

# **Essais des transformateurs de puissance, des inductances de mise à la terre et des inductances shunt**

**SN-14.2h**

**NOVEMBRE 2011**

---

## Avertissement

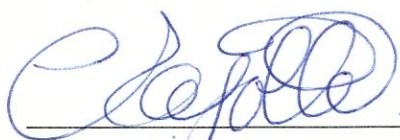
Un amendement (A) peut modifier le présent document. Dans un tel cas, il a préséance sur celui-ci jusqu'à son intégration lors de la prochaine révision du document.

## Historique des modifications

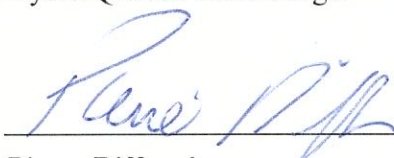
Ver.	Date	Auteurs	Modifications principales
d	01/1979		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conversion en unités SI</li> <li>- Valeur crête de l'onde coupée réduite de 115% à 110%</li> <li>- Précision apportée au texte</li> <li>- Modifications aux modalités de certains essais</li> <li>- Texte modifié pour tenir compte des défauts fugitifs</li> </ul>
e	07/1982		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise à jour et précision apportée au texte</li> <li>- Référent aux nouvelles versions des normes ACNOR, EEMAC, ANSI, IEEE et CEI</li> <li>- Ajout de la mesure de capacité et du facteur de puissance (paragraphe 8.5)</li> </ul>
f	05/1988	R. Beauchemin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précisions apportées au texte</li> <li>- Ajout des essais d'échauffement en surcharge, de qualification sismique, des changeurs de prise et d'erreur en régime transitoire des T.C.</li> <li>- Mesure des décharges partielles en pC</li> </ul>
g	11/2004	P. Pepin F. Rochon	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition de la séquence d'essai et du contenu des rapports d'essais</li> <li>- Choc de foudre: essais de type et essais individuels</li> <li>- Échauffement en surcharge: critères de réussite</li> <li>- Inductances shunt: mesure de linéarité et mesure du bruit</li> <li>- Prescription concernant la reprise des essais en cas de défaut</li> <li>- Guide d'essais à réaliser suivant une réparation ou une remise à neuf</li> <li>- Essai individuels: choc de manoeuvre</li> </ul>
h	11/2011	C. Rajotte P. Riffon  Collaborateurs: G. Gagné J. Mainville V.N. Nguyen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Révision générale;</li> <li>- Ajout de prescriptions particulières d'essais pour les inductances de MALT;</li> <li>- Mise à jour des références normatives;</li> <li>- Clarification de l'ordre des essais;</li> <li>- Addition d'essais de tenue aux chocs de foudre sur les enroulements tertiaires enfouis;</li> <li>- Ajout de précisions additionnelles pour les essais de tenue aux chocs de foudre;</li> <li>- Ajout de la méthode indirecte comme méthode d'essais préférentielle pour les essais de tenue chocs de foudre sur les bornes de neutre;</li> <li>- Ajout d'une mesure obligatoire de la température des points chauds des enroulements par fibres optiques;</li> <li>- Ajout de précisions concernant la mesure de la température des pièces métalliques par thermocouples;</li> <li>- Ajout de précisions concernant l'essai d'échauffement et le traitement des résultats;</li> <li>- Abaissement de l'échauffement admissible de l'huile au sommet de la cuve à 60°C;</li> <li>- Ajout de précisions concernant l'essai d'échauffement en surcharge et ajustement aux critères de réussite;</li> <li>- Ajout de critères de gaz dissous lors des essais diélectriques et de surexcitation;</li> <li>- Précisions concernant les niveaux de gaz non-détectables;</li> <li>- Mesure de bruit audible par la méthode d'intensité acoustique et addition de la mesure du bruit en charge pour tous les transformateurs;</li> <li>- Ajout d'un critère d'acceptation sur la résistance des enroulements;</li> <li>- Ajout de méthodes alternatives d'essai de vérification de l'étanchéité;</li> <li>- Addition d'une mesure de réponse en fréquence (FRA) comme essai de routine;</li> <li>- Ajout de précisions concernant la mesure des pertes à vide, addition du niveau 80% de la tension assignée;</li> <li>- Ajout de précisions concernant la mesure des pertes en charge et de l'impédance, modification de la tolérance à 5% sur l'impédance des enroulements principaux des transformateurs de puissance;</li> <li>- Addition d'une mesure des pertes des ventilateurs et des pompes;</li> <li>- Ajout de précisions concernant l'essai en tension induite et la position du changeur de prises;</li> <li>- Addition d'une mesure du facteur de puissance de l'isolation;</li> <li>- Clarifications ajoutées concernant les essais de tenue aux courts-circuits des enroulements tertiaires;</li> <li>- Élimination des mesures FRSL lors des essais de tenue au courant de court-circuit;</li> <li>- Augmentation de la tolérance sur le courant symétrique lors des essais de tenue au courant de court-circuit à <math>\pm 10\%</math>;</li> <li>- Exigence de réaliser tous les essais de type et de routine suite aux essais de tenue au courant de court-circuit;</li> <li>- Ajout des modalités d'essais de tenue au courant de court-circuit pour les inductances de MALT;</li> <li>- Ajout de précisions concernant l'essai de tenue aux chocs de foudre avec parafoudres sur les bornes de ligne;</li> <li>- Ajout des essais de conception, de type, de prélèvement et de routine sur les enveloppes des traversées avec enveloppe en polymère et enveloppe en porcelaine;</li> <li>- Addition d'un essai spécial de cyclage thermique à basse et haute température sur les traversées;</li> <li>- Ajout des essais de chocs en routine sur les traversées de tensions assignées 145 kV et plus;</li> <li>- Augmentation de la température minimale d'opération du changeur de prises en charge à -40°C lors de l'essai mécanique à basse température;</li> <li>- Révision générale des annexes A, B, C, D;</li> <li>- Annexe B: Addition des essais applicables aux inductances de MALT et des inductances shunt;</li> <li>- Annexe D: Modification pour tenir compte du nouveau cycle de surcharge journalier d'hiver.</li> </ul>

**Signatures**

Préparé par :

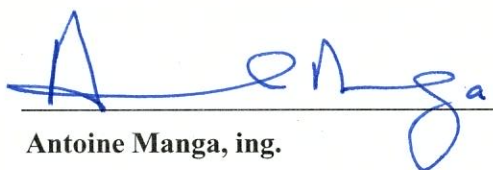
  
20/12/2011**Claude Rajotte, ing.**

Transformateurs, Compensation et CCHT  
Unité Appareillage  
Direction Expertise  
Direction Principale – Planification, expertise et affaires réglementaires  
Hydro-Québec TransÉnergie

  
20/12/2011**Pierre Riffon, ing.**

Unité de Qualité de la Fabrication  
Direction Ingénierie de Transport  
Hydro-Québec Équipement et centre des services partagés

Approuvé par :

  
2011/12/20**Antoine Manga, ing.**

Chef Transformateurs, Compensation et CCHT  
Unité Appareillage  
Direction Expertise  
Direction Principale – Planification, expertise et affaires réglementaires  
Hydro-Québec TransÉnergie

Approuvé par :

  
21/12/21**Patrick Bujold**

Chef Appareillage de transport  
Direction Expertise  
Direction Principale – Planification, expertise et affaires réglementaires  
Hydro-Québec TransÉnergie

## Table des matières

<b>1. Prescriptions générales.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objet.....	1
1.2 Références normatives.....	1
1.3 Domaine d'application.....	3
1.4 Définitions.....	3
<b>1.5 Règles générales pour la réalisation des essais .....</b>	<b>4</b>
1.5.1 Classification des essais.....	4
1.5.2 Liste des essais et séquences d'essais.....	4
1.5.3 Programme d'essais.....	5
1.5.4 Avis d'essais.....	7
1.5.5 Rapport d'essais .....	7
1.5.6 Période de validité des essais de type .....	9
1.5.7 Prescriptions concernant la reprise des essais en cas de défaut .....	9
1.5.8 Reprises d'essai suite à une réparation d'un appareil.....	10
<b>2. Essais de type sur les appareils .....</b>	<b>11</b>
2.1 Généralités.....	11
2.2 Essais de tenue aux chocs de foudre avec ondes coupées.....	11
2.2.1 Généralités .....	11
2.2.2 Arrangement pour essais.....	11
2.2.3 Tension d'essais .....	13
2.2.4 Forme d'onde .....	13
2.2.5 Séquence d'essais .....	14
2.2.6 Système de mesure .....	15
2.2.7 Critères de réussite des essais .....	15
2.3 Essais de tenue aux chocs de foudre sur les bornes de neutre.....	16
2.4 Essai d'échauffement à la puissance nominale .....	16
2.4.1 Préparation de l'appareil essayé .....	17
2.4.2 Paramètres à mesurer durant l'essai .....	18
2.4.3 Déroulement de l'essai .....	18
2.4.4 Résultats des essais .....	21
2.4.5 Critères d'acceptation des essais .....	22
2.5 Essai d'échauffement en surcharge .....	23
2.5.1 Préparation de l'objet d'essai .....	23
2.5.2 Modalité d'essai et profil de surcharge.....	23
2.5.3 Paramètres à mesurer en cours d'essais.....	24
2.5.4 Critères de réussite de l'essai .....	26
2.6 Prélèvement et analyse des échantillons d'huile.....	27
2.7 Mesure des impédances homopolaires des transformateurs.....	28
2.8 Mesure du bruit audible.....	28
2.9 Essai de surexcitation à 110 % de la tension nominale.....	29
2.10 Qualification parasismique .....	29

<b>3. Essais individuels des transformateurs de puissance, des inductances de mise à la terre et des inductances shunt .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Généralités .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Mesure de la résistance des enroulements .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Essais de tenue aux chocs de foudre .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4 Essais de tenue aux chocs de manœuvre .....</b>	<b>30</b>
3.4.1 Généralités .....	30
3.4.2 Arrangement des appareils pour les essais .....	31
3.4.3 Forme d'onde .....	31
3.4.4 Tension d'essais .....	31
3.4.5 Séquence d'essais .....	31
3.4.6 Système de mesure .....	32
3.4.7 Critères de réussite .....	32
<b>3.5 Essai par tension appliquée à fréquence industrielle .....</b>	<b>32</b>
<b>3.6 Vérification de l'étanchéité de la cuve et des radiateurs .....</b>	<b>32</b>
<b>3.7 Essai d'isolement du noyau .....</b>	<b>32</b>
<b>3.8 Mesure de la réponse en fréquence (FRA) .....</b>	<b>32</b>
<b>3.9 Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire .....</b>	<b>33</b>
<b>3.10 Mesure du rapport de transformation .....</b>	<b>33</b>
<b>3.11 Mesure du courant à vide .....</b>	<b>33</b>
<b>3.12 Mesure des pertes à vide .....</b>	<b>33</b>
<b>3.13 Mesure de l'impédance de court-circuit .....</b>	<b>33</b>
<b>3.14 Mesure de l'impédance des inductances de MALT .....</b>	<b>34</b>
<b>3.15 Mesure des pertes en charge .....</b>	<b>34</b>
<b>3.16 Mesure des pertes des ventilateurs et des pompes .....</b>	<b>34</b>
<b>3.17 Essais d'opération du changeur de prises en charge .....</b>	<b>34</b>
<b>3.18 Essai en tension induite .....</b>	<b>35</b>
3.18.1 Essai de courte durée pour les transformateurs de tensions assignées inférieures à 72,5 kV .....	35
3.18.2 Essai en tension induite avec mesures de décharge partielles pour les transformateurs de tensions assignées égales supérieures à 72,5 kV .....	35
<b>3.19 Essai de mesure du facteur de puissance de l'isolation .....</b>	<b>37</b>
<b>3.20 Mesure de l'impédance (linéarité) et des pertes des inductances shunt .....</b>	<b>37</b>
<b>3.21 Essai en tension appliquée sur les inductances de MALT et sur les inductances shunt .....</b>	<b>39</b>
3.21.1 Essai de courte durée pour les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées inférieures à 72,5 kV .....	39
3.21.2 Essai en tension appliquée avec mesures de décharge partielles pour les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées égales ou supérieures à 72,5 kV .....	40
<b>3.22 Mesure du niveau de bruit audible des inductances shunt .....</b>	<b>40</b>

<b>4. Essais spéciaux .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Tenue au courant de court-circuit des transformateurs.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Généralités .....	41
4.1.2 Courant de court-circuit symétrique .....	41
4.1.3 Courant de court circuit asymétrique.....	42
4.1.4 Démonstration de la tenue thermique au court-circuit.....	42
4.1.5 Démonstration de la tenue mécanique au court-circuit.....	43
<b>4.2 Essai de tenue au courant de défaut sur les inductances de MALT .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Mesure des perturbations radioélectriques externes .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4 Essais de tenue aux chocs de foudre et aux chocs de foudre coupés avec parafoudres sur les bornes de ligne.....</b>	<b>47</b>
<b>5. Essais sur les composants.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Essais de type sur les traversées.....</b>	<b>47</b>
5.1.1 Généralités .....	47
5.1.2 Essais de tenue de tension à fréquence industrielle à sec ou sous pluie.....	48
5.1.3 Essais de tenue à la tension de choc de foudre à sec.....	48
5.1.4 Essais de tenue à la tension de choc de manoeuvre à sec ou sous pluie .....	48
5.1.5 Essai de stabilité thermique .....	48
5.1.6 Essai d'échauffement .....	48
5.1.7 Vérification de la tenue au courant thermique de courte durée.....	48
5.1.8 Essai de tenue en flexion .....	48
5.1.9 Essai d'étanchéité .....	49
5.1.10 Essai de cyclage thermique à basse et haute température .....	49
<b>5.2 Essais individuels des traversées.....</b>	<b>49</b>
<b>5.3 Essai de type sur les transformateurs de courant .....</b>	<b>49</b>
<b>5.4 Essais individuels sur les transformateurs de courant .....</b>	<b>49</b>
<b>5.5 Essais de type sur les changeurs de prise .....</b>	<b>50</b>
<b>5.6 Essais individuels sur les changeurs de prise.....</b>	<b>50</b>
 Annexe A: Exigences d'essais pour les traversées de remplacement et renseignements à fournir lors d'appel d'offres .....	50
Annexe B: Guide général pour la réalisation des essais suivant une réparation ou une remise à neuf.....	50
Annexe C: Lexique des essais sur les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, des inductances de MALT et inductances shunt .....	61
Annexe D: Calcul des caractéristiques thermiques en surcharge des transformateurs .....	65

---

## Liste des figures

	Page
Figure 1 - Cycle de surcharge	26

## Liste des tableaux

	Page
<i>Tableau 1 – Essais requis pour les transformateurs de puissance, les inductances de MALT et les inductances shunts</i>	6
<i>Tableau 2 – Période de validité des essais de type</i>	9
<i>Tableau 3 – Énergie emmagasinée dans les condensateurs du générateur de chocs I</i>	12
<i>Tableau 4 – Valeurs des résistances non inductives</i>	13
<i>Tableau 5 – Temps de balayage</i>	15
<i>Tableau 6 – Températures limites lors de l'essai de surcharge</i>	26
<i>Tableau 7 – Augmentation maximale du contenu en gaz dissous</i>	27
<i>Tableau 8 – Critères de réussite des perturbations radioélectriques externes</i>	47
<i>Tableau A.1 - Essais individuels sur les traversées de remplacement</i>	53
<i>Tableau A.2 - Essais de type sur les traversées de remplacement</i>	55



---

## 1. Prescriptions générales

### 1.1 Objet

La présente spécification définit les essais que le fabricant doit effectuer sur les transformateurs de puissance, les inductances de mise à la terre et les inductances shunt construits pour Hydro-Québec. Elle donne aussi les essais à réaliser pour les composants majeurs tels que les changeurs de prises, les traversées et les transformateurs de courant ainsi que certains accessoires.

### 1.2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements). Les exigences données dans les spécifications techniques normalisées d'Hydro-Québec (SN) ont préséance sur les autres références normatives.

#### Hydro-Québec

SN-14.1	Spécification technique -Transformateurs de puissance et inductances shunt.
SN-14.4	Spécification technique pour la fourniture d'inductances de mise à la terre.
SN-16.1	Spécification technique pour les essais sur les transformateurs de mesure.
SN-20.2	Fourniture et essais de supports isolants destinés aux installations de postes de 15 à 800 kV
TET APG-N-0001	Qualification parasismique des équipements, bâtiments et ouvrages du réseau de transport

#### Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

C57.12.00-2010 (D5)	IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers (Draft)
C57.12.90-2010	IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers
C57.13-2008	IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers
C57.19.00-2004	IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings
C57.19.01-2000	IEEE Standard Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Power Apparatus Bushings

---

C57.21-2008	IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500 kVA
C57.113-2010	IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid - Filled Power Transformers and Shunt Reactors.

Commission électrotechnique internationale (CEI)

60060-1 (2010)	Technique des essais à haute tension - Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais
60076-1 (2011)	Transformateurs de puissance- Partie 1: Généralités
60076-2 (2011)	Transformateurs de puissance- Partie 2: Échauffement des transformateurs immergés dans le liquide
60076-3	Transformateurs de puissance- Partie 3: Essais diélectriques
60076-4 (2002)	Transformateurs de puissance- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et surtension de manœuvre - Transformateur de puissance et bobines d'inductances
60076-5 (2006)	Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit
60076-18	Transformateurs de puissance – Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence (à être publiée)
60076-10 (2001)	Transformateurs de puissance- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit
61083-1	Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de chocs à haute tension - Partie 1 : Prescriptions pour les appareils.
60137 (2008)	Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1000 volts
60214-1 (2003)	Changeurs de prise en charge – Partie 1 Prescriptions de performances et méthodes d'essais
61462 (2007)	Isolateurs composites creux –Isolateurs avec ou sans pression interne pour utilisation dans des appareillages électriques de tensions nominales supérieures à 1 000 V – Définitions, méthodes d'essais, critères d'acceptation et recommandations de conception
62155 (2003)	Isolateurs creux avec ou sans pression interne, en matière céramique ou en verre, pour utilisation dans les appareillages prévus pour des tensions nominales supérieures à 1000 V
62271-1 (2007)	Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes

American Society for Testing and Material (ASTM)

ASTM D3612-01 Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography

Canadian Standards association (CSA)

CAN/CSA-C88.1-F96 (C2011) - Traversées des transformateurs de puissance et des bobines d'inductance

Electrical and Electronic Manufacturers Association of Canada (EEMAC)

GL1-3, 1988 Power Transformers and Reactors Bushings

### **1.3 Domaine d'application**

D'une façon générale, ce document s'applique aux transformateurs de puissance, aux inductances shunt et aux inductances de mise à la terre (MALT). Ces appareils sont décrits respectivement dans les spécifications techniques SN-14.1, SN-14.4 d'Hydro-Québec ou dans une spécification technique particulière qui peut faire ou non l'objet d'un gel de spécification pour une durée déterminée.

La présente spécification technique ne s'applique pas aux transformateurs de distribution.

Les termes "transformateurs de puissance" désignent les transformateurs de postes de transport, les transformateurs de centrales et les transformateurs de services auxiliaires. Seuls les transformateurs de convertisseurs HTCC sont couverts par une spécification d'essais particulière.

### **1.4 Définitions**

Les définitions de la Publication 60076-1 de la CEI sont applicables, sauf la définition de la puissance assignée (référence article 3.4.6) qui doit être remplacée par la définition suivante:

Puissance assignée (Sr) : La puissance de sortie fournie en service continu ou pour une période donnée, à la tension nominale secondaire, à la charge nominale et à la fréquence nominale, sans dépasser les limites d'échauffement prescrites dans les conditions d'essais.

Les définitions de la Publication C57.12.90 de l'IEEE sont applicables car elles complètent celles des Publications CEI.

Les termes "nominal" et "assigné" sont synonymes.

Le mot "appareil" est utilisé dans le présent document comme terme générique signifiant les transformateurs de puissance, les inductances shunt et les inductances de malt.

## 1.5 Règles générales pour la réalisation des essais

Le fabricant doit fournir sur demande le certificat d'étalonnage pour tous les appareils de mesure utilisés au cours des essais mentionnés dans la présente spécification.

D'autre part, les représentants d'Hydro-Québec doivent avoir un accès complet et sans préavis au laboratoire d'essai durant toute la durée des essais sur les appareils appartenant à Hydro-Québec, incluant l'accès à l'aire d'essai et la salle de commande

### 1.5.1 Classification des essais

Les essais décrits dans la présente spécification sont classifiés selon les catégories suivantes: type, individuel et spécial.

Un essai de type est un essai réalisé sur la première unité d'une série d'appareils de construction identique, et qui vise à établir que la conception proposée par le fabricant rencontre les exigences de la spécification technique.

Un essai individuel est un essai qui est effectué systématiquement sur chaque appareil.

Un essai spécial est un essai qui est effectué seulement lorsque demandé explicitement par Hydro-Québec dans la spécification particulière. Il doit faire l'objet d'une entente entre Hydro-Québec et le fabricant.

### 1.5.2 Liste des essais et séquences d'essais

La liste des essais de type, individuels ou spéciaux exigés par Hydro-Québec est donnée au tableau 1.

Les essais à réaliser doivent être exécutés dans l'ordre suivant. Les premiers essais à réaliser sont ceux permettant l'alimentation de l'objet d'essai à des valeurs de tension ou de courant inférieures aux valeurs assignées (mesure de résistance, rapport de transformations, etc.). Ces essais doivent être suivis des mesures de pertes en charge dans le cas des transformateurs, des mesures d'impédance (homopolaire et de court-circuit), de l'échauffement à puissance nominale et, si requis, l'échauffement en surcharge.

Suite à ces essais, les essais diélectriques peuvent être effectués dans n'importe quel ordre. Par contre, l'essai en tension induite avec mesure des décharges partielles (si applicable) doit être le dernier des essais diélectriques.

La mesure de pertes à vide doit être réalisée après les essais diélectriques. Toutefois, l'essai de surexcitation à 110 % de la tension assignée peut être réalisé avant ou après la mesure des pertes à vide.

Pour des raisons de commodités d'essais, (principalement lorsque l'objet d'essai n'est pas soumis aux essais de type), les mesures des pertes en charge et des impédances peuvent être effectuées à la suite des essais de tension induite.

### 1.5.3 Programme d'essais

Un mois avant le début des essais, le fabricant doit fournir au représentant d'Hydro-Québec le programme d'essais complet comprenant les paramètres d'essais et les arrangements requis de l'appareil pour chacun des essais applicables pour les appareils d'une commande. Le programme d'essai doit être approuvé par Hydro-Québec. Dans le cas où le fabricant ne propose pas d'essais de type, celui-ci doit certifier que les appareils concernés sont identiques à un appareil ayant déjà subi les essais de type et il doit indiquer la date à laquelle ces essais ont été faits afin d'assurer que les périodes de validité sont respectées (tableau 2). Le fabricant doit également rendre disponible le rapport d'essais de type associé.

