

Modélisation Et Préviation Des Pertes De Distribution Electricité Nationale De Madagascar Par L'approche Arima Et Holt-Winters

Onja Mickael RAHELISON¹, Tokiniaina RAZANAKOLONA¹, Eric Jean Roy SAMBATRA^{1,2},
Charles Bernard ANDRIANIRINA^{1,3}

¹Ecole Doctorale Thématique « Energies Renouvelables et Environnement » de l'Université d'Antsiranana,
Madagascar

²Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana, Madagascar

³Institut Supérieur des Sciences et Technologie de Mahajanga, Madagascar

Corresponding Author: Onja Mickael RAHELISON. E-mail: onjamickaelrahelison@gmail.com



Resume : Le secteur électrique étant un fléau omniprésent dans les pays en développement et plus particulièrement la zone Afrique Subsaharienne, les pertes de toute nature peuvent en être des raisons majeures. Madagascar est pris comme cas d'étude. À partir des données annuelles couvrant la période 2008–2024 fournies par la société nationale d'électricité, les pertes totales atteignent en moyenne 22,6% de la production au niveau de la distribution, 8,2% lors du transport, et 11% correspondent à des pertes non collectées, selon les estimations du Fonds Monétaire International. La rareté de l'existence d'outils de management de ce fléau a amené les auteurs à proposer une approche d'évaluation et de prévision pouvant servir aux acteurs majeurs du secteur. Ainsi, cet article analyse les pertes d'énergie électrique de Madagascar, à l'échelle nationale en combinant des méthodes de modélisation et de prévision statistique. L'approche par les modèles ARIMA (1,0,1) et Holt-Winters basée sur des séries temporelles de production, de ventes et de pertes est adoptée et permet d'anticiper les dynamiques futures. Les résultats indiquent qu'à l'horizon 2029, la production pourrait atteindre environ 2,2TWh, tandis que les pertes resteraient comprises entre 0,5 et 0,65TWh, soit près de 25% de l'électricité produite. Les diagnostics des résidus confirment l'adéquation des modèles retenus, avec des résidus globalement indépendants et distribués de façon quasi normale. Ces résultats mettent en évidence la persistance des pertes structurelles dans le système électrique malgache et soulignent l'urgence d'investissements ciblés et de réformes institutionnelles pour améliorer l'efficacité technique et la viabilité financière du secteur.

Mots-clés : JIRAMA, Modélisation ARIMA, Holt-Winters, Prévisions énergétiques, Pertes d'électricité, Madagascar, Efficacité du système électrique, Pays en Développement.

Abstract: The electricity sector remains a pervasive challenge in developing countries, particularly in Sub-Saharan Africa, where losses of various kinds are often major contributing factors. Madagascar is taken as a case study. Based on annual data covering the period 2008–2024 provided by the national electricity company, total losses average 22.6% of production at the distribution level, 8.2% during transmission, and 11% correspond to uncollected losses, according to estimates from the International Monetary Fund. The scarcity of management tools to address this issue has led the authors to propose an evaluation and forecasting approach that could serve key stakeholders in the sector. Accordingly, this article analyzes electricity losses in Madagascar at the national level by combining statistical modeling and forecasting methods. The ARIMA (1,0,1) and Holt-Winters models, based on time series of production, sales, and losses, are adopted to anticipate

future dynamics. The results suggest that by 2029, production could reach around 2.2 TWh, while losses would remain between 0.5 and 0.65 TWh, representing nearly 25% of total electricity generated. Residual diagnostics confirm the adequacy of the models, with residuals being largely independent and approximately normally distributed. These findings highlight the persistence of structural losses in Madagascar's power system and underscore the urgency of targeted investments and institutional reforms to enhance technical efficiency and ensure the sector's financial sustainability.

Keywords: JIRAMA, ARIMA modeling, Holt-Winters, energy forecasting, electricity losses, Madagascar, power system efficiency, developing countries.

1. INTRODUCTION

Le secteur de l'électricité constitue un levier fondamental du développement économique et social, en particulier dans les pays en développement où l'accès universel à l'énergie demeure un défi majeur [1]. À Madagascar, la compagnie nationale JIRAMA assure encore près de 85 % de la production et de la distribution d'électricité, tandis que des producteurs indépendants et des projets d'électrification rurale, notamment soutenus par la Nouvelle Politique de l'Energie et le Pacte Énergétique National, complètent l'offre à travers des mini-réseaux et des centrales décentralisées [2]. Néanmoins, le taux national d'accès à l'électricité reste faible, estimé à environ 35% en 2023, avec de fortes disparités entre zones urbaines et rurales [3]. Le système électrique malgache est confronté à des difficultés structurelles persistantes, notamment un déficit de production, une dépendance élevée aux centrales thermiques coûteuses, et surtout des pertes considérables dans le réseau [4]. Selon le Fonds Monétaire International (FMI), ces pertes atteignent en moyenne 22,6% au niveau de la distribution, 8,2% lors du transport et 11% correspondent à de l'électricité non collectée [3]. La presse nationale et divers rapports signalent que ces pertes sont amplifiées par des causes multiples telles que le vol d'électricité, les branchements frauduleux, les défaillances techniques, ainsi que l'absence d'un système moderne de gestion et de comptage [5]. Ces inefficiences compromettent non seulement la viabilité financière de l'opérateur public, mais aussi la fiabilité de l'approvisionnement, accentuant la vulnérabilité du système électrique national. Dans la littérature, plusieurs outils d'analyse et de prévision des productions et pertes énergétiques sont mobilisés. Les approches économétriques et les modèles d'équilibre partiel permettent d'intégrer des variables exogènes (prix, revenus, climat), mais nécessitent de longues séries fiables et sont sensibles aux ruptures structurelles [6]. Les méthodes d'ingénierie énergétique, souvent utilisées par les opérateurs, offrent une bonne précision technique, mais elles se limitent à des contextes locaux et exigent des données détaillées rarement disponibles [7]. Enfin, les modèles statistiques de séries temporelles, tels qu'ARIMA et Holt-Winters, présentent l'avantage de pouvoir capter les tendances, saisonnalités et chocs sur des données limitées, ce qui en fait un outil adapté aux pays en développement où l'information est parcellaire [8,9]. Dans ce contexte, le présent article propose une modélisation et une prévision des pertes d'électricité de la JIRAMA à partir des données disponibles sur la période 2008–2024, en mobilisant les approches ARIMA et Holt-Winters. L'objectif est double : d'une part, mettre en évidence l'ampleur et la persistance des pertes dans le système électrique malgache ; d'autre part, fournir des projections quantitatives pouvant servir de base à l'élaboration de politiques en matière d'efficacité énergétique et de gouvernance sectorielle.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Matériels

