

# NORME INTERNATIONALE

**Interprétation de l'analyse des gaz dissous dans les esters naturels et synthétiques**

Sample Document

get full document from [standards.iteh.ai](https://standards.iteh.ai)



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2026 IEC, Geneva, Switzerland

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat  
3, rue de Varembé  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

### Recherche de publications IEC -

[webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

**Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## SOMMAIRE

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                            | 4  |
| INTRODUCTION.....                                                                                                             | 6  |
| 1    Domaine d'application .....                                                                                              | 7  |
| 2    Références normatives .....                                                                                              | 7  |
| 3    Termes, définitions, abréviations, noms et formules chimiques .....                                                      | 7  |
| 3.1    Termes et définitions .....                                                                                            | 7  |
| 3.2    Abréviations, noms et formules chimiques .....                                                                         | 10 |
| 3.2.1    Noms et formules chimiques .....                                                                                     | 10 |
| 3.2.2    Abréviations .....                                                                                                   | 10 |
| 4    Exemples de production de gaz dans un transformateur rempli d'esters naturels et synthétiques .....                      | 10 |
| 4.1    Généralités .....                                                                                                      | 10 |
| 4.1.1    Généralités .....                                                                                                    | 10 |
| 4.1.2    Propriétés physiques et chimiques.....                                                                               | 11 |
| 4.1.3    Comportement de gassing sous claquage diélectrique et contrainte thermique dans des expériences en laboratoire ..... | 12 |
| 4.1.4    Stray gassing sous contrainte thermo-oxydative .....                                                                 | 13 |
| 5    Schémas d'interprétation .....                                                                                           | 16 |
| 5.1    Généralités .....                                                                                                      | 16 |
| 5.2    90 <sup>e</sup> ou 95 <sup>e</sup> percentile des concentrations en gaz .....                                          | 17 |
| 5.3    Rapports de gaz .....                                                                                                  | 18 |
| 5.3.1    Généralités .....                                                                                                    | 18 |
| 5.3.2    Rapports de deux gaz pour les décharges partielles (DP) dans les esters synthétiques et naturels .....               | 19 |
| 5.3.3    Rapport de deux gaz pour les décharges (D) dans les esters synthétiques et naturels.....                             | 20 |
| 5.3.4    Rapport de deux gaz pour les défauts thermiques (T) dans les esters synthétiques .....                               | 20 |
| 5.3.5    Rapport de deux gaz pour les défauts thermiques (T) dans les esters naturels .....                                   | 20 |
| 5.3.6    Considérations générales pour les rapports de deux gaz .....                                                         | 21 |
| 5.4    Taux d'augmentation des gaz .....                                                                                      | 21 |
| 5.5    Analyse des tendances .....                                                                                            | 22 |
| 5.6    Représentation graphique .....                                                                                         | 22 |
| 6    Analyse des gaz dissous lors des essais de réception en usine (FAT) .....                                                | 23 |
| 7    Interprétation des bases de données .....                                                                                | 23 |
| 7.1    Généralités .....                                                                                                      | 23 |
| 7.2    Incertitudes dans l'interprétation des bases de données .....                                                          | 24 |
| 7.3    Restrictions relatives à l'interprétation des bases de données.....                                                    | 24 |
| 8    Fiabilité de l'AGD.....                                                                                                  | 24 |
| 9    Vérifications de l'AGD.....                                                                                              | 24 |
| 10   Actions recommandées en fonction de l'interprétation des résultats de l'analyse des gaz dissous.....                     | 25 |
| 11   Exemples de matériels avec évolution des gaz et analyse des tendances .....                                              | 25 |
| Annexe A (informative) Solubilité des gaz dans divers liquides isolants .....                                                 | 26 |
| Annexe B (informative) Résultats de l'évaluation des bases de données.....                                                    | 27 |
| B.1    Base de données sur les esters naturels (µl/l).....                                                                    | 27 |