**Tableau 1 – Essais requis pour les transformateurs de puissance, les inductances de MALT et les inductances shunts**

Essais	Transformateurs de puissance et inductances de mise à la terre			Inductances Shunts		
	Type	Individuel	Spécial	Type	Individuel	Spécial
Essai d'échauffement (article 2.4)	X			X		
Mesure du bruit audible (article 2.8)	X				X	
Tenue au courant de court-circuit (article 4.1)			X			
Qualification parasismique (par calcul, article 2.10)	X			X		
Mesure des impédances homopolaires (article 2.7)	X					
Mesure des perturbations radioélectriques externes (article 4.3)			X			X
Essai d'échauffement en surcharge (si applicable, article 2.5)	X					
Essai de tenue aux chocs de foudre (article 3.3)		X			X	
Essai de tenue aux chocs de foudre avec ondes coupées (article 2.2)	X	X <sup>Note 1</sup>		X	X <sup>Note 1</sup>	
Essai de tenue aux chocs de foudre sur les bornes de neutre (article 2.3)	X			X		
Essai de tenue aux chocs de foudre avec parafoudres sur les bornes de ligne (article 4.4)			X			
Essai de tenue aux chocs de manœuvre (si applicable, article 3.4)		X <sup>Note 2,3</sup>			X <sup>Note 2,3</sup>	
Essai par tension appliquée à fréquence industrielle (article 3.5)		X			X	
Mesure du rapport de transformation (article 3.10)		X				
Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire (article 3.9)		X				
Résistance des enroulements (article 3.2)		X			X	
Mesure des pertes à vide et du courant à vide (courant à vide, articles 3.11 et 3.12)		X				
Mesure des pertes en charge et de l'impédance de court-circuit (articles 3.13 et 3.15)		X				
Mesure de l'impédance homopolaire des inductances de MALT (article 3.14)		X				
Mesure des pertes des ventilateurs et des pompes (si applicables, article 3.16)		X				
Mesure de l'impédance (linéarité) et des pertes des inductances shunt (article 3.20)					X	
Essai en tension induite (article 3.18)		X				
Essai en tension appliquée sur les inductances de MALT et inductance shunt (article 3.21)		X			X	

**Tableau 1 – Essais requis pour les transformateurs de puissance, les inductances de MALT et les inductances shunts (suite)**

Essais	Transformateurs de puissance et inductances de mise à la terre			Inductances Shunts		
	Type	Individuel	Spécial	Type	Individuel	Spécial
Essais d'opération du changeur de prises en charge (article 3.17)		X				
Essai de surexcitation à 110 % de la tension nominale (article 2.9)	X					
Vérification de l'étanchéité de la cuve et des radiateurs (article 3.6)		X			X	
Mesure de la réponse en fréquence (FRA, article 3.9)		X			X	
Essai de mesure du facteur de puissance de l'isolation (article 3.19)		X			X	
Essai d'isolement du noyau (article 3.7)		X			X	
Vérification des accessoires et composants		X			X	

Note 1: S'applique aux appareils 735 kV, aux autotransformateurs 330 kV comportant un changeur de prises et aux transformateurs de puissance raccordés directement à l'appareillage blindé isolé au SF<sub>6</sub>.

Note 2: Pour les appareils triphasés dont la classe de tension est égale ou supérieure à 285 kV, la tenue de l'isolation entre phases doit être vérifiée par des essais.

Note 3: Sur le premier transformateur d'une commande, la polarité de la surtension de manœuvre appliquée doit être de polarité positive (voir 3.4)

### 1.5.4 Avis d'essais

Le fabricant doit aviser Hydro-Québec lorsqu'il est prêt à effectuer les essais sur un appareil. Les fabricants étrangers (hors Canada) doivent donner un préavis de deux semaines, tandis qu'un préavis d'une semaine est suffisant pour les fabricants canadiens. Si le fabricant néglige de donner le préavis susmentionné, Hydro-Québec pourra exiger que les essais soient repris en présence d'un de ses représentants.

### 1.5.5 Rapport d'essais

Le fabricant doit faire parvenir au responsable de la qualité concerné d'Hydro-Québec un exemplaire du rapport d'essais au cours du mois qui suit la fin des essais. Une version électronique (format .pdf) du rapport d'essais doit également être fournie.

Le rapport d'essais doit inclure les informations suivantes:

- a) Informations générales:
  - Numéro de commande d'Hydro-Québec;
  - Destination de l'appareil;
  - Type d'appareil essayé;
  - Type d'essais (individuels, de type ou spéciaux);

- Dans le cas de rapport d'essais individuels sur les appareils, le fabricant doit indiquer le numéro de série de l'appareil sur lequel les essais de type ont été effectués;
  - Liste des essais réalisés;
  - Date des essais;
  - Personnes témoignant des essais.
- b) Informations sur l'objet d'essai:
- Fabricant;
  - Année de fabrication;
  - Numéro de série;
  - Modèle;
  - Caractéristiques assignées de chaque enroulement: puissance, courant, tension etc.;
  - Nombre de phases;
  - Type de connexions (Y,  $\Delta$ , etc.);
  - Type de refroidissement;
  - Impédance de court-circuit en % (en indiquant la base en MVA);
  - Changeur de prises: type, modèle, caractéristiques électriques et le numéro de série;
  - Traversées: type, modèle, caractéristiques électriques et numéro de série;
  - Transformateurs de courant: type, modèle, caractéristiques électriques et numéro de série;
  - Plaque signalétique;
  - Liste complète des numéros de dessins permettant d'identifier sans ambiguïté l'appareil essayé.
- c) Informations relatives aux conditions et paramètres d'essais:
- Schéma du circuit d'essai utilisé comprenant les détails des composants utilisés (ex: paramètres du générateur de chocs);
  - Descriptions des diviseurs de tension, transformateurs de mesure, shunts de mesure de courant etc.;
  - Liste des instruments de mesure utilisés;
  - Arrangement de l'objet d'essai (présence des accessoires etc.);
  - Enroulements essayés, et le raccordement des bornes non soumises à l'essai;
  - Position du changeur de prises;
  - Mode de refroidissement (si applicable);
  - Conditions atmosphériques;
  - Paramètres d'essais (formes d'ondes, fréquence de la tension d'essais, température, tension appliquée, courant d'essais, etc.);
  - Relevé de toutes les mesures effectuées <sup>Note 1</sup> au cours des essais incluant tous les oscillogrammes concernant les essais de chocs <sup>Note 2</sup>.
- Note 1: Dans le cas des essais d'échauffement à la puissance nominale et en surcharge, ceci inclut le positionnement des fibres optiques et thermocouples, toutes les mesures de températures et toutes les mesures de résistances en fonction du temps, mesurées après la coupure de l'alimentation. Les échauffements et les températures de l'huile et des points chauds des différents enroulements doivent être clairement indiqués.
- Note 2: Tous les oscillogrammes dont la tension excède 50% de la tension assignée de choc de l'enroulement.
- d) Informations relatives à l'analyse des gaz dissous durant la série d'essais:
- L'analyse des gaz dissous avant et après les essais diélectriques;
  - L'analyse des gaz dissous avant et après les essais de surexcitation;
  - L'analyse des gaz dissous avant, pendant et après l'essai d'échauffement et de surcharge;



- Les résultats d'analyse doivent être présentés sous forme de tableau indiquant la concentration des différents gaz dissous en ppm. Afin de permettre un suivi de l'évolution en cours d'essais, l'heure, la date ainsi que l'endroit du prélèvement doivent être indiqués chronologiquement dans le tableau. Les fiches de résultats du laboratoire doivent être jointes en annexe.

### 1.5.6 Période de validité des essais de type

Lorsqu'ils sont acceptés, les essais de type demeurent valables pendant la période indiquée au tableau 2, à condition que la conception des appareils et les spécifications techniques d'Hydro-Québec demeurent inchangées. Dans le cas de gels de conception qui répondent aux gels de spécification, les essais de type demeurent valables pour la durée spécifiée à moins d'une demande spécifique d'Hydro-Québec de reprendre l'ensemble ou une partie du programme d'essais de type.

Les essais de type sont valables pour la période indiquée ci-après:

**Tableau 2 – Période de validité des essais de type**

Description	Période de validité
Tous les essais de type (sauf échauffement en surcharge lorsqu'applicable) des transformateurs de puissance, des transformateurs de services auxiliaires, des inductances shunt (sauf dans le cas de gel de conception)	2 ans
Tous les essais de type des inductances de MALT	5 ans
Essai d'échauffement en surcharge (si applicable)	8 ans
Essais de type des transformateurs de courant	10 ans
Essais de type des changeurs de prise en charge	10 ans
Essais de type des traversées	10 ans

### 1.5.7 Prescriptions concernant la reprise des essais en cas de défaut

Le fabricant doit faire parvenir, dans les meilleurs délais suivant un défaut dans un appareil, un rapport "d'analyse de faute" au responsable de la qualité d'Hydro-Québec concerné. Le fabricant doit informer Hydro-Québec (quotidiennement si nécessaire) de l'évolution de cette analyse, par exemple, la nature du défaut et les causes possibles, tout en indiquant les correctifs à apporter. Ce rapport doit indiquer la liste des essais à reprendre ainsi que le retard de la livraison occasionné par le défaut.

Tout défaut nécessitant le décuvage ou la vidange partielle ou complète du liquide isolant ainsi qu'une inspection de l'intérieur de la cuve entraîne automatiquement la reprise de l'essai interrompu ou, à tout le moins, la reprise de l'essai par tension induite avec mesures de décharges partielles, pour toute classe d'isolation égale ou supérieure à 72,5 kV.

Hydro-Québec se réserve le droit d'exiger une inspection minutieuse à l'intérieur de l'appareil à la fin de tous les essais même si lesdits essais se sont révélés satisfaisants. À la suite de cette inspection faite en présence de son représentant, Hydro-Québec pourra exiger la reprise de l'essai en tension induite, qu'un défaut ait été détecté ou non.

Dans le cas de défauts répétés sur une ou plusieurs unités d'une même conception, les représentants d'Hydro-Québec doivent avoir accès aux ateliers du fabricant, à tous les dessins, à tous les résultats des calculs exécutés, aux résultats des études effectuées sur modèle, à tous les renseignements touchant la conception des appareils et à toute autre information pertinente qui pourrait servir à orienter l'action d'Hydro-Québec. Il est entendu que ces informations seront traitées de façon confidentielle et ne sortiront pas des ateliers du fabricant.

#### **1.5.7.1 Défaut diélectrique**

Une décharge disruptive interne lors des essais diélectriques d'un appareil à n'importe quel moment des essais entraîne automatiquement la reprise complète de tous les essais diélectriques.

Un dépassement du niveau garanti de décharges partielles lors de l'essai de tension induite nécessite une détection pour localiser la ou les sources des décharges. S'il s'agit d'un problème mineur nécessitant une réparation pouvant être effectuée sans un retour à l'usine ou sans décuvage, la reprise de l'essai d'induit serait suffisante. Dans les autres cas, la reprise de tous les essais diélectriques est requise.

Toutes fautes lors des essais diélectriques, même si les essais subséquents n'ont pas produits de défaillance, doit être pleinement investiguées et l'endroit de la faute doit être clairement identifiée et l'isolation impliquée doit être remplacée. Ceci peut nécessiter un décuvage et un démantèlement d'un ou plusieurs enroulements.

#### **1.5.7.2 Défaut à l'essai d'échauffement ou durant l'essai en surcharge**

Lorsque les performances attendues ne sont pas rencontrées, soit par un dépassement des échauffements ou par la production de gaz dépassant les limites acceptables, une modification de conception doit être apportée.

Les essais d'échauffement, incluant l'essai d'échauffement en surcharge, si applicable, doivent être repris.

#### **1.5.7.3 Défaut à l'essai de tenue au courant de court-circuit**

Si les critères de réussite définis à l'article 4.2.3 ne sont rencontrés, le transformateur devra être modifié et l'essai repris.

#### **1.5.7.4 Caractéristique hors tolérance (pertes, impédance et bruit audible)**

Certains essais servent à vérifier que l'appareil essayé rencontre des valeurs garanties. Dans le cas de mesure des pertes, des pénalités sont applicables lorsque les valeurs mesurées dépassent les valeurs garanties. Pour les impédances de court-circuit, toutes dérogations aux valeurs attendues seront sujettes à négociation.

Lorsque le niveau de bruit audible mesuré dépasse la valeur garantie, le fabricant doit modifier son appareil afin de le rendre conforme. La solution proposée pour réduire le niveau de bruit audible doit être préalablement acceptée par Hydro-Québec. Suite à ces modifications, l'essai de mesure du bruit audible doit être entièrement repris afin de vérifier l'efficacité des mesures correctives apportées.

### **1.5.8 Reprises d'essai suite à une réparation d'un appareil**

Lorsqu'un appareil subit des dommages en service et doit être réparé, on doit convenir d'un programme d'essai permettant de s'assurer de la viabilité de l'appareil avant sa remise en service.

Le programme d'essai dépend principalement de l'envergure des réparations à effectuer. L'annexe B fournit un guide relatif aux essais à réaliser suite à une réparation.

## **2. Essais de type sur les appareils**

### **2.1 Généralités**

La liste des essais de type exigés par Hydro-Québec est donnée au tableau no 1. Les essais doivent être réalisés à une température ambiante comprise entre +10 °C et +40 °C. Les appareils soumis aux essais doivent être munis de tous les accessoires (incluant les boîtiers des tertiaires, si applicable) pouvant influencer les résultats d'essais. Les appareils doivent être munis des traversées prévues dans la fourniture.

Cependant, pour les transformateurs prévus pour un raccordement direct à des barres blindées isolées au SF<sub>6</sub>, des traversées d'essais huile-air peuvent être utilisées en remplacement des traversées prévues pour le service. Dans ce cas, le fabricant devra démontrer (par exemple avec des études de champ électrique) que ces traversées ne favorisent pas la tenue du transformateur lors des essais.

### **2.2 Essais de tenue aux chocs de foudre avec ondes coupées**

#### **2.2.1 Généralités**

Ces essais s'appliquent à tous les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, inductances de MALT et inductances shunt. Les essais de type de tenue aux chocs de foudre avec ondes coupées doivent être également réalisés sur les enroulements tertiaires incluant ceux qui sont enfouis. Dans ce dernier cas, des traversées d'essais temporaires doivent être ajoutées afin de soumettre ces enroulements aux différents essais et la tension de tenue aux chocs de foudre doit être déterminée en fonction de la tension nominale de cet enroulement.

#### **2.2.2 Arrangement pour essais**

Durant ces essais le transformateur doit être assemblé comme en service. L'assemblage exclut l'installation de traversées SF<sub>6</sub> et une partie quelconque du jeu de barres blindées, si applicable.

La borne neutre de l'enroulement essayé doit être solidement mise à la terre à travers une impédance de très faible valeur (shunt) pour la mesure du courant d'essais.

Les bornes de ligne non soumises à l'essai, incluant le cas des autotransformateurs, doivent être reliées solidement à la terre ou reliées à la terre à travers une résistance de très faible valeur pour la mesure du courant d'essais.

Lorsque l'impédance résultante sur l'enroulement essayé est faible, il peut s'avérer difficile d'obtenir une durée "t<sub>2</sub>" (correspondant à 50 % de la valeur crête) qui rencontre les tolérances prescrites (e.g. 40 à 60 µs). Pour ces cas, le fabricant doit prendre toutes les dispositions nécessaires pour utiliser le générateur de chocs dans une configuration optimale, c'est-à-dire en utilisant le plus grand nombre d'étages en parallèle. Une durée "t<sub>2</sub>" inférieure aux prescriptions peut être acceptable si l'énergie disponible emmagasinée dans les condensateurs du générateur lors de l'essai de chocs est égale ou supérieure aux valeurs indiquées au tableau 3.

**Tableau 3 – Énergie emmagasinée dans les condensateurs du générateur de chocs I**

Catégorie	Puissance assignée pour les transformateurs		Énergie minimale emmagasinée dans le générateur de chocs lors des essais <sup>1, 2, 3</sup>
	Monophasés (kVA)	Triphasés (kVA)	Énergie (kJ)
I	5 à 500	15 à 1 500	N/A
II	501 à 3333	1 501 à 10 000	N/A
III	3334 à 10 000	10 001 à 30 000	15
IV a	10 001 à 40 000	30 001 à 120 000	15
IV b	40 001 à 160 000	120 001 à 480 000	50
IV c	> 160 000	> 480 000	62,5

Notes:

1- S'applique seulement si la durée " $t_2$ " est inférieure à la tolérance minimale prescrite (40  $\mu$ s).

2- Si la durée " $t_2$ " rencontre les tolérances prescrites (40  $\mu$ s à 60  $\mu$ s), aucune restriction n'est exigée quant à la configuration du générateur de chocs durant les essais.

3- Pour les enroulements dont la tension assignée de tenue aux chocs de foudre est inférieure à 95 kV, une capacité minimale du générateur de chocs égale ou supérieure à 4,0  $\mu$ F peut être utilisée sans imposer le niveau d'énergie minimum spécifié au tableau 3.

Le fabricant doit aviser Hydro-Québec, lors de son offre, s'il prévoit que les formes d'ondes lors des essais de tenues aux chocs de foudre ne rencontrent pas les tolérances prescrites.

Si les niveaux d'énergie minimale emmagasinée dans le générateur de chocs, tel que spécifiés dans le tableau 3, sont rencontrés et que la durée " $t_2$ " demeure sous la tolérance prescrite, les bornes des enroulements non soumis à la tension de chocs doivent être reliées à la terre par des résistances non inductives sans dépasser les valeurs indiquées au tableau 4. Le fabricant doit aviser Hydro-Québec, lors de son offre ou lors de la revue de conception, s'il prévoit utiliser des résistances sur les bornes non essayées. Si des résistances sont nécessaires lors des essais, elles doivent être réduites à la valeur minimale permettant de rencontrer la durée " $t_2$ " minimale requise soit 40  $\mu$ s. De plus, on doit s'assurer que la tension qui apparaît sur les bornes non essayées ne dépasse pas 80 % de leur tension de tenue aux chocs de foudre.

**Tableau 4 – Valeurs des résistances non inductives**

Tension assignée de l'enroulement	Résistance
(kV efficace)	( $\Omega$ )
$\leq 330$	$\leq 450$
765	$\leq 300$
Enroulement relié à un jeu de barres blindées	$\leq 75$
Enroulement relié à des câbles	$\leq 30$

En dernier recours et sujet à l'approbation d'Hydro-Québec, pour les enroulements de très faible impédance, il peut être requis d'ajouter une résistance en série avec la mise à la terre de l'enroulement essayé pour obtenir une durée " $t_2$ " s'approchant de la valeur spécifiée. Cependant, cette action peut réduire les contraintes entre spires de l'enroulement. La valeur de la résistance doit donc être la plus faible possible afin de limiter cette réduction de contraintes. Le fabricant doit aviser Hydro-Québec de l'utilisation de résistances lors de son offre ou lors de la revue de conception. Hydro-Québec privilégie plutôt l'utilisation de résistances sur les bornes des enroulements non soumis aux impulsions.

Lorsque les essais sont réalisés sur des enroulements comportant un changeur de prises en charge, les deux prises extrêmes et la prise médiane (pour un transformateur avec changeur de prises avec inversion de polarité) ou la prise principale (pour les transformateurs avec changeur de prises de type grossier/fin) d'un transformateur triphasé doivent être utilisées. L'essai doit être réalisé sur une prise différente pour chacune des trois phases d'un transformateur triphasé ou pour chacun des trois transformateurs monophasés constitutifs d'un banc triphasé. Dans le cas d'essai sur un seul transformateur monophasé d'un banc triphasé (par exemple: réparation), l'essai doit être réalisé à la prise donnant le nombre minimal de tours effectifs.

Note - Il est recommandé d'installer des capteurs ultrasoniques sur la cuve pendant les essais de chocs.

### 2.2.3 Tension d'essais

La valeur crête de la tension pour les essais de tenue aux chocs plein et celle pour les essais avec une onde coupée doivent être égales aux tensions de tenue aux chocs de foudre précisées dans la spécification technique normalisée (SN-14.1) ou dans la spécification particulière.

La valeur crête de l'onde pleine réduite doit se situer entre 50 % et 70 % de celle de l'onde pleine, tandis que la valeur crête de l'onde coupée réduite doit se situer entre 50 % et 80 % de celle de l'onde pleine coupée. Il n'est pas obligatoire d'appliquer des ondes coupées réduites.

Note: La tolérance sur la valeur crête est celle spécifiée à la norme CEI 60060-1 ( $\pm 3$  %). Toutefois, si la valeur obtenue lors d'un choc est différente de la valeur spécifiée, mais à l'intérieur des tolérances prescrites, la tension du générateur de chocs doit être réajustée de façon à obtenir la valeur spécifiée pour les essais subséquents.

### 2.2.4 Forme d'onde

La forme de l'onde de foudre pleine doit être de  $1,2 \mu\text{s}$  ( $\pm 30$  %) X  $50 \mu\text{s}$  ( $\pm 20$  %). Les ondes appliquées doivent être de polarité négative.

Pour les enroulements de forte capacité parasite et de faible tension (exemple: enroulement tertiaire), le temps de front " $t_1$ " obtenu en laboratoire peut difficilement rencontrer la valeur normalisée (1,2  $\mu$ s). Dans un tel cas, le laboratoire doit démontrer que le temps de front obtenu est uniquement attribuable à l'objet d'essai et non relié au réglage du circuit d'essais. Des temps de front supérieurs à 1,56  $\mu$ s peuvent être acceptables s'il est démontré que la résistance de front du générateur de chocs est minimale et que des dépassements de tension importants sont générés avec l'utilisation de résistances de front de valeurs plus faibles. Pour ce type d'enroulement, l'acceptation de la forme d'onde (temps de front vs dépassement) est sujette à l'approbation du représentant d'Hydro-Québec.

Dans tous les cas, il convient de vérifier le dépassement de tension ainsi que l'amplitude de la tension en polarité inverse de la forme d'onde obtenue en essai. Le temps de front de l'onde de foudre doit être le plus près possible de la valeur normalisée (1,2 $\mu$ s) tout en limitant le dépassement de tension à +10 %.

Note: Pour certains types d'enroulements, il n'est pas possible de limiter le dépassement sous les 10% demandé. Dans ces cas, les éléments du générateur de chocs doivent être optimisés et la configuration qui a montré le dépassement le plus faible doit être utilisée pour les essais. Dans ces cas, le fabricant doit montrer que l'optimisation des éléments du générateur de chocs a été effectuée.

Pour les ondes coupées, la durée jusqu'à la coupure doit être comprise entre 3 et 5  $\mu$ s. La durée conventionnelle de la chute de tension pendant la coupure doit être la plus courte possible. Pour obtenir un temps de coupure rapide, l'éclateur doit être positionné le plus près possible de la borne essayée. L'éclateur doit être situé à une distance inférieure à la hauteur du transformateur en essai, de la borne essayée. Le fabricant doit préférentiellement utiliser des éclateurs à sphères avec temps de coupure contrôlé. Si l'utilisation d'un tel éclateur conduit à des oscillations inverses supérieures à 30 %, des éclateurs de type tige-tige peuvent être utilisés en alternative.

Le laboratoire ne doit pas réduire de façon artificielle le dépassement en polarité inverse à une valeur inférieure à 30%, par exemple en ajoutant une résistance en série avec l'éclateur. La seule alternative acceptable pour Hydro-Québec est l'utilisation d'un éclateur tige-tige. Si le dépassement excède 30% et ce même avec des éclateurs de type tige-tige, alors le dépassement inverse résultant doit être utilisé lors des essais.

### 2.2.5 Séquence d'essais

Les essais de tenue aux chocs de foudre consistent à appliquer à chacune des bornes les ondes de choc suivantes:

- une ou plusieurs ondes pleines réduites
- une onde pleine
- une ou deux ondes coupées réduites (non obligatoires)
- deux ondes coupées
- deux ondes pleines

La première onde pleine doit suivre le plus tôt possible la 2<sup>e</sup> onde coupée à l'intérieur d'un délai maximal de 10 minutes.

