

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'utilisation de la méthode en haute tension continue, pour diagnostiquer l'état de l'isolation de masse des grandes machines tournantes, a fait l'objet d'un certain nombre d'écrits. Nous présenterons ici un court résumé des principales publications.

1.1 IEEE Std 43-2000 « IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery » [9]

Ce document décrit la procédure à suivre pour la mesure de la résistance d'isolation et l'indice de polarisation pour les enroulements statoriques des machines tournantes (machine synchrone, machine à induction et machine à courant continu), d'une puissance de 750 watts et plus. Il présente aussi les valeurs minimales acceptées de la résistance d'isolation et de l'indice de polarisation pour différents types de machines tournantes.

La résistance d'isolation est définie comme étant le quotient de la tension continue appliquée et le courant mesuré ($R = \frac{V}{I}$). Pour maintenir l'uniformité de la mesure, la

résistance d'isolation est déterminée à un instant spécifique t , en général une minute après l'application de la tension. Habituellement, la résistance d'isolation change directement avec l'épaisseur de l'isolation et inversement avec la superficie du conducteur. L'augmentation de la température d'un matériau diélectrique fournit une énergie thermique additionnelle qui libère des porteurs de charge, et de ce fait entraîne une augmentation de la conductivité du matériau, ce qui affecte de manière significative les mesures de la résistance diélectrique. Pour y remédier les mesures sont normalisées à une température standard, généralement 40°C, de telle sorte que pour chaque élévation de 10°C du spécimen, la résistance d'isolation est réduite de moitié. Ainsi, il est recommandé que les mesures de la résistance d'isolation soient obtenues à plusieurs températures sur des

nouveaux enroulements statoriques bien nettoyés et en bon état afin de déterminer le coefficient de correction de température le plus précis.

Selon le comité (IEEE), la résistance d'isolation corrigée minimale acceptée (en méga Ohms) est égale à la tension en kilovolts du système d'isolation plus un. Il est habituellement souhaitable d'avoir une résistance d'isolation aussi haute que possible (d'une centaine aux milliers de méga-ohms). Le tableau I, présenté ci-dessous, indique les valeurs minimales acceptables pour la résistance d'isolation après une minute de l'application de la tension d'essai pour les machines AC et DC.

Tableau I

Les valeurs minimales recommandées pour
la résistance de l'isolation à 40°C¹

Résistance à l'isolation Valeur minimale acceptable MΩ	Échantillons des essais
$R_{min} = kV + 1$	Des enroulements fabriqués avant 1970.
$R_{min} = 100$	Des enroulements DC et AC fabriqués après 1970.
$R_{min} = 5$	Des petites machines $\leq 1kV$

Pratiquement, les mesures de la résistance d'isolation sont employées pour détecter l'absorption d'humidité, la contamination conductrice, le degré de réticulation de la résine, et les fissures. Il est reconnu, qu'il est généralement difficile de faire des conclusions sur l'état d'isolation basées seulement sur les mesures de la résistance d'isolation.

¹ Ces valeurs sont tirées de la norme IEEE Std 43-2000 [9].

Le document présente un autre type d'essai, en l'occurrence l'indice de polarisation, qui est semblable à celui de la résistance d'isolation à l'exception que les lectures sont prises à deux intervalles différents, une minute et 10 minutes, après que la haute tension continue soit appliquée. Le rapport entre ces deux mesures de courant se nomme l'indice de polarisation et donne une indication du degré d'humidité de l'isolation, du degré de contamination, ainsi que de l'intégrité physique. Ce rapport est moins sensible aux variations de la température que les valeurs de la résistance d'isolation. Le standard IEEE 43-2000 recommande une valeur d'indice de polarisation supérieure ou égal à 2 pour la classe F et supérieure ou égal à 1,5 pour l'isolation de classe B. En pratique, l'essai d'indice de polarisation est un indicateur quelque peu ambigu des défauts et des détériorations d'isolation. Il est cependant conseillé de comparer ces mesures avec celles obtenues à partir des machines semblables en bon état pour mieux utiliser ses résultats. Le tableau II suivant exprime les valeurs minimales recommandées selon la classe thermique de l'isolation pour l'indice de polarisation.

