.524	32.6672
7	7	8	7.254344	3.08787
8	7	9	17.9952	3.11109
9	7	10	30.7683	24.8792
10	10	11	21.6797	6.95597
11	10	12	29.1639	15.8644
12	12	13	19.1639	7.89456
13	13	14	11.9505	1.46152
14	13	15	10.6203	1.88454
15	15	16	11.4714	1.06943
Total			176.4196	118.62454

Tableau 13 : Profil de la tension sans compensation d'énergie réactive pour le départ 1

Nœud N°	Tension [pu]	Angle [degré]
1	1.00000	0
2	0.99871	0.00056082
3	0.99064	0.0040991
4	0.98189	0.0080119
5	0.97704	0.010212
6	0.97644	0.010184
7	0.96616	0.015236
8	0.95784	0.019166
9	0.95732	0.019416
10	0.95639	0.019856
11	0.9556	0.020236
12	0.95438	0.020821
13	0.95349	0.021248
14	0.95174	0.022093
15	0.95079	0.022555
16	0.95068	0.022605

Tableau 14 : Profil de la tension sans compensation d'énergie réactive pour le départ 2

Nœud N°	Tension [pu]	Angle [degré]
1	1.00000	0
2	0.99961	0.00016966
3	0.99913	0.00037953
4	0.99122	0.003846
5	0.98936	0.0046709
6	0.98869	0.0049668
7	0.98040	0.0086924
8	0.97853	0.0095421
9	0.97826	0.00096637
10	0.97124	0.012886
11	0.96771	0.014526
12	0.96357	0.016467
13	0.95986	0.018218
14	0.95867	0.018783
15	0.95838	0.018924
16	0.95744	0.019368

Tableau 15 : Comparaison des résultats sans et avec compensation : départ 1

Critère	Sans Compensation	Avec Compensation
Nombre de nœud	16	16
Charge totale	2.45[MVA]	2.45[MVA]
Perte Totale en Puissance active	385.44417 [kW]	70.84221 [kW]
Perte Totale en Puissance réactive	447.34149[kVAr]	82.2252[kVAr]
Tension Maximale	1.0000[pu]	1.0000[pu]
Tension Minimale	0.71551[pu]	0.95068[pu]

Tableau 16 : Comparaison des résultats sans et avec compensation : départ 2

Critère	Sans Compensation	Avec Compensation
Nombre de nœud	16	16
Charge totale	4.03[MVA]	4.03[MVA]
Perte Totale en Puissance active	432.4478 [kW]	76.4196 [kW]
Perte Totale en Puissance réactive	503.35 [kVAr]	118.62454 [kVAr]
Tension Maximale	1.0000[pu]	1.0000[pu]
Tension Minimale	0.8747[pu]	0.95744[pu]

Tableau 17 : Dimensionnement et emplacement du condensateur pour le départ 1

Critère	Valeur
Nombre de nœud	16
Puissance Conservée Maximale	173.502 kVAr
Emplacement Optimal	Nœud 13
Dimension Optimale	1106.107 kVAr

Tableau 18 : Dimensionnement et emplacement du condensateur pour le départ 2

Critère	Valeur
Nombre de nœud	16
Puissance Conservée Maximale	58.7111kVAr
Emplacement Optimal	Nœud 15
Dimension Optimale	373.3501KVAr