Dans le cas de transformateur équipé de dispositifs internes de limitation de la tension (varistances aux bornes d'une ou de plusieurs bobines ou aux bornes d'une partie d'une ou de plusieurs bobines), la séquence d'essais suivante s'applique:

- une onde pleine réduite à 60 %;
- une onde pleine réduite à 75 % <sup>note 2</sup>;
- une onde pleine réduite à 90 %;
- une onde pleine à 100%;
- deux ondes coupées à 110 %;
- deux ondes pleines à 100 %;
- une onde pleine réduite à 90 %;
- une onde pleine réduite à 75 % <sup>note 2</sup>;
- une onde pleine réduite à 60 %.

Note 1: Les valeurs des ondes pleines réduites indiquées sont approximatives et peuvent varier de  $\pm 5$  %.

Note 2: L'essai avec onde pleine réduite à 75 % du niveau assigné est requis seulement si la conduction des dispositifs de limitation de tension est prévue.

Les valeurs exprimées signifient le pourcentage du niveau de tension assignée aux chocs de foudre.

Cette séquence particulière est requise pour démontrer que les différences observées sur les oscillogrammes entre les ondes de chocs réduites et pleines sont causées uniquement par la conduction des dispositifs de limitation de tension.

### 2.2.6 Système de mesure

Les oscillogrammes de tension et de courant doivent être enregistrés à l'aide d'un système numérique d'acquisition et de traitement satisfaisant aux prescriptions de la norme CEI 61083-1.

Les formes d'ondes doivent être enregistrées et illustrées dans le rapport d'essais avec les temps de balayage suivants:

Note: Toutes les ondes dont la tension excède 50% de la tension assignée de choc de l'enroulement doivent être enregistrées et incluses dans le rapport d'essais.

**Tableau 5 – Temps de balayage**

Forme d'onde	Oscillogramme de tension	Oscillogramme de courant de neutre
Onde pleine et réduite	50 à 100 $\mu$ s	100 à 600 $\mu$ s
Onde coupée	5 à 10 $\mu$ s	10 à 50 $\mu$ s

### 2.2.7 Critères de réussite des essais

La comparaison de tous les oscillogrammes de tension et de courant enregistrés lors des chocs avec ondes pleines et ondes réduites ne doit présenter aucune différence.

Toute divergence entre les formes d'ondes enregistrées est sujette à investigation. En cas de doute quant à l'interprétation des résultats, la séquence d'essais doit être reprise. Une modification des éléments du circuit d'essais peut être réalisée afin de s'assurer que cette divergence ne provienne pas d'un composant défectueux du circuit d'essais. Les essais doivent être considérés comme acceptables en autant que le critère énoncé ci-haut soit rencontré lors de la reprise de la séquence d'essais.

Tout bruit anormal observé lors d'un essai et qui a résulté en une différence sur les oscillogrammes de tension et/ou de courant doit être considéré comme une défaillance du transformateur en essai et ce même s'il n'a pas été possible de répéter ce phénomène par l'application de chocs de foudre supplémentaires. Dans ce cas, la partie active doit être soigneusement inspectée afin de localiser le défaut observé et apporter les correctifs nécessaires. Par la suite, la totalité des essais diélectriques doivent être repris.

## 2.3 Essais de tenue aux chocs de foudre sur les bornes de neutre

Les impulsions de foudre sur le neutre peuvent être soit :

- réalisées par application indirecte sur la borne de ligne (méthode préférentielle) ou en alternative;
- appliquées directement à la borne de neutre.

Pour les essais avec application indirecte des chocs, les impulsions de foudre de forme d'onde normalisée ( $1,2 \times 50 \mu s$ ) doivent être appliquées sur l'une des bornes de ligne ou sur toutes les bornes de ligne d'un enroulement triphasé reliées ensemble. La borne neutre doit être mise à la terre à travers une résistance. La tension mesurée à la borne neutre (lorsqu'une impulsion est appliquée sur la borne de ligne), doit être égale à la tension de tenue assignée au choc de foudre sur le neutre définie à la spécification technique normalisée (SN 14.1) ou dans la spécification technique particulière. La tension appliquée sur la ou les bornes de ligne ne doit pas dépasser 75 % de la tension de tenue assignée au choc de foudre de cette borne. La forme d'onde résultante obtenue sur la borne neutre n'est pas spécifiée et doit être acceptée telle quelle.

Pour les essais avec application directe, il s'agit d'appliquer les impulsions sur la borne neutre en ayant toutes les autres bornes mises à la terre. La forme d'onde requise est la forme normalisée ( $1,2 \mu s \times 50 \mu s$ ) mais avec une durée de front pouvant varier de 0,84 à 10  $\mu s$ .

Quel que soit la méthode d'essais utilisée, la séquence d'essais doit être :

- une onde pleine réduite;
- trois ondes pleines.

## 2.4 Essai d'échauffement à la puissance nominale

L'essai d'échauffement sur les transformateurs doit être effectué selon les prescriptions de la norme C57.12.90 de l'IEEE. Pour les inductances shunt, l'essai doit être effectué selon les prescriptions de la norme IEEE C57.21. Pour les inductances de MALT, l'essai doit être effectué pour le mode homopolaire assigné. Cet essai doit être précédé et suivi de la prise d'échantillons d'huile. La méthode de prise des échantillons ainsi que les critères d'acceptation des gaz dissous sont indiqués à la section 2.6.



### 2.4.1 Préparation de l'appareil essayé

Cet essai doit être effectué sur un appareil muni de son système de refroidissement complet ainsi que de ses accessoires de surveillance (moniteurs de température, relais de gaz, unité de surveillance des gaz dissous). Ces accessoires de surveillance doivent être fonctionnels durant l'essai et leur fonctionnement vérifié. Lorsqu'un fabricant garantit plus d'une puissance assignée selon des modes de refroidissement différents (ONAN, ONAF, etc.), l'essai doit être fait pour le mode de refroidissement correspondant à la puissance maximale garantie. Hydro-Québec se réserve toutefois le droit d'exiger de réaliser un essai d'échauffement à la puissance définie en refroidissement naturel (ONAN). Si un tel essai est requis, il doit être signifié au fabricant au moment de la revue de conception.

Le niveau d'huile du conservateur doit être ajusté au niveau nominal spécifié par le fabricant.

Une mesure à froid de la résistance c.c. de chaque enroulement doit être prise avant l'essai. La température de mesure est celle correspondant à la température moyenne de l'huile. Le temps de charge des enroulements doit être évalué afin de déterminer le moment où les mesures des résistances à chaud à la fin de l'échauffement sont valides.

Un transformateur de puissance doit être essayé dans la combinaison de connexions et de prises qui produit la température d'enroulement la plus élevée. Cette condition est généralement rencontrée pour la combinaison de connexions et de prise(s) ayant les pertes en charge les plus élevées. A cet effet, on doit procéder à la mesure des pertes en charge avant l'essai selon les prescriptions du paragraphe 3.15. Les pertes en charge au courant nominal mesurées ( $P_c$ ) doivent être corrigées pour une température de référence de +75 °C. Les pertes générées durant la partie à pertes constantes de l'essai d'échauffement doivent correspondre aux pertes totales ( $P_T$ ).

$$P_T = P_{c +75\text{ °C}} + P_o$$

Où

$P_T$ : Pertes totales produites durant l'essai d'échauffement;

$P_{c +75\text{ °C}}$ : Pertes en charge mesurées et corrigées pour une température de 75 °C;

$P_o$ : Pertes à vide calculées par le fabricant (voir Note 1).

Note 1: Hydro-Québec exige à la clause 1.5.2 de réaliser l'essai d'échauffement avant la mesure des pertes à vide. Afin de ne pas effectuer cette mesure deux fois, les pertes à vide calculées par le fabricant devront être utilisées dans le calcul des pertes totales à appliquer. Les échauffements de l'huile et des enroulements devront être, par la suite, corrigés (si requis) en fonction de la valeur réelle mesurée des pertes à vide..

Note 2: Étant donné que les pertes à vide ne représentent qu'un faible pourcentage des pertes totales et que la mesure des pertes à vide n'est prévue qu'à la fin des essais, on utilisera les pertes à vide garanties par le manufacturier pour le calcul des pertes totales à générer lors de l'essai d'échauffement.

Pour les inductances shunt, l'essai doit être effectué en appliquant 105% de la tension assignée.

De façon générale, pour les transformateurs de puissances assignées supérieures à 10 MVA (puissance équivalente triphasée), deux sondes de température par fibres optiques doivent être installées sur chacun des enroulements primaire et secondaire. Pour les transformateurs triphasés il est suffisant d'installer ces sondes sur la jambe centrale et sur une des jambes extérieures. Le nombre et la position des sondes à fibres optiques devra faire l'objet d'une entente lors de la revue de conception.

Pour les inductances de MALT et les transformateurs de puissance de puissances assignées de 10 MVA et

moins, l'installation de sondes à fibres optiques n'est généralement pas requise et dans le cas contraire, devra faire l'objet d'une entente particulière.

Des thermocouples ou des sondes à fibres optiques doivent être installés à l'intérieur de la cuve pour la mesure de la température des points chauds sur les pièces métalliques qui sont ou non en contacts avec l'isolation solide (presses-culasses, plaques de retenue, écran de la cuve, barres de traction, etc.). Ceux-ci doivent être installés par le fabricant avant le début des essais d'échauffement. La position des thermocouples ou des sondes devra faire l'objet d'une entente lors de la revue de conception.

#### 2.4.2 Paramètres à mesurer durant l'essai

Les mesures suivantes doivent être prises durant l'essai:

- Température ambiante déterminée à partir de la mesure de 3 thermocouples placés chacun dans un récipient contenant ½ à 1,0 litre d'huile et positionné selon les modalités décrites à l'article 5.1.1 de la CEI 60076-2;
- Température de l'huile à l'entrée et à la sortie des conduites alimentant les radiateurs. Trois points de mesure en haut et trois points de mesure en bas doivent être utilisés pour obtenir une évaluation plus précise (si applicable);
- Température de l'huile au sommet de la cuve mesurée à l'aide d'au moins un thermocouple immergé approximativement à 50 mm sous la surface de l'huile;
- Température moyenne de l'huile (par calcul, selon les températures mesurées à l'entrée et à la sortie des conduites d'alimentation des radiateurs);
- Températures des points chauds des enroulements par fibres optiques;
- Températures des presses-culasses et barres de traction lorsque pourvus de thermocouples ou de sondes à fibres optiques et spécifiquement demandé par Hydro-Québec;
- Courant dans les enroulements;
- Pertes en kilowatts.

#### 2.4.3 Déroulement de l'essai

a) Transformateurs de puissance et de services auxiliaires:

Le transformateur de puissance est alimenté avec un courant d'essai produisant les pertes totales calculées (essai à pertes constantes) jusqu'à la stabilité de la température c'est-à-dire, jusqu'à ce que les échauffements de l'huile au sommet de la cuve et de la température de l'huile moyenne rencontrent le plus sévère des 2 critères suivants:

- Variation de l'échauffement de moins de 1 °C sur une période de 3 heures consécutives.
- Variation de l'échauffement de moins de 2,5 % pour une période de 3 heures consécutives.

Note: Il est permis d'alimenter en surcharge ou de réduire l'efficacité du système de refroidissement pendant un certain temps pour atteindre la stabilité plus rapidement.

Après la période de stabilité à pertes constantes, le courant d'essai est abaissé au courant nominal pour au moins une heure. Durant cette période à courant constant, on doit balayer toutes les surfaces de la cuve avec une caméra infrarouge incluant les tourelles des traversées, pour déterminer la température du point le plus chaud de la cuve.

À la fin de la période d'une heure, on procède à la coupure du circuit d'alimentation et à la mesure des résistances des enroulements à chaud pour déterminer la température moyenne des enroulements au moment de la coupure ( $\theta_w$ ) et la courbe de refroidissement de l'enroulement. Le système de refroidissement (pompes et ventilateurs, si applicable) ne doit pas être en opération durant la mesure des résistances.

Une source à courant continu doit être utilisée pour alimenter l'enroulement. La méthode des 4 fils doit être utilisée pour la mesure des résistances c.c. La valeur du courant c.c. injecté pour la mesure des résistances doit être considérablement inférieure à la valeur du courant nominal de l'enroulement mesuré ( $\leq 15\% I_n$ ). Le temps de charge de l'enroulement devrait généralement être inférieur à 90 secondes. S'il est supérieur, une source c.c. de tension augmentée avec une résistance série doit être utilisée de façon à réduire le temps de charge de l'enroulement.

La mesure des résistances des enroulements doit être prise le plus rapidement possible après la coupure de l'alimentation. La première mesure doit être effectuée au plus tard 4 minutes suivant l'interruption du courant. Les mesures doivent être enregistrées à intervalle d'environ 15 secondes pour une période totale de 10 minutes.

Note- Lors de la mesure des résistances, il est possible qu'un enroulement prenne quelque temps à se charger, ce qui peut conduire à des mesures erronées. Ces dernières doivent être ignorées. Afin d'éviter des mesures incohérentes on doit laisser le temps requis à l'enroulement pour se charger entièrement. Le délai requis peut être évalué lors de la mesure de la résistance à froid effectuée avant l'essai d'échauffement.

La courbe de variation de la résistance en fonction du temps est ensuite tracée et la résistance à chaud, au moment de la coupure, doit être déterminée par régression. La régression doit être logarithmique et doit satisfaire les exigences de la CEI 60076-2.

Dans le cas des transformateurs de puissance triphasés, les températures de tous les enroulements, sur les trois phases, doivent être déterminées à partir de la méthode de mesure de la résistance à chaud.

Advenant que les résistances c.c. à chaud de tous les enroulements ne puissent être mesurées simultanément après la coupure du courant, il est permis, une fois la première série de mesures complétée, de reprendre l'essai à courant constant pendant au moins 1 heure. Une deuxième série de mesures des résistances c.c. à chaud des enroulements restants peut être effectuée et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des résistances c.c. à chaud de tous les enroulements aient été mesurées.

Dans le cas de transformateurs n'ayant pas de cycle de surcharge assigné (par exemple pour les transformateurs de centrales, les transformateurs de compensateurs statiques, etc...), la période d'essai à pertes constantes doit être prolongée pour une durée totale de 24 heures suivie d'une période d'une heure à courant nominal. Cette méthode est utilisée dans le but d'augmenter la sensibilité de l'analyse des gaz dissous dans l'huile.

## b) Inductances de MALT:

Pour la fonction inductance de MALT, l'inductance de MALT doit être alimentée avec un courant d'essai monophasé circulant en mode homopolaire entre les trois phases mises en parallèle et la borne neutre. Le courant d'essai doit produire les pertes totales calculées (pertes mesurées pour le courant homopolaire spécifié + pertes à vide + pertes des enroulements primaires et secondaires pour alimentation de services auxiliaires, si applicable) jusqu'à la stabilité de la température c'est-à-dire, jusqu'à ce que les échauffements de l'huile au sommet de la cuve et de la température de l'huile moyenne rencontrent le plus sévère des 2 critères suivants:

- Variation de l'échauffement de moins de 1 °C sur une période de 3 heures consécutives.
- Variation de l'échauffement de moins de 2,5 % pour une période de 3 heures consécutives.

Note: Il est permis d'augmenter la charge ou de réduire l'efficacité du système de refroidissement pendant un certain temps pour atteindre la stabilité plus rapidement.

Après la période de stabilité à pertes constantes, le courant d'essai est abaissé au courant nominal homopolaire spécifié additionné du courant circulant dans l'enroulement primaire si l'inductance est prévue pour alimenter des services auxiliaires pour une durée d'au moins d'une heure. Durant cette période à courant constant, on doit balayer toutes les surfaces de la cuve avec une caméra infrarouge incluant les tourelles des traversées, pour déterminer la température du point le plus chaud de la cuve.

À la fin de la période d'une heure, on procède à la coupure du circuit d'alimentation et à la mesure des résistances des enroulements primaires à chaud pour déterminer la température moyenne des enroulements primaires au moment de la coupure ( $\theta_w$ ) et la courbe de refroidissement de l'enroulement.

Les températures de tous les enroulements primaires, sur les trois phases, doivent être déterminées individuellement à partir de la méthode de mesure de la résistance à chaud.

Pour les inductances de MALT avec enroulements pour l'alimentation de services auxiliaires, l'essai d'échauffement de la partie "transformateur" doit être effectué séparément de l'essai d'échauffement pour la fonction "inductance de MALT". Pour la fonction "transformateur de services auxiliaires", la tension doit être appliquée sur les bornes haute-tension avec les bornes basse-tension court-circuitées de façon à ce que le courant assigné circule dans les enroulements secondaires. Le courant doit être appliqué pour une période d'au moins 1 heure de façon à pouvoir déterminer le gradient entre la température moyenne de l'enroulement et la température moyenne de l'huile. À la fin de la période d'une heure, on procède à la coupure du circuit d'alimentation et à la mesure des résistances des enroulements secondaires à chaud pour déterminer la température moyenne des enroulements secondaires au moment de la coupure ( $\theta_w$ ) et la courbe de refroidissement de ces enroulements.

Les températures de tous les enroulements secondaires, sur les trois phases, doivent être déterminées individuellement à partir de la méthode de mesure de la résistance à chaud.

Les autres modalités applicables des mesures des résistances à chaud sont celles décrites pour les transformateurs de puissance.

## c) Inductances shunt:

Dans le cas des inductances shunt, l'appareil doit être alimenté à 105 % de la tension assignée jusqu'à stabilité de la température c'est-à-dire, jusqu'à ce que les échauffements de l'huile au sommet de la cuve et de la température de l'huile moyenne rencontrent le plus sévère des 2 critères suivants:

- Variation de l'échauffement de moins de 1 °C sur une période de 3 heures consécutives;
- Variation de l'échauffement de moins de 2,5 % pour une période de 3 heures consécutives.

Note: Il est permis d'alimenter en surcharge ou de réduire l'efficacité du système de refroidissement pendant un certain temps pour atteindre la stabilité plus rapidement.

Les pertes doivent être mesurées durant l'essai.

Durant la dernière heure d'essai, on doit balayer toutes les surfaces de la cuve avec une caméra infrarouge incluant les tourelles des traversées, pour déterminer la température du point le plus chaud de la cuve.

À la fin de l'essai, on procède à la coupure du circuit d'alimentation et à la mesure des résistances des enroulements à chaud pour déterminer la température moyenne des enroulements au moment de la coupure ( $\theta_w$ ) et la courbe de refroidissement de l'enroulement.

Les températures de tous les enroulements, sur les trois phases, doivent être déterminées individuellement à partir de la méthode de mesure de la résistance à chaud.

Les autres modalités applicables des mesures des résistances à chaud sont celles décrites pour les transformateurs de puissance.

#### 2.4.4 Résultats des essais

Lorsque la stabilité est atteinte, l'échauffement ultime de l'huile au sommet de la cuve ( $\Delta\theta_{ou}$ ) aux conditions de dissipation des pertes totales peut être établi. L'échauffement moyen de l'huile ( $\Delta\theta_m$ ) est défini comme étant la température de l'huile au sommet de la cuve ( $\theta_o$ ) moins la moitié de la différence des températures du liquide de refroidissement mesurées dans les conduites d'alimentation supérieure ( $\theta_h$ ) et inférieure ( $\theta_b$ ) des radiateurs:

L'équation suivante définit l'échauffement moyen de l'huile:

$$\Delta\theta_m = \theta_o - \left( \frac{\theta_h - \theta_b}{2} \right) - \theta_a$$

Où  $\theta_a$  correspond à la moyenne des températures ambiantes.

L'équation suivante définit la température moyenne de l'huile:

$$\theta_m = \theta_o - \left( \frac{\theta_h - \theta_b}{2} \right)$$

La température moyenne de l'enroulement ( $\theta_w$ ) est déterminée par l'équation suivante:

$$\theta_w = \frac{R_h}{R_c}(\theta_k + \theta_{rc}) - \theta_k$$

Où

$R_h$ : Résistance à chaud après la coupure du courant déterminée par régression;

$R_c$ : Résistance à froid mesurée avant l'essai d'échauffement;

$\theta_k$ : Constante du cuivre: 234,5 °C;

$\theta_{rc}$ : Température de mesure de la résistance à froid.

L'échauffement moyen de l'enroulement est obtenu à partir de la température de l'enroulement calculée par régression et corrigée pour tenir compte de la différence de la température moyenne de l'huile à la stabilité (i.e. fin de la période à pertes constantes) et à la coupure (i.e. fin de la période à courant constant):

$$\Delta\theta_w = \theta_w + (\theta_{m\text{-stabilité}} - \theta_{m\text{-coupure}}) - \theta_{a\text{-stabilité}}$$

L'élévation de température du point chaud de l'enroulement doit être déterminée selon la méthode CEI par l'équation suivante:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{o\text{-stabilité}} + F_{PC} (\theta_w - \theta_{m\text{-coupure}})$$

Le facteur de point chaud  $F_{PC}$  doit être celui calculé par le fabricant et tel qu'indiqué lors de la revue de conception. L'utilisation du facteur de point chaud, par défaut, de 1,3 tel que suggéré par la CEI 60076-2 n'est pas acceptable. L'indicateur de température de l'huile au sommet et du point chaud de l'enroulement devra être ajusté suivant les résultats d'essais obtenus.

La mesure du point chaud devra être effectuée par fibres optiques. Typiquement, deux fibres par enroulements et pour chacune des phases devront être installées. Le nombre et l'emplacement de ces fibres devront faire l'objet d'une entente lors de la revue de conception.

## 2.4.5 Critères d'acceptation des essais

Les critères d'acceptation de l'essai d'échauffement sont:

- L'échauffement de l'huile au sommet de la cuve ne doit pas dépasser +60 °C;
- L'échauffement moyen des enroulements ne doit pas dépasser:
  - 65 °C pour les transformateurs de puissance et les inductances de MALT;
  - 55°C pour les inductances shunt;
- L'échauffement du point chaud des enroulements calculé selon les modalités prescrites précédemment et mesurés avec les sondes à fibres optiques ne doit pas dépasser:
  - 80 °C pour les transformateurs de puissance et les inductances de MALT;
  - 65°C pour les inductances shunt;
- L'analyse des gaz dissous doit rencontrer les critères spécifiés à l'article 2.6.

## 2.5 Essai d'échauffement en surcharge

L'essai d'échauffement en surcharge est exigé pour tous les transformateurs de puissance sauf les transformateurs de centrales, les transformateurs de services auxiliaires, les transformateurs des compensateurs statiques, les inductances shunt et les inductances de MALT (avec ou sans services auxiliaires) ou lorsque la spécification technique particulière ne demande aucune capacité en surcharge.

L'essai d'échauffement en surcharge doit être réalisé à la suite de l'essai d'échauffement à la puissance nominale, cet essai étant considéré comme la première étape de l'essai de surcharge.

### 2.5.1 Préparation de l'objet d'essai

L'essai doit débuter à la suite de l'essai d'échauffement sans laisser le temps au transformateur de se refroidir, sauf le temps nécessaire pour réaliser les mesures de résistances à chaud suite à l'essai d'échauffement et le temps nécessaire pour réassembler les raccordements de puissance. L'essai doit être réalisé avec les mêmes mesures, le même arrangement de combinaison de connexions et de prises que pour l'essai d'échauffement à 1,0 p.u.

Avant de débuter l'essai d'échauffement en surcharge, un thermocouple doit être installé à l'endroit le plus chaud de la cuve, identifié par thermographie lors de l'essai d'échauffement. Lors des essais à 1,3 et 1,5 p.u., l'emplacement identifié durant l'essai d'échauffement à 1,0 p.u. doit être revalidé par thermographie et le thermocouple remplacé au besoin.