Les données utilisées dans cette étude proviennent de la compagnie nationale d'électricité de Madagascar (JIRAMA). Plus spécifiquement, le fichier Excel intitulé STAT_JIRAMA_2008_2024.xlsx, disponible sur le site institutionnel [10], a été mobilisé. Ce tableau regroupe des séries chronologiques annuelles couvrant la période 2008–2024, incluant la production brute

d'électricité, les ventes totales (HT/MT/BT), les pertes (techniques et commerciales), ainsi que le nombre d'abonnés. Ces données officielles constituent la base empirique de l'analyse menée dans cet article.

2.2. Méthodes

L'approche méthodologique repose sur la modélisation et la prévision de séries temporelles. Dans un premier temps, les données ont été nettoyées et transformées en séries annuelles structurées à l'aide de Python (pandas, numpy). Des visualisations initiales ont permis de mettre en évidence les tendances de la production, des ventes et des pertes. Dans un second temps, deux modèles statistiques ont été appliqués :

- ✓ Le modèle Holt-Winters (lissage exponentiel triple) est utilisé pour capter la tendance et les variations de long terme [8,11]. Il décompose la série en trois composantes : niveau L_t , tendance T_t et saisonnalité S_t . Dans notre cas (données annuelles), la version non saisonnière (Holt) peut s'écrire :

$$\begin{aligned} L_t &= \alpha y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \\ \{T_t &= \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \\ \hat{y}_{t+h|t} &= L_t + hT_t \end{aligned}$$

où y_t est la valeur observée à l'année t et h l'horizon de prévision (en années). Les paramètres $\alpha, \beta \in [0,1]$ sont estimés par minimisation de la RMSE.

Cette approche permet de modéliser les tendances de long terme et de lisser les fluctuations conjoncturelles.

- ✓ Le modèle ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) a été estimé pour identifier les dépendances temporelles et fournir des prévisions robustes [8] qui se définit comme :

$$\Phi_p(L)(1 - L)^d y_t = c + \Theta_q(L)\varepsilon_t$$

où :

- L est l'opérateur de retard ($Ly_t = y_{t-1}$) ;
- p est l'ordre autorégressif (AR), correspondant au nombre de retards de y_t dans $\Phi_p(L)$;
- q est l'ordre moyenne mobile (MA), correspondant au nombre de retards du terme d'erreur dans $\Theta_q(L)$;
- $\Phi_p(L) = 1 - \phi_1 L - \dots - \phi_p L^p$ représente la composante autorégressive ;
- $\Theta_q(L) = 1 + \theta_1 L + \dots + \theta_q L^q$ la composante de moyenne mobile ;
- d indique l'ordre de différenciation pour stationnariser la série ;
- ε_t est le terme d'erreur blanche de variance constante σ^2 .

Les performances des modèles ont été comparées à l'aide d'indicateurs d'erreur (MAE et RMSE) [12]. La validité statistique des modèles retenus a ensuite été évaluée par des diagnostics des résidus (tests de Ljung-Box, Jarque-Bera et analyse des corrélogrammes), conformément à la littérature dédiée aux tests et diagnostics des séries temporelles [12]. La Figure 1 illustre le schéma fonctionnel, résumant les principales étapes de traitement et de modélisation appliquées aux deux approches ARIMA et Holt-Winters.

