

## **Évaluation d'état diélectrique et Analyse des causes profondes des défaillances des transformateurs de courant haute tension (HT) et très haute tension (THT)**

**DIEGO M. ROBALINO**  
Megger  
États-Unis

**ISMAIL GÜNER**  
Hydro-Québec  
Canada

### **RÉSUMÉ**

Afin d'exploiter efficacement le réseau électrique existant et d'assurer une transition harmonieuse vers un réseau intelligent plus moderne et complexe, il est essentiel de se doter de méthodes de diagnostic proactives et précises capables de prédire l'état des composants essentiels du réseau électrique, tels que les transformateurs de puissance, de distribution et de mesure.

Les transformateurs de courant doivent présenter deux grandes qualités : 1) la précision, pour les applications de comptage et de facturation, et 2) la robustesse et la fiabilité, pour les systèmes complexes de protection et de contrôle. En raison de la criticité de ces applications, la conception des transformateurs de mesure a été améliorée et de nouveaux matériaux ont été développés pour répondre aux conditions environnementales et opérationnelles les plus exigeantes.

Comme tout autre composant électrique à haute tension (HT), les transformateurs de courant HT à isolant papier-huile subissent un processus de vieillissement inévitable qui a un effet sur les isolants solides et liquides. Si ce processus n'est pas surveillé, l'équipement pourrait voir sa durée de vie utile diminuer et présenter un état de marche dangereux, soit un risque élevé de blessures pour le personnel d'exploitation et de dommages aux autres appareils à proximité.

Pour qualifier l'état électrique d'un transformateur de courant, il faut d'abord réaliser une analyse complète des paramètres électriques et de leur conformité avec les valeurs nominales. Outre les essais électriques, les essais diélectriques non intrusifs et non destructifs permettent d'évaluer l'état du système d'isolation et d'appuyer les activités de maintenance proactive et préventive.

La recherche préliminaire effectuée sur les transformateurs de courant à moyenne et haute tension à l'aide de techniques d'essai avancées, y compris l'analyse des gaz dissous (AGD) et l'essai de réponse en fréquence diélectrique (DFR), est à la base de ce travail. Elle vise à préciser les avantages et les limites de ces techniques d'essai appliquées aux transformateurs de courant à très haute tension (THT) et à établir des corrélations entre elles.

Ce document présente les résultats de mesures prises sur différents appareils en service, l'un d'eux étant un transformateur de courant à isolant papier-huile à 765 kV retiré du service pour être entièrement démonté en vue d'analyser la corrélation entre l'AGD, l'essai DFR et les observations résultant de l'inspection du système d'isolation du transformateur.

Cet article donne des renseignements pouvant servir de référence aux gestionnaires d'actifs et au personnel de maintenance et d'exploitation chargés de hiérarchiser les activités de maintenance ou le remplacement des appareils défectueux. Dans l'ensemble, il présente un travail unique visant à élargir les connaissances sur les applications spécialisées de l'AGD, des essais DFR et des essais DFR à haute tension pour l'évaluation de l'état de l'isolation des transformateurs de courant HT et THT.

### **MOTS CLÉS**

Transformateur de courant haute tension, réponse en fréquence diélectrique, DFR, spectroscopie dans le domaine fréquentiel, analyse des gaz dissous, évaluation de l'état

## CONTEXTE

Premier producteur d'énergie renouvelable en Amérique du Nord, Hydro-Québec exploite un vaste réseau de transport à haute tension comportant un nombre important de transformateurs de courant à très haute tension (THT) immergés dans l'huile. Certains modèles à 800 kV sont équipés d'un système d'isolation papier-huile-sable (sable quartzeux). L'utilisation de sable permet de réduire le volume d'huile, d'améliorer les caractéristiques mécaniques et d'utiliser des systèmes d'expansion sans organes mobiles.