L'indicateur de température du point chaud de l'enroulement et de l'huile au sommet doit être ajusté selon les paramètres obtenus lors de l'essai d'échauffement à 1,0 p.u. avant le début de l'essai d'échauffement en surcharge.

### 2.5.2 Modalité d'essai et profil de surcharge

L'essai d'échauffement en surcharge est réalisé à différents niveaux de charge, incluant des niveaux de charges supérieurs à la puissance nominale du transformateur.

Note: Il est reconnu qu'un essai à des niveaux de charge supérieurs à la puissance nominale peut faire subir un certain vieillissement à l'isolation du transformateur.

Durant l'essai de surcharge, la ventilation de l'aire d'essai est permise en autant que la température ambiante soit maintenue stable et qu'il n'y ait pas de ventilation forcée ou courant d'air directement sur l'objet d'essai. Tous les équipements de refroidissement, pompes, et ventilateurs, à l'exception des équipements prévus pour la redondance, doivent fonctionner durant toute la durée de l'essai, c'est-à-dire durant les périodes d'application de la charge, durant les périodes de refroidissement, et aussi après la période à 150 % du courant nominal de la prise essayée, jusqu'à la prise du dernier échantillon d'huile.

Le profil de surcharge à réaliser est le suivant:

- On doit faire circuler un courant égal à 130 % du courant nominal de la prise essayée pendant une période de 24 heures. Si la température ambiante est supérieure à 20 °C, il est permis de réduire le courant de 0,7 % pour chaque °C au-dessus de la température ambiante de 20 °C.
- Par la suite, une période de refroidissement de 3 heures est requise pendant laquelle on continue d'enregistrer les températures mentionnées au paragraphe 2.5.3 afin de déterminer la constante de temps thermique de l'huile.

- Après la période de refroidissement, on doit faire circuler un courant égal à 70% du courant nominal de la prise essayée jusqu'à stabilisation de la température de l'huile c'est-à-dire, jusqu'à ce que les échauffements de l'huile au sommet de la cuve et de l'huile moyenne ne varient pas plus que de 1°C sur une période de 3 heures consécutives.
- La durée de la période de refroidissement entre l'essai à 70% et l'essai à 150% ne devrait pas excéder 1 heure. S'il est impossible de respecter ce critère, le transformateur doit être remis sous charge de façon à obtenir au moins la même température qu'à la fin de la période de refroidissement d'une heure avant de débiter l'essai à 150%.
- Par la suite, on doit faire circuler un courant égal à 150 % du courant nominal de la prise essayée et arrêter l'essai lorsqu'une des deux conditions suivantes est rencontrée:
  - La température maximale du point chaud des enroulements atteint 140 °C selon les mesures effectuées par fibres optiques;
  - La durée de l'essai a atteint 3 heures.

Note: Il est préférable pour toute la séquence de l'essai en surcharge de maintenir la température ambiante à  $+20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  pour toute la durée de l'essai plutôt que de réduire le courant d'essai pour l'étape à 1,3 p.u. ou la durée de l'essai pour l'étape à 1,5 p.u.. A cet effet, une ventilation de l'aire d'essai peut être acceptable en autant qu'il n'y ait pas de circulation d'air directe autour du transformateur.

### 2.5.3 Paramètres à mesurer en cours d'essais

On doit enregistrer les données suivantes, à chaque intervalle de 15 minutes durant les 3 premières heures de chaque période (y compris durant la période de refroidissement) et à un intervalle de 30 minutes pour les heures subséquentes:

- Températures ambiantes;
- Température de l'huile à l'entrée et à la sortie des conduites alimentant les radiateurs;
- Température de l'huile au sommet de la cuve apparaissant sur l'indicateur de température de l'huile du transformateur;
- Température de l'huile au sommet de la cuve mesurée à l'aide d'un thermocouple;
- Température du point chaud apparaissant sur l'indicateur de température de l'enroulement. L'indicateur doit être calibré avant le début de l'essai de surcharge selon les résultats obtenus au cours de l'essai d'échauffement;
- Températures des points chauds des enroulements mesurées par les sondes à fibres optiques;
- Température des points chauds sur les pièces métalliques non en contacts avec l'isolation solide (presses-culasses, plaques de retenue, écran de la cuve, barres de traction, etc.);
- Température du point chaud de la cuve mesurée à l'aide d'un thermocouple;
- Courant de charge;
- Pertes dissipées par le transformateur.



A la fin de chaque période d'alimentation, on doit mesurer les résistances c.c. à chaud de la paire d'enroulements les plus chauds, tel qu'observé lors de l'essai d'échauffement à 1.0 p.u., pour déterminer leur température moyenne respective au moment de la coupure ( $\theta_w$ ).

Deux échantillons d'huile doivent être pris aux étapes suivantes:

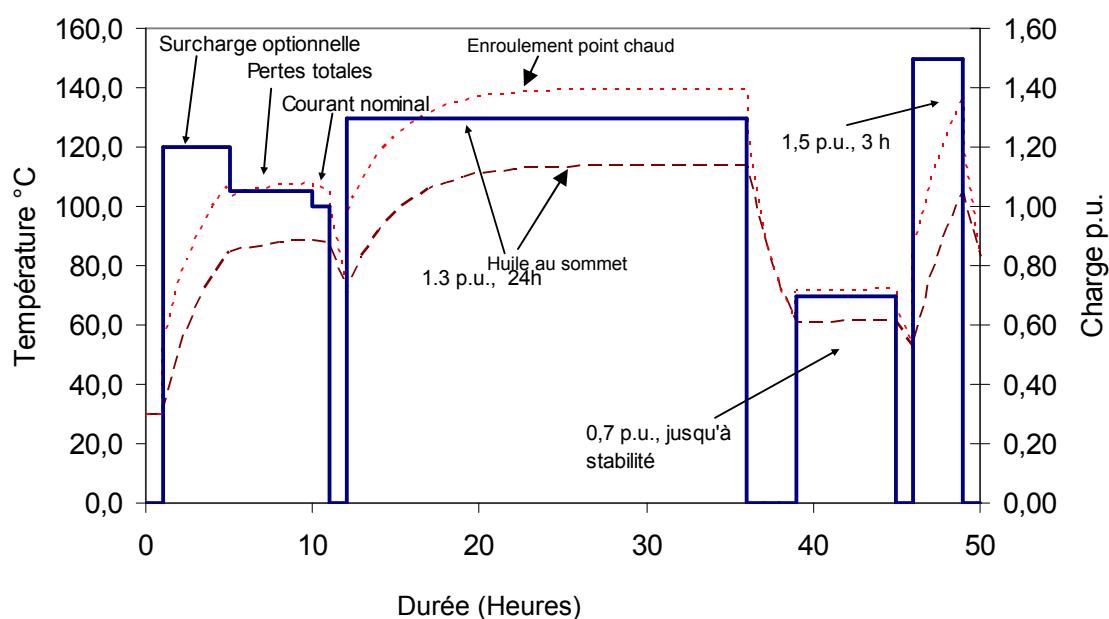
- Immédiatement avant et après l'essai de courant à 130 % du courant nominal;
- Immédiatement après l'essai de courant à 70 % du courant nominal;
- Immédiatement après la fin de l'essai de courant à 150 % du courant nominal;
- Trois heures après la fin de l'essai de courant à 150 % du courant nominal. Les ventilateurs peuvent être temporairement arrêtés à la fin de l'essai à 150% pour permettre la mesure du bruit audible à chaud.

La méthode de prise des échantillons ainsi que les critères d'acceptation des gaz dissous sont donnés au paragraphe 2.6.

Une mesure des températures à la surface de la cuve et des tourelles doit être effectuée par thermographie peu avant l'interruption des courants d'essai à 1.3 p.u. et 1,5 p.u.

Note: La surcharge initiale optionnelle, illustrée à la figure 1, peut être utilisée si jugée nécessaire par le fabricant.

Note: Les échelles de la figure 1 sont indiquées à titre indicatif seulement et ne représente pas les niveaux de température atteinte en fonction de la surcharge appliquée.

**Figure 1 - Cycle de surcharge**

#### 2.5.4 Critères de réussite de l'essai

L'essai d'échauffement en surcharge a démontré que le transformateur a les capacités en surcharge spécifiées si les conditions suivantes sont rencontrées:

- Les températures limites indiquées au tableau 6 ne sont pas dépassées;
- Les caractéristiques thermiques évaluées à partir des calculs décrits à l'annexe D doivent démontrer que le transformateur peut supporter les profils journaliers de surcharge donnés à l'article 4.2.6 de la spécification technique normalisée SN 14.1;
- L'huile dans le conservateur n'a pas débordé;
- L'augmentation des gaz dissous dans l'huile respecte les critères énoncés au paragraphe 2.6.

**Tableau 6 – Températures limites lors de l'essai de surcharge**

Température du point chaud de l'enroulement: $F_{PC} \times (\theta_w - \theta_m) + \theta_o$	140 °C
Température du point chaud des pièces métalliques en contact avec de l'isolation	140 °C
Température du point chaud des pièces métalliques non en contact avec de l'isolation	180 °C

## 2.6 Prélèvement et analyse des échantillons d'huile

La procédure de prélèvement des échantillons d'huile et l'analyse des gaz dissous doivent être réalisées conformément à la norme ASTM D3612-90.

Les prélèvements des échantillons d'huile pour analyse des gaz dissous doivent être effectués comme suit:

- Avant et après les essais diélectriques;
- Avant et après l'essai de surexcitation;
- Avant, pendant et après l'essai d'échauffement et de surcharge;

La prise d'échantillon d'huile doit être faite à un endroit là l'huile circule. Le robinet de vidange de l'huile n'est pas acceptable. Une valve provisoire peut être aménagée au bas de l'un des radiateurs.

Une prise d'échantillon doit être faite à chacun des deux endroits suivants:

- 1<sup>er</sup> échantillon: au bas d'un des radiateurs;
- 2<sup>e</sup> échantillon: sur le dessus de la cuve.

Les limites du taux de génération des gaz dissous sont définies au tableau 7. Ce tableau indique l'augmentation maximale en ppm par heure ou en valeur absolue du contenu en gaz dissous dans l'huile au cours des essais.

**Tableau 7 – Augmentation maximale du contenu en gaz dissous**

Essai	Échauffement à 1, 0 p.u.	Surcharge à 1, 3 p.u.	Surcharge à 1, 5 p.u.	Essais diélectriques et de surexcitation
Gaz dissous	Augmentation maximale ppm/h	Augmentation maximale ppm/h	Augmentation maximale ppm/h	Augmentation maximale absolue
CO	2	10	20	N/A
CO <sub>2</sub>	20	100	200	N/A
H <sub>2</sub>	0,8	1,5	3	15
CH <sub>4</sub>	0,2	0,4	1,5	5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	n.d.	Note 1	0,5	n.d.
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	n.d.	Note 1	n.d.	n.d.
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.: Indique une augmentation non-détectable; Compte-tenu de la précision et de la répétabilité des analyses de gaz dissous, une variation absolue totale de 0,1 ppm et moins n'est pas considérée comme significative.

Note 1: Une augmentation absolue totale de 0,2 ppm pour la durée de l'essai est permise.

Le 1<sup>er</sup> échantillon doit être analysé. Si aucun des seuils du tableau 7 n'est dépassé, il n'y a pas de défaut thermique et/ou diélectrique et l'appareil est accepté.

Si un ou plusieurs des seuils du tableau 7 sont dépassés, il y a possibilité de défaut thermique et/ou diélectrique et le 2<sup>e</sup> échantillon de gaz sera analysé pour confirmer le diagnostic.

Selon les résultats, Hydro-Québec et le fabricant doivent ensuite convenir de réaliser des essais additionnels et/ou d'effectuer une inspection interne du transformateur pour localiser la source de génération du gaz et procéder à des modifications de conception, si nécessaire.

## 2.7 Mesure des impédances homopolaires des transformateurs

Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme IEEE C57.90, article 9.5. La mesure des impédances homopolaires doit être effectuée pour les transformateurs triphasés comprenant un couplage Y-Δ ou Y-Y.

## 2.8 Mesure du bruit audible

La mesure de bruit doit être réalisée en essai de type sur les transformateurs de puissances, les transformateurs de services auxiliaires et les inductances de mise à la terre, mais en essai individuel pour les inductances shunts (voir paragraphe 3.22).

La mesure de bruit audible doit se faire par une mesure d'intensité acoustique et par la réalisation d'une évaluation de la puissance acoustique, le tout selon les prescriptions de la norme CEI 60076-10.

Les deux évaluations suivantes doivent être réalisées:

- $L_{WA,V}$  : Puissance acoustique en mode ONAN, à vide, à une tension de 105% la tension nominale (sur la prise produisant le flux maximal si le transformateur est de type à flux variable). Pour les transformateur à flux constant, l'essai peut être effectué à n'importe quel prise;
- $L_{WA,C}$ : Puissance acoustique avec tout le refroidissement en fonction et à 100% du courant assigné de la prise utilisée lors de l'essai d'échauffement.

Les contours respectifs, tels que définis à la CEI 60076-10, de ces deux mesures doivent être le contour du mode ONAF II si applicable. Dans le cas de transformateurs ayant uniquement le mode de refroidissement ONAN, alors le contour à utiliser sera celui décrit pour le mode ONAN.

La somme logarithmique de ces deux puissances acoustiques est ensuite effectuée selon l'équation suivante:

$$L_{WA,TOTAL} = 10 \log (10^{(L_{WA,V} / 10)} + 10^{(L_{WA,C} / 10)})$$

Note: La tension d'essai doit être mesurée avec un voltmètre répondant à la valeur moyenne de la tension mais affichant une mesure de tension efficace.

La mesure du bruit audible doit être réalisée à chaud (idéalement après l'essai d'échauffement) i.e. à la température de l'huile au sommet de la cuve égale à celle atteinte lors de l'essai d'échauffement. Une tolérance de  $\pm 10$  °C par rapport à celle atteinte lors de l'essai d'échauffement à 1,0 p.u. est acceptable.

Dans le cas de transformateurs prévus pour être équipés d'une enceinte acoustique, la mesure du bruit audible devrait être réalisée préférentiellement avec l'enceinte acoustique installée. Si l'atténuation de l'enceinte acoustique a été démontrée par d'autres essais antérieurs ou au site, alors il n'est pas nécessaire de réaliser cette mesure en usine avec l'enceinte installée. Le facteur d'atténuation mesuré et convenu avec Hydro-Québec sera appliqué sur le niveau de bruit audible mesuré sans enceinte. Des mesures additionnelles au site peuvent être demandées.

## **2.9 Essai de surexcitation à 110 % de la tension nominale**

Cet essai peut être réalisé avant ou après la mesure de pertes à vide pour des raisons de similarité de montage d'essai. Deux échantillons de gaz dissous doivent être prélevés avant l'essai.

Le changeur de prises doit être positionné à la prise donnant le flux maximal pour les transformateurs à flux variable et à n'importe quelle prise pour les transformateurs à flux constant. Le transformateur doit être alimenté à 110 % de la tension nominale pendant une période minimale de 8 heures.

Les pertes à vide et le courant d'excitation doivent être mesurés au début et à la fin de cet essai. Les valeurs mesurées à fin de l'essai ne devraient pas augmenter par rapport à celles mesurées au début de l'essai. Une augmentation de plus de 5% par rapport aux valeurs mesurées au début de l'essai devra être investiguée et expliquée.

L'analyse des échantillons d'huile ne doit pas révéler d'augmentation des gaz dissous dans l'huile excédant les valeurs indiquées au tableau 7.

## **2.10 Qualification parasismique**

La tenue sismique des appareils doit être démontrée selon les modalités de la spécification TET APG-N-0001.

# **3. Essais individuels des transformateurs de puissance, des inductances de mise à la terre et des inductances shunt**

## **3.1 Généralités**

Les essais individuels à réaliser sont indiqués au tableau 1. À l'exception des transformateurs prévus pour un raccordement direct à des barres blindées isolées au SF<sub>6</sub>, les appareils doivent être munis de leurs propres traversées lorsqu'ils sont soumis aux essais.

Pour les transformateurs prévus pour un raccordement direct à des barres blindées isolées au SF<sub>6</sub>, des traversées d'essais huile-air peuvent être utilisées en remplacement des traversées prévues pour le service. Dans ce cas, le fabricant devra démontrer (par exemple avec des études de champ électrique) que ces traversées ne favorisent pas la tenue du transformateur lors des essais.

## **3.2 Mesure de la résistance des enroulements**

La résistance des enroulements doit être mesurée conformément à l'article 5 de la norme IEEE C57.12.90.

Si le transformateur est muni d'un changeur de prises (en charge et hors charge), on doit mesurer la résistance de chacun des enroulements et à toutes les prises.

Les valeurs mesurées et corrigées pour une température de 75°C ne doivent pas s'écarter de plus de 3% avec les valeurs prévues à la conception par le fabricant. Tout écart supérieur à 3% devra être expliqué par le fabricant et accepté par Hydro-Québec.

### 3.3 Essais de tenue aux chocs de foudre

Les essais individuels de tenue aux chocs de foudre doivent être effectués sur chacun des appareils qui n'ont pas été soumis aux essais de type de tenue aux chocs de foudre avec ondes coupées.

Les essais de chocs avec ondes coupées tels que décrits en 2.2 doivent être réalisés comme essai individuel sur les appareils suivants:

- Transformateurs de puissance raccordés directement à l'appareillage blindé isolé au SF<sub>6</sub> par l'intermédiaire d'une traversée Huile/SF<sub>6</sub>;
- Transformateurs et autotransformateurs dont la tension assignée d'un des enroulements est de 700 kV et plus;
- Autotransformateurs de puissance munis d'un changeur de prises en charge dont la tension assignée d'un des enroulements est de 280 kV et plus.

Les essais de chocs de foudre individuels consistent à appliquer sur chacune des bornes de ligne tel qu'indiqué à la spécification technique normalisée (SN 14.1) ou à la spécification particulière:

- Au moins, une onde pleine réduite;
- Trois ondes pleines au niveau de tension.

Toutes les dispositions mentionnées au paragraphe 2.2 du présent document s'appliquent s'il y a lieu.

### 3.4 Essais de tenue aux chocs de manœuvre

#### 3.4.1 Généralités

Les essais de tenue aux chocs de manœuvre s'appliquent aux appareils avec enroulements de classe de tension 330 kV et plus.

Dans le cas où des essais de tension aux chocs de manœuvre phase-phase sont requis sur un transformateur triphasé, ils peuvent être combinés avec les essais phase-terre. Pour les essais phase-phase, la tension appliquée entre phases doit être mesurée.

Des essais avec une tension appliquée de polarité positive, doivent être réalisés sur le premier transformateur d'une commande, et doit être équipé de son conservateur et de l'ensemble de ses accessoires afin de vérifier adéquatement la tenue dans l'air entre phases (si applicable) et par rapport à la terre. Si le conservateur est monté sur une structure séparée à une distance d'au moins 1,2 fois la distance phase-terre de la traversée, il n'est pas requis de monter le conservateur mais la tuyauterie installée sur le couvercle de la cuve doit être installée en totalité.

Dans le cas où un transformateur est équipé d'un dispositif interne de limitation de la tension (varistances), celui-ci ne doit en aucun cas opérer durant les essais. En effet, en raison de l'importance de l'énergie présente lors de surtensions de manœuvre en service, le dispositif de limitation de tension ne doit en aucun cas limiter la surtension de manœuvre prescrite pour les essais.

### 3.4.2 Arrangement des appareils pour les essais

Pendant les essais, la borne neutre de l'enroulement à l'essai doit être directement reliée à la terre. Dans le cas des transformateurs de puissance, les enroulements non essayés doivent être solidement reliés à la terre en un point, mais non court-circuités. Pour un transformateur triphasé, chaque phase doit être essayée en mettant la borne neutre à la terre et avec le transformateur connecté de telle façon qu'une tension en polarité inverse et d'amplitude de demi-valeur soit induite sur les deux autres phases non soumises à l'essai. Ces dernières peuvent être reliées ensemble. Des résistances d'amortissement peuvent être placées entre les bornes non soumises directement à la surtension appliquée et la terre.

Note - Il est recommandé d'installer des capteurs ultrasoniques sur la cuve pendant les essais de chocs.

### 3.4.3 Forme d'onde

La durée du front d'onde doit être supérieure à 100  $\mu$ s. La tension doit se maintenir à une valeur supérieure à 90 % de sa valeur de crête pendant au moins 200  $\mu$ s. Le temps jusqu'au premier passage par zéro doit être d'au moins 1 000  $\mu$ s.

### 3.4.4 Tension d'essais

La tension d'essais est spécifiée à la SN14.1 ou à la spécification technique particulière. La tolérance sur la tension d'essais est de  $\pm 3\%$ .

### 3.4.5 Séquence d'essais

Ces essais consistent à appliquer, soit directement, soit par induction, à chacune des bornes de ligne:

- Une onde pleine réduite;
- Trois ondes pleines de polarité négative.

Afin de vérifier les distances diélectriques dans l'air, un appareil d'une même commande doit être soumis à des essais avec une tension appliquée de polarité positive, soit directement ou par induction sur chacune des bornes de ligne:

- Une onde pleine réduite;
- Trois ondes pleines de polarité positive.

Ces essais en polarité positive remplacent les essais de polarité négative cités précédemment.

Dans le cas des transformateurs de puissance, deux ondes réduites (50 % à 70 % de la tension d'essais) de polarité inverse à celle de l'essai doivent être appliquées entre chaque onde pleine afin de limiter la saturation du circuit magnétique.

### 3.4.6 Système de mesure

Les oscillogrammes de tension et de courant doivent être mesurés à l'aide d'un enregistreur analogique ou à l'aide d'un système numérique d'acquisition et de traitement satisfaisant les prescriptions de la norme CEI 61083-1.

Toutes les formes d'ondes doivent être enregistrées et illustrées dans le rapport d'essais.

### 3.4.7 Critères de réussite

L'appareil a réussi les essais s'il ne se produit pas d'effondrement de tension et s'il n'y a pas de différence entre les oscillogrammes de tension autre que celle causée par la saturation du noyau.

## 3.5 Essai par tension appliquée à fréquence industrielle

Cet essai doit être effectué conformément aux prescriptions précisées au paragraphe 10.6 de la norme IEEE C57.12.90.

Cet essai est requis sur tous les appareils, quelle que soit leur classe de tension.

## 3.6 Vérification de l'étanchéité de la cuve et des radiateurs

La vérification de l'étanchéité de la cuve et des radiateurs doit être faite à une pression minimale de 35 kPa pendant 24 heures. Si un essai d'échauffement doit être effectué sur l'un des appareils d'une même commande, on doit en profiter pour faire l'essai d'étanchéité avec de l'huile chaude.

D'autres méthodes équivalentes peuvent être proposées par le fabricant et sujettes à approbation par Hydro-Québec.

## 3.7 Essai d'isolement du noyau

Cet essai doit être effectué à l'aide d'un appareil produisant une tension d'environ 1000 volts c.c. et la résistance mesurée doit être égale ou supérieure à 50 M $\Omega$  pour une température d'huile d'environ 20 °C.

## 3.8 Mesure de la réponse en fréquence (FRA)

Cette mesure est utilisée comme référence future pour le suivi en service.

Tous les transformateurs et les inductances shunt monophasées de tensions assignées égales ou supérieures à 145 kV devront subir un essai de mesure de la réponse en fréquence (FRA) selon les modalités de la norme CEI 60076-18 (sera publiée prochainement). Cet essai doit être effectué à la fin des essais sur un appareil rempli de son huile isolante et les traversées installées,

Pour des raisons pratiques, la mesure FRA des inductances shunt triphasées peut être effectuée sans huile avec les traversées de service installées.