Tableau II

**Les valeurs minimales recommandées
pour l'indice de polarisation**

Classe thermique d'isolation	Valeur minimale pour l'indice de polarisation
Classe A	1,5
Classe B	2,0
Classe F	2,0
Classe H	2,0

1.2 IEEE Std 95-2002 « IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and above) with High Direct Voltage » [8]

Dans ce document, le conseil d'association des comités de coordination des normes IEEE établit des méthodes uniformes d'utilisation de la haute tension continue pour l'évaluation de l'état d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques de 2 300V et plus. Ces recommandations couvrent les essais avant la livraison de l'équipement depuis l'usine, après l'installation de l'équipement, et lors des entretiens de routine des machines déjà en service. Elles proposent un certain ensemble de conseils pour l'analyse des variations du courant mesuré en fonction de la tension appliquée afin de rendre l'évaluation de l'état de l'isolation plus efficace par rapport aux mesures utilisant une tension alternative. Chaque méthode d'essai offre des avantages et des inconvénients. Le document présente trois techniques généralement employées pour les essais à haute tension continue, qui se résument comme suit.

1.2.1 Essai par Échelon de tension à des intervalles de temps uniforme

Initialement un échelon de tension, égal à 30% ou moins de la tension maximale de l'essai, est appliqué afin de déterminer les valeurs de la résistance d'isolation et de l'indice de polarisation. Une fois que ces deux valeurs sont conformes aux critères de la norme IEEE Std 43-2000, la haute tension continue est appliquée sous forme d'une série d'échelon de tension à des intervalles de temps réguliers. Le niveau de tension de chaque échelon doit être égal à 3% ou moins du niveau maximal de la tension d'essai et reste maintenu jusqu'à ce que le courant d'absorption ait atteint une valeur négligeable avant d'appliquer l'échelon de tension suivant. Les lectures du courant sont prises à la fin de chaque intervalle de temps et ainsi la courbe du courant en fonction de la tension appliquée est reproduite instantanément sur un graphe. Pendant et après l'essai, la courbe est examinée afin de détecter des augmentations ou autres variations du courant de conduction en fonction de la tension appliquée qui pourraient indiquer des défauts d'isolation.

1.2.2 Essai Échelon de tension à des intervalles du temps graduels

Initialement un échelon de tension de 30% ou moins de la tension maximale de l'essai, est appliqué pendant 10 minutes. Les mesures du courant sont prise aux moments suivants : $t_1 = 30 \text{ s}$, $t_2 = 45 \text{ s}$, $t_3 = 1 \text{ min}$ et $t_4 = 2 \text{ min}$ puis jusqu'à 10 min avec des incrément de 1 min. Les valeurs mesurées sont immédiatement tracées sur une échelle log-log. Une courbe lisse est adaptée aux mesures après 8 minutes de lecture et qui sera extrapolée à 10 minutes. Trois points sont lus de cette courbe pour être employés à la détermination de la composante de conduction du courant mesuré. Ces trois points sont les valeurs du courant total lues aux moments : $t = 1 \text{ min}$, $t = 3,16 \text{ min}$ et $t = 10 \text{ min}$. Ils sont employés pour tirer la composante de conduction du courant mesuré selon l'équation suivante.

$$I_c = \frac{(i_{1\text{min}} \times i_{10\text{min}}) - (i_{3,16\text{min}})^2}{(i_{1\text{min}} + i_{10\text{min}}) - 2i_{3,16\text{min}}}$$