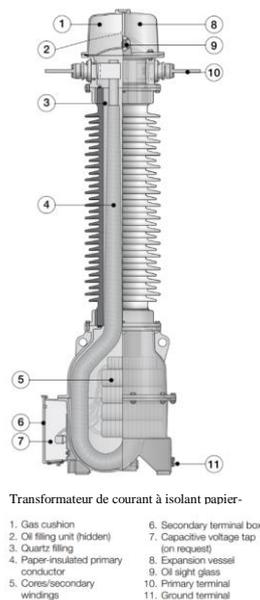


Figure 1 Conception générique d'un transformateur de courant THT avec remplissage au sable

Depuis 2003, plusieurs transformateurs de courant autonomes à 765 kV ont subi des pannes spectaculaires en service, causant des explosions majeures et des dommages indirects dans d'importants postes électriques. Des morceaux d'isolateur en porcelaine ont été projetés sur l'appareillage de commutation à proximité, causant de graves dommages. Hydro-Québec a alors décidé d'instaurer un rayon de sécurité de 130 mètres autour de tous les transformateurs de mesure du même modèle.

Hydro-Québec a pris d'autres mesures préventives et restreint l'accès à ces zones jusqu'à ce que la cause fondamentale de la défaillance soit connue avec certitude. Il est devenu primordial pour l'équipe de gestion des actifs de la société d'élaborer une méthode d'essai fiable, en plus des pratiques courantes, afin de déterminer les risques d'exploitation avant que survienne une défaillance catastrophique.

Selon le fabricant, la durée de vie prévue des transformateurs de courant THT avec remplissage au sable quartzeux est d'environ 30 ans. Après cette période, l'appareil devrait être remplacé. Il n'empêche que dans un réseau aussi complexe que celui d'Hydro-Québec, certaines pièces d'équipement doivent rester en service même après leur durée de vie utile recommandée. Pour cette raison, une procédure pour évaluer l'état d'isolation de ces types de transformateurs et assurer la surveillance, la réparation ou le remplacement des appareils dans le réseau devrait être mise en œuvre. Les données fournies dans l'article [1] témoignent des

préoccupations des exploitants de services d'électricité et justifient toute mesure prise pour minimiser les dangers.

Des essais de réponse en fréquence diélectrique (DFR) et des analyses des gaz dissous (AGD) ont été effectués sur des transformateurs de courant immergés à moyenne et haute tension à la Tennessee Technological University [2], et l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a récemment publié un guide pour l'application de l'essai DFR aux transformateurs de puissance et de distribution [3]. Dans le présent article, les résultats de mesure du ratio facteur de puissance/facteur de dissipation (PF/DF) à la fréquence de ligne, de la capacité (C), de la réponse en fréquence diélectrique (DFR) et de l'analyse des gaz dissous (AGD) sont pris en compte afin de corréliser les techniques de diagnostic avancées et définir les priorités et les stratégies de maintenance en vue de surveiller, de réparer ou de remplacer les transformateurs de courant HT et THT sur le réseau électrique d'Hydro-Québec.

