

## **Impacts des pertes diélectriques dues au vieillissement de l'isolation papier/huile contenue dans les transformateurs sur le rendement énergétique du réseau électrique en Côte d'Ivoire**

### **[ Impacts of dielectric losses due to the aging of the paper/oil insulation contained in the transformers on the energy efficiency of the power grid in Côte d'Ivoire ]**

*Gnoléba Célestin Bogui<sup>1</sup>, Amidou Betie<sup>2</sup>, and Zié Yeo<sup>3</sup>*

UMRI Génie Electricité et Electronique Appliquée, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Electricity is missing or even unavailable in many localities in our country; while we have many power plants with large capacities (powers). This is partly due to energy losses in the networks. The transformers that are the essential components in the transmission and distribution of electrical energy have an aging population. The degradation of their paper/oil insulation system in the active part is the main cause. The dielectric losses in transformers due to this degradation (aging) are not taken into account in determining the efficiency of transformers. This paper shows that the dielectric losses in oil-impregnated paper-insulated transformers are becoming more and more important and are not to be neglected in the calculation of the efficiency of transformers due to their large number in electrical networks. With the help of DIRANA (Dielectric Analyzer), we made direct measurements of the dissipation factor and the capacity of the paper/oil insulation on real transformers in service in the electrical network in Côte d'Ivoire. In the following we calculated the dielectric power losses.

**KEYWORDS:** Transformer, dielectric losses, dissipation factor, capacitance, insulation.

**RESUME:** L'électricité est manquante voir indisponible dans nombre de localités de notre pays; alors que nous avons beaucoup de centrales électriques de grandes capacités (puissances). Cela est dû en partie aux pertes d'énergies dans les réseaux. Les transformateurs qui sont les composants essentiels dans la transmission et la distribution de l'énergie électrique ont une population vieillissante. La dégradation de leur système d'isolation papier/ huile dans la partie active en est la principale cause. Les pertes diélectriques dans les transformateurs dues à cette dégradation (vieillesse) sont passées sous silence dans la détermination du rendement de ceux-ci. Cet article montre que les pertes diélectriques dans les transformateurs à isolation papier imprégné d'huile sont de plus en plus importantes et ne sont pas à négliger dans le calcul du rendement des transformateurs compte tenu de leur grand nombre dans les réseaux électriques. A l'aide du DIRANA (Analyseur Diélectrique), nous avons fait des mesures directes du facteur de dissipation et de la capacité de l'isolation papier/ huile sur des transformateurs réels en service dans le réseau électrique en Côte d'Ivoire. Dans la suite nous avons calculé les pertes de puissance diélectrique.

**MOTS-CLEFS:** Transformateur, pertes diélectriques, facteur de dissipation, capacité, isolation.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. PLACE DU TRANSFORMATEUR DANS LE RESEAU ELECTRIQUE

De la centrale d'énergie jusqu'à la consommation de l'électricité résidentielle, commerciale et industrielle, il existe tout un réseau de transport constitué d'une variété de composantes. Parmi ces équipements, il y a le transformateur qui est l'équipement le plus onéreux. Un transformateur de puissance est le dispositif qui transfère l'énergie à travers le réseau électrique avec différents niveaux de tension. Il existe à la fois des transformateurs de puissance éleveurs et des transformateurs de puissance abaisseurs. Il s'agit d'un composant très coûteux dans un système électrique et doit être maintenu en bon état pour fonctionner au niveau optimal [1]. Ils reçoivent l'énergie, la transforment (en passant d'un niveau de tension à un autre) et la répartissent (en assurant la jonction des différents réseaux électriques). La figure 1 donne l'exemple d'un réseau électrique.

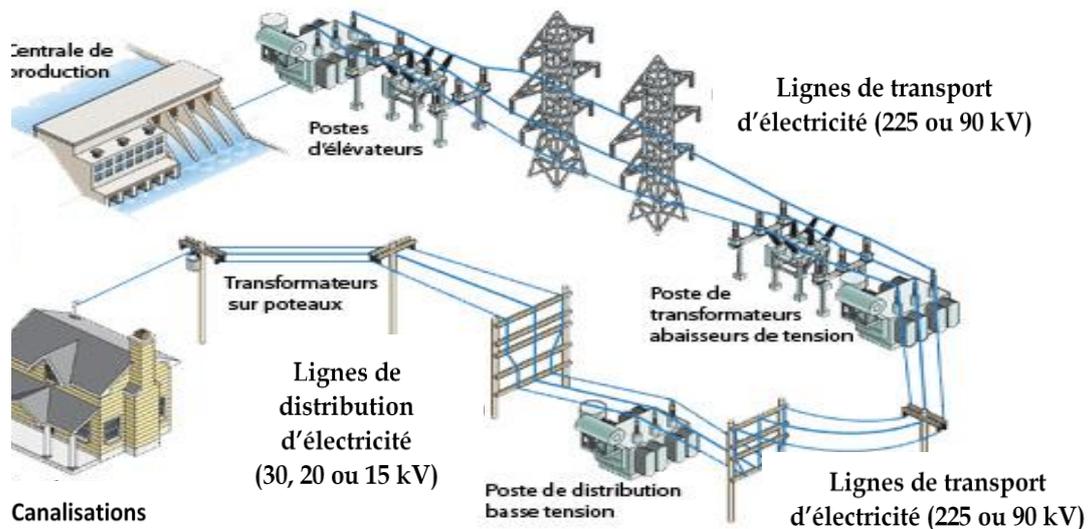


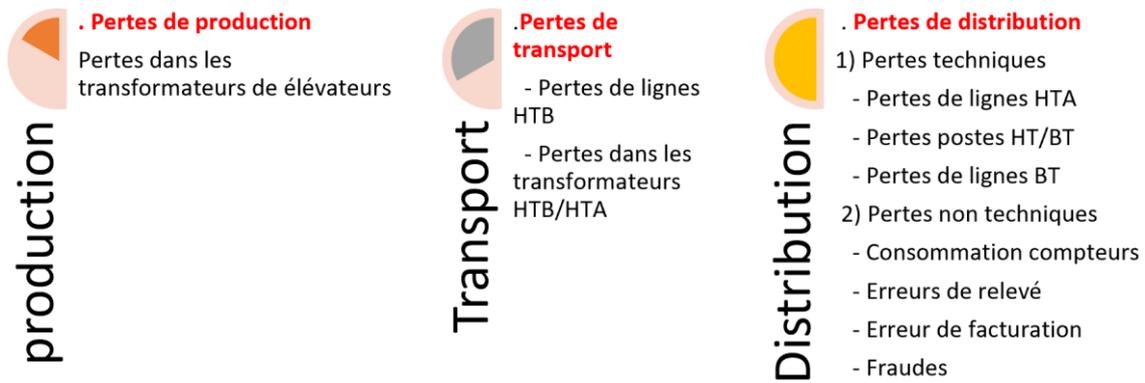
Fig. 1. Exemple de réseau électrique

### 1.2. PERTE D'ENERGIE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE

Les pertes d'énergie électrique dans le monde sont estimées pour les pays: [2].