Ce courant I_c sera soustrait des lectures de courant mesuré à 1 minute et à 10 minute afin d'obtenir le courant d'absorption I_a (le courant capacatif est supposé négligeable). Ces valeurs sont ensuite utilisées pour calculer le rapport d'absorption N suivant :

$$N = \frac{Ia_{1\text{min}}}{Ia_{10\text{min}}}$$

Une fois que ces calculs sont complétés, les périodes des échelons de tension pour le reste du test (jusqu'au niveau de tension maximale) sont adaptées. Ces adaptations sont réalisées par pas moins de deux personnes. Ce facteur humain rend difficile de respecter avec exactitude les conditions d'essai mentionnées ci-dessus, menant à des imprécisions et des inexactitudes dans l'évaluation générale de l'état d'isolation.

1.2.3 Essai de montée progressive en haute tension continue (Ramped Voltage Test)

Cet essai peut être considéré comme un essai échelon de tension pour lequel la tension est réajustée à des intervalles du temps très petits s'approchant de zéro. C'est ainsi qu'une rampe de tension est formée. Le courant d'isolation en fonction de la tension appliquée est enregistré sur un graphe en X-Y, pour fournir une observation continue et une analyse de la réponse du courant au fur et à mesure que l'essai progresse. L'application de la tenue de tension en montée progressive au lieu des deux premières méthodes, linéarise automatiquement la composante du courant de la capacité géométrique et du courant d'absorption de sorte que les variations significatives du courant mesuré seront observées plus facilement. En outre, l'augmentation lente et continue de la tension appliquée, en général 1 kilovolt par minute, est moins susceptible de causer des dommages imprévisibles à l'isolation que l'utilisation d'incrément de tension à un taux de montée d'approximativement 1 kilovolts par seconde. Le courant d'isolation versus la tension appliquée est automatiquement tracé sur un graphe X-Y, fournissant l'observation et l'analyse continue de la réponse de courant d'isolation au fur et à mesure que l'essai progresse. L'état d'isolation est évalué en fonction des non-linéarités du courant d'isolation observées sur le graphe et qui sont directement proportionnelles aux variations du courant de fuite

1.3 High-Voltage DC Tests for Evaluating Stator Winding Insulation: Uniform step, graded step, and Ramped Test Methods [11]

L'évaluation d'isolation des enroulements statoriques par des essais haute tension en courant continu, employée dans l'industrie pour la maintenance du système d'isolation, est réalisée par plusieurs méthodes pratiques (méthode d'échelon uniforme, méthode d'échelon à plusieurs niveaux, méthode de montée progressive en haute tension continue, etc.) [8, 9]. Chaque méthode présente des inconvénients et des avantages pour différents types et endroits d'essai. L'objectif de ce papier est de tracer un portrait de

niveau de fiabilité de chaque méthode pour l'évaluation de l'état du système d'isolation. L'essai de montrée progressive en haute tension continue est présenté comme un outil très adapté pour les essais sur site qui endommage moins le système d'isolation tout en respectant le standard IEEE Std 95-2002 [8]. L'approche utilisée pour former la rampe de tension est réalisée sous forme d'une montée progressive en tension à des intervalles temporels très courts. Cette technique linéarise automatiquement la composante d'absorption du courant d'isolation. Ainsi les déviations du courant de fuite seront facilement visualisées. Le graphe du courant d'isolation en fonction de la tension appliquée, fournit l'observation et l'analyse continue de la réponse diélectrique tant que l'essai progresse. L'essai de montée progressive en haute tension continue simplifie considérablement l'analyse des mesures de courant de fuite au niveau du stator de l'enroulement. Bien qu'aucun test de diagnostique ne puisse détecter avec succès tous les types de défauts de l'enroulement statorique, cet essai s'est avéré être un moyen efficace pour établir une bonne maintenance préventive afin d'éviter des éventuels échecs en service. En outre, il nous permet d'utiliser une seule personne pour l'exécution des essais, laquelle dispose d'un contrôle suffisant pour éviter d'endommager l'isolation lors de ces essais. Cette opération prend moins de temps pour être exécutée. L'auteur présente un résultat très important, qui se définit en une augmentation lente et continue de la tension appliquée, environ 1 kV/min ou 17 V/s, et qui est moins susceptible d'endommager l'isolation par rapport à une application de tension d'environ 1 kV/s.