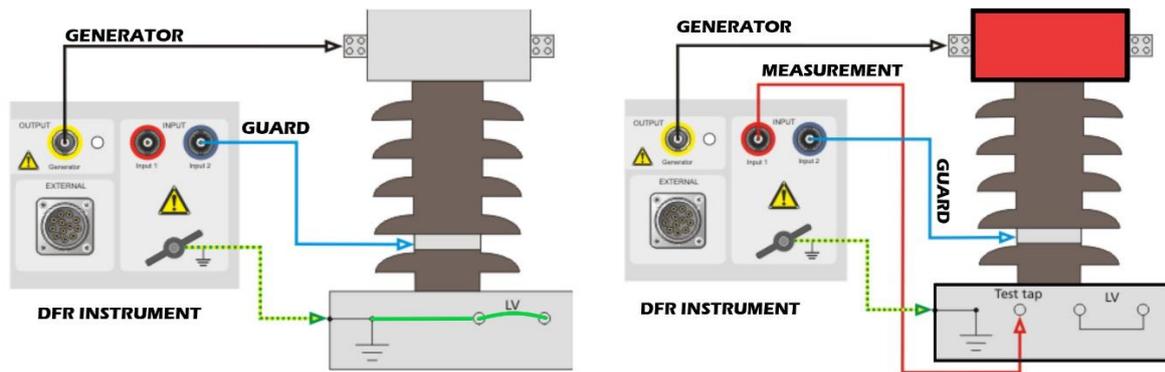
L'application de l'essai DFR sur les transformateurs de courant THT permet de quantifier la teneur en humidité globale dans l'isolant solide et la conductivité de l'isolant liquide. En plus de ces mesures, qui permettent d'évaluer l'état du système d'isolation, des réponses atypiques sont indicatives d'une contamination possible de l'isolant. Enfin, la réponse diélectrique dans le domaine fréquentiel peut être convertie dans le domaine de température pour visualiser le véritable comportement du ratio PF/DF en fonction de la température pour un appareil donné.

## **ESSAIS SUR LE TERRAIN DE TRANSFORMATEURS DE COURANT HAUTE TENSION**

Les essais sur le terrain à des fins d'évaluation de l'état peuvent être divisés en essais électriques et en essais diélectriques. Une bonne description des étapes requises et suggérées pour réaliser les essais électriques sur le terrain des transformateurs de courant se trouve dans les publications [4, 5, 6].

Les essais diélectriques sont au cœur du travail décrit dans le présent article et servent de base à la formulation de conclusions pratiques sur le système d'isolation des transformateurs de courant THT, où l'échantillonnage de l'huile n'est pas toujours possible et où l'état du système d'isolation doit être vérifié. Des techniques de diagnostic avancées telles que les mesures de réponse diélectrique dans le domaine fréquentiel sont donc employées sur le terrain. Des mesures du ratio PF/DF à la fréquence de ligne sont généralement effectuées pour évaluer l'état général du système d'isolation. Elles donnent une idée globale de sa contamination ou de sa détérioration.

Dans l'essai DFR, on fait appel à une procédure semblable à la méthode d'analyse du ratio PF/DF, mais, dans ce cas, on réalise un balayage de fréquences à large bande pour générer une réponse diélectrique unique pour l'isolant à l'essai (capacité). Le plus souvent, l'essai DFR est réalisé à l'endroit où se trouve la majorité de l'isolant solide. Par conséquent, pour les transformateurs de courant dotés d'une prise d'essai, il est mené sur la prise C1 et, pour ceux qui n'en sont pas équipés, un essai global est réalisé avec la prise de terre reliée directement à l'enroulement secondaire (comme indiqué sur la figure 3).



a) Raccordement pour essai diélectrique sur un transformateur de courant HT sans prise d'essai

b) Raccordement pour essai diélectrique sur un transformateur de courant HT avec prise d'essai

Figure 2 Raccordement entre un instrument de mesure de la réponse en fréquence diélectrique (DFR) et un transformateur de courant HT ou THT

L'essai DFR est effectué sur les transformateurs de courant HT pour :

- estimer la teneur en humidité (%MC) dans l'isolant solide ;
- déterminer la conductivité de l'isolant liquide ;
- obtenir le comportement thermique réel des paramètres diélectriques ;
- dégager les réponses atypiques dues à la contamination.

## EXPÉRIENCE SUR LE TERRAIN

Dans le cadre de l'analyse des causes fondamentales et des défaillances, Hydro-Québec a pris des mesures de DFR sur des transformateurs de courant à 765 kV afin d'étudier les corrélations entre les DFR et les résultats de l'analyse des gaz dissous (AGD). En 2016, elle a soumis six transformateurs de courant à 765 kV du même modèle à des essais après la défaillance d'un appareil du même modèle et de la même année de fabrication. Ce modèle est doté d'une prise d'essai capacitive qui simplifie l'essai et l'analyse comparative, comme le montre la figure 3.