- développés: taux de pertes moyen d'environ 7%.
- pays émergents, Inde, Brésil ont respectivement 27% et 16% de pertes.
- sous-développés: pertes sont comprises entre 25 et 50%.

Le sujet de la perte continue d'être un sujet de grand intérêt. En 2018, seulement environ 80,3% de l'énergie produite dans les centrales électriques en Côte d'Ivoire était effectivement distribuée au consommateur [3]. Les 19,7% restants de l'énergie sont perdus dans le réseau de transport et de distribution [4]. Le flux d'énergie dans un réseau électrique est schématisé comme indiqué à la figure 2.



**Fig. 2. Schéma montrant le flux de pertes dans un réseau électrique**

Les pertes techniques restent une préoccupation grandissante pour l'ensemble des producteurs et distributeurs d'énergie. Globalement, les pertes techniques varient largement d'un pays à l'autre, selon les caractéristiques du réseau.

### 1.3. PERTES ELECTRIQUES AU NIVEAU DES TRANSFORMATEURS

Dans toute machine électrique, la «perte» peut être définie comme la différence entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie. De nos jours, les transformateurs de puissance électrique ont une efficacité comprise entre 95% et 98% [5]. Malgré cela, ils sont responsables d'environ 16 à 40% des pertes moyennes dans le réseau électrique [6]. Ces pertes sont une conséquence du grand nombre de transformateurs installés [5], entre autres facteurs. On estime qu'il y a environ 10 milles transformateurs de distribution en service en Côte d'Ivoire. Les pertes fer, les pertes joule, les pertes errantes (parasites) et les pertes diélectriques sont les types de pertes dans le transformateur [7].

Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement aux pertes d'énergie (puissance) dans le système d'isolation papier/huile du transformateur de puissance lorsque celui-ci est en service.

### 1.4. PERTES DIELECTRIQUES DANS LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

#### 1.4.1. DEFINITION

Les pertes diélectriques correspondent à de l'énergie dissipée dans un diélectrique quand ce dernier est soumis à un champ électrique extérieur [8]. Ainsi, quand un champ électrique est appliqué au diélectrique, la polarisation ne suit pas ce champ de manière instantanée: ceci traduit une absorption d'énergie par le diélectrique, équivalente au travail nécessaire pour déplacer ou induire les dipôles et pour déplacer les charges libres. Le cas d'école, correspondant à la situation fréquente de l'application d'une tension sinusoïdale à un système d'isolation, est celui d'un champ extérieur qui varie de façon sinusoïdale avec une pulsation  $\omega$ : on remarque alors l'existence d'une composante du courant à travers le diélectrique en phase avec le champ (à la différence de la composante de déplacement, qui est, elle, en quadrature avec le champ). L'existence de la composante du courant en phase avec le champ traduit ainsi les pertes diélectriques [8], [9]. Les décharges partielles peuvent contribuer à l'augmentation des pertes diélectriques dans une isolation vieillie thermiquement [10].

#### 1.4.2. EXPRESSION DES PERTES DIELECTRIQUES DANS LE TRANSFORMATEUR

Les pertes de puissance totales dans le diélectrique, par unité de volume, correspondent à la somme des pertes: pertes par hystérésis et pertes par conduction [9].

$$P_d = P_h + P_c \quad (1)$$

$$\text{Avec } P_h = \omega \cdot \varepsilon'' E_{eff}^2 = \omega \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E_{eff}^2 \quad (2)$$

$$\text{Et } P_c = \sigma \cdot E_{eff}^2 \quad (3)$$

$$\text{Donc } P_d = (\omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r'' + \sigma) \cdot E_{eff}^2 \tag{4}$$

Généralement, les pertes diélectriques dans l'isolation peuvent être représentées par une résistance parallèle (Rp). Ce modèle de circuit équivalent est représenté sur la figure 3 où la résistance Rp, représente les pertes diélectriques basées sur la conductivité, la charge d'espace et la polarisation de la formation de dipôles, et la capacité Cp, représente les éléments capacitifs de l'isolation [11].

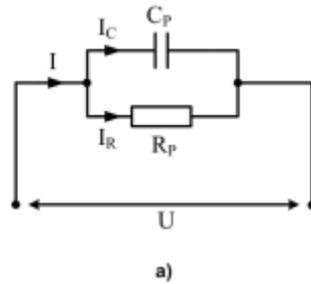


Fig. 3. Circuit parallèle (A) et série (B) équivalent d'une isolation haute tension

Par ailleurs, Selon J.C. BUBOIS dans les Propriétés diélectriques des polymères [12] pour un condensateur imparfait la densité de courant est donnée par:

$$J(\omega) = [\sigma_c + \omega \epsilon''(\omega) + j\omega \epsilon'(\omega)] E(\omega) \tag{5}$$

En posant  $J(\omega) = \frac{I(\omega)}{A}$  et  $E(\omega) = \frac{U(\omega)}{d}$  et  $C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$

On obtient la relation:

$$I(\omega) = \omega C_0 \left[ \frac{\sigma_c}{\omega \epsilon_0} + \epsilon''(\omega) + j\epsilon'(\omega) \right] U(\omega) \tag{6}$$

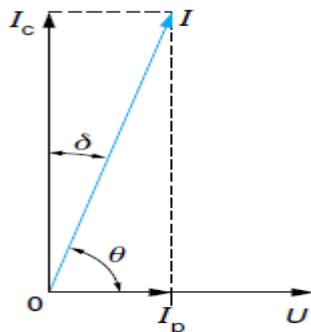
Le courant de fuite traversant le diélectrique est la somme:

$$\text{Du courant de charge } I_C = j\omega C_0 \epsilon'(\omega) U(\omega) \tag{7}$$

Et du courant de pertes d'énergie dans le diélectrique (dues à la polarisation).

$$I_P = \omega C_0 \left[ \frac{\sigma_c}{\omega \epsilon_0} + \epsilon''(\omega) \right] U(\omega) \tag{8}$$

Dans le diagramme de Fresnel (figure le courant alternatif complexe  $I$  résultant de l'application de la tension alternative complexe  $U$  aux bornes du condensateur plan rempli de diélectrique contient deux composantes:  $I = I_C + I_P$  (9)



$I(A)$  : courant résultant de fuite  
 $I_C(A)$ : courant de charge  
 $I_P(A)$ : courant de perte  
 $U(V)$ : tension  
 $\delta(rad)$ : angle de perte  
 $\theta(rad)$ : angle de phase

Fig. 4. Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait

Dans un condensateur parfait, on obtiendrait un déphasage de 90° entre le courant **I** et la tension **U**. Selon l'équation, on constate que le déphasage entre **I** et **U** n'est pas exactement de 90°, mais plutôt de 90 - δ,

où: L'angle  $\delta = \frac{\pi}{2} - \theta$  est appelé angle de pertes diélectriques.