1.4 Advantages of the Ramped Direct High-Voltage Method of Assessing Stator Winding Insulation Condition [12]

Dans cet article, l'auteur commence par rappeler les principaux facteurs qui accélèrent le processus de détérioration d'un système d'isolation des enroulements à masse statorique. La dégradation chimique des matériaux isolants peut causer une formation de poches d'eau, d'acides et de gaz ionisants résultant en une migration et une concentration de l'humidité et diminuant la rigidité diélectrique de l'isolation. Aussi l'auteur ajoute que les variations de température dues au cycle thermique sont

responsables de la formation de poches de gaz au long de l'isolation. Toutes ces contraintes agissent directement sur les propriétés électriques de l'enroulement que l'on peut mesurer, quantifier, et analyser. Ces dernières sont souvent utilisés pour le diagnostique de l'état d'isolation, en réalisant des essais hors service à haute tension continue (off-line tests), sur le système d'isolation à masse statorique. L'auteur revient sur ce dernier point en présentant la panoplie des essais à haute tension continue largement répandues dans l'industrie de l'électricité [8, 9].

Les essais à haute tension continue sont reconnus être bien adaptés pour détecter des problèmes d'isolation tels que le craquement, les fissures, la contamination externe, le mauvais traitement de la résine et la formation de l'humidité qui, selon l'auteur, vont augmenter d'une manière significative la conduction de volume ou de surface du système d'isolation. Ces méthodes sont moins habiles pour la détection d'une pauvre imprégnation, d'un décollement, ou d'une isolation thermique âgée. En effet, ces défauts génèrent une faible conductivité de courant continu, ce qui limitera la détection des variations subtiles du comportement électrique par les méthodes conventionnelles à tension continue citées en [8].

L'essai de montée progressive en haute tension continue vise à combler ces lacunes et ces limitations. Il est plus simple et exige une seule personne pour son exécution. Il améliore aussi la qualité des données acquises, et offre une analyse plus avancée sur l'état de l'isolation de l'enroulement statorique [13-14]. Il consiste en une unité de commande placée en dehors de la zone d'essai et souvent reliée à un PC. Elle est équipée de circuits de mesure de la tension et du courant et elle fournit un signal rampe lent et lisse à l'amplificateur haute tension. Le générateur (amplificateur) haute tension produit une sortie bien stable sans ondulations afin d'éviter des erreurs dans la mesure du courant. L'auteur insiste sur un point vital. Il recommande de mettre solidement l'enroulement statorique à la terre une fois que l'essai est terminé et ce pendant plusieurs heures pour s'assurer que toutes les charges ont été dissipées. Autrement, des tensions

dangereuses peuvent réapparaître sur les bornes de l'enroulement et si un autre essai de tension est appliqué juste après le premier essai, cela causera certainement des endommagements importants.

L'auteur abordera par la suite les types d'isolation en indiquant qu'une isolation en asphalte (une substance fortement polaire) est caractérisée par un plus grand nombre de dipôles par unité de volume que celle en époxy, ce qui mènera à des valeurs de courants mesurés plus élevées et conséquemment à une pente plus raide sur le graphe du courant en fonction de la tension. Il renforce ces propos en donnant un exemple d'un système d'isolation vieilli et détérioré en asphalte. La réponse montre une augmentation progressive de la non linéarité du courant en fonction de la tension. Cela indique qu'une dégradation thermique de l'isolation s'est produite, ce qui a comme conséquence une destruction des couches du ruban adhésif aux extrémités de l'enroulement, causant ainsi la formation de vacuoles et créant possiblement des chemins carbonisés dans l'isolation de masse statorique. Ces défauts deviennent des sites d'injections pour les charges d'espace et pour l'initiation de décharges partielles, donnant naissance à un courant de fuite important. Les systèmes d'isolation basés sur l'asphalte sont également vulnérables à l'absorption d'humidité à travers les fissures. Ces dernières sont généralement causées suite à : la volatilisation provoquée par la chaleur, l'oxydation chimique et la fente moléculaire de l'asphalte. Il est dans ces conditions important d'installer des chauffages électriques dans les chambres d'air du stator pour garder l'enroulement à quelques degrés au-dessus du point de condensation afin d'empêcher une condensation d'humidité sur les surfaces de l'enroulement pendant que la machine est à l'arrêt.