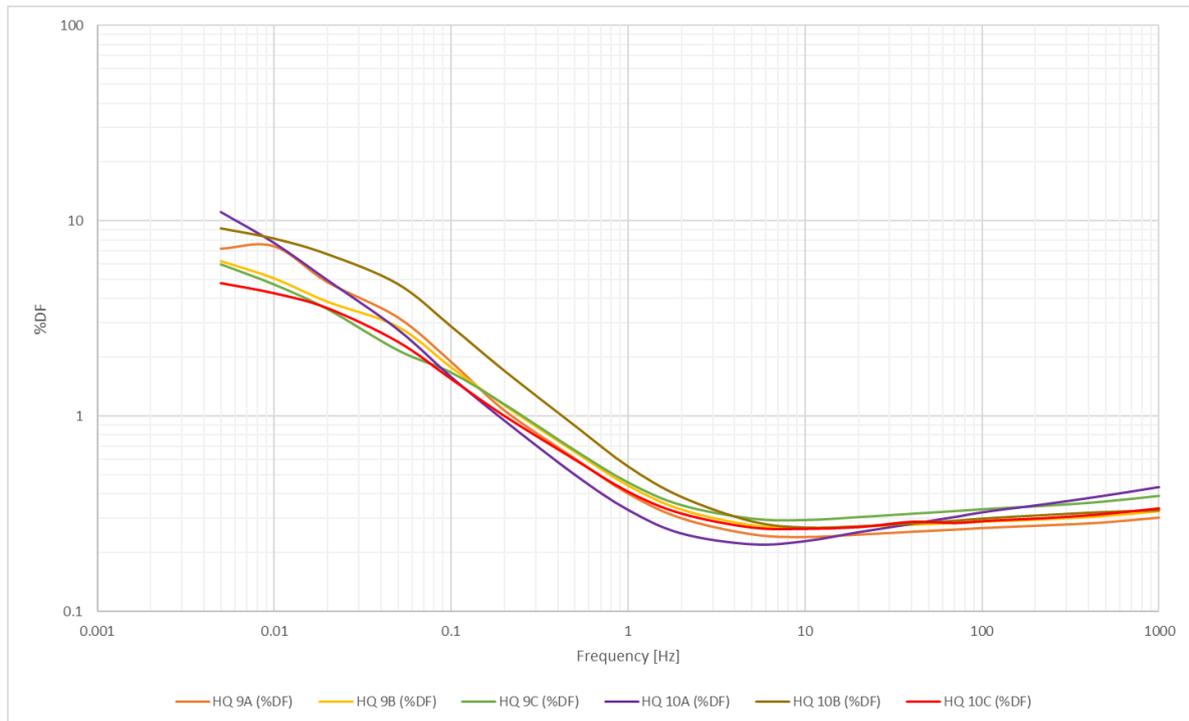


Figure 3 Caractérisation des transformateurs de courant THT à isolant papier-huile et remplissage au sable

Tableau I Réponse en fréquence diélectrique (DFR) et facteur de correction de température (ITC) de six transformateurs de courant (TC) THT avec remplissage au sable (2016)

N° du TC	Capacité (nF)	Teneur en humidité (%MC)	Conductivité	Facteur de puissance corrigé à 20 °C par l'ITC				
				500 Hz	60 Hz	15 Hz	1 Hz	0,1 Hz
700-9A	1154	1,3	0,073	0,303	0,269	0,254	0,3	1,07
700-9B	1271	1,6	0,022	0,32	0,287	0,275	0,365	1,3
700-9C	1363	1,5	0,021	0,37	0,327	0,305	0,419	1,5
700-10A	1044	0,4	0,974	0,41	0,307	0,258	0,288	1,25
700-10B	1120	2,1	0,052	0,325	0,292	0,274	0,459	2,3
700-10C	1283	1,4	0,006	0,338	0,292	0,282	0,318	1,0

Bien que les mesures de DFR affichent un profil similaire entre 1 kHz et 15 Hz (les toutes premières différences de profil apparaissent à 1 Hz et 0,1 Hz), les résultats de l'AGD ne présentent aucune anomalie. De manière générale, ces mesures ont été jugées normales pour le type de transformateur de courant THT à l'étude.