La tangente de l'angle de pertes,  $\tan\delta$ , est donnée par:

$$\tan\delta = \frac{|I_p|}{|I_c|} \tag{10}$$

On a finalement le facteur de dissipation sous la forme:

$$\tan\delta = \frac{\frac{\sigma_c}{\omega\epsilon_0} + \epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \tag{11}$$

La tangente de perte regroupe donc toutes les pertes diélectriques et conductrices. Les pertes dues à la relaxation dipolaire deviennent importantes à mesure que la fréquence du signal imposé augmente. L'équation indique également que les pertes par conduction en courant continu sont plus importantes lorsque la fréquence diminue.

Il en résulte que pour l'expression de la puissance diélectrique par unité de volume, on peut l'écrire sous la forme suivante [13]:

$$P_d = U^2 \omega C. \tan\delta \tag{12}$$

Dans l'expression de la puissance diélectrique, nous avons le facteur de perte  $\tan\delta$  qui est une fonction de la qualité du diélectrique. Ainsi la puissance diélectrique augmenterait proportionnellement au facteur de perte. Le vieillissement et la décomposition de l'isolation, ou la pénétration d'eau, augmentent la quantité d'énergie sous forme de chaleur dans l'isolation [5]. Nous montrerons ce fait par la mesure directe de  $\tan\delta$  et des autres paramètres (la capacitance du diélectrique).

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. MATERIELS EXPERIMENTAUX

Les mesures sont effectuées en fonction de la teneur en humidité, du vieillissement du système d'isolation papier/huile et de la température. Les investigations sur les objets de test sont effectuées sur des transformateurs de puissance neufs et âgés.

#### 2.1.1. TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Compte tenu de la disponibilité et des séances de mesures, nous avons fait des mesures sur dix (10) transformateurs appartenant à des services publics. Il s'agit de la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité). Des mesures ont été effectuées sur plusieurs unités identiques. Les transformateurs neufs et vieillis en service étudiés dans ce travail sont répertoriés dans les tableaux 1 et 2. Nous avons pris quelques un des transformateurs étudiés en tenant en compte de leur site d'installation (localité).

**Tableau 1. Enquête sur les nouveaux transformateurs**

Poste	Description du transformateur	N° de série du transformateur	Année de mise en service
1: YOP2	TFO 90/16,5 kV, 50 MVA	160354	2016
2: Ferké	225/35 kV; 50 MVA	1LIN1860010053	2019
3: Sérébou	225/33 kV; 20 MVA	10112213-9	2019
4: Bondoukou	225/90/15kV; 70 MVA	10112213-2	2019
5: San-pédro	90/15 kV;	50318	2019

Tableau 2. Enquête sur les transformateurs vieilliss

Poste	Description du transformateur	N° de série du transformateur	Année de mise en service
1: Kossou usine	17/225 kV; 72 MVA	43572	1972
2: Taabo usine	13,8/225 kV; 82,5 MVA	41ST230872	1978
3: Taabo	225/90 kV; 70 MVA	91873	1980
4: Plateau	90/16,5 kV; 36 MVA	H6815002	1982
5: YOP2	90/16,5 kV; 50 MVA	1LIT03088A	2006

Le transformateur triphasé est isolé avec du papier Kraft cellulosique et de l'huile minérale Nytro Nynas.



Fig. 5. Transformateur 90/30 Kv; 40 MVA a bondoukou installé en 2019 (CIE)

### 2.1.2. APPAREIL DE MESURES

Pour la mesure de  $\tan\delta$  et de la capacité  $C_p$ , nous utilisons le DIRANA: appareil de mesures diélectriques qui regroupe la spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS) et le courant de polarisation et de dépolarisation (PDC). Il permet de déterminer la teneur en eau du papier sans recours à un échantillon d'huile. Les mesures sont rapides et fiables.



Fig. 6. Appareil de mesure diélectrique: Le DIRANA (CIE)

## 2.2. METHODE

Les mesures effectuées avec le DIRANA [14] sont conformes aux normes de sécurité suivantes:

- EN 50191 (VDE 0104) "Mise en œuvre et utilisation des matériels électriques"
- EN 50110-1 (VDE 0105 Partie 100) "Utilisation des installations électriques"
- IEEE 510 "IEEE - Méthodes recommandées pour la sécurité dans les tests sous haute tension et de forte puissance".

La température de l'huile du transformateur est donnée en mesurant la température d'un échantillon d'huile. On mesure le chemin d'isolation principale (H-L) entre les enroulements haute tension et basse tension du transformateur électrique. C'est cette isolation qui donne les meilleures mesures diélectriques.

Les tensions de sortie pour les mesures de la spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS) et le courant de polarisation et de dépolarisation (PDC) sont respectivement: 100V et 200V à la fréquence 50 Hz.

La quantité principale d'isolation cellulosique et l'huile dans le transformateur se situe entre les enroulements primaires et secondaires. Pour mesurer cette isolation, on raccorde la sortie à l'enroulement haute tension et l'entrée à l'enroulement basse tension. Le facteur de dissipation de l'isolation et la capacité de l'isolation sont mesurés à 50 Hz. Pour les valeurs de la puissance perdue dans le diélectrique, nous avons utilisé l'expression de l'équation (12).

