

Gestion de l'équilibrage du réseau jusqu'aux abonnés

*Analyse et solutions techniques pour la distribution
BT*

Auteur : Elisée NZORUBARA

Année académique 2025-2026

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude aux ingénieurs et techniciens de la REGIDESO (Burundi) pour m'avoir ouvert leurs portes et fourni les informations nécessaires à la réalisation de ce projet. Leurs explications sur la réalité des infrastructures électriques et les défis quotidiens du réseau de distribution ont été une source d'inspiration majeure pour ce travail.

Résumé

Ce rapport technique se concentre sur une problématique critique du réseau de distribution électrique en plein développement : la gestion et l'équilibrage des phases jusqu'aux abonnés finaux. Prenant pour cas d'étude les infrastructures de la REGIDESO à Bujumbura, ce travail propose une analyse sur le terrain des conséquences du déséquilibre sur le matériel (notamment la casse prématurée des transformateurs).

Pour répondre à ce défi technique et organisationnel, ce projet modélise trois approches de résolution chiffrées : une solution pragmatique logicielle (outil automatisé Excel), une solution de diagnostic professionnel (analyseurs réseaux type Fluke couplés à une réorganisation des méthodes de travail), et une solution innovante (POC de boîtier IoT) pour amorcer la transition vers une maintenance prédictive.

Sommaire

1	Introduction	5
1.1	Problématique	5
1.2	Objectifs du projet	5
2	État de l'Art : Théorie et Conséquences du Déséquilibre	5
2.1	Structure d'un réseau Basse Tension (BT)	5
2.2	Le déséquilibre des phases dans la pratique	6
2.3	Conséquences techniques et économiques	6
3	Analyse de la Situation Actuelle	6
3.1	Méthodologie de relevé actuelle	6
3.2	Diagnostic et Bilan	6
4	Solutions Proposées et Implémentation	7
4.1	Solution 1 : L'approche pragmatique (Outil Excel Automatisé)	7
4.2	Solution 2 : L'approche professionnelle (Analyseurs Fluke et Réorganisation)	7
4.3	Solution 3 : Vers une gestion dynamique (Boîtier IoT de maintenance pré- dictive)	8
5	Impact et Retours sur Investissement (ROI)	8
5.1	Comparatif financier et technique	8
5.2	Gains pour le gestionnaire de réseau	9
6	Conclusion et Perspectives	9
7	Bibliographie	10

1 Introduction

1.1 Problématique

Les réseaux électriques de distribution dans les villes en forte expansion, comme Bujumbura au Burundi, font face à des défis techniques majeurs. L'un des problèmes les plus récurrents et coûteux est la casse prématurée des transformateurs de distribution Basse Tension (BT). Le constat sur le terrain montre que lors du raccordement de nouveaux abonnés (qui se multiplient grâce aux projets d'électrification massive¹), il n'y a pas de vérification stricte sur l'équilibre entre les phases.

Cette absence de gestion de la charge provoque des asymétries sévères. Cela cause non seulement des chutes de tension récurrentes chez les clients (impactant la qualité du service), mais aussi une usure très rapide du matériel, obligeant la REGIDESO à des opérations curatives lourdes et coûteuses.

1.2 Objectifs du projet

Ce projet a pour objectif d'informer un regard d'ingénieur sur le fonctionnement concret du réseau de distribution BT et de proposer des pistes d'amélioration concrètes et chiffrées. Nous analyserons la situation actuelle et proposerons trois solutions distinctes, adaptées à différents niveaux de capacité technologique et budgétaire.

2 État de l'Art : Théorie et Conséquences du Déséquilibre

2.1 Structure d'un réseau Basse Tension (BT)

Dans les zones d'habitation, le réseau BT distribue l'énergie en triphasé avec un neutre. Les câbles utilisés sont souvent des pré-assemblés² (ex : $3 \times 70 + 1 \times 54.6 + 1 \times 16mm^2$). Les trois câbles de section identique sont les phases (L1, L2, L3) et le câble de section différente est le neutre, qui assure le retour des courants de déséquilibre. Théoriquement, les charges (les habitations) doivent être réparties de manière égale (environ 33.3 %) sur chaque phase pour que la somme vectorielle des courants soit proche de zéro dans le neutre.