D'autres types de construction qu'on retrouve couramment dans les transformateurs haute tension sans remplissage au sable affichent une réponse légèrement différente, comme le montre la figure 4.

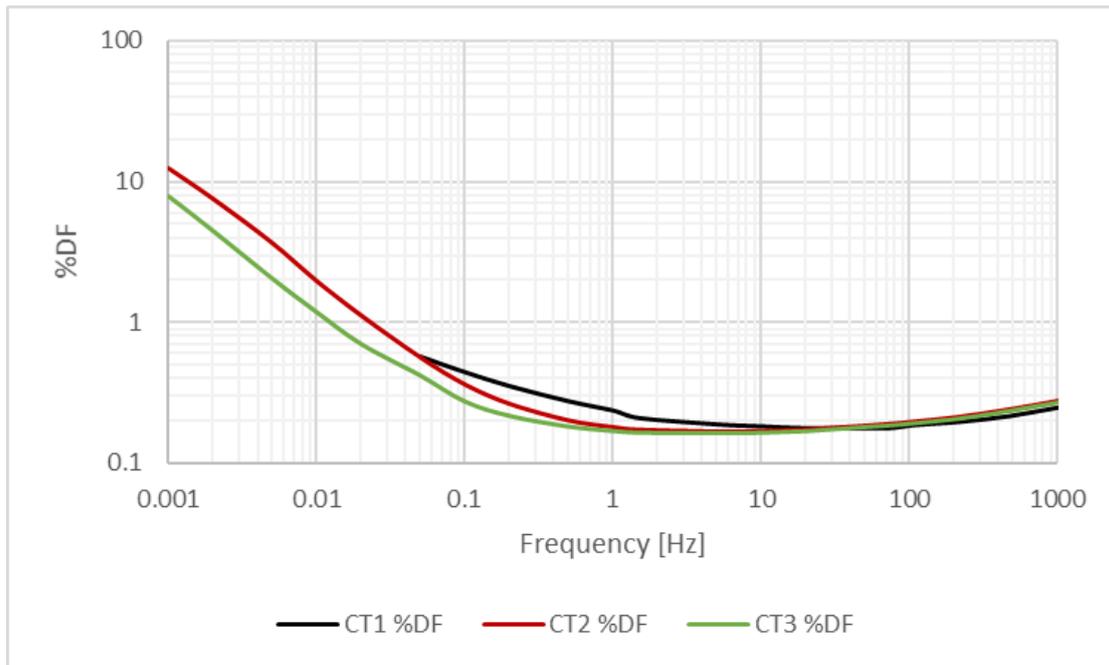


Figure 4 Caractéristiques de la DFR de l'isolant papier-huile de transformateurs de courant THT uniquement

Tableau II DFR et ITC de transformateurs de courant THT sans remplissage au sable

N° du TC	Capacité (nF)	Teneur en humidité (%MC)	Conductivité	Facteur de puissance corrigé à 20 °C par l'ITC				
				500 Hz	60 Hz	15 Hz	1 Hz	0,1 Hz
1	1662	0,8	0,012	0,225	0,176	0,176	0,225	0,41
2	831	0,4	0,045	0,26	0,187	0,173	0,175	0,32
3	846,3	0,3	0,019	0,26	0,188	0,172	0,165	0,23