La configuration de mesure est affichée sur la figure 7:

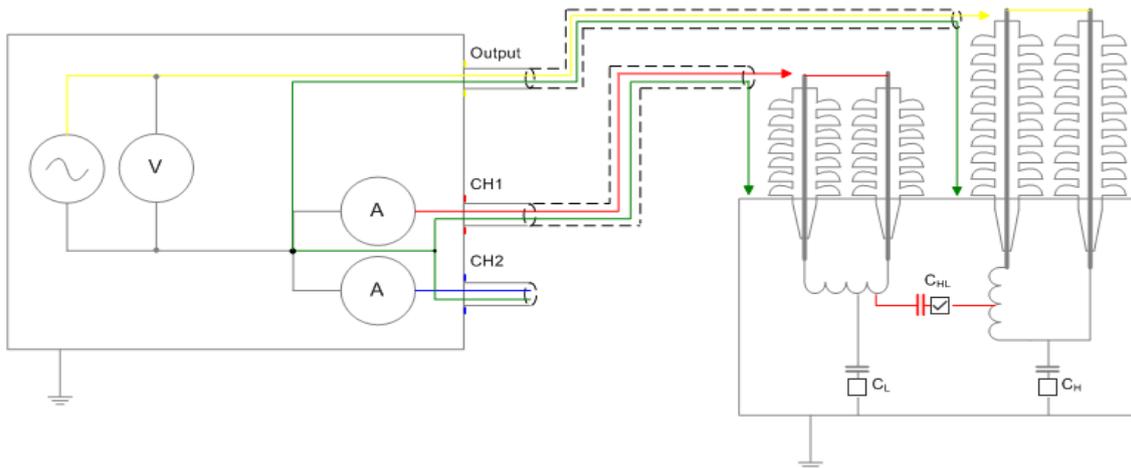


Fig. 7. Schéma de configuration de la mesure

## 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. PUISSANCE DISSIPÉE DANS LE DIELECTRIQUE EN FONCTION DU VIEILLISSEMENT DE L'ISOLATION PAPIER/HUILE DU TRANSFORMATEUR

La mesure du facteur de dissipation  $\tan\delta$  est faite sur différents transformateurs à 50 Hz selon les différentes contraintes: humidité, température, vieillissement et tension de service. La puissance  $P_d$  dissipée dans le diélectrique a été quantifiée pour les différentes valeurs de  $\tan\delta$ . Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous.

Pour l'étude du vieillissement du système d'isolation papier/huile, nous exploitons des mesures faites sur trois types de transformateurs en service dont la durée de vieillissement du papier/huile est de zéro (0), deux (2) et dix (10) ans. Pour ces mesures, nous faisons varier la température pour un taux d'humidité égal à 1,2% à une fréquence de 50 Hz pour des transformateurs de 225/33 kV à 50 MVA. Nous faisons varier le taux d'humidité pour une température constante. Nous obtenons les figures suivantes montrant les variations du facteur de dissipation et des pertes de puissance diélectriques dans les transformateurs en fonction de la température, de l'humidité et du vieillissement de l'isolation papier/ huile.

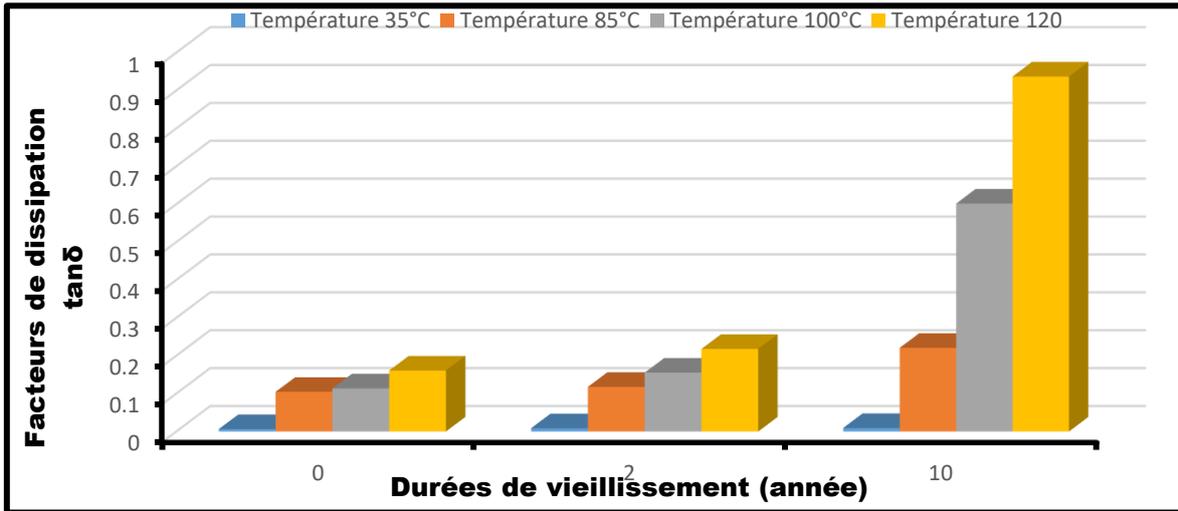


Fig. 8. Effets du vieillissement thermique sur le facteur de dissipation diélectrique