Les résultats doivent être transmis sous forme graphique et sous formes numériques.



### 3.9 Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire

On doit effectuer l'essai conformément à l'article 6 de la norme IEEE C57.12.90.

### 3.10 Mesure du rapport de transformation

On doit effectuer l'essai conformément à l'article 7 de la norme IEEE C57.12.90.

Si le transformateur est muni d'un ou de plusieurs changeurs de prises en charge, on doit également vérifier le rapport de transformation à chacune des prises.

Le rapport de transformation mesuré ne doit pas s'écarter de plus de 0,5 % de la valeur calculée à partir des informations inscrites sur la plaque signalétique.

### 3.11 Mesure du courant à vide

Le courant à vide doit être mesuré à 80, 90, 100, 105, 110 et 115 %<sup>(note)</sup> de la tension assignée, selon les prescriptions du paragraphe 8.5 de la norme IEEE C57.12.90.

Note: Si le niveau de tension 115% ne peut être atteint à cause d'une limitation de puissance de la source, le niveau le plus haut possible doit alors être appliqué.

Pour les transformateurs à flux variable, la mesure du courant à vide doit être effectuée à la prise nominale et aux prises extrêmes du changeur de prises en charge.

### 3.12 Mesure des pertes à vide

On doit mesurer les pertes à vide à 80, 90, 100, 105, 110 et 115 %<sup>(note 1)</sup> de la tension nominale selon les prescriptions de l'article 8 de la norme IEEE C57.12.90. La tension d'essai et les pertes mesurées doivent être corrigées comme mentionné à l'article 8.3 de la norme IEEE C57.12.90.

Les pertes à vide mesurées ne doivent pas excéder de plus de +2 % la valeur garantie par le manufacturier.

Si les pertes excèdent de plus de 2% les pertes garanties suite aux essais diélectriques, la mesure des pertes à vide peut être répétée suite à l'essai de surexcitation et c'est cette dernière valeur qui sera considérée comme valeur officielle des pertes à vide.

Si les pertes demeurent supérieures à plus de 2% des pertes garanties, le fabricant sera soumis aux pénalités prévues au contrat. Si ces pertes excèdent de plus de 10 % la valeur garantie, le fabricant devra expliquer cet écart et l'appareil pourrait être refusé.

Note 1: Si le niveau de tension 115% ne peut être atteint à cause d'une limitation de puissance de la source, le niveau le plus haut possible doit alors être appliqué

### 3.13 Mesure de l'impédance de court-circuit

On doit effectuer l'essai conformément à l'article 9 de la norme IEEE C57.12.90.

Les impédances de court-circuit doivent être mesurées entre les différentes paires d'enroulements (par exemple: H-X, X-Y et H-Y). On doit faire cette mesure à la prise nominale et aux prises extrêmes du changeur de prises en charge sur chacun des transformateurs d'une même commande.

On doit également faire la mesure de l'impédance entre la haute et la basse tension à toutes les prises du changeur de prises sur le premier transformateur d'une commande.

Les impédances mesurées pour les enroulements HT-BT des transformateurs de puissance ne doivent pas s'écarter de plus de 5,0 % de la valeur spécifiée par HQ. Les impédances mesurées pour les enroulements HT-tertiaire et BT-tertiaire ne doivent pas s'écarter de plus de 10,0 % de la valeur spécifiée par HQ.

Pour les transformateurs de services auxiliaires, l'impédance mesurée pour l'enroulement HT-BT ne doit pas s'écarter de plus de 7,5 % de la valeur spécifiée par HQ.

### **3.14 Mesure de l'impédance des inductances de MALT**

L'impédance homopolaire doit être mesurée entre le neutre et les trois bornes de ligne court-circuitées.

L'impédance homopolaire mesurée ne doit pas s'écarter de plus de 10,0 % de la valeur spécifiée par HQ.

Dans le cas d'inductances de MALT avec enroulements pour l'alimentation des services auxiliaires, l'impédance de court-circuit doit respecter le critère d'impédance minimum donné à la SN 14.4.

### **3.15 Mesure des pertes en charge**

On doit effectuer cet essai conformément à l'article 9 de la norme IEEE C57.12.90. Pour les transformateurs triphasés, la méthode de mesure par trois wattmètres doit être utilisée. La précision des appareils de mesure doit satisfaire les prescriptions de l'article 9.4 de l'IEEE C57.12.00. La précision sur la mesure des pertes doit être meilleure que 3 %.

Les pertes en charge doivent être mesurées à 60, 80 et 100 % du courant assigné, ce qui correspond aux puissances assignées pour les modes de refroidissement ONAN / ONAF I / ONAF II. On doit faire cette mesure à la prise nominale et aux prises extrêmes du changeur de prises en charge sur chacun des transformateurs d'une commande. On doit également faire cette mesure à toutes les prises du changeur de prises sur le premier transformateur d'une commande. Dans ce cas les mesures doivent être faites avec un courant égal ou inférieur à 25% du courant assigné.

Les pertes mesurées ne doivent pas s'écarter de plus de +2 % de la valeur garantie par le manufacturier.

Si les pertes excèdent de plus de 2 % les pertes garanties, le fabricant sera soumis aux pénalités prévues au contrat. Si ces pertes excèdent de plus de 10 % la valeur garantie, le fabricant devra expliquer cet écart et l'appareil pourrait être refusé.

### **3.16 Mesure des pertes des ventilateurs et des pompes**

La mesure des pertes des ventilateurs et des pompes devra être effectuée à la fréquence nominale et la tension nominale d'alimentation.

### **3.17 Essais d'opération du changeur de prises en charge**

Les essais d'opération du changeur de prises en charge doivent être effectués conformément aux prescriptions de l'article 11.7 de la CEI 60076-1.

### 3.18 Essai en tension induite

#### 3.18.1 Essai de courte durée pour les transformateurs de tensions assignées inférieures à 72,5 kV.

L'essai sur les transformateurs de puissance dont la tension maximale est inférieure à 72,5 kV doit être fait selon les prescriptions de l'article 12 de la norme CEI 60076-3. Aucune mesure des décharges partielles n'est requise pour ces appareils.

La tension d'essai doit être élevée à deux fois la tension de l'enroulement essayé. La tension d'essai doit être appliquée pour une durée de 7200 cycles sans jamais dépasser 60 secondes.

La position du changeur de prises pour l'essai doit être choisie de façon à obtenir la contrainte de tension maximale entre tours (2,0 p.u.) de tous les enroulements ainsi que la tension induite maximale phase-terre sur les enroulements haute tension.

L'essai est réussi s'il ne se produit pas d'effondrement de la tension d'essai.

#### 3.18.2 Essai en tension induite avec mesures de décharge partielles pour les transformateurs de tensions assignées égales supérieures à 72,5 kV.

L'essai en tension induite et la mesure des décharges partielles doit être fait de la façon suivante sur tous les transformateurs de puissance dont la classe de tension est égale ou supérieure à 72,5 kV, quelle que soit leur puissance assignée.

##### a) Application de la tension d'essai

Pendant l'essai, le transformateur doit être alimenté par un des enroulements avec une tension de fréquence égale ou supérieure à 120 Hz afin de ne pas saturer le circuit magnétique. La tension doit être graduellement augmentée jusqu'à ce que l'ensemble des enroulements atteignent les valeurs d'essais indiquées à la spécification technique normalisée (SN 14.1) ou à la spécification particulière.

Les tensions de précontrainte indiquées au tableau P1.6 de la spécification technique normalisée (SN 14.1) ou de la spécification particulière pendant doivent être appliquées pour une durée de 7 200 cycles:

Par la suite, sans interrompre la tension d'essais, la tension d'essai doit être abaissée aux valeurs indiquées (1 heure) du tableau P1.6 de la spécification technique normalisée (SN 14.1) ou de la spécification particulière et maintenir ce niveau durant une heure, quelle que soit la fréquence de la tension d'essai.

Note: Advenant le cas où après l'application de la tension d'essai de précontrainte (7200 cycles) celle-ci est abaissée à une valeur inférieure à celle prescrite pour la mesure des décharges partielles (niveau d'essai 1 heure), alors l'essai doit être arrêté et repris depuis le début incluant la ré-application de la tension de précontrainte. Une tolérance de -3 % de cette valeur est acceptable.

La position du changeur de prises doit être telle que les tensions d'essais spécifiées au tableau P1.6 pour chacun des enroulements soient au moins rencontrées. Advenant que cette tension n'est pas spécifiée au tableau P1.6 (par exemple pour certains enroulements de tensions maximales inférieures à 72,5 kV, les mêmes facteurs de surtensions que ceux appliqués sur les enroulements haute-tension doivent être appliqués sur les enroulements basse-tension. D'autre part, les facteurs de surtension sur d'autres enroulements (par exemple: le tertiaire) peuvent être supérieurs à ceux appliqués sur les enroulements principaux.

### **b) Mesure des décharges partielles**

Les décharges partielles doivent être observées et mesurées selon la méthode indiquée ci-dessous:

- Les mesures doivent être effectuées sur les bornes de ligne de tous les enroulements dont la classe de tension est égale ou supérieure à 72,5 kV;
- Chacun des canaux de mesure doit être étalonné avec des impulsions répétitives d'intensité égale à la limite maximale des décharges partielles (500 pC);
- Le niveau de bruit de fond doit être noté avant et après l'application de la tension à l'objet d'essai pour chacun des canaux de mesure des décharges partielles et il ne doit pas excéder 50 % de la limite maximale admissible;
- Les tensions d'apparition et d'extinction des décharges partielles doivent être notées (si applicable);
- Les décharges partielles doivent être visualisées d'une façon continue (sur oscilloscope, par exemple) et l'intensité doit être notée à intervalle de 5 minutes durant l'essai d'une heure et ce sur toutes les bornes à mesurer;
- Le niveau de décharges partielles doit être mesuré en pC avec une bande passante large telle que définie au document IEEE C57.113. Un oscilloscope doit être branché en permanence afin de pouvoir visualiser les décharges s'il y a lieu (localisation sur l'onde de tension appliquée, fréquence d'apparition, intensité etc..).

### **c) Critères de réussite**

L'essai est réussi si:

- Il n'y a pas d'effondrement de la tension d'essai;
- Il n'y a pas de décharges partielles soutenues à la tension maximale de service;
- Le niveau moyen continu des décharges partielles durant l'essai d'une heure ne dépasse pas 500 pC.
- L'augmentation du niveau des décharges durant l'essai d'une heure ne dépasse pas 100 pC;

- Il n'y a pas d'augmentation soutenue du niveau de décharges durant les 20 dernières minutes de l'essai;
- Si une augmentation du niveau des décharges partielles est observée durant les 20 dernières minutes, l'essai doit être prolongé d'au moins 20 minutes afin de suivre l'évolution des décharges. Si les décharges observées dépassent les critères de réussite, l'essai doit être prolongé ou repris depuis le début, en incluant la période de précontrainte de 7200 cycles;
- Si durant la période d'une heure une augmentation supérieure à 100 pC est observée, l'essai doit être soit prolongé ou répété. Il peut être prolongé jusqu'à ce que le niveau de décharges et l'augmentation ne dépassent pas les valeurs maximales acceptables pendant une période d'une heure pour chaque borne. Si l'on préfère répéter l'essai plutôt que de le prolonger, on devra également répéter l'essai à la tension d'essai maximale de l'appareil pendant 7 200 cycles;
- Des décharges continues de durée quelconque et survenant à intervalles irréguliers peuvent être acceptées jusqu'au niveau de 500 pC s'il est démontré durant l'essai que le niveau moyen n'a pas augmenté.

Il convient de négliger des pointes qui surviennent occasionnellement. De plus, l'apparition de décharges sporadiques, c'est-à-dire des décharges isolées, non répétitives (moins d'une décharge à la minute) et de forte amplitude ( $\geq 1000$  pC) ne doivent pas être considérées comme un signe de détérioration de l'isolation. Des décharges sporadiques de forte amplitude ( $\geq 1000$  pC) dont le taux d'occurrence est supérieur à une décharge par minute est inacceptable. Dans ces conditions, l'installation des sondes acoustiques sur la cuve du transformateur est essentielle afin de pouvoir discriminer la nature et la provenance des décharges (externes ou internes). Si ces décharges sont internes, le transformateur n'est pas acceptable. Si ces dernières sont externes, l'arrangement du montage d'essais doit être modifié et l'essai repris.

### 3.19 Essai de mesure du facteur de puissance de l'isolation

La mesure du facteur de puissance de l'isolation doit être réalisée selon les modalités de l'article 10.10 de la norme IEEE C7.12.90

### 3.20 Mesure de l'impédance (linéarité) et des pertes des inductances shunt

Cet essai doit être effectué conformément à l'article 10.4 de la norme IEEE C57.21. On doit mesurer l'impédance équivalente (ratio  $V/I_{\text{eff}}$ ) à 100 % et 105 % de la tension assignée.

Ces deux mesures se font une à la suite de l'autre, l'impédance étant simplement le rapport de la tension mesurée aux bornes de l'inductance sur le courant efficace qui circule dans celle-ci lorsque l'inductance est alimentée à la tension et fréquence assignée.

La linéarité de l'inductance doit être déterminée par une méthode directe si les installations d'essais le permettent ou par une méthode indirecte telle que décrite à la clause 10.9 de la norme IEEE C57.21. Dans le cas de la méthode indirecte, les modalités d'essais suivantes s'appliquent:

- Mesure de la résistance c.c. à froid, avant essai;

- L'inductance shunt doit être chargée à l'aide d'un courant c.c. dont la valeur doit dépasser 1,5 fois le courant nominal crête de l'inductance. La durée pendant laquelle l'inductance doit supporter ce courant c.c. doit être limitée le plus possible afin d'éviter tout échauffement excessif de l'enroulement;
- Une fois le niveau de courant atteint, l'inductance doit être court-circuitée au travers d'un shunt de faible valeur ohmique
- Une fois l'inductance court-circuitée, la source à courant continu doit être débranchée afin de décharger l'inductance à travers le shunt de faible valeur ohmique branchée à ses bornes;
- Le courant de décharge circulant dans la résistance de décharge doit être enregistré de façon continue jusqu'à ce que l'inductance soit complètement déchargée;
- La tension résultante aux bornes de la résistance totale du circuit de décharge (incluant le câblage, le shunt de mesure et l'enroulement) est égale à la tension aux bornes de l'inductance et correspond à  $L \times (di/dt)$ ;
- À partir de l'oscillogramme de courant obtenu durant la décharge, il est possible d'évaluer en tout point la variation de l'impédance " $X_L$ " en fonction du courant et d'en vérifier ainsi la linéarité. Le courant efficace résultant doit être comparé à celui qui aurait été obtenu avec un courant sinusoïdal pur (sur une inductance linéaire non-saturable) et l'écart entre ces deux courants ne doit pas différer de plus de 1% pour des tensions appliquées de 105% et moins et de moins 5% pour des tensions assignées de 150% et moins;

Note: La variation instantanée de l'inductance est non-linéaire avec la tension appliquée. Ceci résulte en un courant déformé par rapport à celui résultant d'une inductance linéaire non-saturable. Ce n'est pas la variation instantanée de l'inductance qu'il faut comparer mais plutôt la variation du courant efficace résultant de la surexcitation par rapport à celui qui aurait été produit par une inductance linéaire non-saturable. Une telle situation donne généralement une réduction de l'inductance à 150% de la tension appliquée supérieure à 5% mais le courant efficace résultant de l'onde déformée n'est pas augmenté de plus de 5%.

- Mesure de la résistance c.c. à chaud, après essai.

La valeur de la résistance de l'enroulement à utiliser pour les calculs doit être la résistance moyenne calculée à partir des résistances c.c. à froid avant essai et à chaud après essai.

La linéarité doit être vérifiée pour les valeurs suivantes: 100 %, 105 %, 120 % et 150 % du courant assigné.

L'impédance, la linéarité et les pertes d'une inductance triphasée doivent être mesurées avec une source triphasée. Si le courant dans les trois phases n'est pas balancé, on doit prendre la valeur moyenne des courants dans les trois phases pour les calculs d'impédances et des pertes.

Étant donné le faible facteur de puissance des inductances shunts, les pertes doivent être mesurées à l'aide d'un wattmètre étalonné, conçu à cet effet, et avec une précision supérieure à 3 %.

Les pertes mesurées ( $P_m$ ) sont les pertes totales comprenant les pertes  $RI^2$ , les pertes vagabondes ainsi que les pertes fer ( $P_f$ ).

Les pertes mesurées à la température de l'enroulement ( $T_m$ ) doivent être corrigées pour la température de référence ( $T_f = 75\text{ °C}$ ). A cet effet, l'inductance est alimentée pendant au moins 15 minutes à la tension nominale et à la fin de cette période, les pertes sont mesurées et on procède à la mesure de résistance à chaud comme lors de l'essai d'échauffement. Cette mesure permettra de déterminer la température de mesure des pertes.

Une seconde mesure est réalisée à 105 % de la tension nominale en suivant la même procédure.

Les pertes doivent être corrigées par la méthode suivante:

$$P_{\text{corrigée } 75\text{ °C}} = [I_m^2 R_m (T_f + T_k) / (T_m + T_k)] + [(P_m - I_m^2 R_m - P_f) (T_m + T_k) / (T_f + T_k)] + P_f$$

Où:

$T_k$  = Constante: 234,5 °C pour le cuivre;

$P_f$  = Pertes fer calculées et déclarées par le fabricant.

Les critères d'acceptation de cet essai sont:

- L'impédance équivalente mesurée à 105% de la tension assignée (ratio  $V/I_{\text{eff}}$ ) ne doit pas différer de plus de 1% de la valeur mesurée à 100 % de la tension assignée;
- L'impédance équivalente mesurée de 105 % à 150 % de la tension assignée (ratio  $V/I_{\text{eff}}$ ) ne doit pas excéder la valeur mesurée à 100% de la tension assignée de plus de 5 %;
- La puissance mesurée à 100 % de la tension assignée ne doit pas différer de plus de 2,5 % de la valeur assignée. Pour des unités fabriquées en même temps, la puissance ne doit pas différer de plus de 0,5 % entre les différentes unités.

### 3.21 Essai en tension appliquée sur les inductances de MALT et sur les inductances shunt

#### 3.21.1 Essai de courte durée pour les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées inférieures à 72,5 kV.

L'essai sur les inductances de mise à la terre et sur les inductances shunt dont la tension assignée est inférieure à 72,5 kV doit être fait selon les prescriptions de l'article 10.3.3.1 de la norme IEEE C57.21. Aucune mesure des décharges partielles n'est requise pour ces appareils.

La tension d'essai doit être élevée à deux fois la tension de l'enroulement essayé. La tension d'essai doit être appliquée pour une durée de 7200 cycles sans jamais dépasser 60 secondes.

L'essai est réussi s'il ne se produit pas d'effondrement de la tension d'essai.

### **3.21.2 Essai en tension appliquée avec mesures de décharge partielles pour les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées égales ou supérieures à 72,5 kV.**

L'essai en tension appliquée et la mesure des décharges partielles doivent être faits de la façon suivante sur toutes les inductances de MALT et les inductances shunt dont la classe de tension est égale ou supérieure à 72,5 kV, et ce quelle que soit leur puissance assignée.

#### **a. Application de la tension d'essai**

Pendant l'essai, l'inductance doit être alimentée telle qu'elle le sera en service avec le neutre mis solidement à la terre. Pour les inductances triphasées, l'inductance doit être alimentée à l'aide d'une source triphasée.

Pour les inductances de tensions assignées de 72,5 kV à 330 kV inclusivement, la tension de précontrainte spécifiée doit être appliquée pendant 7200 cycles et doit être suivie, sans interruption de la tension, de la tension de mesure des décharges partielles pour une durée d'une heure. La tension d'essai doit être appliquée pendant une heure quelle que soit la fréquence de la tension d'essai. Le niveau de la tension d'essai (1 heure) est précisé au tableau P1.6 de la spécification technique normalisée (SN-14.1) ou à la spécification particulière. Pour les inductances shunt 735 kV, aucune tension de précontrainte 7200 cycles n'est spécifiée compte-tenu des limitations des laboratoires d'essais.

#### **b. Mesure des décharges partielles**

Les prescriptions du paragraphe 3.18.2 b) sont applicables.

#### **c. Critères de réussite**

Les prescriptions du paragraphe 3.18.2 c) sont applicables.

### **3.22 Mesure du niveau de bruit audible des inductances shunt**

Cet essai individuel doit être réalisé sur chacune des inductances shunt monophasée ou triphasée. Cette mesure peut être effectuée à froid et sans les radiateurs selon les prescriptions de la norme CEI 60076-10 avec les compléments suivants.

La mesure du niveau de bruit doit être réalisée à une tension de 105 % de la tension nominale de l'inductance shunt.

Note: La tension d'essai doit être mesurée avec un voltmètre répondant à la valeur moyenne de la tension mais affichant une mesure de tension efficace.

Note: À froid signifie: « à la température ambiante ». À chaud signifie : « l'élévation de la température de l'huile au sommet doit être égale à celle atteinte lors de l'essai d'échauffement avec une tolérance de  $\pm 10$  °C ».

Si la mesure de bruit audible est effectuée à froid et sans les radiateurs, un critère spécifique au niveau de bruit maximal admissible doit être convenu entre le fabricant et Hydro-Québec. Le critère à utiliser doit être démontré à partir de résultats expérimentaux comparant les niveaux de bruit audible obtenus à chaud et à froid, avec et sans système de refroidissement. Les modalités de cet essai de comparaison doivent faire l'objet d'une entente entre le fabricant et Hydro-Québec.



Toute modification de la conception et/ou du système de refroidissement implique une reprise de l'essai de niveau de bruit audible afin d'établir un nouveau facteur de correction.

Dans le cas où la mesure de bruit à froid d'un appareil dépasse le niveau établi, le fabricant doit effectuer une nouvelle mesure de bruit à chaud. Dans ce cas, les radiateurs doivent être installés pour mesurer le niveau de bruit à chaud afin que l'exigence indiquée dans la spécification technique normalisée SN-14.1 soit entièrement satisfaite.

La mesure de bruit audible doit se faire par une mesure d'intensité acoustique et par la réalisation d'une évaluation de la puissance acoustique, le tout selon les prescriptions de la norme CEI 60076-10.

## **4. Essais spéciaux**

### **4.1 Tenue au courant de court-circuit des transformateurs**

La norme CEI 60076-5 est applicable avec les modifications et les prescriptions particulières suivantes.

#### **4.1.1 Généralités**

Un appareil peut être soumis à un essai de tenue au courant de court-circuit. Cet essai est réalisé dans le but de vérifier que les appareils sont conçus et construits pour supporter sans dommage les contraintes mécaniques et thermiques reliées au courant de court-circuit.

Note: Au moment de l'émission du présent document, la puissance disponible des laboratoires d'essais pour réaliser les essais de tenue au courant de court-circuit des transformateurs de puissance est limitée à environ 1000 MVA en monophasé et à 2000 MVA en triphasé.

Pour les besoins de définition des prescriptions et critères d'essais, les transformateurs triphasés ou les groupes triphasés sont classés en trois catégories selon la puissance nominale:

Catégorie I:  $\leq 2\,500$  kVA

Catégorie II: 2 501 kVA à 100 000 kVA

Catégorie III:  $> 100$  MVA

#### **4.1.2 Courant de court-circuit symétrique**

Le courant de court-circuit symétrique doit être calculé en tenant compte de l'impédance du transformateur et de l'impédance du réseau.