Indépendamment du type et du modèle de transformateur de courant à l'étude, l'essai DFR permet de visualiser graphiquement la réponse diélectrique qui peut caractériser un appareil de ce type. La capacité (C), le ratio %DF/%PF, la conductivité de l'huile ( $\sigma$ ) et la teneur en humidité (%MC) sont des paramètres fondamentaux tirés de l'analyse de la DFR. Le facteur de correction de température (algorithme ITC) procure un autre avantage, soit la possibilité de normaliser à 20 °C la réponse diélectrique « complète ». La réponse diélectrique normalisée à 20 °C permet de réaliser des analyses comparatives et tendancielle des valeurs %DF à des fréquences différentes de la fréquence de ligne (50 ou 60 Hz).

Pour les appareils expérimentaux, Hydro-Québec n'a acquis aucune donnée de référence préliminaire. Étant donné l'absence de mesures de référence durant les études de défaillances, la prise de mesures sur des composants jumeaux de conception identique a permis la réalisation d'une analyse comparative et l'élaboration d'un critère pour la gestion des actifs. À noter qu'il est très utile d'obtenir une DFR de référence du fabricant de transformateurs de courant pour pouvoir évaluer les conditions de vieillissement et les conditions en service.

En 2018, un autre transformateur de courant THT de modèle similaire appartenant à Hydro-Québec a subi une défaillance. Hydro-Québec a alors lancé un vaste programme d'évaluation

de l'état de l'ensemble de son parc de transformateurs de courant HT et THT. À la lumière des résultats d'une AGD réalisée sur des échantillons, l'un des transformateurs de courant THT a été retiré du réseau. Pour mieux comprendre l'évolution du gaz et son effet sur le système diélectrique du transformateur de courant THT, un essai DFR a été effectué pour comparer celui-ci avec des appareils en bon état.