2- Figures

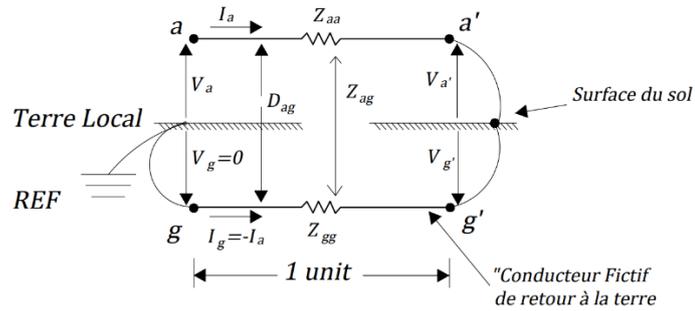


Figure 1 : Modèle de CARSON

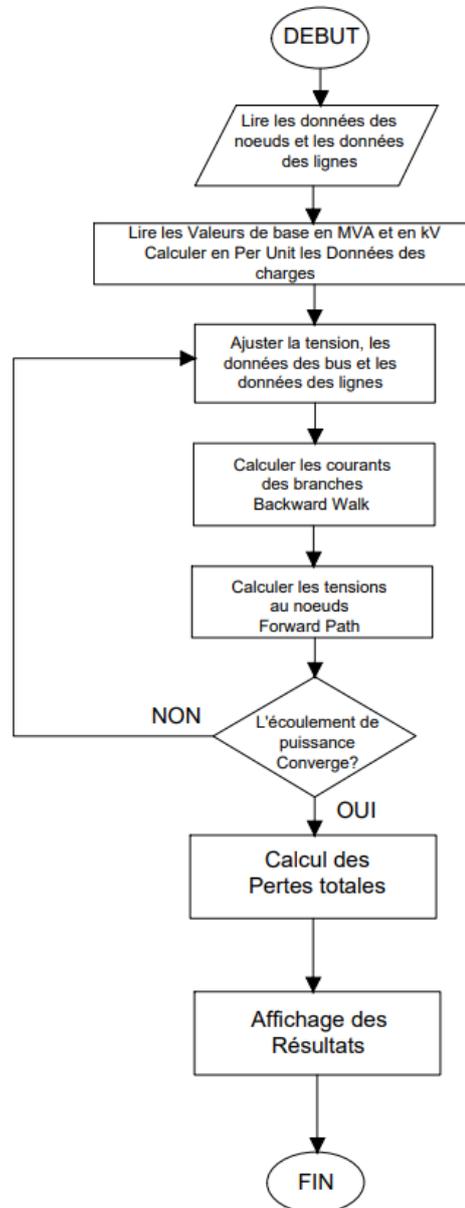


Figure 2 : organigramme backward forward sweep

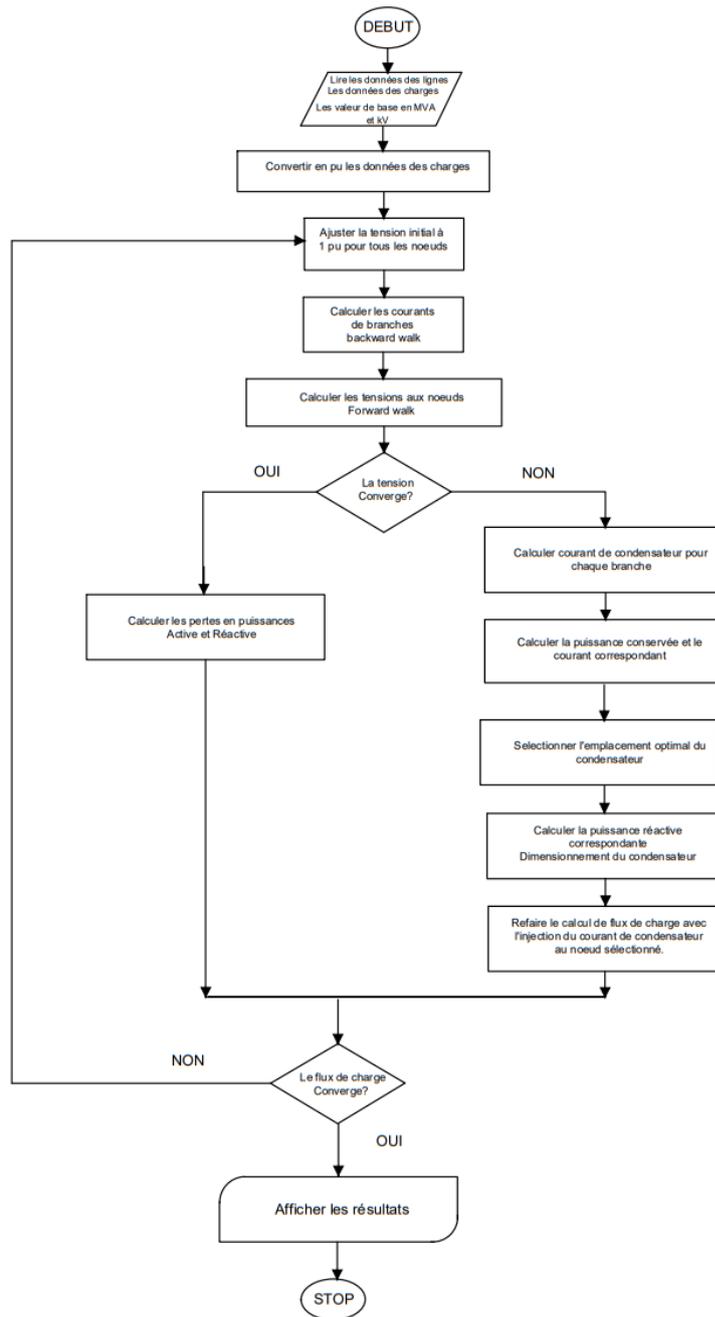


Figure 3 : Organigramme Maximum Power Saving

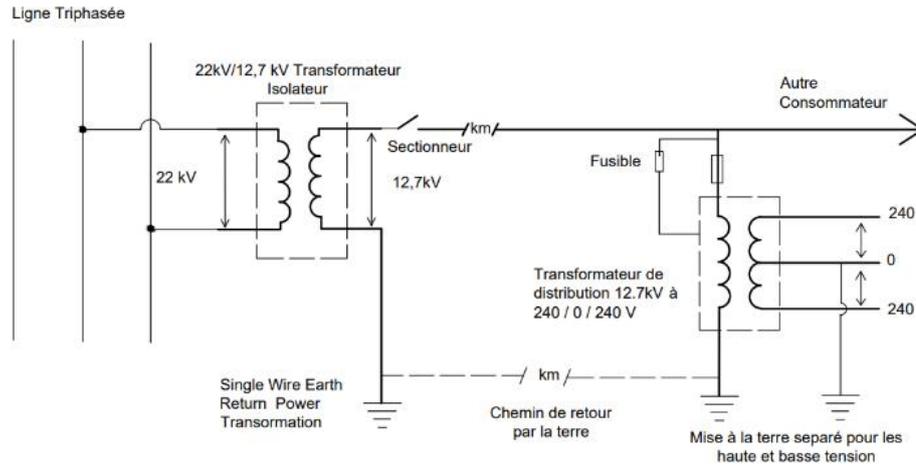


Figure 4 : Configuration SWER Isolée

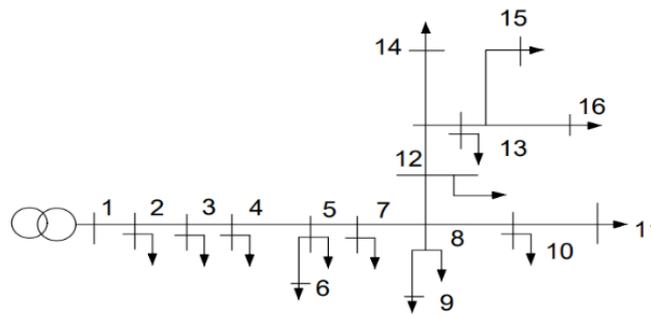