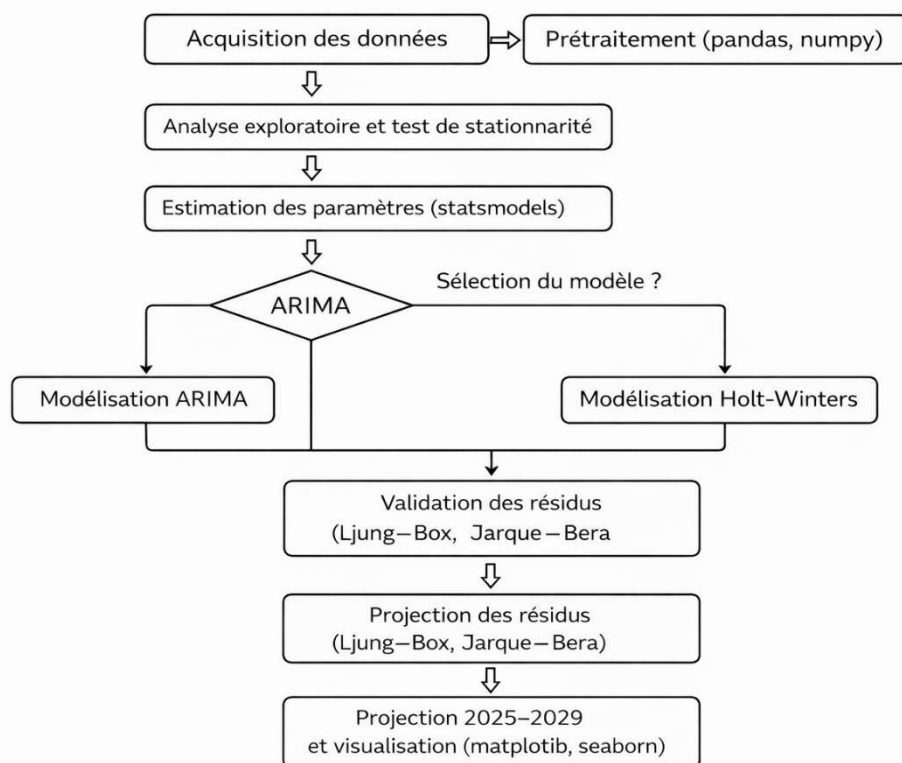


Figure 1 : Schéma fonctionnel du processus de modélisation

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Production, ventes et pertes d'électricité à Madagascar : trajectoires historiques et scénarios prévisionnels

La figure ci-dessous présente l'évolution historique et les projections à cinq ans de la production (bleu), des ventes (vert) et des pertes (rouge) d'électricité de la JIRAMA sur la période 2008–2029, issue de l'approche ARIMA. 2029 n'a pas été choisi au hasard. Cette année de projection est mise en cohérence avec la date butoire mentionnée dans les documents de politique de développement énergétique de Madagascar (NPE). Ainsi, un premier groupe de variations représente l'évolution temporelle réelle des paramètres d'étude susmentionnés (2008-2024) et un deuxième groupe met en perspective les prévisions pour 5 ans d'horizon (2025-2029) avec les marges de confiance estimées.

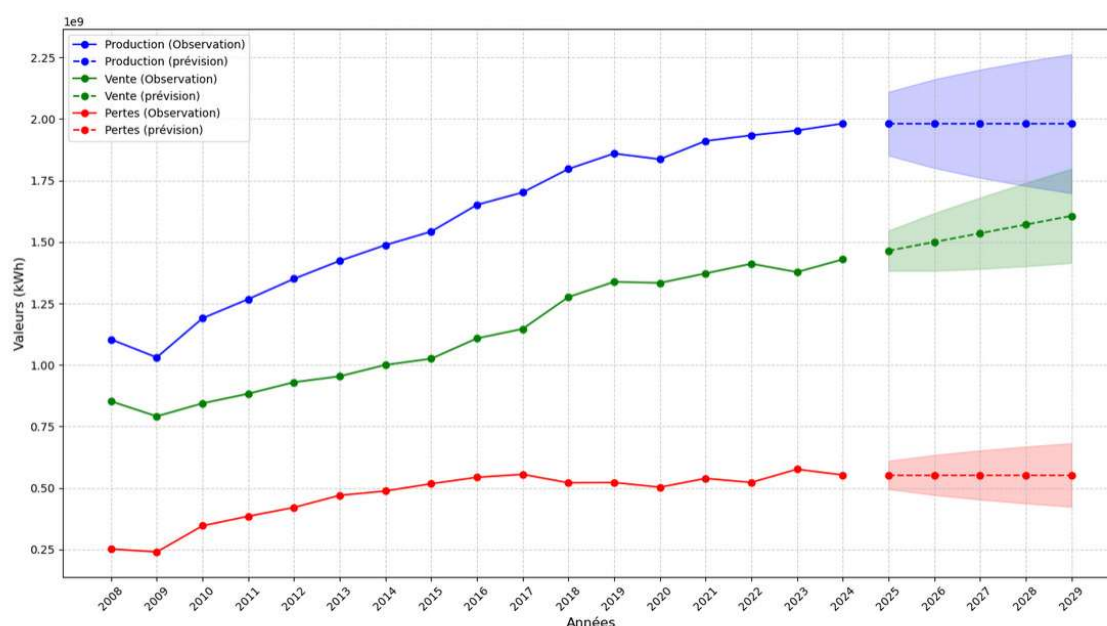


Figure 2 : Prévisions ARIMA sur 5 ans (Production, Vente, Pertes)

Les résultats indiquent une progression soutenue de la production et des ventes d'électricité entre 2008 et 2024, avec un passage de 1,1 milliard de kWh à près de 2,0 TWh pour la production et de 0,85 à environ 1,45 TWh pour les ventes. Cette dynamique positive devrait se poursuivre au cours des cinq prochaines années, les prévisions ARIMA suggérant une production comprise entre 1,9 et 2,3 TWh et des ventes oscillantes entre 1,45 et 1,75 TWh à l'horizon 2029. Les pertes, qui s'établissaient autour de 0,25 TWh en 2008 et atteignaient environ 0,55 TWh en 2024, demeurent à un niveau structurellement élevé. Les projections indiquent une stabilisation, avec des volumes prévus compris entre 0,5 et 0,65 TWh à l'horizon 2029. L'écart persistant entre la production et les ventes confirme le poids des pertes techniques et commerciales dans le système électrique malgache, représentant plus de 20% de l'électricité produite. Enfin, l'élargissement progressif des intervalles de confiance après 2025 témoigne de l'incertitude croissante entourant les trajectoires futures et souligne la nécessité d'articuler la planification énergétique avec des politiques publiques robustes en matière de réduction des pertes et de sécurisation des revenus.