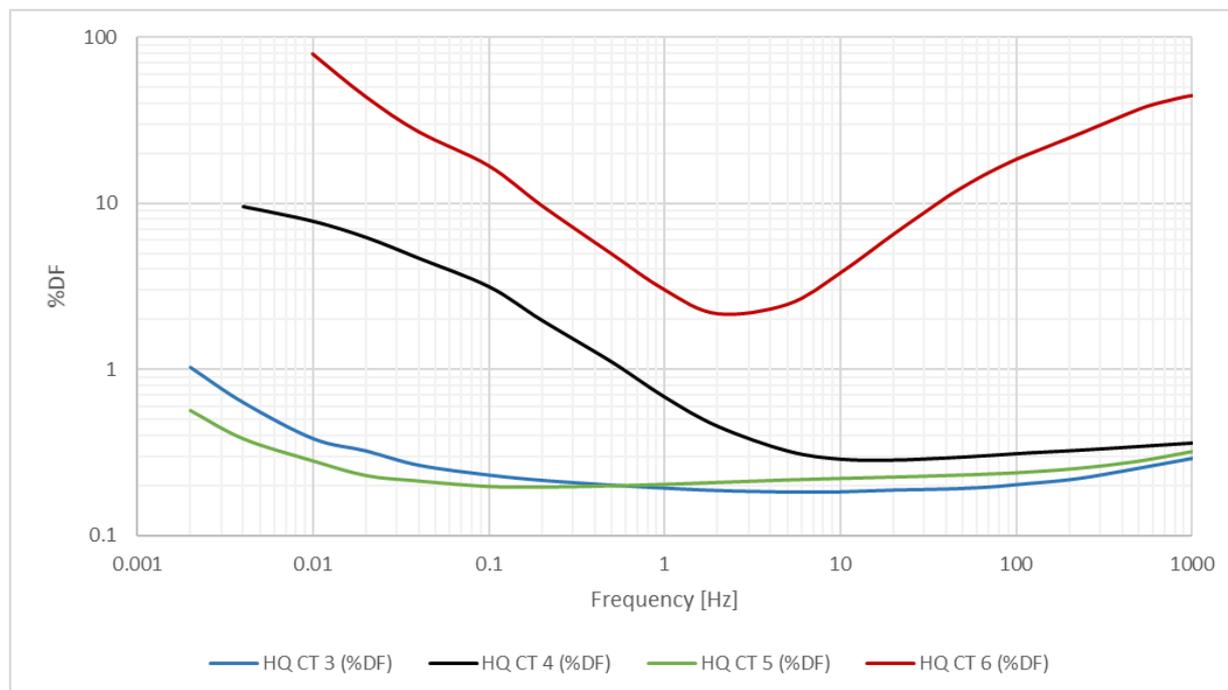


Figure 5 DFR de différents transformateurs de courant THT dans le cadre de l'étude menée par Hydro-Québec

La DFR s'est avérée atypique pour le système d'isolation de l'appareil CT6 d'Hydro-Québec, affichant des pertes élevées sur tout le spectre de fréquences par rapport aux mesures de référence indiquées à la figure 3 et aux mesures prises sur d'autres appareils du réseau (figure 5). L'AGD menée sur l'appareil CT6 indique des niveaux anormaux pour certains hydrocarbures tels que l'acétylène, ce phénomène étant généralement observé après la formation d'un arc électrique ou une activité importante de décharges partielles. Ces valeurs sont présentées au tableau III.

Tableau III Résultats de l'AGD pour le transformateur CT6 d'Hydro-Québec

AGD	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Mesurés à la cuve inférieure	43	302	489	12	17	16	2
Mesurés à la cuve supérieure	5	117	637	10	10	14	11
Limite type	140	500	3000	35	2	15	35

Hydro-Québec compte mener une étude approfondie de l'appareil CT6, où des mesures de DFR seront prises pour différentes couches du système d'isolation. Au moment de la rédaction de cet article, les résultats de l'inspection interne n'étaient pas encore disponibles.

Les postes THT posent un nouveau défi pour la réalisation des essais DFR basse tension typiques à 140 VRMS. Afin de surmonter le brouillage électromagnétique causé par les postes

THT et ultra haute tension (UHT), Hydro-Québec a intégré l'utilisation d'un amplificateur de tension pour améliorer le rapport signal/bruit. La procédure d'essai mise au point par Hydro-Québec prévoit un essai DFR à 1400 VRMS, avec des mesures de haute qualité dans la gamme de 1 kHz à 10 MHz pour les transformateurs de courant à 800 kV.

## ÉVALUATION DE L'ÉTAT

La plupart des défaillances survenant dans les transformateurs de mesure résultent de la dégradation progressive du système d'isolation, laquelle doit être surveillée afin d'éviter les défaillances imprévues et d'établir un plan de gestion des actifs qui hiérarchise les activités de maintenance par évaluation de l'état du système diélectrique.

Les causes les plus courantes de défaut de l'isolant papier-huile sont les suivantes :

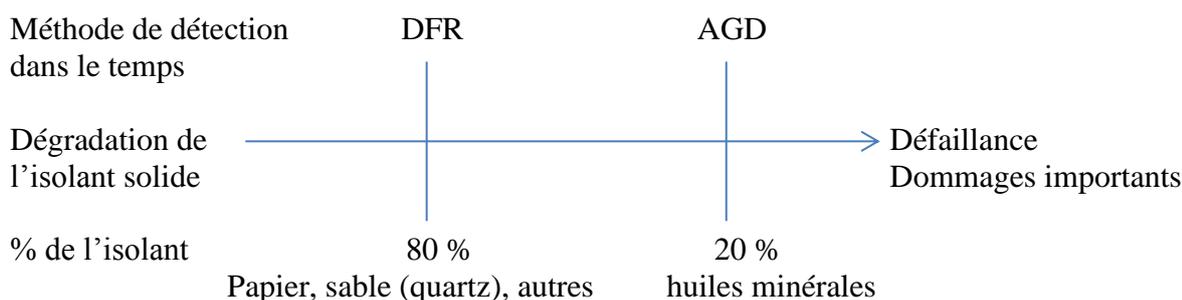
- entrée d'humidité ;
- oxydation et vieillissement de l'huile ;
- décharges partielles ;
- vieillissement du papier ;
- instabilité thermique.