1. Banque MONDIALE. *Burundi : Projet d'Énergie Solaire dans les Communautés Locales (SOLEIL)*. Objectif d'accès universel à l'électricité à l'horizon 2030 au Burundi. World Bank Group, 2020. URL : <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P164438>.

2. AFNOR NF C 33-209. *NF C 33-209 : Câbles isolés ou protégés pour réseaux d'énergie - Faisceaux pour réseaux aériens de tension assignée 0,6/1 kV*. Norme utilisée pour le dimensionnement des câbles BT pré-assemblés. AFNOR. 1996.

2.2 Le déséquilibre des phases dans la pratique

Dans la réalité, le déséquilibre survient lorsque de nombreux abonnés monophasés sont connectés de manière aléatoire sur la même phase. Cela s'explique par un manque de coordination entre les équipes de génie civil qui tirent la ligne et les électriciens qui raccordent le compteur de l'abonné. Sur le terrain, l'opérateur a tendance à raccorder la maison au fil de phase le plus facile d'accès ou le plus bas sur le poteau, sans tenir compte de la charge préexistante.

2.3 Conséquences techniques et économiques

Les conséquences de ce déséquilibre sont sévères :

- **Courant de neutre élevé** : Le courant de retour dans le neutre devient très important, ce qui crée un échauffement (effet Joule) et des pertes techniques non facturées.
- **Déséquilibre de tension** : La tension sur la phase surchargée s'effondre (lumières faibles, équipements qui ne démarrent pas), tandis que la tension sur les phases sous-chargées augmente, risquant de détruire les appareils ménagers.
- **Casse du transformateur** : Ce déséquilibre crée des contraintes thermiques extrêmes dans une seule des bobines du transformateur (ex : 30/0.4 KV). L'huile se dégrade plus vite, les isolants fondent, entraînant la destruction prématurée de l'équipement³.

3 Analyse de la Situation Actuelle

3.1 Méthodologie de relevé actuelle

Actuellement, la gestion de ce problème est réactive (maintenance curative). Lorsqu'un quartier subit des coupures répétées (fusibles qui fondent) ou que la chute de tension est trop visible, une équipe est envoyée.

3.2 Diagnostic et Bilan

Prenons pour exemple un transformateur de 160 KVA, la phase L1 peut tirer 180A, la phase L2 120A et la L3 seulement 40A. Le transformateur fonctionne donc à sa limite critique sur une seule bobine, perdant de fait entre 20 % et 30 % de sa capacité utile globale. L'opération d'équilibrage manuelle qui s'ensuit est souvent faite "à l'aveugle" par itérations, ce qui prend un temps considérable aux équipes.

3. IEEE. *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*. Étude sur l'impact de la température et du déséquilibre sur le vieillissement de l'isolant. 2012.

4 Solutions Proposées et Implémentation

Face à ce constat matériel, il est impératif de modifier la manière dont l'équilibrage est pensé et maintenu. Voici trois propositions de solutions, de la plus accessible à la plus innovante, avec une estimation de leur coût d'implémentation.

4.1 Solution 1 : L'approche pragmatique (Outil Excel Automatisé)

Cette première approche est logicielle. Elle vise à remplacer les calculs empiriques sur le terrain par un outil d'aide à la décision mathématique, sans nécessiter de nouveaux équipements lourds.