3.2. État des lieux des pertes techniques et non techniques

Selon l'analyse des documents d'étude, des constats in visu mais aussi et surtout des échanges avec les personnes clés de la société d'électricité, les pertes d'électricité dans le réseau de la JIRAMA se divisent en deux grandes catégories :

- ✓ Les pertes techniques, qui proviennent principalement du transport et de la distribution (effet Joule, surcharges, équipements vétustes, déséquilibres de phase).
- ✓ Les pertes non techniques, liées essentiellement aux fraudes, aux erreurs de comptage, aux branchements clandestins et aux défauts de facturation.

Le graphique ci-dessous illustre une surface 3D interpolée représentant la relation entre : l'année (axe des abscisses X), la production brute (axe des ordonnées Y, en GWh), les pertes (axe des cotes Z, en GWh).

La couleur de la surface indique le niveau de pertes, allant du minimum ($\approx 0,25\text{GWh}$, en bleu/violet) au maximum ($\approx 0,65\text{GWh}$, en jaune).

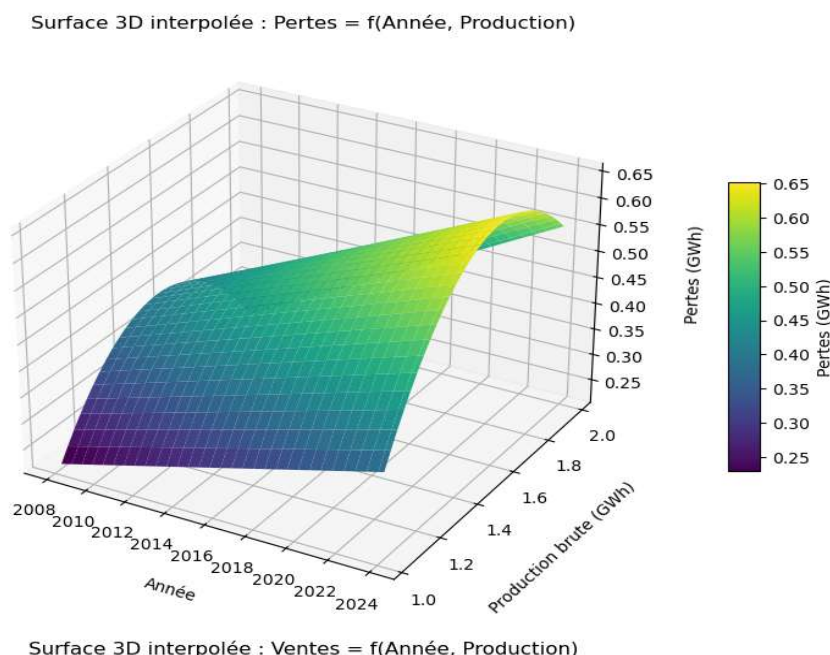


Figure 3 : Surface 3D interpolée de l'état des lieux des pertes techniques et non techniques

On observe une corrélation positive entre l'année et le niveau des pertes : plus on avance dans le temps, plus les pertes augmentent. Cette évolution traduit une tendance structurelle liée à l'extension des installations, à l'augmentation de la production et à l'absence d'optimisation des réseaux. Pour une production brute de $1,0\text{GWh}$, les pertes étaient proches de $0,25\text{GWh}$ en 2008 ; elles dépassaient déjà $0,40\text{GWh}$ en 2020 et se rapprochent de $0,55\text{GWh}$ en 2024. Avec une production brute de $2,0\text{GWh}$, les pertes atteignent environ $0,35\text{GWh}$ en 2010, puis $0,60\text{GWh}$ en 2022, pour culminer à $0,65\text{GWh}$ en 2024. Le graphique 3D met ainsi en évidence une dynamique non linéaire, où les pertes augmentent simultanément avec le temps et le niveau de production. Cette progression illustre une double vulnérabilité du système JIRAMA : technique (efficacité limitée des infrastructures, absence de modernisation) et organisationnelle (fraudes, branchements illicites). Sans réformes structurelles, cette tendance est appelée à se renforcer au-delà de 2024. L'analyse des modèles de prévision confirme ces constats. Le modèle Holt-Winters capture correctement les tendances globales mais tend à lisser les fluctuations extrêmes, tandis que le modèle ARIMA(1,0,1) fournit des projections plus précises et robustes, validées par des résidus non autocorrélés et quasi normaux. La surface 3D illustre alors une croissance accélérée des pertes au-delà d'un seuil critique ($\approx 1,6\text{GWh}$ de production brute), seuil qui correspond à une baisse significative de l'efficacité du système lorsque la charge augmente. Cela reflète une caractéristique classique des infrastructures sous-dimensionnées et confirme la pertinence des modèles utilisés pour anticiper cette dynamique.