Pour les transformateurs des catégories I et II, l'impédance du réseau doit être considérée comme nulle dans le calcul du courant de court-circuit si elle est inférieure ou égale à 5 % de l'impédance du transformateur.

À moins d'indication contraire, la puissance de court-circuit du réseau est définie à la spécification technique normalisée SN 14.1 (tableau P1.4). Pour les cas particuliers, la puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où le transformateur sera installé doit être définie à la spécification technique particulière.

L'essai doit être réalisé en simulant les pires conditions de défaut. Le pire défaut se produit lors d'un court-circuit triphasé sur l'un ou l'autre des enroulements principaux. Pour le tertiaire (si applicable), des transformateurs 330 kV et moins, le pire défaut survient lors d'un défaut triphasé au tertiaire. Pour les transformateurs 765 kV, le défaut triphasé au tertiaire n'est pas considéré et le pire cas devient le courant de circulation résultant d'un défaut phase-terre sur l'enroulement basse tension lorsque le transformateur est alimenté en triphasé.

Pour les transformateurs triphasés, la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique est définie comme suit:

$$I_{cc(sym)} = \frac{U_{p-d}}{\sqrt{3}(Z_T + Z_r)}$$

Où

$U_{p-d}$ : Tension pré-défaut (105 %  $U_n$ )

$Z_t$ : impédance du transformateur en ohms

$Z_r$ : impédance du réseau en ohms

Les contraintes appliquées à l'enroulement tertiaire doivent être calculées, cas par cas, en considérant soit un défaut triphasé ou un défaut monophasé à la terre à proximité de la borne de l'enroulement primaire ou de la borne de l'enroulement secondaire, selon le cas, tel qu'indiqué précédemment. Les valeurs résultantes du courant de court-circuit doivent être données par le soumissionnaire dans le questionnaire technique.

#### 4.1.3 Courant de court circuit asymétrique

Pour la tenue mécanique, la valeur crête du courant de court-circuit doit être calculée selon l'équation suivante:

$$I_{cc(asym)} = I_{cc} \left[ 1 + e^{-\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \frac{R}{X}} \sin \phi \right]$$

Où

$I_{cc}$ : est le courant symétrique défini en 4.1.2;

$\phi$ : correspond à  $\arctan X/R$  (radians);

$X$ : la somme des réactances du transformateur et du réseau en ohms;

$R$ : la somme des résistances du transformateur et du réseau en ohms.

Note: La valeur de la résistance du transformateur doit être déterminée pour une température de référence de 75°C.

#### 4.1.4 Démonstration de la tenue thermique au court-circuit

La tenue thermique doit être vérifiée par calcul. Le courant d'essai est celui défini en 4.1.2 du présent document. La durée du court-circuit est de 2 secondes.

La température moyenne la plus élevée  $\theta_1$  atteinte par l'enroulement après un court-circuit doit être calculée d'après les équations suivantes:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 235)}{\left(\frac{106000}{J^2 t} - 1\right)} \quad \text{pour les enroulements en cuivre}$$

Où

$\theta_0$ : température initiale en °C;

$J$ : densité de courant (symétrique) de court-circuit (A eff /mm<sup>2</sup>);

$t$ : durée en secondes (2 secondes).

La température maximale admissible de chaque enroulement suivant un court-circuit pour une classe d'isolation de 105 °C (classe thermique A) ne doit pas excéder 250 °C pour les enroulements de cuivre.

Note: Lorsqu'une classe d'isolation autre que la classe (A) est utilisée pour un transformateur immergé dans l'huile, des valeurs différentes de températures maximales peuvent être acceptées après entente entre le manufacturier et Hydro-Québec.

#### 4.1.5 Démonstration de la tenue mécanique au court-circuit

##### a) Généralités

La tenue mécanique des transformateurs doit être démontrée par des essais, à moins que des essais n'aient déjà été réalisés sur un appareil d'une même famille. Dans un tel cas, une validation des calculs et une comparaison de conception de l'appareil essayé avec l'appareil en commande devraient permettre de valider les performances du transformateur en commande.

##### b) Arrangements et conditions pour les essais

Le transformateur essayé doit être neuf et muni de ses propres traversées. Les accessoires reliés à la protection de l'appareil tels que le relais de gaz et la valve de surpression doivent être installés sur le transformateur pour l'essai.

La température de l'enroulement doit être comprise entre +10 °C et +40 °C avant les essais de tenue au courant de court-circuit. Durant l'essai, la température de l'enroulement peut augmenter considérablement due à la circulation du courant de court-circuit. Il faut en tenir compte lors d'essais pour les transformateurs de la catégorie I ( $\leq 2500$  kVA).

**c) Mesures à effectuer avant l'essai de court-circuit**

Les essais doivent être précédés de la mesure des impédances de court-circuit, d'une mesure du courant à vide et la mesure des pertes à vide. La variation du courant à vide peut être une indication de détérioration du noyau.

Sans être considérées comme un critère précis, une mesure de la réponse en fréquence (FRA) peut contribuer à diagnostiquer l'état du transformateur suite aux essais.

**d) Réalisation de l'essai**

Le courant d'essai est déterminé selon la méthode de calcul prescrite aux articles 4.1.2 et 4.1.3. La tolérance sur le courant d'essai crête asymétrique est de -0 %, +5 %. La tolérance sur le courant d'essai symétrique est de  $\pm 10\%$ .

La fréquence du courant d'essai doit être normalement de 60 Hz. Pour différentes raisons, si l'essai doit être réalisé avec une fréquence différente de 60 Hz, il doit faire l'objet d'un accord avec Hydro-Québec.

Les prescriptions des articles 4.2.5 à 4.2.7.3 de la norme CEI 60076-5 sont applicables pour la réalisation de l'essai.

Le nombre d'essai à réaliser est:

- Pour les transformateurs monophasés: trois (3). Si applicable, la position du changeur de prises doit être pour un essai sur la prise médiane et pour les deux autres essais sur chacune des prises extrêmes;
- Pour les transformateurs triphasés: neuf (9), dont trois essais sur chacune des phases. Si applicable, la position du changeur de prises doit être différente pour chacune des phases essayées. Une phase doit être essayée sur la prise médiane tandis que les deux autres phases sur chacune des prises extrêmes.

La durée de chaque essai est de 0,5 seconde pour les transformateurs de la catégorie I et de 0,25 seconde pour les transformateurs des catégories II et III. La tolérance acceptable sur la durée des essais est de  $\pm 10\%$ .

Le courant et la tension d'essai doivent être enregistrés durant chaque essai. Une mesure d'impédance de court-circuit doit être effectuée après chacun des essais. Une mesure de la réponse en fréquence (FRA) doit être effectuée avant et après tous les essais.

Avant et après tous les essais de tenue au courant de court-circuit, on doit prélever des échantillons d'huile pour l'analyse des gaz dissous en haut et en bas de la cuve principale.

Après les essais, le transformateur doit être décuvé pour inspection de la partie active, afin de déceler des défauts visuels éventuels tels que les déformations, déplacements ou blocage qui pourraient affecter la fiabilité à long terme du transformateur. Tous les essais de type et de routine doivent être effectués après les essais de tenue au court-circuit et après le décuvage.

### e) Critères de réussite de l'essai

Les critères de réussite énoncés au paragraphe 4.2.7.4 de la norme CEI 60076-5 sont applicables moyennant quelques points complémentaires. En résumé, le transformateur a réussi les essais si les conditions suivantes sont satisfaites:

- Les oscillogrammes de tension et de courant enregistrés lors des essais ne montrent pas de changements soudains;
- L'inspection après décuvage ne révèle aucun dommage mécanique tel que déplacement des enroulements, des connexions ou des structures de support ou du noyau ou toutes autres anomalies pouvant compromettre le bon fonctionnement du transformateur;
- Tous les essais de type et de routine réalisés après les essais de tenue au courant de court-circuit sont réussis, avec succès;
- Les analyses de gaz dissous dans l'huile ne doivent montrer la présence de défauts internes;
- Aucune trace d'arc ne doit être observée lors de l'inspection interne;
- Le courant à vide mesuré avant et après les essais ne doit pas augmenter de plus de 5 % pour les conceptions à noyau empilé. et de plus de 25 % pour les conceptions à noyau bobiné;
- La variation de l'impédance de court-circuit mesurée en ohms après les essais ( $\Delta Z$ ) ne doit pas dépasser les limites indiquées ci-dessous:

#### **Transformateurs de catégorie I et II ( $\leq 100$ MVA):**

La variation acceptable de l'impédance ( $\Delta Z$ ) doit être égale ou inférieure à 2 % pour tout transformateur à bobinages circulaires concentriques.

Toutefois, pour les transformateurs de 10 MVA et moins dont l'enroulement basse tension est constitué d'un feuillard métallique et dont l'impédance est supérieure à 3 %, une variation plus élevée n'excédant pas 4 % peut être acceptable suivant un accord entre Hydro-Québec et le manufacturier.

La variation acceptable de l'impédance ( $\Delta Z$ ) doit être égale ou inférieure à 7,5 % pour tout transformateur à bobinages concentriques non circulaires dont l'impédance est supérieure à 3 %. La valeur de 7,5 % peut être réduite suivant un accord entre Hydro-Québec et le manufacturier.

Note: Pour les transformateurs à bobinages concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit inférieure à 3%, la variation acceptable d'impédance ne peut être spécifiée. Basé sur la pratique, certains types de construction pourraient varier jusqu'à au-delà de 2,5 à 5 fois l'impédance de court circuit.

#### **Transformateurs de catégorie III ( $> 100$ MVA):**

La variation de l'impédance de court-circuit mesurée en ohms après les essais ( $\Delta Z$ ) ne doit pas dépasser 1 %.

Si la variation de l'impédance est comprise entre 1 % et 2 %, un décuvage suivi d'un démantèlement complet des bobines, permettant un examen approfondi, sont requis.

Sans être considérée comme un critère précis, l'analyse de la réponse en fréquence (FRA: Frequency Response Analysis) est un outil additionnel dans l'évaluation du comportement du transformateur lors des essais.

Si la variation de l'impédance excède les valeurs prescrites, le transformateur a échoué l'essai. Suite au décufrage et au démantèlement des bobines, il peut s'avérer nécessaire d'apporter des modifications à la conception. Si tel est le cas, tous les essais de type et de routine, incluant l'essai de court-circuit, doivent être repris.

#### **4.2 Essai de tenue au courant de défaut sur les inductances de MALT**

Un essai de tenue au courant de défaut pour le mode de fonctionnement homopolaire doit être réalisé pour les inductances de MALT. L'essai doit être réalisé en court-circuitant les 3 bornes haute-tension et en alimentant ces bornes et la borne de neutre avec une source de puissance monophasée à 60Hz. Trois essais doivent être réalisés, les deux premiers d'une durée de 0,25 seconde tandis que le troisième essai doit être d'une durée égale à celle spécifiée à la SN14.4 ou à celle indiquée à la spécification particulière. Le courant de chacun des essais doit être pleinement asymétrique et une crête d'au moins 2,75 fois le courant de défaut assigné efficace doit être obtenue.

Les critères de réussite applicables aux inductances de MALT sont ceux décrits en 4.1.5 e).

Pour les inductances de MALT pourvus d'un enroulement additionnel pour l'alimentation de services auxiliaires, la démonstration de la tenue au courant de court-circuit de la fonction "transformateur" se fait séparément de celle associée à la fonction "inductance de MALT". Les modalités des essais de tenue au courant de court-circuit de la fonction "transformateur" doivent être conformes à celles décrites précédemment pour les transformateurs.

#### **4.3 Mesure des perturbations radioélectriques externes**

La mesure des perturbations radioélectriques externes ne s'applique qu'aux appareils de classe de tension égale ou supérieure à 245 kV. Cette mesure doit être réalisée conformément aux prescriptions de l'article 6.3 de la norme CEI 62271-1 ou de la NEMA CC-1. Cet essai permet de valider l'ensemble "traversées, raccords, anneaux pare effluves, etc."

Lors de la mesure, les traversées doivent être munies des raccords utilisés en service. Tous les accessoires normalement montés sur la cuve du transformateur en service doivent être installés. Les conducteurs d'alimentation doivent être de diamètre similaire à ceux prévus en service pour une distance d'au moins 1 mètre à partir des raccords. L'autre extrémité des conducteurs d'alimentation peut être blindée par un anneau pare-effluves.

Hydro-Québec est en mesure de fournir aux fabricants les raccords appropriés pour effectuer cet essai. Toute demande en ce sens doit cependant être adressée à Hydro-Québec au moins un mois à l'avance et ne doit concerner que les raccords non fournis par le fabricant.

Les critères d'acceptation sont les suivants:

**Tableau 8 – Critères de réussite des perturbations radioélectriques externes**

Prescriptions	Tension d'essai	Fréquence de mesure	Critères de réussite
NEMA CC-1	105 %Un	1MHz	500 $\mu$ volts
CEI 62271-1	110 %Un	0,5MHz	2500 $\mu$ volts

#### 4.4 Essais de tenue aux chocs de foudre et aux chocs de foudre coupés avec parafoudres sur les bornes de ligne

Ces essais peuvent être requis pour des applications particulières afin de représenter des conditions de service.

Lorsqu'applicables, ces essais doivent être réalisés sur chacune des bornes à l'exception de la borne de neutre et des bornes du tertiaire. La borne essayée ne doit pas être équipée de son parafoudre. Les bornes non soumises à l'essai de choc doivent être raccordées à des parafoudres plutôt que reliées à la terre. La tension apparaissant sur ces bornes, ainsi que le courant, doivent être mesurés. La série d'essais doit être effectuée avec et sans l'impédance d'onde simulant l'impédance d'onde de la ligne en parallèle avec le parafoudre. Les valeurs des impédances d'onde de la ligne à utiliser sont les valeurs maximales montrées au tableau 4.

Les essais doivent être réalisés en appliquant d'abord une onde pleine réduite à environ 50 % du niveau de choc requis. L'amplitude des essais suivants est augmentée par échelon d'environ 10 à 15 % jusqu'à atteindre 110 % du niveau de protection maximal spécifié 8 x 20  $\mu$ s pour le parafoudre prévu pour être installé sur la borne alimentée, voir tableau 2b de la SN17.3b). Pour les chocs coupés, la tension d'essais doit être 110% du niveau de protection maximal pour les ondes à front raide (1  $\mu$ s, voir tableau 2b de la SN17.3b). Une onde pleine suivie de deux ondes coupées et de deux ondes pleines doivent être appliquées.

## 5. Essais sur les composants

### 5.1 Essais de type sur les traversées

#### 5.1.1 Généralités

À moins d'indication contraire, les essais doivent être réalisés selon les prescriptions de la norme CEI 60137. Des mesures de la capacité, de la tangente delta et des décharges partielles doivent être réalisées avant et après les essais de chocs de foudre, de surtensions de manœuvre (si applicable) et de tenue à fréquence industrielle conformément aux prescriptions des articles 9.1 et 9.4 de la CEI 60137.

Les tensions à appliquer pour les essais diélectriques sont indiquées au tableau P1.7 de la SN14.1 ou de la SN14.4 pour les inductances de MALT.

De plus, tous les essais de conception, de type, de prélèvement et individuels des enveloppes en porcelaine ou en polymère des traversées doivent être réalisés selon les prescriptions des normes CEI 62155 ou CEI 61462. Pour les isolateurs en porcelaine, le mortier utilisé doit subir les essais de type et de prélèvement décrits à la spécification technique normalisée SN20.2.

Dans le cas de traversées prévues pour des installations avec barres blindées isolées à l'air, la performance diélectrique et d'échauffement de ces traversées doivent être démontrées par des essais de type simulant la barre blindée.

### **5.1.2 Essais de tenue de tension à fréquence industrielle à sec ou sous pluie**

L'essai de tenue à fréquence industrielle doit être effectué sous pluie pour les traversées de tensions assignées égales ou inférieures à 245 kV. La durée de l'essai est de 1 minute. L'essai doit être effectué selon les modalités de l'article 8.2 de la CEI 60137.

### **5.1.3 Essais de tenue à la tension de choc de foudre à sec**

Pour les traversées de tensions assignées égales ou supérieures à 145 kV, l'essai consiste à appliquer quinze ondes pleines de polarité positive, une onde pleine de polarité négative, cinq ondes coupées de polarité négative et quatorze ondes pleines de polarité négative. Les critères de réussite énoncés à l'article 8.3 de la CEI 60137 s'appliquent.

Pour les traversées dont la classe de tension est égale ou inférieure à 72,5 kV, seuls les essais avec ondes pleines sont requis.

### **5.1.4 Essais de tenue à la tension de choc de manœuvre à sec ou sous pluie**

Cet essai doit être effectué sous pluie pour les traversées de tensions assignées égales ou supérieures à 330 kV. L'essai doit être effectué selon les modalités de l'article 8.4 de la CEI 60137.

L'essai consiste à appliquer quinze ondes de polarité négative et quinze ondes de polarité positive. La forme d'onde doit être de  $250 \pm 50 \mu\text{s} / 2500 \pm 1500 \mu\text{s}$ .

L'essai est réussi s'il ne se produit pas plus de deux contournements par série de quinze chocs.

### **5.1.5 Essai de stabilité thermique**

Cet essai doit être réalisé conformément au paragraphe 8.5 de la norme CEI 60137.

### **5.1.6 Essai d'échauffement**

Cet essai doit être réalisé conformément au paragraphe 8.7 de la norme CEI 60137.

### **5.1.7 Vérification de la tenue au courant thermique de courte durée**

Le fabricant doit fournir un calcul conforme au paragraphe 8.8 de la norme CEI 60137.

### **5.1.8 Essai de tenue en flexion**

Cet essai doit être réalisé conformément au paragraphe 8.9 de la norme CEI 60137. La valeur de l'effort à appliquer est donnée au paragraphe 5.1.3 de la spécification technique normalisée SN-14.1 ou dans la spécification technique particulière.



### 5.1.9 Essai d'étanchéité

Selon le type de traversée, cet essai doit être effectué conformément aux prescriptions des paragraphes 8.10, 8.11 ou 8.12 de la norme CEI 60137.

### 5.1.10 Essai de cyclage thermique à basse et haute température

Essai de type spécial qui peut être réalisé à la demande d'Hydro-Québec. Les modalités d'essais devront faire l'objet d'une entente entre le fabricant et Hydro-Québec.

## 5.2 Essais individuels des traversées

Les essais individuels doivent être réalisés conformément aux prescriptions énoncées à la norme CEI 60137. Les essais individuels suivants doivent être exécutés sur les traversées:

- Mesure du facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ ) et de la capacité et avant et après l'essai de tenue à fréquence industrielle (paragraphe 9.1 de la CEI 60137);
- Essai de tenue aux chocs de foudre (paragraphe 9.2 de la CEI 60137) Cet s'applique à toutes traversées de tensions assignées 145 kV et plus. La séquence d'essais suivante est demandée:
  - Une onde réduite de polarité négative;
  - Cinq ondes pleines de polarité négative;
- Essai de tenue à fréquence industrielle, à sec (paragraphe 9.3 de la CEI 60137);
- Mesure de l'intensité des décharges partielles internes avant et après l'essai de tenue à fréquence industrielle (paragraphe 9.4 de la CEI 60137);
- Essai d'isolement des prises (paragraphe 9.5 de la CEI 60137);
- Essai d'étanchéité (paragraphes 9.6, 9.7, 9.8, 9.9 de la CEI 60137),
- Examen visuel et vérification des dimensions (paragraphe 9.10 de la CEI 60137).

## 5.3 Essai de type sur les transformateurs de courant

Dans le cas des transformateurs de courant dont la classe de précision TPY, on doit effectuer l'essai de mesure de l'erreur en régime transitoire. Cet essai doit être réalisé conformément aux prescriptions énoncées dans la spécification technique normalisée SN-16.1 d'Hydro-Québec et adapté selon la classe précision demandée à la SN14.1

## 5.4 Essais individuels sur les transformateurs de courant

Les essais individuels suivants doivent être effectués sur chacun des transformateurs de courant:

- Vérification du rapport de transformation à toutes les prises et, préférablement, au courant assigné;
- Vérification de la polarité;

- Vérification de la précision pour les transformateurs de courant dont une classe de précision pour la mesure est donnée;
- Vérification des caractéristiques magnétiques des noyaux pour lesquels une classe de précision relative à la protection est donnée;
- Essai de tenue à 2200 volts à 60 Hz pendant 1 minute sur les enroulements et le câblage auxiliaire.

Note: Si les classes de précision sont définies selon l'IEEE, les essais de vérification de la précision et de vérification des caractéristiques magnétiques doivent être réalisés selon les prescriptions de la norme IEEE C57.13. Si les classes de précision sont définies selon la CEI, les essais de vérification de la précision et de vérification des caractéristiques magnétiques doivent être réalisés selon les prescriptions des normes CEI 60044-1 et 60044-6.

## 5.5 Essais de type sur les changeurs de prise

Ces essais doivent être réalisés conformément aux prescriptions de la norme CEI 60214-1.

Les essais suivants doivent être effectués sur le changeur de prises en charge proposé:

- Essai d'échauffement des contacts (paragraphe 5.2.1 de la CEI 60214-1);
- Essai d'endurance comprenant 50,000 manoeuvres au courant assigné (paragraphe 5.2.2.1 de la CEI 60214-1);
- Essai de pouvoir de coupure comprenant 40 manoeuvres au double du courant assigné (paragraphe 5.2.2.2 de la CEI 60214-1);
- Essai au courant de court-circuit (paragraphe 5.2.3 de la CEI 60214-1);
- Essai des impédances de passage (paragraphe 5.2.4 de la CEI 60214-1);
- Essai d'endurance mécanique comprenant 500,000 manoeuvres dont 100 à -40 °C (paragraphe 5.2.5 de la CEI 60214-1);
- Essai de succession des opérations (paragraphe 5.2.5.2 de la CEI 60214-1);
- Essai de tenue à la pression et au vide (paragraphe 5.2.5.3 de la CEI 60214-1);
- Essai d'étanchéité (paragraphe 5.2.5.4 de la CEI 60214-1);
- Essais diélectriques (paragraphe 5.2.6 de la CEI 60214-1).

## 5.6 Essais individuels sur les changeurs de prise

Ces essais doivent être effectués conformément aux prescriptions de la norme CEI 60214-1.

Les essais suivants doivent être réalisés sur chaque changeur de prises en charge:

- Essai mécanique comprenant 10 cycles de fonctionnement complet (paragraphe 5.3.1 de la CEI 60214-1);
- Essai de succession des opérations (paragraphe 5.3.2 de la CEI 60214-1);

- Essai diélectrique des circuits auxiliaires à 2 kV eff, 50 ou 60 Hz, pendant 1 minute (paragraphe 5.3.3 de la CEI 60214-1);
- Essai sous pression et sous vide (5.3.4 de la CEI 60214-1).

---

## **Annexe A Exigences d'essais pour les traversées de remplacement et renseignements à fournir lors d'appel d'offres**

### **A.1 Champ d'application**

La politique d'essais de la présente annexe s'applique seulement aux traversées de remplacement montées sur des transformateurs existants dont les traversées d'origine ne sont plus disponibles. Les traversées visées ici s'appliquent aux tensions variant de 12 kV à 330 kV. Les traversées dont la classe de tension est de 765 kV doivent être homologuées.

### **A.2 Exigences**

Les critères de performance sont basés principalement sur la norme CEI 60137 et doivent satisfaire les exigences des spécifications techniques normalisées. Aussi, certaines exigences peuvent varier selon la quantité de traversées à approvisionner.

Les essais individuels ainsi que les essais de type sont décrits en détail dans les articles suivants.