- **Le fonctionnement** : Les techniciens effectuent leur relevé ponctuel de température ou de courant par pince ampèremétrique et rentrent ces valeurs dans un fichier Excel automatisé. L'algorithme calcule instantanément le plan de reconnexion optimal (ex : "Déplacer 30A de L1 vers L3") pour atteindre l'équilibre parfait.
- **Estimation du coût** : La solution exploite les licences informatiques déjà présentes dans l'entreprise et les pinces ampèremétriques existantes. Le coût est le temps de réalisation de l'Excel est négligeable comparée à formation des équipes (1 à 2 heures).

Conclusion : L'on passe d'un équilibrage intuitif à une méthode fiable. C'est la solution la plus rapide à déployer pour soulager les transformateurs critiques.

4.2 Solution 2 : L'approche professionnelle (Analyseurs Fluke et Réorganisation)

Le problème des mesures à la pince ampèremétrique est qu'elles sont ponctuelles. Une charge équilibrée à 14h peut être complètement déséquilibrée à 19h. Cette solution repose sur du matériel de diagnostic industriel et une méthode de travail stricte.

- **L'équipement** : L'acquisition d'analyseurs de qualité d'énergie portables (Type *Fluke 1770* ou *Fluke 435*). Ces appareils sont branchés dans le poste et laissés sur place pendant 48h à 72h pour enregistrer le profil de charge complet (courants, tensions, harmoniques).
- **L'organisation technique** : Mettre en place un standard visuel sur les poteaux (bagues de couleurs pour L1, L2, L3). Lors des nouveaux raccordements, l'électricien doit obligatoirement suivre une feuille de route dictée par le bureau d'études pour brancher la maison sur la phase spécifiée, avec vérification avant validation du compteur.
- **Estimation du coût** : Élevé (5 000 € à 8 000 € par appareil Fluke)⁴ et en temps d'acquisition. L'investissement est conséquent pour la REGIDESO, mais il correspond aux standards internationaux de l'industrie. À cela s'ajoute le coût de la formation des techniciens et de la signalétique sur le réseau.

4. FLUKE CORPORATION. *Analyseurs de qualité du réseau électrique triphasé de la série Fluke 1770*. Catalogue et spécifications techniques incluant les gammes de prix industrielles. Fluke. 2022.

Conclusion : C'est la solution la plus robuste et professionnelle à moyen terme. Elle traite non seulement les conséquences (grâce au Fluke) mais aussi la cause à la racine (grâce à l'organisation des raccordements).

4.3 Solution 3 : Vers une gestion dynamique (Boîtier IoT de maintenance prédictive)

En prévision d'une future digitalisation du réseau (type SCADA BT), cette solution propose de développer un Proof of Concept (POC) d'un système intelligent et connecté à faible coût.

- **Le concept :** Concevoir un boîtier de surveillance IoT (Internet des Objets) basé sur des microcontrôleurs (type ESP32 ou Arduino) équipés de tores de mesure de courant non intrusifs.
- **Fonctionnement :** Ce boîtier mesure en continu le courant et la tension sur les trois phases. S'il détecte un déséquilibre dépassant un seuil (ex : $> 15\%$) pendant plus de 2 heures, il envoie une alerte automatique par module GSM (SMS) aux équipes de maintenance.
- **Estimation du coût : Faible/Modéré (400 € à 600 € par boîtier)**⁵. Le coût matériel d'un tel module développé en interne ou par une start-up locale est très bas. L'investissement principal réside dans la R&D logicielle et le maintien du serveur/abonnement SIM.

Conclusion : L'on passe d'une maintenance curative à une maintenance prédictive (intervenir avant la casse). C'est une solution très innovante qui est un mix des solutions précédentes. Elle demande cependant un temps de développement plus élevé.

5 Impact et Retours sur Investissement (ROI)

5.1 Comparatif financier et technique

Les trois solutions présentées offrent des retours sur investissement différents, mais toutes convergent vers le même objectif de rentabilité : éviter le remplacement des transformateurs.

5. M. A. HOSSAIN et al. « Low-Cost IoT-Based Smart Grid Monitoring System ». In : *IEEE Access* (2019). Référence pour l'estimation technique et économique des boîtiers IoT à base de microcontrôleurs type ESP32.