|                                                                                                                                                |                                                       |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----|
| B.2                                                                                                                                            | Base de données sur les esters synthétiques (µl/l)    | 28 |
| Annexe C (informative) Exemples de matériels avec évolution des gaz et analyse des tendances                                                   |                                                       | 29 |
| C.1                                                                                                                                            | Généralités                                           | 29 |
| C.2                                                                                                                                            | Exemple de décharge partielle (DP) par effet couronne | 29 |
| C.2.1                                                                                                                                          | Généralités                                           | 29 |
| C.2.2                                                                                                                                          | Schéma d'interprétation                               | 29 |
| C.2.3                                                                                                                                          | Représentations graphiques                            | 30 |
| C.2.4                                                                                                                                          | Inspection du transformateur pour exemple C.2         | 31 |
| C.3                                                                                                                                            | Exemple de décharge (D)                               | 32 |
| C.3.1                                                                                                                                          | Généralités                                           | 32 |
| C.3.2                                                                                                                                          | Schéma d'interprétation                               | 32 |
| C.3.3                                                                                                                                          | Représentations graphiques                            | 33 |
| C.3.4                                                                                                                                          | Inspection du transformateur pour exemple C.3         | 34 |
| C.4                                                                                                                                            | Exemple thermique (T)                                 | 34 |
| C.4.1                                                                                                                                          | Généralités                                           | 34 |
| C.4.2                                                                                                                                          | Schéma d'interprétation                               | 35 |
| C.4.3                                                                                                                                          | Représentations graphiques                            | 35 |
| C.4.4                                                                                                                                          | Inspection du transformateur pour exemple C.4         | 36 |
| C.5                                                                                                                                            | Évolution des tendances – Exemple C.5                 | 37 |
| C.5.1                                                                                                                                          | Généralités                                           | 37 |
| C.5.2                                                                                                                                          | Schéma d'interprétation                               | 38 |
| C.5.3                                                                                                                                          | Représentations graphiques                            | 38 |
| C.5.4                                                                                                                                          | Inspection du transformateur pour exemple C.5         | 39 |
| C.6                                                                                                                                            | Évolution des tendances – Exemple C.6                 | 39 |
| C.6.1                                                                                                                                          | Généralités                                           | 39 |
| C.6.2                                                                                                                                          | Schéma d'interprétation                               | 40 |
| C.6.3                                                                                                                                          | Représentations graphiques                            | 41 |
| C.6.4                                                                                                                                          | Inspection du transformateur pour exemple C.6         | 42 |
| Annexe D (informative) Informations disponibles sur l'analyse des gaz dissous des monoesters et des esters mélangés                            |                                                       | 43 |
| D.1                                                                                                                                            | Ester d'acides gras de palme (PFAE)                   | 43 |
| D.2                                                                                                                                            | Esters mélangés selon l'IEC 63012 [33]                | 43 |
| Bibliographie                                                                                                                                  |                                                       | 44 |
| Figure 1 – Production relative de gaz après 100 claquages conformément à l'IEC 60156 [37] (5 s de pause entre les claquages sans entraînement) |                                                       | 12 |
| Figure 2 – Production de gaz après vieillissement à 120 °C pendant 64 h sur des liquides isolants saturés en air                               |                                                       | 13 |
| Figure 3 – Production d'hydrogène en µl/l en raison du stray gassing                                                                           |                                                       | 14 |
| Figure 4 – Production de méthane en µl/l en raison du stray gassing                                                                            |                                                       | 14 |
| Figure 5 – Production d'éthane en µl/l en raison du stray gassing                                                                              |                                                       | 14 |
| Figure 6 – Production de monoxyde de carbone en µl/l en raison du stray gassing                                                                |                                                       | 15 |
| Figure C.1 – Photographie de cire X trouvée après examen                                                                                       |                                                       | 31 |
| Figure C.2 – Photographie de la rupture de l'âme dans l'exemple C.3                                                                            |                                                       | 34 |
| Figure C.3 – Représentation graphique des tendances pour exemple C.5                                                                           |                                                       | 39 |
| Figure C.4 – Représentation graphique des tendances pour exemple C.6                                                                           |                                                       | 41 |