### **A.3 Essais individuels**

Les essais individuels sont requis pour chacune des commandes, peu importe le nombre de traversées à approvisionner. Le rapport donnant les résultats des essais individuels devra accompagner les traversées à la livraison.

Le tableau A.1 résume les exigences d'Hydro-Québec pour les différentes applications.

**Tableau A.1 - Essais individuels sur les traversées de remplacement**

Essais	Exigences Hydro-Québec
Mesure du facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ ) et de la capacité à la température ambiante (selon l'article 9.1 de la CEI 60137)	$U_m^1 \leq 36$ kV: mesurer C1 et $\tan \delta$ à 10 kV et à $1,05 U_m/\sqrt{3}$ : mesurer C2 et $\tan \delta$ à 500 V $U_m \geq 52$ kV: mesurer C1 et $\tan \delta$ à 10 kV, et à $1,05 U_m/\sqrt{3}$ et $U_m$ : mesurer C2 et $\tan \delta$ à 2 kV Valeurs maximales de la $\tan \delta$ : Papier imprégné d'huile $\leq 0,7 \%$ à 20 °C Papier imprégné de résine $\leq 0,85\%$ (tel que ANSI C57.19.01-2000)
Essai de tenue à la tension de choc de foudre à sec (BIL), essais d'échantillonnage, applicables seulement pour $U_m \geq 145$ kV (selon l'article 9.2 de la CEI 60137)	$U_m \geq 145$ kV: 5 ondes pleines négatives Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1 <u>Règle d'échantillonnage</u> : 1 traversée par lot de 6 ou moins, en cas d'échec, 2 traversées additionnelles du même lot doivent être essayées, en cas d'échec additionnel, toutes les traversées du lot doivent être essayées.
Essai de tenue sous tension à fréquence industrielle, à sec (selon l'article 9.3 de la CEI 60137)	Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1. Durée d'application de la tension d'essai: 1 minute
Mesure de l'intensité des décharges partielles (selon l'article 9.4 de la CEI 60137)	Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1. Mesure des décharges partielles à la tension de tenue 1 minute 60 Hz: aucun niveau maximal spécifié. Niveau maximal des décharges partielles à $U_m$ : 10 pC Niveau maximal des décharges partielles à $1,5 U_m/\sqrt{3}$ : 10 pC Niveau maximal des décharges partielles à $1,05 U_m/\sqrt{3}$ : 5 pC
Essai d'isolation des prises (selon l'article 9.5 de la CEI 60137)	Prise de mesure: 2 kV c.a., 1 minute. Prise de tension: 20 kV c.a., 1 minute.
Essais de pression interne et d'étanchéité (selon les articles 9.6, 9.7, 9.8 et 9.9 de la CEI 60137).	Selon la CEI 60137 ou selon la méthode suivante: Une pression de 135 kPa d'azote doit être appliquée pour une durée de 15 minutes, la traversée étant immergée sous l'eau.
Examen visuel et vérification des dimensions (selon l'article 9.10 de la CEI 60137)	Applicable.

<sup>1</sup> :  $U_m$  est défini comme la classe de tension assignée (nominale)

## A.4 Essais de type

Hydro-Québec accepte les essais de type déjà effectués sur des traversées identiques. À défaut d'avoir été réalisés selon la norme CEI 60137, ces essais devront avoir été exécutés selon l'une des normes suivantes: IEEE C57.19.00, EEMAC GL1-3 ou CAN/CSA C88.1.

Le rapport donnant les résultats des essais de type et les dimensions physiques devra être fourni au moment de la commande. Si certains essais n'étaient pas réalisés, ou non acceptables, le fournisseur devra satisfaire les exigences d'Hydro-Québec décrites au tableau 2. De la même façon, Hydro-Québec se réserve le droit d'exiger des essais de type pour des commandes impliquant une grande quantité de traversées d'une même conception.

Les essais d'échauffement et de stabilité thermique sont très coûteux. Pour éviter de réaliser les essais, Hydro-Québec préfère augmenter le courant nominal de la traversée à au moins 125% du courant nominal permanent requis selon l'application.

Le tableau 2 résume les exigences d'essais de type d'Hydro-Québec pour les traversées de remplacement.

**Tableau A.2 - Essais de type sur les traversées de remplacement**

Essais	Exigences Hydro-Québec
Essai de tenue sous tension à fréquence industrielle sous pluie, applicable seulement pour $U_m \leq 245$ kV (selon l'article 8.1 de la CEI 60137)	Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1. Durée d'application de la tension d'essai: 1 minute; Caractéristiques de la pluie artificielle: selon le tableau 1 de la CEI 60060-1.
Essai de tenue à la tension de choc de foudre à sec (BIL) (selon l'article 8.3 de la CEI 60137)	Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1. Séquence d'essais: 15 ondes pleines de polarité positive, 1 onde pleine de polarité négative, 5 ondes coupées de polarité négative et 14 ondes pleines de polarité négative.
Essai de tenue à la tension de choc de manœuvre sous pluie (SIL), applicable seulement pour $U_m \geq 330$ kV (selon l'article 8.4 de la CEI 60137)	Tension d'essai selon la spécification normalisée SN-14.1. Séquence d'essais: 15 ondes pleines de polarité positive et 15 ondes pleines de polarité négative. Caractéristiques de la pluie artificielle: selon le tableau 1 de la CEI 60060-1.
Essai d'échauffement (selon l'article 8.7 de la CEI 60137 mais avec les paramètres spécifiques d'Hydro-Québec.	Température ambiante maximale: 30 °C; Échauffement de l'huile d'immersion: 65 °C; Échauffement maximal admissible du point chaud: 75 °C; Température maximale admissible du point chaud: 105 °C.
Essai de stabilité thermique: (selon l'article 8.5 de la CEI 60137)	Évaluer les rapports existants si ceux-ci sont disponibles.
Essai de tenue à la flexion:	Force appliquée: selon les valeurs prescrites à la SN14.1 Force appliquée uniquement sur la partie air Pression d'huile simultanée: 70 kPa. Durée d'application de la force de flexion: 1 minute
Vérification de la tenue au courant thermique de courte durée (selon l'article 8.8. de la CEI 60137)	Durée du court-circuit: 2 secondes

Notes importantes

- Des essais de type complets devront être effectués, selon la norme CEI 60137, en vue d'homologuer des traversées si celles-ci devaient équiper des appareils neufs. Pour chacun des types de traversées un rapport d'essais complet devra être fourni à Hydro-Québec;
- Pour toute commande, Hydro-Québec se réserve le droit d'exiger un certificat de conformité concernant l'huile isolante et les garnitures d'étanchéité;

- L'huile isolante doit satisfaire tous les critères de l'article 5.2 de la SN-14.1h;
- Les garnitures d'étanchéité ou joints toriques doivent répondre aux spécifications décrites à l'article 5.4.7 de la SN14.1h. Le Viton rencontre aussi les exigences d'Hydro-Québec.

#### **A.5 Documentation à fournir lors d'appel d'offres**

Un dessin détaillé comprenant toutes les dimensions nécessaires à la comparaison entre la traversée à remplacer et celle proposée par le fabricant ainsi qu'un rapport d'essais de type doivent être joints à tout appel d'offres.



## **Annexe B Guide général pour la réalisation des essais sur les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, d'inductances de MALT ou d'inductances shunt suivant une réparation ou une remise à neuf**

### **B.1 But**

Définir les essais sur transformateurs de puissance et de services auxiliaires, d'inductances de MALT ou d'inductances shunt suivant une réparation ou une remise à neuf en atelier.

### **B.2 Champ d'application**

Le présent guide s'applique aux transformateurs de puissance et de services auxiliaires, aux inductances de MALT et aux inductances shunt ayant subi une réparation ou une remise à neuf en atelier.

### **B.3 Contenu**

Ce guide donne les critères à considérer pour choisir les essais à réaliser selon l'importance et le type de réparation ou de remise à neuf.

Les essais demandés par cette annexe sont décrits sous les rubriques "Essais de type" et "Essais individuels" du présent document.

### **B.4 Objectifs des essais**

Les essais réalisés sur les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, les inductances de MALT ou les inductances shunt à la suite d'une réparation ou d'une remise à neuf ont pour objectif premier de vérifier la qualité de la réparation en plus de donner l'assurance du bon fonctionnement de l'appareil suite à cette intervention.

### **B.5 Réparation mineure ne nécessitant pas de décuvage**

Ce type de réparation est effectué sans décuper la partie active. Ces réparations n'impliquent pas les enroulements. Voici quelques exemples de travaux dans cette catégorie: ré-isolation des câbles externes aux enroulements, transformateurs de courant et changeur de prises en charge, serrage des supports de câbles, etc.

Liste des essais applicables:

- a. Essai d'isolement du noyau (3.7);
- b. Essai de mesure du facteur de puissance de l'isolation (enroulements et traversées. 3.19);
- c. Mesure de la résistance des enroulements (3.2);
- d. Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire (si applicable et si requis, 3.9);
- e. Mesure du rapport de transformation (si applicable, 3.10);

- f. Vérification des accessoires<sup>2</sup>;
- g. Essai d'opération du changeur de prises en charge (si applicable), à vide seulement, lorsque le commutateur ou le sélecteur a été remplacé ou réparé (3.17);

Un rapport sur les travaux réalisés doit être produit. Il doit inclure: toutes observations, description détaillée des réparations et modifications effectuées incluant des dessins des modifications apportées ainsi que le rapport des essais réalisés suite à ces réparations et modifications.

## B.6 Réparation mineure nécessitant un décufrage mais n'impliquant pas la partie active

Ce type de réparation requiert un décufrage et le déplacement de la partie active. Ces réparations n'impliquent pas les enroulements. Voici quelques exemples de travaux de cette catégorie: réparations de connexions internes, raccords au CPC, pare effluves, etc.

Liste des essais applicables:

- a. Essai d'isolement du noyau (3.7);
- b. Mesure du facteur de puissance de l'isolation (enroulements et traversées. 3.19);
- c. Mesure de la résistance des enroulements (3.2);
- d. Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire (si applicable et si requis, 3.9);
- e. Mesure du rapport de transformation (si applicable, 3.10);
- f. Vérification des accessoires;
- g. Mesure de la réponse en fréquence (FRA) (sur demande seulement, 3.8));
- h. Essais de tenue aux chocs de foudre pour les appareils 735 kV seulement à 80 % des niveaux assignés (3.3);
- i. Essai en tension induite avec mesures de décharges partielles (si applicable) à 80 % des niveaux prescrits (3.18 ou 3.21 selon le cas);
- j. Essais d'opération du changeur de prises en charge (si applicable) lorsque le commutateur ou le sélecteur a été remplacé ou réparé (3.17);
- k. Mesure d'impédance de court-circuit<sup>3</sup> lorsque le commutateur ou le sélecteur a été remplacé ou réparé (si applicable, 3.13);

Un rapport sur les travaux réalisés doit être produit. Il doit inclure: toutes observations, description détaillée des réparations et modifications effectuées incluant des dessins des modifications apportées ainsi que le rapport des essais réalisés suite à ces réparations et modifications.

---

<sup>2</sup> Les vérifications des accessoires sont réalisées en fonction de l'état de ceux-ci et selon l'entente avec l'atelier.

<sup>3</sup> Seulement si un doute persiste sur les propriétés physiques des bobines (suivant un court-circuit antérieur), il est recommandé de prendre une mesure d'impédance HT-BT. Si une variation est observée par rapport à la valeur originale il est préférable d'effectuer une mesure FRA.

## B.7 Réparation mineure nécessitant un décuvage mais impliquant la partie active

Ce type de réparation requiert un décuvage et le déplacement de la partie active. Ces réparations pourraient faire suite à un défaut qui aurait produit des dommages aux enroulements. Voici quelques exemples de travaux de cette catégorie: travaux d'isolation ou de connexions dans les enroulements ou sur les conducteurs de sortie, blocage des enroulements, travaux réalisés sur la culasse supérieure, isolation des barres de traction, etc.

Liste des essais applicables:

- a. Essai d'isolement du noyau (3.7);
- b. Essai de mesure du facteur de puissance de l'isolation (enroulements et traversées, 3.19);
- c. Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire (3.9);
- d. Mesure du rapport de transformation (3.10);
- e. Mesure de la résistance des enroulements (3.2);
- f. Vérification des accessoires;
- g. Mesure de l'impédance en court-circuit (si applicable, 3.13);
- h. Mesure de l'impédance homopolaire des inductances de MALT (si applicable, 3.14);
- i. Mesure de l'impédance (linéarité) des inductances shunt (si applicable, 3.20);
- j. Mesure de la réponse en fréquence (FRA) (sur demande, 3.8);
- k. Essais de tenue aux chocs de foudre pour les appareils 735 kV seulement, à 100% des niveaux assignés (3.3);
- l. Essai en tension induite avec mesures de décharges partielles (si applicables) à 80 % des niveaux prescrits (3.18 ou 3.21 selon le cas);
- m. Mesure des pertes à vide et courant à vide si la culasse supérieure a été démantelée (si applicable, 3.12);
- n. Mesure du niveau de bruit audible des inductances shunt (si applicable, 3.22);
- o. Essais d'opération du changeur de prises à tension nominale et à courant nominal lorsque le commutateur ou le sélecteur a été remplacé ou réparé (si applicable, 3.17);

Un rapport sur les travaux réalisés doit être produit. Il doit inclure: toutes observations, description détaillée des réparations et modifications effectuées incluant des dessins des modifications apportées ainsi que le rapport des essais réalisés suite à ces réparations et modifications.

## B.8 Réparation majeure impliquant le remplacement d'un ou de tous les enroulements sans changement de conception

Ce type de réparation requiert un décuvage et le déplacement de la partie active. Ces réparations doivent normalement faire suite à un défaut qui a produit des dommages aux enroulements. Voici quelques exemples

de travaux de cette catégorie: changement d'un ou de plusieurs enroulements, modification du blocage ou travail important sur le noyau, etc.

Liste des essais et la séquence applicables:

- a. Essai d'isolement du noyau (3.7);
- b. Essais de mesure du facteur de puissance de l'isolation (enroulements et traversées, 3.19);
- c. Contrôle de la polarité et de l'écart angulaire (3.9);
- d. Mesure du rapport de transformation (si applicable, 3.10);
- e. Mesure de la résistance des enroulements (3.2);
- f. Vérification des accessoires;
- g. Mesure de l'impédance de court-circuit (si applicable, 3.13);
- h. Mesure de l'impédance homopolaire des inductances de MALT (si applicable, 3.14);
- i. Mesure de l'impédance (linéarité) et des pertes des inductances shunt (si applicable, 3.20);
- j. Mesure de la réponse en fréquence (FRA) (sur demande, 3.8));
- k. Essais de tenue aux chocs de foudre à 100% des niveaux assignés (3.3);
- l. Essai en tension induite et mesures de décharges partielles (si applicable) à 80 % des niveaux prescrits lorsqu'un seul enroulement est impliqué et à 100% des niveaux spécifiés lorsque tous les enroulements sont impliqués (3.18 ou 3.21 selon le cas);
- m. Mesure des pertes à vide et du courant à vide (si applicable, 3.11 et 3.12);
- n. Mesure du niveau de bruit audible des inductances shunt (si applicable, 3.22);
- o. Essais d'opération du changeur de prises à tension nominale et à courant nominal lorsque le commutateur ou le sélecteur a été remplacé ou réparé (si applicable, 3.17);

Un rapport sur les travaux réalisés doit être produit. Il doit inclure: toutes observations, description détaillée des réparations et modifications effectuées incluant des dessins des modifications apportées ainsi que le rapport des essais réalisés suite à ces réparations et modifications.

### **B.9 Réparation majeure impliquant le remplacement d'un ou de tous les enroulements comprenant un changement de conception**

Ce type de réparation requiert un décufrage et le déplacement de la partie active. Ces réparations doivent normalement faire suite à un défaut qui a produit des dommages aux enroulements. Voici quelques exemples de travaux de cette catégorie: changement de conception d'un ou de plusieurs enroulements, rebobinage d'un ou plusieurs enroulements avec un autre type de conducteur ou avec des dimensions différentes, etc.

Tous les essais de type et individuels, à 100 % des niveaux prescrits, doivent être réalisés.

## **Annexe C    Lexique des essais sur les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, des inductances de MALT et inductances shunt**

### **C.1    Mesures de contrôle des caractéristiques de fonctionnement**

La mesure de la résistance c.c. des enroulements permet de déterminer les pertes  $RI^2$  dans les enroulements et les connexions. Des écarts importants dans les résultats obtenus avec ceux calculés par le fabricant pourraient révéler des contacts ou raccordements défectueux. Au cours de la mesure, la température doit être relevée car la résistance des enroulements est proportionnelle à la température.

Le contrôle de la polarité, l'écart angulaire et la mesure du rapport de transformation, permettent de vérifier le sens relatif des bobinages du schéma de connexions entre les enroulements ainsi que le rapport de transformation à toutes les prises.

L'essai d'isolement du noyau permet de s'assurer qu'aucun courant indésirable ne circulera entre le noyau et la cuve une fois l'appareil mis en service.

Pour les transformateurs de puissance et de services auxiliaires, la mesure d'impédance en court-circuit est effectuée en alimentant le transformateur par un enroulement avec une tension à 60 Hz pendant que son enroulement correspondant est court-circuité. Cet essai concerne toujours une paire d'enroulements. Il permet de contrôler l'équilibre entre les différentes phases. Aussi, en comparant les résultats obtenus à ceux d'origine, il est possible de valider qu'aucune déformation significative ne s'est produite sur les bobines. En cas de doute, la mesure de la réponse en fréquence (FRA) pourrait être utilisée.

Pour les inductances de MALT, la mesure de l'impédance se fait en mode homopolaire seulement. Cet essai consiste à alimenter avec une tension 60 Hz monophasée les trois bornes de ligne court-circuitées et le neutre.

Pour les inductances shunt, l'impédance est mesurée en appliquant la tension nominale aux bornes de l'inductance. De plus, une mesure de la linéarité de cette impédance est demandée jusqu'à une tension de 1,5 p.u. Cette mesure de linéarité peut être réalisée directement, si les installations d'essais le permettent, ou par une méthode c.c. indirecte tel que décrite précédemment dans ce document (3.20). L'essai de linéarité permet de vérifier que le dimensionnement et l'assemblage du circuit magnétique est adéquat.

Pour les transformateurs, la mesure des pertes en charge est en général exécutée en court-circuitant l'enroulement BT tout en alimentant à partir de l'enroulement HT. Comme pour les essais de résistances, les enroulements doivent se trouver à une température uniforme et celle-ci doit être mesurée. Cet essai permet de vérifier que la conception et l'assemblage final des enroulements sont adéquats. Par calcul, il est possible de vérifier le rapport entre les pertes  $RI^2$  et vagabondes, ce qui fournit une indication sur la qualité de la conception et de la fabrication, comme le câble utilisé dans les enroulements (éventuels points chauds dans des conducteurs, ou sur des pièces métalliques massives à proximité des enroulements).

Pour les inductances de MALT, les pertes en charge sont mesurées en mode homopolaire seulement à moins qu'elles ne soient équipées d'un enroulement additionnel pour l'alimentation des services auxiliaires. Dans ce dernier cas, deux mesures de pertes doivent être réalisées, la première pour la fonction inductance de MALT en mode homopolaire en faisant circuler le courant assigné dans la borne neutre avec les bornes de lignes court-circuitées ensemble. La deuxième mesure doit être effectuée comme pour les transformateurs en alimentant un des deux enroulements avec l'autre en court-circuit.

Pour les inductances shunt, les pertes en charge sont mesurées en appliquant la tension nominale aux bornes de l'inductance. Cette mesure ne permet pas de séparer les pertes en charge des pertes fer car les deux sont présentes simultanément. Les pertes en charge sont déduites par calculs en retranchant la valeur des pertes à vide calculées par le fabricant. Pour les inductances shunt, les pertes en charge sont très faibles par rapport à la puissance nominale de l'inductance et des méthodes de mesure adaptées telles que l'utilisation d'un pont de Schering ou d'un wattmètre pouvant mesurer des pertes dans un circuit ayant un très faible facteur de puissance doivent être utilisées pour s'assurer d'une précision adéquate.

Pour la mesure du courant à vide des transformateurs de puissance, de services auxiliaires et des inductances de MALT et de pertes à vide, le transformateur ou l'inductance de MALT est alimenté par un de ses enroulements à sa tension nominale à 60 Hz, ses autres enroulements (si applicable) étant en circuit ouvert. Cet essai permet de vérifier plus particulièrement la qualité de l'assemblage du circuit magnétique et principalement les joints. En service ou suite à une réparation, la valeur mesurée du courant à vide doit être comparable aux valeurs obtenues avant la réparation de l'appareil ou obtenue lors des essais d'origine. Si une source à haute tension n'est pas disponible, un essai de mesure du courant à vide à 10 kV peut servir comme mesure comparative lors d'essais au poste. En cas de doute sur le niveau du courant à vide, un essai de mesure des pertes à vide est recommandé.

## C.2 Essais diélectriques

Plusieurs types de tensions sont appliqués à un transformateur, une inductance de MALT ou une inductance shunt en service:

- La tension nominale à 60 Hz dont la répartition le long des enroulements est linéaire;
- Des surtensions *atmosphériques* de courte durée et de croissance très rapide qui, dans certain cas, peuvent être coupées par une décharge disruptive à la terre à proximité du transformateur;
- Des surtensions de manœuvre généralement produites par la manœuvre d'appareils de coupure.

L'essai à fréquence industrielle par tension appliquée sur les transformateurs est réalisé en portant la totalité de l'enroulement essayé à un potentiel pour une durée donnée pendant que les autres enroulements sont reliés à la masse. Il permet de vérifier l'isolation entre enroulements et entre enroulements et la terre. Cet essai est important pour vérifier l'isolation d'un enroulement connecté en  $\Delta$  par exemple ou pour vérifier l'isolation du point neutre de l'enroulement.

Durant les essais de tenue aux chocs de foudre, la répartition de tension à l'intérieur du transformateur, de l'inductance de MALT ou l'inductance shunt n'est pas linéaire le long de l'enroulement, avec des gradients de champ électrique élevés près de l'entrée de la bobine ou près des discontinuités à l'intérieur de la bobine. Une tension parfois importante peut éventuellement se retrouver sur un enroulement BT ou dans l'isolation entre les enroulements via une transmission inductive et capacitive. Selon la construction du transformateur, cette forme d'onde peut provoquer des oscillations internes entre enroulements. Les essais de tenue aux chocs de foudre coupés favorisent encore davantage ces phénomènes de résonance.

Durant l'essai de tenue aux chocs de manœuvre, la répartition de tension dans les enroulements est pratiquement linéaire. Cet essai permet de vérifier la capacité de l'appareil à supporter les contraintes diélectriques causées par une manœuvre d'un appareil de sectionnement en réseau. Cet essai produit des contraintes diélectriques sévères. Cet essai ne s'applique qu'aux appareils dont la classe de tensions est de 300 kV ou plus.

L'essai en tension induite avec mesures de décharges partielles (si applicable) pour les transformateurs est normalement effectué à une tension d'environ 2,0 (1,7) p.u. pour toutes les tensions sauf à 1,8 (1,55) p.u. pour les transformateurs à 120 kV. Cet essai est réalisé à l'aide d'une fréquence plus élevée que la fréquence assignée pour ne pas saturer le circuit magnétique.

Pour les transformateurs, les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées inférieures à 72,5 kV, la durée de l'essai est de 7200 cycles et aucune mesure de décharges partielles n'est réalisée.