L'auteur donne un autre exemple d'une isolation en polyester-mica qui est composée d'un ruban de Mylar et de morceaux de mica imprégnés dans une résine du polyester. Le courant mesuré semble normal au fur et à mesure que la tension appliquée augmente de zéro à quelques kilovolts. Toutefois, lorsque la tension excède 3,2 kV, la pente de la réponse augmente brusquement et le courant devient non linéaire et quelque peu

erratique. L'auteur indique que lors de la fabrication et du traitement final de l'enroulement à l'usine, une température et une pression insuffisante ont été appliquées afin de fondre et de consolider correctement les couches d'isolation. Conséquemment, l'isolation souffrait de décollements répandus et de délamination entre les rubans. Le traitement incomplet de la résine est aussi caractérisé par une plus grande densité des charges conductrices et polaires, menant à l'accroissement du courant de polarisation et du courant de fuite. L'auteur ajoute un autre exemple d'une machine ayant un système d'isolation thermodurcissable, qui est vulnérable à l'usure mécanique et aux fissures. Cet enroulement présente une fissure sur l'isolation de masse, causée suite à une rude manipulation de l'enroulement lors de son installation. Cela s'interprète par une augmentation pointue du courant de conduction dû à des activités de décharges à l'endroit du craquement. De même, un mauvais traitement des résines, des vernis, et d'autres enduits provoque des conséquences semblables. L'auteur, avant de conclure, donne un dernier exemple d'une isolation en époxy-mica sévèrement contaminée. L'inspection physique de la machine indique une contamination significative sur les parties supérieures et inférieures de l'enroulement statorique. Il est impératif de faire attention aux contaminants tels que le huile, le carbone, la poussière, la saleté, lesquels, combinés avec l'humidité, peuvent causer un indésirable accroissement dans le courant de conduction pendant les essais à haute tension.

L'auteur conclut que l'essai de montée progressive en haute tension continue, une fois correctement fait, peut identifier les enroulements statoriques qui s'approche de leur fin de vie sans accélérer leur processus de détérioration.

1.5 Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines [3]

Dans cet article l'auteur, revient sur l'utilité de la méthode d'analyse de la réponse diélectrique mesurée dans les deux domaines, temporel et fréquentiel, et employée dans l'évaluation de l'état d'isolation des systèmes électriques. Cette méthode montre qu'on peut caractériser le comportement du matériau diélectrique à partir des mesures de la conductivité courant continu (σ), de la composante haute fréquence de la permittivité relative ϵ_{∞} et de la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ [14]. Pour cette investigation une barre statorique basée sur la technologie VPI époxy, selon la norme du fabricant, est utilisée. Un instrument d'une plage de fréquence allant de 10^4 à 10^3 Hz, appelé le IDA 200 [15], est employé pour mesurer les pertes diélectriques, $\tan\delta(\omega)$, et la capacité $C(\omega)$ à des fréquences discrètes. Les mesures ont été réalisées en appliquant une crête de tension de 200 V. Dans le domaine de temps, la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ est estimée après un temps de charge de 1 000 secondes à partir du courant de dépolariation selon l'équation (1.1) suivante :