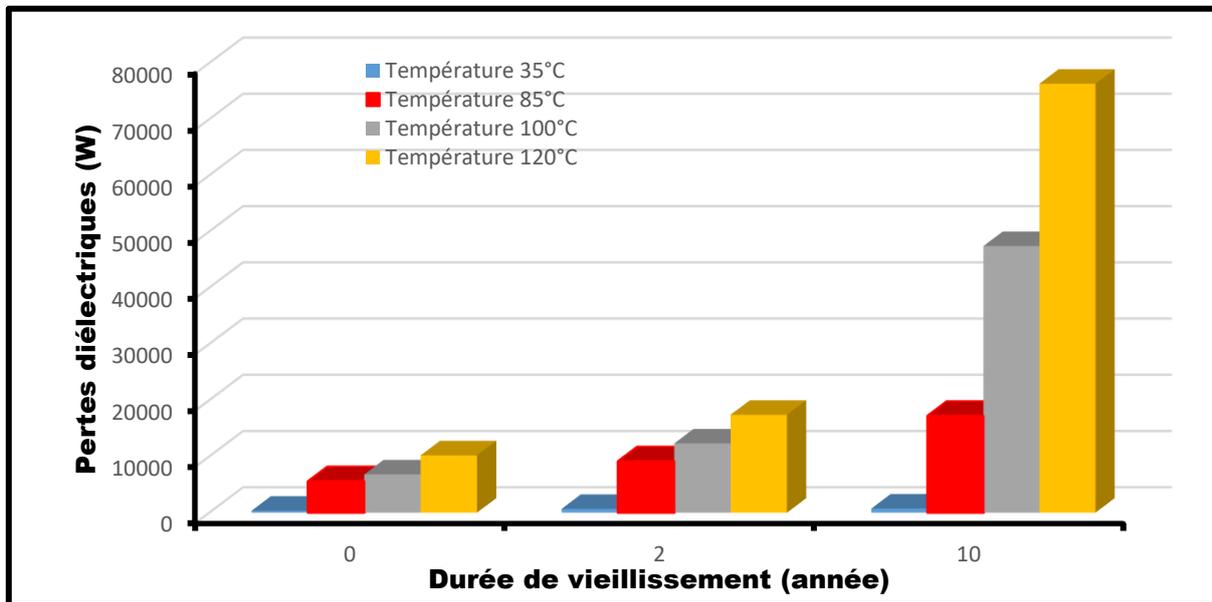


Fig. 9. Effets du vieillissement thermique sur les pertes diélectriques

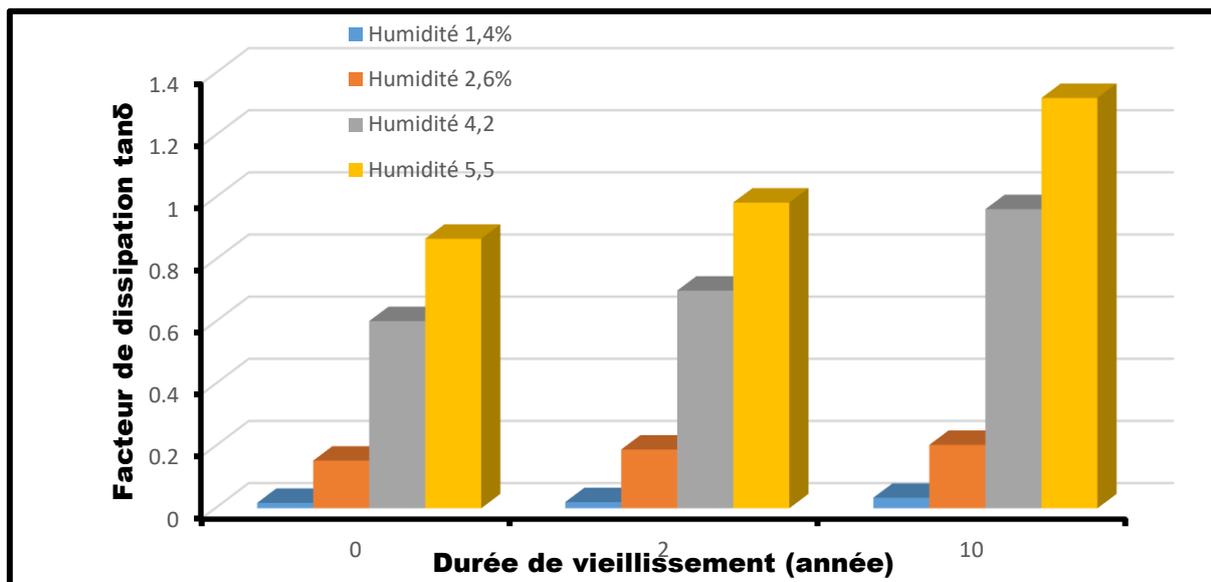


Fig. 10. Effets de l'humidité et du vieillissement sur le facteur de dissipation

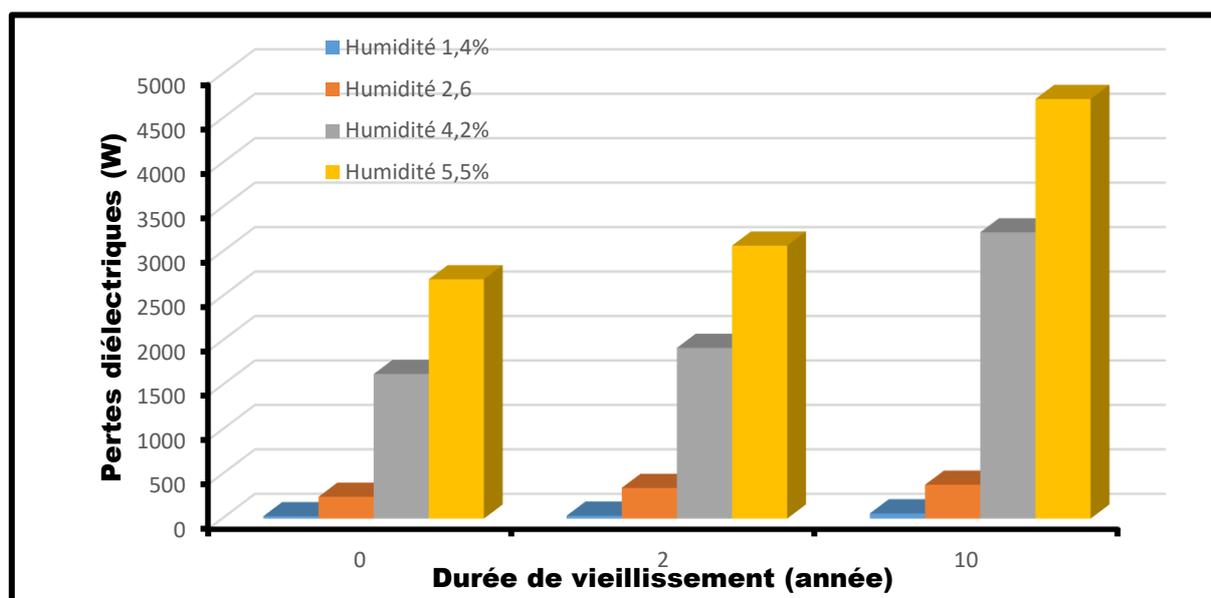


Fig. 11. Effets de l'humidité et du vieillissement sur les pertes diélectriques

Nous constatons sur les figures 8, 9, 10 et 11 que pour tous les temps de vieillissement, le facteur de dissipation et la perte diélectrique augmentent avec la température et du taux d'humidité, surtout pour les températures au-delà de 85°C. Ce comportement peut être assigné à la diminution de la résistivité [15]. La température et l'humidité favorisant le vieillissement provoque plus l'augmentation de pertes diélectriques. En effet, le vieillissement est dû à l'effet combiné de l'humidité et de la chaleur dans le système d'isolation. Donc le vieillissement contribue au phénomène de conduction dans le diélectrique et donc de pertes diélectriques.