3.3. Évolution des pertes électriques à Madagascar avec tendance et intervalle de confiance

La figure ci-dessous, intitulée "Évolution des pertes électriques à Madagascar avec tendance et intervalle de confiance", compare l'évolution des pertes techniques et non techniques entre 2015 et 2025. Elle distingue les valeurs observées, les tendances estimées ainsi que les intervalles de confiance à 95%. La courbe bleue représente les pertes techniques, initialement en légère hausse avant d'entamer une baisse progressive, ce qui justifie une approximation qui pourrait mieux s'ajuster par une

forme parabolique concave plutôt qu’une simple tendance linéaire. La zone bleutée illustre l’incertitude associée à cette évolution. La courbe rouge, quant à elle, retrace l’évolution des pertes non techniques, avec une trajectoire clairement croissante et une zone d’incertitude en rouge clair qui confirme la robustesse de cette tendance.

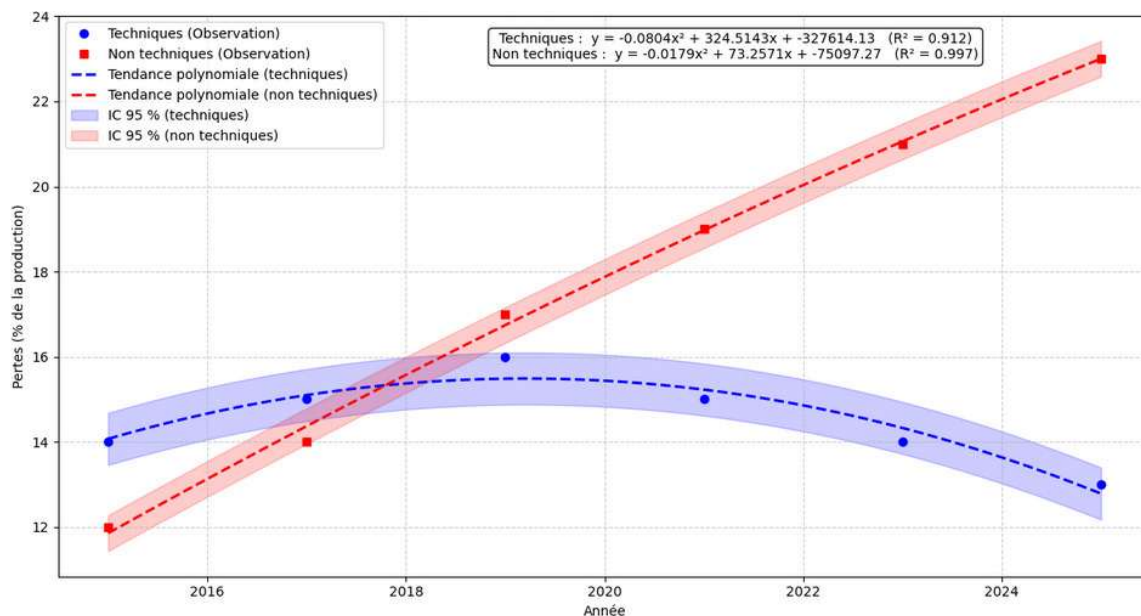


Figure 4 : Évolution des pertes électriques à Madagascar avec tendance et intervalle de confiance

Le graphique met en évidence deux dynamiques opposées :

Pertes techniques : elles oscillent d’abord à la hausse (2015–2018) avant de décroître pour atteindre environ 13% en 2025. Cette évolution traduit une amélioration relative de l’efficacité technique, probablement liée aux projets de réhabilitation des lignes HTA, à la modernisation de certains équipements de distribution, et aux investissements engagés via le Pacte énergétique et d’autres programmes d’appui international. Toutefois, l’incertitude croissante à long terme suggère que ces gains restent fragiles sans investissements structurels supplémentaires.

Pertes non techniques : elles progressent de manière continue et marquée, passant de 12% en 2015 à plus de 23% en 2025. Cette tendance robuste reflète l’ampleur croissante des branchements frauduleux, du vol d’électricité et des insuffisances persistantes dans les mécanismes de gestion et de contrôle. Malgré certaines initiatives pilotes de compteurs intelligents et de sécurisation du réseau, les résultats demeurent limités face à l’ampleur du phénomène.

En somme, alors que les pertes techniques tendent à se stabiliser grâce à des investissements ciblés, les pertes non techniques deviennent prédominantes et représentent, à l’horizon 2025, près du double des pertes techniques. Ce contraste souligne la nécessité urgente d’articuler les réformes techniques à des mesures institutionnelles et de gouvernance, incluant la lutte contre les branchements illicites et le renforcement de la régulation du secteur.

3.4. Pertes totales du système (techniques, commerciales et non collectées)

La figure ci-dessous présente un schéma simplifié du flux énergétique de la JIRAMA et des pertes associées, exprimé sur une base de 100 unités de production. Le graphique met en évidence, de manière successive, les pertes de transport, de distribution et les pertes non collectées, avant d'aboutir à l'électricité effectivement collectée.