La méthodologie d'évaluation de l'état au moyen de l'AGD et des essais DFR peut éclairer plusieurs décisions de gestion du cycle de vie.

Interprétation	Mesure de suivi
Résultats satisfaisants	Effectuer un nouvel échantillonnage dans 5 ans.
Résultats incertains ou suspects	Effectuer un nouvel échantillonnage dans un délai de 6 à 12 mois.
Résultat indiquant un défaut	Évaluer les options de maintenance. Prévoir le remplacement du transformateur.

En général, la surveillance en ligne des transformateurs de courant HT n'est pas une méthode qui se justifie sur le plan économique. L'AGD et les essais DFR hors ligne permettent, quant à eux, d'établir des paramètres de hiérarchisation avancés qui entraînent des changements dans la fréquence des essais, la maintenance ou le retrait prévu des transformateurs.

Une défaillance causée par la dégradation de l'isolant solide ne peut être détectée par l'AGD que si le processus de dégradation laisse des traces dans l'huile. Par conséquent, un programme combinant l'AGD et les essais DFR augmente les chances de détection efficace de la dégradation de l'isolant papier-huile.



## CONCLUSIONS

L'évaluation sur le terrain de l'état diélectrique de transformateurs de courant THT en présence d'un brouillage diélectrique est possible grâce à la mesure de la réponse en fréquence diélectrique (DFR) haute tension (1400 VRMS). L'analyse diélectrique dans le domaine fréquentiel permet d'obtenir une signature diélectrique unique de l'isolant papier-huile dans les transformateurs de courant THT avec ou sans remplissage au sable.

Les dernières avancées dans le domaine de la mesure de la DFR en utilisant l'algorithme de correction de la température (ITC) permettent de normaliser l'ensemble de la réponse diélectrique à 20 °C. Grâce à cette méthode, il est maintenant possible de classer la réponse diélectrique à des fréquences différentes de 50/60 Hz. L'étude révèle que des indicateurs %DF fiables se trouvent à 1 Hz et 0,1 Hz lorsque les résultats sont correctement normalisés par l'ITC ; sinon, l'information est vague et potentiellement trompeuse.

Les travaux expérimentaux montrent que les essais DFR permettent de détecter des variations diélectriques dues à la contamination ou aux décharges partielles ainsi qu'aux infiltrations d'humidité.

L'équipe de gestion des actifs d'Hydro-Québec poursuivra son étude des transformateurs de courant THT défectueux et, en collaboration avec des experts de l'industrie, élaborera un cadre de limites suggérées pour la DFR à différentes fréquences afin d'assurer la fiabilité de l'exploitation et de minimiser les risques sur le terrain.

Grâce aux essais DFR et à l'AGD, il est possible de mener une évaluation avancée de l'état diélectrique des transformateurs de courant HT et THT. Cette information revêt une grande importance pour le personnel d'exploitation et de gestion des actifs.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CIGRÉ. « State of the art of Instrument Transformers », Brochure technique 394, 2009.
- [2] ROBALINO, D. « Loss of Life of MV Current Transformers under Thermal Acceleration Aging », thèse de doctorat, Tennessee Technological University, 2009.
- [3] IEEE. *C57.161, Guide for Dielectric Frequency Response Test*, 2018.
- [4] ROBALINO, D. « A comprehensive approach to current Transformer field diagnostics », Actes de la TechCon Asia-Pacific Conference, 2016.
- [5] IEEE. *C57.13-2016, Standard Requirements for Instrument Transformers*.
- [6] CEI. *61869-2 Transformateurs de mesure – Partie 2 : Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant*, éd. 1, 2012.