### 3.2. IMPACT DE LA PUISSANCE PERDUE DANS LE DIELECTRIQUE SUR LE RENDEMENT ENERGETIQUE

Nous allons dans ce paragraphe mettre en évidence l'impact des pertes liées à la qualité de l'isolation sur l'efficacité énergétique des réseaux d'énergie électrique. Pour ce faire, nous allons considérer le cas d'une isolation neuve de 0 an, une isolation vieillie de 2 ans et une isolation vieillie de 10 ans. Nous considérons trois types de transformateurs de avec des tensions différentes dans le réseau. Les résultats des calculs sont reportés dans le tableau ci-après:

Tableau 3. Tableau de mesures du facteur de dissipation et calcul des pertes diélectriques en fonction des capacités des transformateurs et de la qualité de leur isolation

Qualité de l'isolation	Transformateur 1: 20 MVA; 36 kV; 3,99 nF; f = 50 Hz			Transformateur 2: 36 MVA; 90 kV; 9,24 nF; f = 50 Hz			Transformateur 3: 50 MVA; 225 kV; 3,35 nF; f = 50 Hz		
	$\tan\delta$	$P_d$	$W_p$	$\tan\delta$	$P_d$	$W_p$	$\tan\delta$	$P_d$	$W_p$
		W	MWh/an		W	MWh/an		W	MWh/an
Neuve: 0 an	0,0164	26,642	0,234	0,0149	350,343	3,071	0,0187	996,326	8,734
Vieille: 2 ans	0,0575	93,410	0,819	0,0353	830,006	7,276	0,0961	5120,154	44,883
Vieille: 10 ans	0,238	386,638	3,389	0,236	5549,053	48,643	0,389	20725,705	181,682

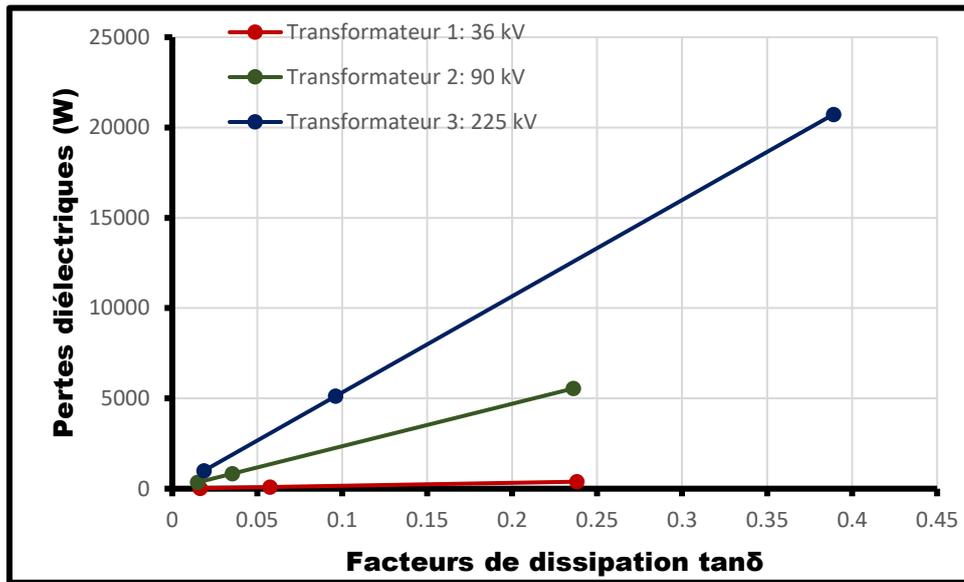


Fig. 12. Effets du facteur de dissipation sur les pertes diélectriques

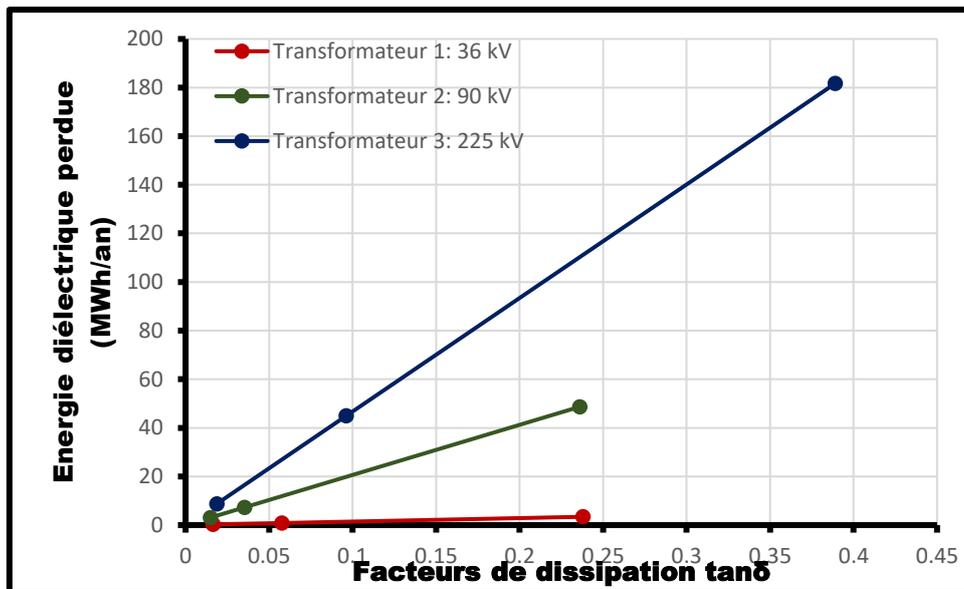


Fig. 13. Effets du facteur de dissipation sur l'énergie électrique

Les figures 12 et 13 nous font remarquer que l'augmentation de la puissance dissipée est directement proportionnelle à l'augmentation du facteur de dissipation qui est influencée par la qualité de l'isolation. Avec le niveau de tension qui augmente, nous constatons que les pertes sont plus élevées.

### 3.3. ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE PERDUE DANS LE DIELECTRIQUE PAR RAPPORT AUX PERTES D'ENERGIE DANS LE RESEAU

Dans ce paragraphe, nous allons montrer l'impact des pertes diélectriques sur les pertes de réseaux.

Dans le réseau ivoirien, nous allons calculer la puissance annuelle perdue dans le diélectrique papier/huile des transformateurs selon leur niveau de tension, leur nombre approximatif et leur état de vieillissement.