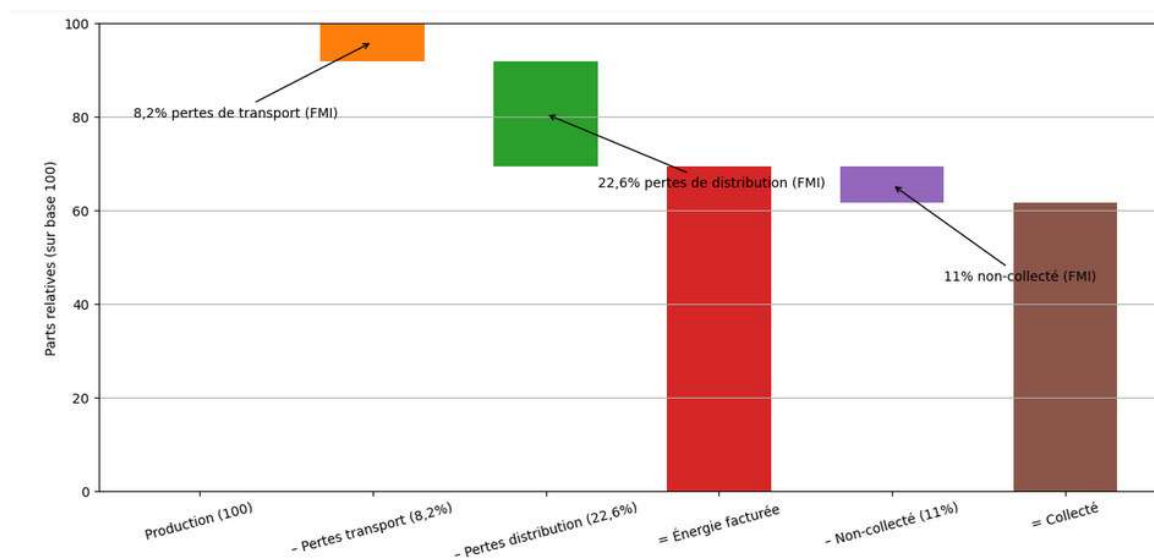


Figure 5 : flux énergétique de la JIRAMA et des pertes associées

À partir d'une base de 100 unités produites, les pertes de transport représentent 8,2%, réduisant l'énergie disponible à environ 92 unités. Les pertes de distribution, estimées à 22,6% de la production totale, diminuent l'électricité facturée à environ 70 unités. Sur cette énergie facturée, 11 % demeurent non collectés, de sorte que l'électricité effectivement encaissée par la compagnie nationale ne représente qu'environ 62% de la production initiale. Ce flux en cascade illustre l'ampleur des inefficiences cumulées, depuis la transmission jusqu'à la facturation. La visualisation confirme que la principale source de pertes provient du réseau de distribution, mais qu'à celles-ci s'ajoutent des pertes commerciales significatives liées au non-recouvrement. L'ensemble met en lumière un double défi technique et institutionnel : moderniser les infrastructures afin de réduire les pertes techniques et renforcer les mécanismes de gouvernance pour limiter les pertes non techniques. Ces résultats justifient la mise en œuvre des objectifs du PEN, qui prévoit la réduction des pertes et l'amélioration du taux de collecte dans les prochaines années.

3.5. Estimation et validation du modèle ARIMA(1,0,1) pour la série temporelle analysée

Afin d'évaluer la pertinence du modèle ARIMA (1,0,1), nous avons procédé à l'estimation de ses paramètres et à la validation statistique de ses composantes. Le tableau ci-dessous présente les coefficients estimés du modèle, leurs erreurs standards, les statistiques de test associées (z et p-valeurs), ainsi que les intervalles de confiance à 95 %. Ces indicateurs permettent de juger de la significativité des paramètres retenus et de la robustesse globale de l'ajustement.

Le tableau 1 ci-après synthétise les résultats d'estimation du modèle ARIMA(1,0,1). On observe que les coefficients des composantes AR(1) et MA(1) sont significatifs au seuil de 1 %, avec des intervalles de confiance resserrés. Ces résultats

suggèrent que le modèle capte correctement la dépendance temporelle de la série et fournit une base fiable pour les prévisions ultérieures.

Tableau 1: Estimation et validation du modèle ARIMA(1,0,1) pour la série temporelle analysée

Paramètre	Coefficient	Erreur std.	z	p-valeur	IC 95% min	IC 95% max
AR(1)	0.9999	0.015	65.142	0.000	0.970	1.030
MA(1)	-0.9976	0.272	-3.667	0.000	-1.531	-0.464
σ^2	$1.702e^{15}$	$2.85e^{-18}$	$5.98e^{32}$	0.000	$1.7e^{15}$	$1.7e^{15}$

Le tableau présente les résultats d'un modèle ARIMA (1,0,1). Le coefficient autorégressif (AR (1)) est estimé à 0,9999, avec un écart-type de 0,015 et une statistique z très élevée (65,1, $p < 0,001$), ce qui confirme sa significativité. Cette valeur proche de 1 suggère une forte persistance temporelle dans la série, indiquant que les observations passées influencent très fortement les valeurs présentes. Le coefficient de la moyenne mobile (MA (1)) est estimé à -0,9976, également significatif ($p < 0,001$), traduisant un mécanisme correctif important des chocs aléatoires dans le processus.

La variance des résidus (σ^2) est évaluée à $1,702e^{15}$, ce qui reflète l'échelle élevée des données en kWh et souligne l'ampleur de la variabilité non expliquée par le modèle.

Les tests de diagnostic confirment la validité du modèle : le test de Ljung-Box ($Q=0,11$, $p=0,74$) suggère l'absence d'autocorrélation significative des résidus, tandis que le test de Jarque-Bera ($JB=0,71$, $p=0,70$) n'indique pas de déviation majeure par rapport à la normalité. De plus, le test d'hétéroscédasticité ($H=0,71$, $p=0,71$) n'apporte pas de preuve de variance non constante. La skewness (-0,35) et la kurtosis (3,76) indiquent une distribution des résidus légèrement asymétrique et modérément leptokurtique, mais globalement compatible avec une distribution normale.