$$f(t) \approx -\frac{i_{\text{dépolariation}}}{C_0 U_c} \quad (1.1)$$

Le résultat de l'équation (1.2), présenté ci-dessous, confirme que la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ du système d'isolation haute tension des machines tournantes suit le modèle de Curie von Schweidler :

$$f(t) = At^{-n} \quad (1.2)$$

Le courant de dépolariation est transformé du domaine temporel vers le domaine fréquentiel dans le but de vérifier la linéarité du système d'isolation pour quatre différentes tensions de charge : 0,2, 1, 2 et 4 kV. La fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ trouvée, confirme son indépendance du champ électrique appliqué et de la linéarité du système d'isolation. Cependant, pour une meilleure estimation des propriétés diélectriques, il est

nécessaire, lors de la mesure du courant de décharge, que la durée de décharge soit inférieure d'en moins d'une décade à celle du courant de charge.

Les résultats montrent aussi que le domaine du temps est idéal pour les mesures à faibles fréquences ($f < 10$ Hz) tandis que les mesures à hautes fréquences sont plus facilement mesurables dans le domaine fréquentiel du fait que habituellement une lecture du premier point dans le domaine du temps prend un délai minimum d'une seconde d'où la perte de l'information haute fréquence. L'auteur termine cet article, en présentant l'approximation d'Hamon [16] comme un outil très puissant pour un calcul plus rapide des pertes diélectriques dans le domaine des fréquences à partir des données temporelles.

1.6 Low-Frequency Dielectric Response of Epoxy-Mica Insulated Generator bars During Multi-Stress Aging [17]

Dans cet article, une étude de l'évolution de la réponse diélectrique à basse fréquence des matériaux isolants thermodurcissables en époxy-mica utilisés dans l'isolation des enroulements statoriques a été menée en fonction du vieillissement. Ce dernier agit sur le comportement physique et chimique des matériaux isolants menant à un changement de leurs réponses diélectriques. Pour comprendre ces changements, des mesures diélectriques dans le domaine temporel effectuées en laboratoire ont été conduites sur des barres statoriques individuellement avant, pendant et après vieillissement. A cet effet, deux configurations de laboratoire à deux électrodes actives ont été définies. La première configuration permet d'analyser l'évolution de la réponse diélectrique sur la partie droite de la barre statorique, tandis que la deuxième concerne l'évolution de la réponse diélectrique du revêtement semi-conducteur sur les extrémités de la barre statorique. Sous des conditions de mesure en laboratoire de 20°C et 30% RH, des mesures dans le domaine du temps de courant de charge et de décharge ont été effectuées sur une barre statorique non-vieillie isolée en époxy-mica suite à l'application des échelons de tension de 1, 5, 10, 15 et 20 kV. La durée de charge équivalente à chaque échelon de tension était de 2 000 s suivie d'un temps de décharge de 1 000 s.

Pour une évaluation de la réponse diélectrique à basse fréquence, ces mesures sont transformées dans domaine de fréquences utilisant l'équation (10) présentée dans cet article [17].

Pour étudier l'évaluation de la réponse diélectrique en fonction du vieillissement, 12 barres d'un alternateur ont été sélectionnées pour deux programmes de vieillissement réalisés à l'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). Les essais de ces deux programmes de vieillissement à contraintes multiples ont été exécutés sur les trois phases d'un alternateur contenant les 12 barres statoriques sélectionnées. Chaque phase comprend quatre barres disposées symétriquement à raison de deux barres par encoches.

Le premier programme de vieillissement a été exécuté sous une tension de 16 kV rms. Le cycle thermique de charge correspondant à une température du conducteur variait entre 40°C et 122°C. La température du cycle a été réalisée par l'injection d'un courant sur les trois phases en utilisant une source de courant triphasée tel qu'il est montré à la figure 2 dans [18]. Une fois que la température atteint le niveau maximal désiré (122°C), des ventilateurs de refroidissement sont activés pour ramener cette température à la température ambiante de 40°C. La durée complète d'un cycle été de 5 heures, $3^{1/2}$ pour le chauffage suivi de $1^{1/2}$ de refroidissement. L'essai a été exécuté pour une durée totale de 1500 cycles pendant lequel aucune barre n'a été endommagée. Les résultats préliminaires des activités de décharges partielles sont reportés dans [18] et ils sont plus détaillés dans [19].