**Tableau 4.** *Tableau de valeurs des différentes pertes diélectriques dans les transformateurs en fonction de leur niveau de tension et de la qualité de leur isolation dans le réseau électrique ivoirien*

Qualité de l'isolation	Transformateurs: 225 kV		Transformateurs: 90 kV		Transformateurs: 33 kV		Transformateurs: 15 kV	
	Puissance annuelle perdue dans le diélectrique (MWh)							
	Perte/transfo	Perte pour 25 transfos	Perte/transfo	Perte pour 129 transfos	Perte/transfo	Perte pour 4919 transfos	Perte/transfo	Perte pour 4118 transfos
<b>Neuve: 0 an</b>	8,734	218,35	3,071	396,159	0,206	1013,314	0,129	531,222
<b>Vieille: 2 ans</b>	44,883	1122,075	7,276	938,604	1,199	5897,881	0,413	1700,734
<b>Vieille: 10 ans</b>	181,682	4542,05	48,643	6274,947	7,722	34984,518	1,110	4570,98

Le tableau fait ressortir que la puissance totale perdue dans le diélectrique des transformateurs dans une année (2018) pour le réseau typique de la Côte d'Ivoire comportant près de 9191 transformateurs est reparti comme suit:

- Pour une isolation neuve de quelques mois d'installation est de 2159,045 MWh
- Pour une isolation vieillie de deux (2ans), elle est de 9659,294 MWh;
- Et pour une isolation fortement vieillie de dix ans d'installation, elle est de 50377,495 MWh.

Ces résultats nous montrent que même une isolation neuve génère des pertes diélectriques, qui sont énormes suivant le nombre de transformateurs et de capacités installés. Ces pertes deviennent encore plus importantes quand le système d'isolation des transformateurs est fortement vieilli.

La proportion de l'énergie perdue dans le diélectrique de la partie active des transformateurs par rapport aux pertes totales dans les transformateurs et aussi aux pertes totales dans le réseau est décrit dans la figure ci-dessous.

T.R. Blackburn [5] montre que 35% des pertes dans le réseau sont liées aux transformateurs. En 2018, l'énergie perdue a été de 1826,3 GWh pour une énergie consommée nette de 8841 GWh [16]. Soit 639,205 GWh liées aux transformateurs.

Pour un réseau contenant des transformateurs de puissance dont l'énergie perdue dans le diélectrique est 50,377 GWh, nous avons les proportions comme indiquées sur la figure 18.

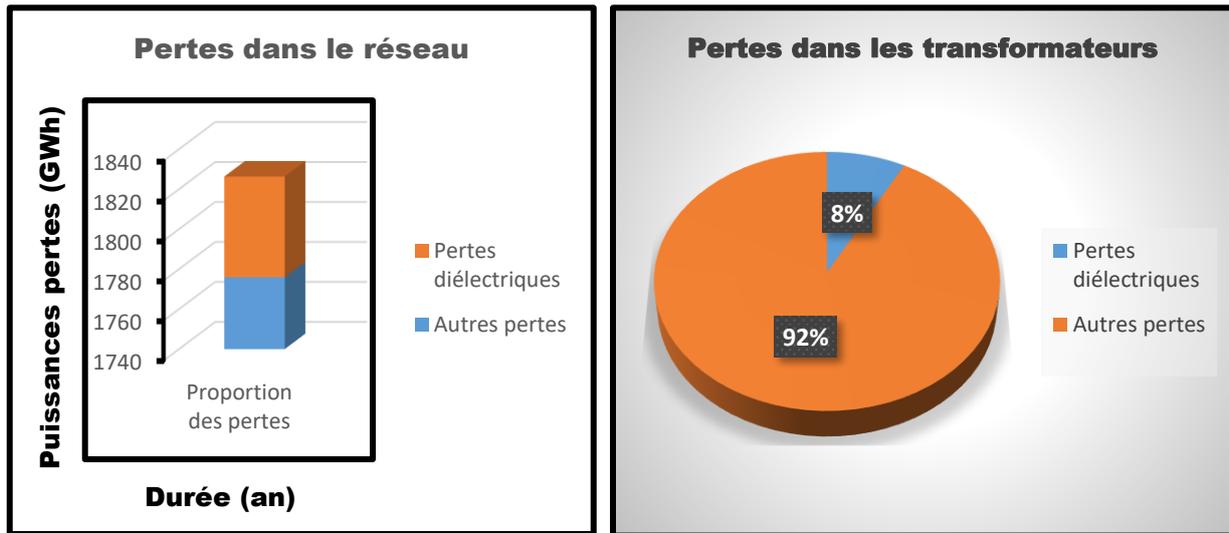


Fig. 14. Impacts des pertes diélectriques par rapport aux autres pertes dans le réseau électrique

Les calculs montrent que 7,88% des pertes dans les transformateurs sont dues aux pertes diélectriques, et que 2,76% des pertes dans le réseau sont dues à ces mêmes pertes.

Par ailleurs, le rendement global du réseau en Côte d'Ivoire en 2018 est de 80,3% [16]. Le rendement cible étant de 86% [16], il y a donc lieu de réduire les pertes, surtout celles dues à la qualité du système d'isolation qui dépendent des conditions d'utilisation. Nous constatons que cette perte d'énergie dans le diélectrique papier-huile des transformateurs a un impact sur le rendement énergétique des transformateurs donc du réseau électrique en Côte d'Ivoire en particulier et dans le monde entier en générale.

Nous voyons que la puissance perdue dans l'isolation papier/huile des transformateurs est à 2,14% des pertes totales dans le réseau électrique en Côte d'Ivoire.

Pour mieux faire ressortir l'impact de l'énergie dissipée dans l'isolation, nous allons la comparer à l'énergie électrique totale consommée par les différentes régions de la Côte d'Ivoire.

Dans cette partie, nous constatons que plus, l'isolation est vieillie et plus la quantité d'énergie perdue due à l'isolation est importante. L'objectif de la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité) est d'atteindre un rendement de 86% dans le réseau électrique qui est de 80,3% en 2018 [3], [16]. L'entretien du système d'isolation des transformateurs pourrait aider à atteindre cette cible.

### 3.4. IMPACT DES PERTES SUR LA PRODUCTION DES GAZ A EFFET DE SERRE

Nous avons pour le même nombre de transformateurs et en se servant des résultats précédents dans le réseau ivoirien évalué la production annuelle de gaz à effet de serre  $CO_2$  (gaz carbonique) causée par les pertes diélectriques. Les résultats sont reportés dans le tableau ci-après. Tout en sachant que pour 1kWh produit, on a 0,29 kg de  $CO_2$  dégagé [5].