Figure 5 : Diagramme unifilaire Départ 1

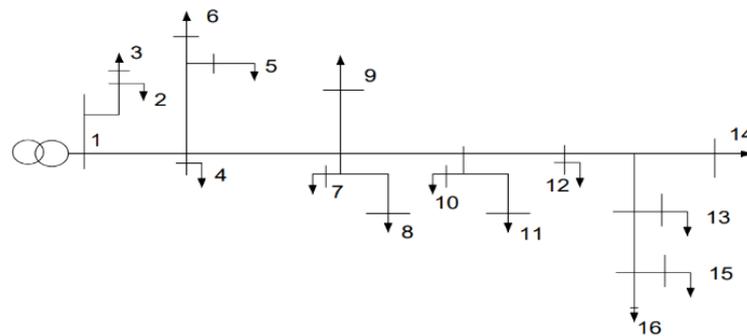


Figure 6 : Diagramme unifilaire

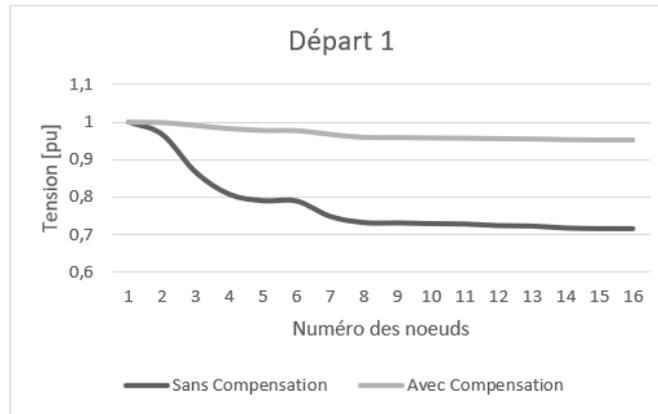


Figure 7 : Profil de la tension sans et avec le condensateur (Départ1)

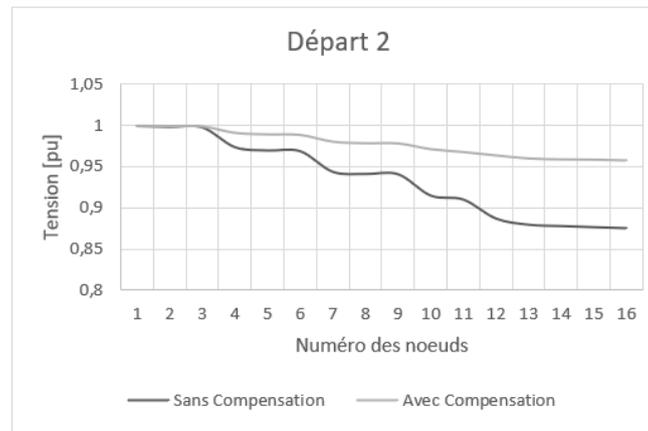


Figure 8 : Profil de la tension sans et avec le condensateur (Départ 2)



Figure 9 : Paysage d'un système SWER existant à Madagascar