Le deuxième programme de vieillissement a été exécuté sur deux ensembles de barres du même type soumis au même niveau de tension et aux mêmes contraintes électriques que celles du premier programme. La seule différence entre les deux programmes est que les grandeurs des contraintes mécaniques et thermiques ont été augmentées dans ce deuxième programme. Le premier ensemble de barres est formé de quatre barres non vieillies isolées en époxy-mica, tandis que le second ensemble est composé de quatre

barres non vieillies et de quatre autres barres vieillies lors du premier programme de vieillissement. Les barres de ce deuxième ensemble sont elles aussi isolées en époxy-mica. Une injection de courant a été réalisée sur le premier ensemble de barres (quatre barres non vieillies) jusqu'à ce que la température du conducteur ait atteint une température de 165°C sous une tension de 16 kV rms. Les 8 autres barres formant le deuxième ensemble ont été elles aussi vieillies sous les mêmes conditions thermiques utilisant une source de courant monophasée, tel qu'illustré à la figure 2 dans [19]. La tension appliquée est de 12 kV rms mais aucune contrainte mécanique n'est appliquée sur ces 8 barres. Au 733^{ème} cycle de charge, le vieillissement a été interrompu pour substituer deux barres des 12 barres, qui présentaient une activité très intense de décharges sur leurs extrémités, par deux nouvelles barres. Le programme de vieillissement avait repris jusqu'à atteindre un total de cycle de 1 049.

Des essais hors service de diagnostique à échelon de tension continue pour l'étude de l'évolution de la réponse diélectrique en fonction du vieillissement utilisant une seule électrode active (voir chapitre 2) ont été effectués périodiquement lors de ces deux programmes de vieillissement à la température du conducteur ayant été ramenée à la température ambiante. Pour le premier programme de vieillissement, les mesures de courant de charge et de décharge ont été réalisées à partir du 1 033^{ème} cycle de vieillissement après chaque centaine de cycle (100 cycle) jusqu'au 1 500^{ème} cycle en appliquant des échelons de tension, tandis que pour le second programme de vieillissement, ces mesures ont été conduites aux cycles 0, 105, 267, 304, 535, 706 et 872 pour les deux ensembles de barres statoriques. Pour ce second programme, le niveau des échelons de tension des essais hors service a été fixé à 500 V afin d'éviter des injections de charge qui peuvent affectées ce deuxième programme de vieillissement.

Pour les essais de vieillissement accéléré, l'auteur constate que les résultats expérimentaux obtenus sur les barres vieillies et non-vieillies n'ont pas menés à un changement significatif de la réponse diélectrique de l'isolant à basses fréquences sur la

toute la partie droite des barres. Cependant, une dégradation considérable a été enregistrée sur les extrémités des barres pendant le vieillissement, menant à un accroissement de la conductivité de surface au niveau du revêtement anti-effluves. Conséquemment, ceci a mené à un changement significatif de la réponse diélectrique de la barre complète observée dans la plage de fréquence de 10^{-4} à 10^{-1} Hz.

De plus, la dégradation progressive du système d'isolation a été caractérisée par une occurrence d'un pic de relaxation qui se déplaçait vers les hautes fréquences au fur et à mesure que le vieillissement progressait. Les méthodes temporelles, qui sont bien adaptées pour une analyse en basse fréquence, se sont avérées sensibles au vieillissement qui a eu lieu. Un modèle d'équation d'une ligne de transmission avec une capacité complexe modélisant le volume du matériau isolant a été proposé par l'auteur pour modéliser les extrémités des barres. Ainsi, les résultats du modèle linéaire se concordent bien avec ceux expérimentaux.