Tableau 5. Valeurs de la quantité de gaz carbonique dégagée dans l'atmosphère en fonction des puissances diélectriques perdues dans le réseau électrique ivoirien

Isolation papier/huile	Puissance perdue dans le diélectrique (W)	Énergie perdue dans le diélectrique (MWh/an)	Quantité de gaz carbonique ( $CO_2$ ) produite/an (kg)
Isolation neuve (3 mois)	246,298	2159,045	626,123
Isolation légèrement vieillie (2 ans)	1101,904	9659,294	2801,195
Isolation fortement vieilles (10 ans)	5746,919	50377,495	14609,474

Les résultats de ce tableau montrent que pour un réseau de transformateurs dont l'isolation est neuve l'énergie perdue fait dégager 626,123 kg de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cette quantité de gaz est plus importante pour une isolation fortement vieillie dont la valeur est de 14609,474 kg de  $CO_2$  dégagée dans l'atmosphère dans une année.

### **3.5. IMPACTES DES PERTES DIELECTRIQUES SUR L'ECONOMIE NATIONALE**

En Côte d'Ivoire, le coût des pertes de distribution est de 8,26 FCFA par kWh en 2018 [16]. Le coût des pertes diélectriques dans les transformateurs du réseau de distribution s'élève à près 420000 FCA pour une isolation fortement vieillie dans une année.

L'expérience mondiale montre que dans les services publics présentant un niveau de perte de réseau élevé, 1 \$ dépensé pour la réduction des pertes permet d'économiser 10 à 15 \$ pour le service public [17], [18].

## **4. CONCLUSION**

Le but de cette étude est de mettre en évidence les pertes de puissance dues au vieillissement de l'isolation papier/huile utilisée dans les transformateurs de puissance. La quantification des pertes électriques a permis de montrer que les pertes dues à la puissance dissipée dans l'isolation ne peuvent pas être négligées. En effet, les calculs font ressortir qu'une isolation papier/huile même neuve, entraîne des pertes dans le diélectrique qui prennent une valeur importante lorsque l'isolation est fortement vieillie. Cela nous interpelle à avoir dans le réseau électrique en Côte d'Ivoire et partout dans le monde des transformateurs dont la qualité de l'isolation est acceptable. Compte tenu du nombre important des transformateurs dans les réseaux nationaux, avoir des transformateurs ayant un rendement élevé est signe de réduction des pertes et donc une augmentation substantielle de la capacité des réseaux. En général, lorsqu'on parle de pertes dans les transformateurs, on pense tout de suite aux pertes conventionnelles, mais cette étude a démontré que les pertes dues à la qualité de l'isolation papier/huile influencent très significativement l'efficacité énergétique des réseaux électriques. Sur le plan de l'environnement, nous avons vu que les pertes diélectriques ont aussi un impact sur le dégagement des gaz à effet de serre tel le gaz carbonique. Chaque année les pertes coûtent au contribuable près de 1000 dollars que nous pouvons récupérer en réduisant ces pertes. La puissance dissipée dans l'isolation est fortement influencée par la qualité de l'isolation représentée par le facteur de dissipation diélectrique qui lui est fonction de la température, de l'humidité du vieillissement et le niveau de la tension de service.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions la Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE) pour sa collaboration qui nous a permis de faire des mesures et la mise à disposition des données des mesures diélectriques. Les remerciements vont aussi à l'encontre du professeur Zié YEO et des docteurs Amidou Bété et Sylvestre Janvier N'CHO pour leurs remarques et corrections qui nous ont été utiles tout au long de ce travail.

## REFERENCES

- [1] O. S. E. Atwa, "Power Transformers Theory Testing and Commissioning," *Pract. Power Syst. Prot. Relays Comm.*, pp. 49–68, 2019.
- [2] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF). 'Les pertes techniques dans les réseaux de transport et de distribution de l'électricité'. Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie), PRISME, 2004.
- [3] CIE, "Rapport annuel 2018," 2019.
- [4] J. C. Olivares, R. Escarela-Pérez, Y. Liu, J. Driesen, J. M. Cañedo, and P. Moreno, "Reducing losses in distribution transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 3, pp. 821–826, 2003.
- [5] A. Betie, "Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance," 2015.
- [6] D. Borge-Diez, A. Colmenar-Santos, M. Castro-Gil, and J. Carpio-Ibáñez, "Parallel distribution transformer loss reductions: A proposed method and experimental validation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 49, no. 1, pp. 170–180, 2013.
- [7] A. Mohammed Alyousef, H. Sultan Alamry, E. Loxbo, and S. Johansson, "Electrical power transformer Examiner," no. June, 2016.
- [8] J. Mijovic and B. D. Fitz, "Dielectric Spectroscopy of Reactive Polymers: Application Note Dielectrics," vol. 2, no. Section 5, 1998.
- [9] Y. Hanen, "Matériaux isolants pour appareillages haute tension dans le domaine du courant continu Comportement et vieillissement," 2015.
- [10] M. B. Aïmed BOUBAKBUR', Yacine MECHER', "Comportement du polykthylkne soumis," 2000.
- [11] C. Kocatepe, C. F. Kumru, R. Ayaz, O. Arikan, and H. Akça, "The influence of voltage and frequency variations on insulation quality of a high voltage cable," *IEEE EuroCon 2013*, no. July, pp. 964–968, 2013.
- [12] J. C. DUBOIS, "Propriétés diélectriques des polymères" *Technique de l'ingénieur, traité électronique ; E 1850-3*," *Tech. l'Ingénieur, Trait. électronique*, 2012.
- [13] J. C. Olivares-Galván, R. Escarela-Pérez, P. S. Georgilakis, and E. Campero-Littlewood, "Separation of no-load losses for distribution transformers using experimental methods: Two frequencies and two temperatures," *IET Conf. Publ.*, vol. 2010, no. 572 CP, pp. 1–5, 2010.
- [14] DIRANA: Manuel d'utilisation "OMICRON", 2010.
- [15] S. Boudraa, "Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'Intelligence artificielle," 2017.
- [16] ANARE, "ANARE-CI: Rapport d'activités 2018," 2019.
- [17] P. Raesaar, E. Tiigimägi, and J. Valtin, "Strategy for analysis of loss situation and identification of loss sources in electricity distribution networks," *Oil Shale*, vol. 24, no. 2 SUPPL., pp. 297–307, 2007.
- [18] M. Munasinghe and M. Munasinghe, "Engineering—Economic Analysis of Electric Power Systems," *Proc. IEEE*, vol. 72, no. 4, pp. 424–461, 1984.