Solution	Coût initial	Précision	Maturité requise
1. Outil Excel Automatisé	développement de l'outil	Faible (Mesure à l'instant T)	Immédiate
2. Analyseurs Fluke + Org.	5 000 - 8 000 € / unité	Très Haute (Profil 48h)	Formation technique
3. Boîtier IoT (POC)	600 € / transformateur	Moyenne (Monitoring continu)	R&D informatique

TABLE 1 – Comparaison des solutions d'équilibrage

5.2 Gains pour le gestionnaire de réseau

En appliquant rigoureusement l'une de ces méthodes d'équilibrage, le gestionnaire de réseau peut récupérer jusqu'à un quart de la puissance nominale perdue de ses transformateurs. Un transformateur équilibré voit sa durée de vie doublée (passant de quelques années en zone saturée à plus de 20 ans)⁶, ce qui diminue considérablement les coûts d'achat de nouveau matériel (un transformateur 160 KVA neuf coûte plusieurs milliers d'euros⁷) et désengorge le travail à l'atelier de réparation.

Enfin, la qualité de l'énergie livrée aux abonnés s'en trouve stabilisée, réduisant les interventions d'urgence et garantissant une meilleure continuité de service.

6 Conclusion et Perspectives

L'instabilité d'un réseau de distribution liée au déséquilibre des phases a des répercussions matérielles lourdes, particulièrement dans les pays où l'électrification s'accélère. À travers cette analyse, il est clair que la simple résolution "par l'expérience" ne suffit plus pour garantir la pérennité du matériel BT.

Les solutions proposées dans ce projet, allant de l'algorithme Excel statique, au matériel de pointe Fluke, jusqu'au POC de télémétrie IoT, prouvent qu'il existe un panel d'outils adaptables aux contraintes budgétaires d'un service public. La clé réside dans la transition d'une gestion curative à une gestion méthodique et, à terme, prédictive. L'ingénieur ne doit pas seulement constater les dégâts ou remplacer les pièces fondues, il doit concevoir et implémenter des processus pour structurer la croissance du réseau. Ce travail constitue une base solide pour anticiper et préparer techniquement la mise en place de futurs "Smart Grids" locaux.

6. IEEE, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*.

7. RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE) / ACTEURS DE LA DISTRIBUTION. *Coûts de référence des équipements de distribution HTA/BT*. Estimations moyennes du coût d'un transformateur 160 KVA neuf. 2023.

7 Bibliographie

Références

- 33-209, AFNOR NF C. *NF C 33-209 : Câbles isolés ou protégés pour réseaux d'énergie - Faisceaux pour réseaux aériens de tension assignée 0,6/1 kV*. Norme utilisée pour le dimensionnement des câbles BT pré-assemblés. AFNOR. 1996.
- FLUKE CORPORATION. *Analyseurs de qualité du réseau électrique triphasé de la série Fluke 1770*. Catalogue et spécifications techniques incluant les gammes de prix industrielles. Fluke. 2022.
- HOSSAIN, M. A. et al. « Low-Cost IoT-Based Smart Grid Monitoring System ». In : *IEEE Access* (2019). Référence pour l'estimation technique et économique des boîtiers IoT à base de microcontrôleurs type ESP32.
- IEEE. *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*. Étude sur l'impact de la température et du déséquilibre sur le vieillissement de l'isolant. 2012.
- MONDIALE, Banque. *Burundi : Projet d'Énergie Solaire dans les Communautés Locales (SOLEIL)*. Objectif d'accès universel à l'électricité à l'horizon 2030 au Burundi. World Bank Group, 2020. URL : <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P164438>.
- RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ (RTE) / ACTEURS DE LA DISTRIBUTION. *Coûts de référence des équipements de distribution HTA/BT*. Estimations moyennes du coût d'un transformateur 160 KVA neuf. 2023.