Pour les transformateurs de tensions assignées égales ou supérieures à 72,5 kV, cet essai est effectué en appliquant dans un premier temps une tension de précontrainte pendant 7200 cycles suivi, sans interruption de la tension, d'une tension d'essai appliquée pour une durée d'une heure. Durant cette période d'une heure, la mesure des décharges partielles est réalisée. Pour les inductances de MALT et les inductances shunt de tensions assignées égales ou supérieures à 72,5 kV mais égales ou inférieure à 330 kV, la procédure est identique à celle des transformateurs.

Pour les inductances shunts de tension assignée de 735 kV, aucune tension de précontrainte n'est appliquée étant donnée les limitations de puissance des laboratoires d'essais. La tension d'essai est appliquée pendant 1 heure pendant laquelle période les décharges partielles sont mesurées.

La tension de cet essai se répartit uniformément le long des enroulements et permet de vérifier l'isolation entre tours sur l'ensemble des enroulements. Les décharges partielles permettent de suivre le comportement de l'isolation et l'évolution de ce dernier en condition de surtension.

### C.3 Essais de fonctionnement

Sont regroupés sous cette rubrique plusieurs essais concernant certains aspects du fonctionnement des transformateurs, des inductances de MALT et des inductances shunt en régime permanent ou transitoire.

- Essai d'échauffement en régime nominal et en surcharge;
- Mesure du niveau du bruit audible;
- Mesure de l'impédance homopolaire;
- Tenue au courant de court-circuit.

Normalement considérés de type ou spéciaux, ces essais ne sont généralement pas réalisés à la suite d'une réparation qui ne comporte pas de changement de conception. Cependant, ces essais pourraient, pour différentes applications, être exigés si certaines modifications dans les enroulements, le blocage, les connexions, le refroidissement, etc. avaient été réalisés.

L'essai d'échauffement d'un transformateur, d'une inductance de MALT ou d'une inductance shunt isolé à l'huile a pour objet de déterminer l'échauffement maximal de l'huile, l'échauffement moyen des enroulements et l'échauffement du point chaud des enroulements. D'autre part, les essais en surcharge sur les transformateurs permettent d'établir les caractéristiques thermiques du transformateur afin d'évaluer son comportement en condition de surcharge selon différents profils de surcharge. Dans le cas où certaines modifications auraient été apportées ayant pour but d'augmenter la puissance d'un appareil, il est recommandé de valider ces améliorations par un essai d'échauffement en régime nominal et un essai d'échauffement en surcharge (si applicable).

Généralement un transformateur, une inductance de MALT ou une inductance shunt en service émet un bruit audible dont les causes essentielles sont la magnétostriction des tôles du circuit magnétique, les entrefers des inductances shunt et les vibrations induites dans les pièces métalliques et shunts des murs de cuve par le flux de fuite qui est proportionnel au courant de charge. À ces bruits peut s'ajouter celui relié au système de refroidissement (si applicable). Les changements de conception qu'impose la réduction du niveau du bruit audible peuvent être considérables et très coûteux.

L'impédance homopolaire des transformateurs, comme les deux essais précédents, est intrinsèque à la conception de l'appareil et dépend principalement si le circuit magnétique est à 3 jambes ou à 5 jambes.

Les essais de tenue en court-circuit sont normalement effectués sur le premier d'un ensemble d'appareils identiques afin de valider si la conception proposée est en mesure de supporter les contraintes mécaniques produites par le courant de court-circuit. Ces essais sont coûteux et doivent être considérés seulement si des faiblesses à ce niveau sont identifiées lors de la revue de conception ou que l'application en réseau nécessite une fiabilité accrue (centrales, interconnexions, etc.) ou lors de gel de spécification et de conception qui s'appliquerait à plusieurs appareils similaires.



## Annexe D Calcul des caractéristiques thermiques en surcharge des transformateurs

### D.1 Généralités

L'essai d'échauffement en surcharge sert à:

- Déterminer les caractéristiques thermiques du transformateur afin de pouvoir évaluer son comportement pour n'importe quel profil de surcharge;
- Démontrer que le transformateur peut supporter les profils journaliers de surcharge spécifiés dans la spécification technique SN-14.1 d'Hydro-Québec, sans dépasser les températures maximales admissibles.

Les paramètres suivants sont établis par calculs à partir des résultats de l'essai de surcharge:

- $n$ : l'exposant s'appliquant aux pertes totales et utilisé dans le calcul de l'échauffement de l'huile au sommet de la cuve;
- $m$ : l'exposant s'appliquant aux pertes dans le cuivre et utilisé dans le calcul de l'échauffement du point chaud;
- $\Delta\theta_{or}$ : l'échauffement de l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales;
- $H_{gr}$ : l'écart de température entre le point chaud et l'huile au sommet de la cuve dans les conditions nominales;
- $T_{or}$ : la constante de temps de l'huile au sommet de la cuve dans les conditions nominales.

Les températures de l'huile au sommet de la cuve et du point chaud de l'enroulement pour les profils journaliers spécifiés doivent être calculées à partir des résultats d'essais.

Les symboles utilisés sont:

- $K$ : niveau de charge en p.u. par rapport à la puissance nominale du transformateur;
- $t$ : durée d'application de la charge;
- $n$ : exposant pour le calcul de l'échauffement de l'huile au sommet de la cuve;
- $m$ : exposant pour le calcul de l'échauffement du point chaud;
- $P_{75\text{ °C}}$ : pertes en charge corrigées à 75 °C et mesurées à la prise donnant les pertes maximales;
- $P_o$ : pertes à vide calculées pour la tension nominale à la même position du changeur de prise que pour l'essai de surcharge;
- $R$ : rapport des pertes en charge au courant nominal corrigées à 75 °C sur les pertes à vide  $P_o$ ;
- $\theta_w$ : température moyenne des enroulements;
- $\theta_m$ : température moyenne de l'huile;

- $\theta_o$ : température de l'huile au sommet de la cuve;
- $\theta_h$ : température du point chaud;
- $\theta_a$ : température ambiante;
- $\Delta\theta_w$ : échauffement moyen des enroulements;
- $\Delta\theta_o$ : échauffement de l'huile au sommet de la cuve;
- $H_g$ : écart de température entre le point chaud et l'huile au sommet de la cuve;
- $T_o$ : constante de temps de l'huile;

Les indices utilisés sont:

- indice r: aux conditions nominales (à 100 % des pertes totales dissipées pour l'huile et à 100 % du courant nominal pour l'enroulement).
- indice i: aux conditions initiales;
- indice u: à l'ultime;
- indice t: après un intervalle de temps t en heures.

## D.2 Calcul des caractéristiques thermiques

### D.2.1 Échauffement moyen de l'enroulement: $\Theta_{wr}$

Correspond à l'échauffement moyen de l'enroulement obtenu lors de l'essai d'échauffement à courant nominal.

### D.2.2 Exposant n

L'exposant n caractérise l'échauffement de l'huile au sommet de la cuve en fonction du niveau de charge K:

$$\Delta\theta_o \equiv \Delta\theta_{or} \left[ \frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \quad (D.1)$$

Lorsque l'essai est réalisé aux pertes totales ( $P_i = P_{c\ 75^\circ\text{C}} + P_o$ ), le facteur de charge est alors différent du courant d'essai en p.u. Dans ce cas, le facteur de charge K devient:

$$K = \frac{I_i}{I_r} \sqrt{\frac{P_i - P_o}{P_i}} \quad (D.2)$$

L'exposant m est calculé à partir des trois conditions où l'équilibre thermique a été atteint, soit à l'essai d'échauffement aux conditions nominales et lors des essais à 1,3 p.u. et à 0,7 p.u.

L'échauffement de l'huile sous le couvercle ( $\Delta\theta_o$ ) obtenu en essai ainsi que le facteur de charge (K) sont portés sur un graphique log-log. La pente de la droite obtenue correspond à l'exposant "n".

### D.2.3 Exposant pour l'échauffement du point chaud: m

L'exposant "m" caractérise l'écart entre les températures du point chaud et l'huile au sommet de la cuve en fonction de la charge:

$$H_g = H_{gr} K^{2m} \quad (D.3)$$

Où:

$H_{gr}$ : l'écart entre les températures moyennes de l'enroulement et de l'huile aux conditions nominales;

K: le courant de charge en p.u.

Pour déterminer cet exposant, on utilise l'écart entre les températures moyennes de l'enroulement ( $\theta_w$ ) et de l'huile ( $\theta_m$ ), c'est à dire ( $\theta_w - \theta_m$ ), à la fin de chacun des niveaux de courant. La température moyenne de l'huile est déterminée par la température de l'huile sous le couvercle ( $\theta_o$ ) moins la moitié de la différence de température mesurée à l'entrée ( $\theta_h$ ) et à la sortie ( $\theta_b$ ) des conduites d'huile des radiateurs.

$$\theta_m = \theta_o - \left( \frac{\theta_h - \theta_b}{2} \right) \quad (D.4)$$

L'exposant m est calculé à partir des trois conditions d'essais où la température moyenne de l'enroulement (après stabilité) est connue: essais d'échauffement à 1,0 p.u., 1,3 p.u. et 0,7 p.u.

Note: Pour la température moyenne de l'huile à 1,0 p.u., il faut utiliser la valeur obtenue à la fin de l'essai à courant constant.

Les écarts obtenus entre les températures moyennes de l'enroulement et de l'huile ( $H_g$ ) en fonction du facteur de charge sont portés sur un graphique log-log. La pente de la droite qui relie ces 3 points correspond à l'exposant 2m.

### D.2.4 Échauffement de l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales: $\Delta\theta_{or}$

L'échauffement de l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales  $\Delta\theta_{or}$  est obtenu lors de l'essai d'échauffement en régime nominal.

### D.2.5 Écart de température entre le point chaud et l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales: $H_{gr}$

L'écart de température entre le point chaud de l'enroulement ( $F_{PC}$ ) et l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales (à 100 % des pertes totales) est calculé à l'aide de la méthode décrite à la CEI 60076-2:

$$H_{gr} = F_{PC} \times (\theta_w - \theta_m) \quad (D.5)$$

$F_{PC}$  peut varier selon le mode de refroidissement de l'appareil soit ONAN, ONAF, OFAF, ODAF, etc.

Pour calculer les échauffements des points chauds des enroulements, le fabricant devra utiliser les facteurs de point chaud ( $F_{PC}$ ) qu'il aura déterminé par calculs. Les facteurs de point chaud calculés seront validés durant les essais par la mesure directe de la température des points chauds réalisée par les sondes de température à fibre optique. Le facteur de point chaud le plus élevé des deux (calculé/mesuré) doit être utilisé pour le calcul de la température des points chauds durant les cycles de surcharge spécifiés.

### D.2.6 Constante de temps de l'huile au sommet de la cuve aux conditions nominales: $T_{or}$

La constante de temps de l'huile au sommet de la cuve est obtenue en calculant par régression logarithmique de la courbe de l'échauffement de l'huile au sommet de la cuve mesurée durant de la période de refroidissement de 3 heures suite à l'essai de 1,3 p.u.

$$\Delta\theta_{o_{\text{à } t=3h}} = \Delta\theta_{oi} \left[ e^{\frac{-3}{\tau_o}} \right] \quad (D.6)$$

$$\tau_o = \frac{3}{\ln \left[ \frac{\Delta\theta_{oi}}{\Delta\theta_{o_{\text{à } t=3hr}}} \right]} \quad (D.7)$$

Où:

- $\Delta\theta_o$  à  $t=3$  heures correspond à l'échauffement de l'huile sous le couvercle 3 heures après l'interruption du courant suite à l'essai à 1,3 p.u.;
- $\Delta\theta_{oi}$  correspond à l'échauffement de l'huile sous le couvercle obtenu à fin de la période d'essais à 1.3 p.u.;
- $\tau_o$  correspond à la constante de temps de l'huile mesurée durant la période de refroidissement.

La constante de temps obtenue est ensuite ramenée aux conditions nominales:

$$\tau_{or} = \tau_o \left[ \frac{\theta_{or}}{\theta_{oi}} \right]^{1-\frac{1}{n}} \quad (D.8)$$

$\theta_{oi}$  correspond à la température de l'huile au début de la période de refroidissement suite à l'essai à 1,3 p.u.

### D.3 Évaluation des profils journaliers des charges spécifiées

On doit calculer la température du point chaud et celle de l'huile au sommet de la cuve pour les deux profils journaliers de surcharge indiqués dans la spécification technique SN-14.1. Ce calcul est effectué en utilisant les caractéristiques thermiques déterminées précédemment.

Les équations qui permettent l'évaluation des profils journaliers de surcharge spécifiées sont:

$$\Delta\theta_{ot} = \Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{oi} (1 - e^{-t/\tau_o}) + \Delta\theta_{oi} \quad (D.9).$$

$$\theta_{ot} = \theta_a + \Delta\theta_{ot} \quad (D.10)$$

$$\Delta\theta_{ht} = \theta_a + \Delta\theta_{ot} + H_g \quad (D.11)$$

**Exemple de calcul****Description du transformateur:**

- Puissance nominale: 250 MVA
- Triphasé
- Tension nominale primaire 230 kV eff.;
- Tension nominale secondaire: 120 kV eff;
- Changeur de prises en charge: Non

**1. Rapport "R" des pertes en charge sur les pertes à vide aux conditions nominales:**

Pertes en charge:  $P_c = 694,2$  kW à 75 °C

Pertes à vide:  $P_0 = 43,1$  kW.

Rapport des pertes cuivre sur les pertes fer R

$R = 16,107$
--------------

**2. Échauffement moyen de l'enroulement à 1,0 p.u.**

Selon les résultats d'essais:

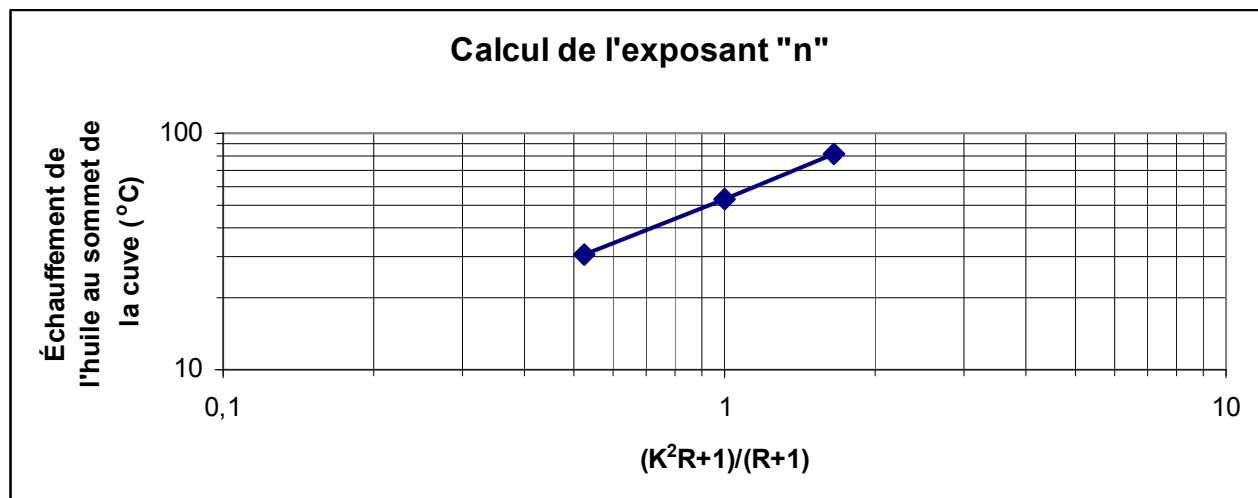
$\Delta\theta_{or} = 57,8$ °C
-------------------------------

**3. Calcul de l'exposant n pour l'échauffement de l'huile du sommet de la cuve (équation D.1)**

Selon les résultats d'essais (cellules grises):

Courant d'essai	Pertes totales	Échauffement de l'huile au sommet	$K_i$	$K_i^2 R + 1 / (R + 1)$
(A eff.)	(kW)	(°C)	p.u.	
442	315,6	30,4	0,704	0,525
646,9	736,6	52,6	1,000 <sup>note</sup>	0,999
814,8	1270,68	82	1,300	1,643

Note : le facteur de charge K est corrigé selon l'équation D.2 pour l'essai d'échauffement à 1,0 p.u. à pertes constantes.

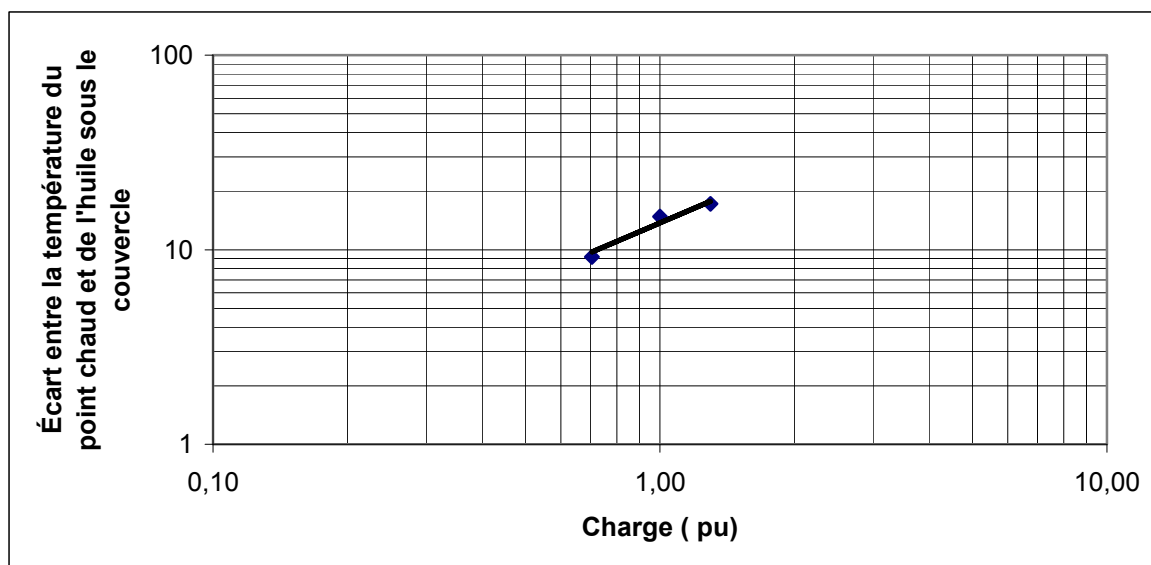


pente = n = 0,87

**4. Calcul de l'exposant m pour l'échauffement du point chaud (équation D.3)**

Selon les résultats d'essais (cellules grises)

Courant d'essai	Température du point chaud enroulement	Température de l'huile au sommet	Facteur de charge	Écart température
(A eff.)	(°C)	(°C)	p.u.	(°C)
442	55,4	46,2	0,7038	9,2
628	81,9	67,1	1,0000	14,8
814,8	115,8	98,6	1,2975	17,2
944,3	122,8	97,4	1,5037	25,4



$$\text{pente} = 2m = 1,0207; m=0,51$$

#### D.4 Échauffement de l'huile du sommet de la cuve $\Delta\theta_{or}$

Selon les résultats d'essais:

- Température moyenne de l'huile aux conditions nominales = 69,7 °C;
- Température de l'huile sous le couvercle aux conditions nominales = 80,1 °C;
- Température moyenne de l'enroulement aux conditions nominales = 84,4 °C;
- Température ambiante durant l'essai aux conditions nominales = 26,3 °C.

Échauffement de l'huile au sommet de la cuve  $\Delta\theta_{or}$ : 53,8 °C

#### D.5 Écart de température entre le point chaud de l'enroulement et l'huile au sommet de la cuve (équation D.5)

Par la méthode définie à la CEI 60076-2:  $H_{gr} = F_{PC} \times (\theta_w - \Delta\theta_h)$

Si on suppose que  $F_{PC} = 1,3$ , alors:

$$H_{gr} = 1,3 \times (84,4 \text{ °C} - 69,7 \text{ °C}) = 19,1 \text{ °C}$$

#### D.6 Constante de temps de l'huile au sommet de la courbe (équations D.7 et D.8)

$$\Delta\theta_0 = \Delta\theta_{oi} \times e^{-3 \text{ heures} / \tau_0}$$

$\Delta\theta_{oi}$  = Échauffement de l'huile au sommet de la cuve à la fin de l'essai à 1,3 p.u.;

$\Delta\theta_0$  = Échauffement de l'huile à la fin des 3 heures de refroidissement;

$\tau_o$  = Constante de temps de l'huile au sommet de la cuve.

Selon les résultats d'essais:

- à la fin de la période à 1,3 p.u.:  $\Delta\theta_{0l} = 82,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- à la fin de la période de refroidissement de 3 heures:  $\Delta\theta_0 = 41,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$41,3 = 82 \times e^{-3 \text{ heures} / \tau_o}$$

$$\tau_o = 4,37 \text{ heures}$$

Constante de temps de l'huile au sommet de la cuve corrigée:

$$\tau_{or} = 4,66 \text{ heures}$$

#### D.7 Vérification du profil de surcharge (équations D.9, D.10 ET D.11)

$$\Delta\theta_{0u} = \Delta\theta_{0r} \times (K^2 r + 1 / (r + 1))^n$$

$$H_g = H_{gr} K^{2m}$$

Les calculs des températures de l'huile et de l'enroulement sont basés sur l'équation suivante:

$$\Delta\theta_{0t} = [\Delta\theta_{0u} - \Delta\theta_{0i}] \times [1 - e^{-\tau/\tau_o}] + \Delta\theta_{0i}$$

Pour le profil journalier de surcharge d'été:

$$\Delta\theta_{0i} = 0 \text{ pour le calcul à } I = 1,0 \text{ p.u.};$$

$$\Delta\theta_{0i} = \Delta\theta_{0t} \text{ à } 1,0 \text{ p.u. pour le calcul à } I = 1,15 \text{ p.u.};$$

$$\Delta\theta_{0i} = \Delta\theta_{0t} \text{ à } 1,15 \text{ p.u. pour le calcul à } I = 1,22 \text{ p.u.}$$

Pour le profil journalier de surcharge d'hiver:

$$\Delta\theta_{0i} = 0 \text{ pour le calcul à } I = 1,35 \text{ p.u.};$$

$$\Delta\theta_{0i} = \Delta\theta_{0t} \text{ à } 1,35 \text{ p.u. pour le calcul à } I = 1,48 \text{ p.u.};$$

$$\Delta\theta_{0i} = \Delta\theta_{0t} \text{ à } 1,48 \text{ p.u. pour le calcul à } I = 1,50 \text{ p.u.};$$



## Vérification du profil de surcharge

Charge	Durée "t" d'application de la charge	Température ambiante	Échauffement ultime de l'huile au sommet de la cuve  $\Delta\theta_{ou}$	Échauffement de l'huile au sommet de la cuve après "t"  $\Delta\theta_{ot}$	$\Delta T^\circ$ entre le point chaud et l'huile au sommet (gradient)  $H_g$	Température de l'huile au sommet de la cuve  $\theta_{ot}$	Température du point chaud de l'enroulement  $\theta_{ht}$
(% In)	(Heures)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Profil journalier de surcharge d'été							
100	12	30	53,8	50,3	19,1	80,3	99,5
115	8	30	67,8	65,0	22,0	95,0	117,0
122	4	30	74,8	70,9	23,4	100,9	124,3
Profil journalier de surcharge d'hiver							
135	12	-20	88,6	82,9	26,0	62,9	88,9
148	8	-20	103,5	100,2	28,5	80,2	108,7
150	4	-20	105,9	103,6	28,9	83,6	112,5