Le modèle ARIMA (1,0,1) fournit un ajustement statistiquement solide pour la série analysée. La forte dépendance autorégressive et le terme de moyenne mobile significatif expliquent la dynamique observée, tandis que les diagnostics des résidus confirment l'adéquation du modèle.

3.6. Résidus associés au modèle ARIMA appliqué à la série des pertes d'électricité (PERTE_kWh)

La figure ci-dessous présente les diagnostics des résidus issus du modèle ARIMA appliqué à la série des pertes d'électricité (PERTE_kWh). Les graphiques incluent le résidu standardisé en fonction du temps, l'histogramme avec densité estimée, le diagramme de probabilité normale (Q-Q plot) ainsi que le corrélogramme des résidus.

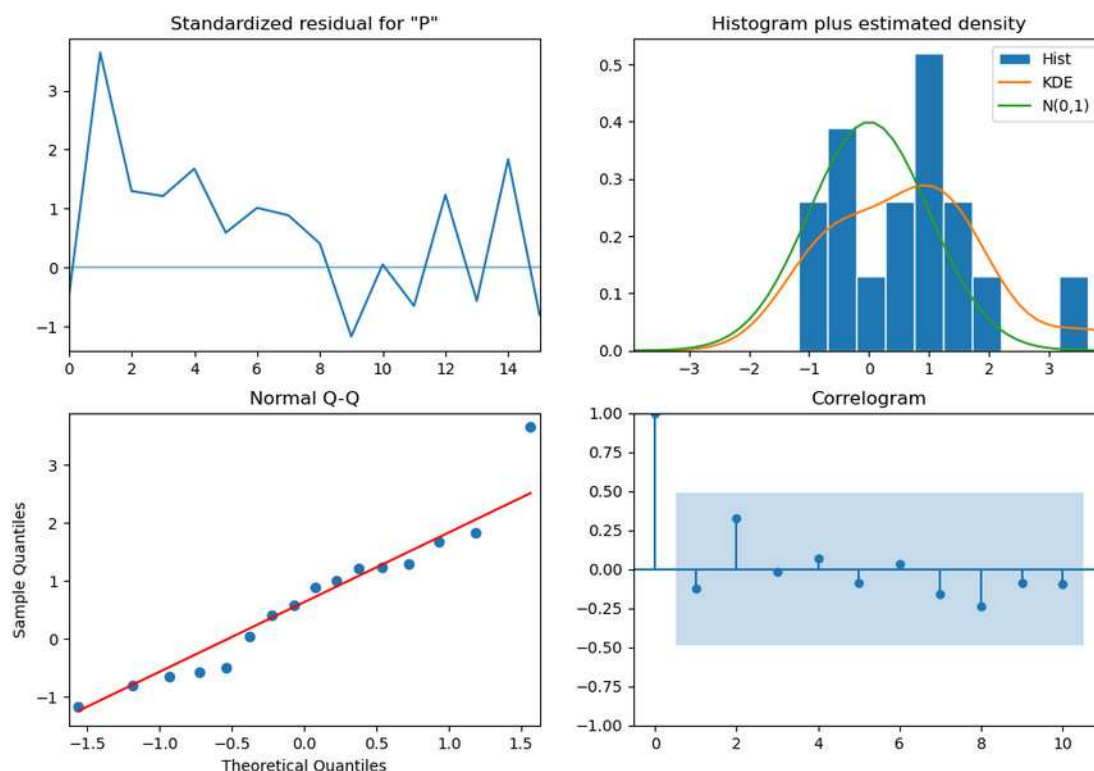


Figure 6: Résidus associés au modèle ARIMA appliqué à la série des pertes d'électricité (PERTE_kwh)

L'analyse des résidus standardisés de la série de production brute montre qu'ils oscillent globalement autour de zéro, avec des valeurs comprises entre environ $-1,5$ et $+2$, ce qui indique l'absence de structure temporelle marquée. L'histogramme et la densité estimée suggèrent une distribution proche de la normale, centrée autour de 0, bien que certaines observations se situent légèrement au-delà de ± 2 . Le Q-Q plot révèle une correspondance satisfaisante entre les quantiles théoriques et empiriques, avec de légers écarts visibles dans les queues supérieures. Enfin, le corrélogramme indique que les autocorrélations des résidus se situent dans l'intervalle de confiance, confirmant que le modèle ARIMA reproduit correctement la dynamique de la production.

3.7. Discussion

Les résultats obtenus confirment la persistance de pertes structurellement élevées dans le système électrique malgache, en ligne avec les constats récents des organisations internationales [3,4]. En 2024, les pertes atteignent environ 0,55TWh, soit près de 25% de l'électricité produite, et les prévisions indiquent une stabilisation autour de 0,5 à 0,65TWh d'ici 2029. Ce niveau excède largement les standards internationaux, selon lesquels les pertes techniques et commerciales combinées oscillent généralement entre 8 et 12% dans les pays à revenu intermédiaire [13].

L'analyse montre que le modèle Holt-Winters cadre efficacement les tendances globales mais tend à sous-estimer les fluctuations extrêmes, tandis que le modèle ARIMA (1,0,1) fournit des prévisions plus précises à court terme, validées par des résidus non autocorrélés et distribués de façon quasi normale. Ce résultat corrobore les travaux de Hyndman et Athanasopoulos [9], qui soulignent la complémentarité entre ces deux approches pour la prévision énergétique.

Sur le plan institutionnel, la persistance de pertes supérieures à 20% traduit des insuffisances techniques (vieillesse du réseau, surcharge des transformateurs) mais aussi commerciales (fraudes, défauts de recouvrement). Ces défis sont

comparables à ceux observés dans d'autres pays d'Afrique subsaharienne où les pertes commerciales peuvent représenter plus de 10% de la production [15]. Les projections issues de cette étude suggèrent que, sans réforme structurelle, la trajectoire future restera marquée par une inefficacité chronique, compromettant la viabilité financière de la JIRAMA et la durabilité de l'approvisionnement électrique.

En ce sens, les objectifs fixés par le Pacte énergétique national de réduire les pertes techniques à 7% et les pertes commerciales à 15% d'ici 2027 apparaissent ambitieux mais nécessaires. Leur atteinte dépendra toutefois de la capacité de l'État et de l'opérateur national à investir dans les infrastructures de transport et de distribution, et à renforcer les mécanismes de gouvernance et de recouvrement [16].

4. CONCLUSION

Cette étude a permis d'analyser et de modéliser les pertes d'électricité du principal opérateur d'électricité (JIRAMA) à Madagascar à partir des données annuelles de la période 2008–2024. Les résultats révèlent que les pertes totales atteignent en moyenne 22,6% au niveau de la distribution, 8,2% lors du transport, et 11% d'électricité non collectées, confirmant ainsi les constats antérieurs des institutions financières internationales. Les prévisions issues des modèles ARIMA et Holt-Winters indiquent une stabilisation des pertes entre 0,5 et 0,65TWh d'ici 2029, soit près de 25% de la production totale, tandis que la production pourrait s'élever à environ 2,2TWh au même horizon. Les modèles appliqués ont montré une performance satisfaisante. L'approche Holt-Winters a permis de mettre en évidence la tendance globale, tandis que l'ARIMA (1,0,1) a fourni des prévisions plus robustes à court terme, confirmées par des diagnostics résiduels compatibles avec l'hypothèse d'indépendance et de normalité. Cette complémentarité méthodologique renforce la crédibilité des projections et souligne l'intérêt d'une approche mixte pour la planification énergétique. Sur le plan politique et institutionnel, ces résultats mettent en évidence la persistance de pertes structurelles, bien supérieures aux standards internationaux, et rappellent la nécessité d'interventions urgentes. Les objectifs fixés par le Pacte Énergétique National, réduction des pertes techniques à 7% et des pertes commerciales à 15% d'ici 2027, augmentation du taux de collecte à 85% puis à plus de 90% d'ici 2030, apparaissent ambitieux mais essentiels pour améliorer la viabilité financière du secteur. En définitive, la modélisation des pertes d'électricité de la JIRAMA met en lumière un double enjeu : moderniser les infrastructures techniques et renforcer la gouvernance institutionnelle. Les prévisions fournies dans cet article offrent un outil d'aide à la décision pour les acteurs publics et privés, tout en soulignant la nécessité d'investissements ciblés et de réformes structurelles pour garantir un approvisionnement énergétique fiable et durable à Madagascar.

Référence

- [1] International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2022*. Paris : OECD/IEA ; 2022.
- [2] African Development Bank. *Madagascar Energy Sector Diagnostic and Policy Note*. Abidjan : AfDB ; 2021.
- [3] International Monetary Fund (IMF). *Madagascar: First Review under the Extended Credit Facility and Resilience and Sustainability Facility*. IMF Country Report No. 23/45. Washington, D.C. ; 2023.
- [4] World Bank. *Madagascar Electricity Access Project: System Performance and Sector Challenges*. Washington, D.C. : World Bank ; 2020.
- [5] L'Express de Madagascar. « JIRAMA : pertes d'électricité et branchements illicites », 15 juillet 2023.
- [6] Greene W.H. *Econometric Analysis*. 8^e éd. New York : Pearson ; 2018.
- [7] Kothari D.P., Nagrath I.J. *Modern Power System Analysis*. 5^e éd. New Delhi : McGraw-Hill Education ; 2019.
- [8] Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC, Ljung GM. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5^e éd. Hoboken, NJ : Wiley ; 2016.
- [9] Hyndman RJ, Athanasopoulos G. *Forecasting: Principles and Practice*. 3^e éd. Melbourne : OTexts ; 2021.

-
- [10] JIRAMA. *Statistiques de la production et de la distribution d'électricité 2008–2024*. Disponible : <https://www.jirama.mg/documents> (consulté en 2025).
- [11] Holt C.C. "Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages." *International Journal of Forecasting*. 2004 ; 20(1): 5–10.
- [12] Chatfield C. *The Analysis of Time Series: An Introduction*. 6^e éd. Boca Raton : CRC Press ; 2016.
- [13] World Bank. *Reducing Technical and Commercial Losses in Power Networks: Good Practices from International Experience*. Washington, D.C. : World Bank ; 2019.
- [14] Eberhard A., Gratwick K. "The evolution of power sector reform in Africa: Country experiences and emerging trends." *Energy Policy*. 2019 ; 129: 990–1001.
- [15] Kamat S., Oparaocha S., Taneja J. "Electricity losses in Sub-Saharan Africa: Trends, determinants, and policy implications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022 ; 154: 111889.
- [16] Government of Madagascar – Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures (MEH). *Pacte Énergétique National – Objectifs 2027–2030*. Antananarivo : MEH ; 2022.