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 – Exemple de la dépendance de la formation des gaz dissous ( $\mu\text{l/l}$ ) à la teneur en acide linoléique du liquide naturel de base (à 120 °C pendant 164 h) [11] | 15 |
| Tableau 2 – Exemple représentant la dépendance du niveau d'insaturation au type d'huile de base                                                                                   | 20 |
| Tableau A.1 – Exemples de coefficients de solubilité à 25 °C rapportés par l'IEC 60567:2023, Annexe A, Tableau A.1                                                                | 26 |
| Tableau B.1 – Percentiles de gaz spécifiques produits à partir de différents types non spécifiés d'esters naturels                                                                | 27 |
| Tableau B.2 – Percentiles de gaz spécifiques produits à partir d'esters naturels à base de soja                                                                                   | 27 |
| Tableau B.3 – Percentiles de gaz spécifiques produits à partir d'esters naturels à base de tournesol à haute teneur en acide oléique                                              | 27 |
| Tableau B.4 – Percentiles de gaz spécifiques produits à partir d'esters synthétiques                                                                                              | 28 |
| Tableau C.1 – Données du transformateur pour exemple C.2                                                                                                                          | 29 |
| Tableau C.2 – Résultats d'AGD (en $\mu\text{l/l}$ ) pour exemple C.2                                                                                                              | 29 |
| Tableau C.3 – Schéma d'interprétation selon les 5.2 à 5.5 pour exemple C.2                                                                                                        | 30 |
| Tableau C.4 – Triangle de Duval pour exemple C.2                                                                                                                                  | 30 |
| Tableau C.5 – Pentagone de Duval pour exemple C.2                                                                                                                                 | 31 |
| Tableau C.6 – Données du transformateur pour exemple C.3                                                                                                                          | 32 |
| Tableau C.7 – Résultats d'AGD (en $\mu\text{l/l}$ ) pour exemple C.3                                                                                                              | 32 |
| Tableau C.8 – Schéma d'interprétation selon les 5.2 à 5.5 pour exemple C.3                                                                                                        | 32 |
| Tableau C.9 – Triangle de Duval pour exemple C.3                                                                                                                                  | 33 |
| Tableau C.10 – Pentagone de Duval pour exemple C.3                                                                                                                                | 33 |
| Tableau C.11 – Données du transformateur pour exemple C.4                                                                                                                         | 34 |
| Tableau C.12 – Résultats d'AGD (en $\mu\text{l/l}$ ) pour exemple C.4                                                                                                             | 35 |
| Tableau C.13 – Schéma d'interprétation selon les 5.2 à 5.5 pour exemple C.4                                                                                                       | 35 |
| Tableau C.14 – Triangle de Duval pour ester naturel à base de soja pour exemple C.4                                                                                               | 36 |
| Tableau C.15 – Pentagone de Duval pour ester naturel à base de soja pour exemple C.4                                                                                              | 36 |
| Tableau C.16 – Données du transformateur pour exemple C.5                                                                                                                         | 37 |
| Tableau C.17 – Résultats d'AGD (en $\mu\text{l/l}$ ) pour exemple C.5                                                                                                             | 37 |
| Tableau C.18 – Schéma d'interprétation selon les 5.2 à 5.5 pour exemple C.5                                                                                                       | 38 |
| Tableau C.19 – Pentagone de Duval pour ester naturel à base de soja pour exemple C.5                                                                                              | 39 |
| Tableau C.20 – Données du transformateur pour exemple C.6                                                                                                                         | 40 |
| Tableau C.21 – Résultats d'AGD (en $\mu\text{l/l}$ ) pour exemple C.6                                                                                                             | 40 |
| Tableau C.22 – Schéma d'interprétation selon les 5.2 à 5.5 pour exemple C.6                                                                                                       | 40 |
| Tableau C.23 – Pentagone de Duval pour ester naturel à base de soja pour exemple C.6                                                                                              | 41 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## Interprétation de l'analyse des gaz dissous dans les esters naturels et synthétiques

### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 63585 a été établie par le comité d'études 10 de l'IEC: Fluides pour applications électrotechniques. Il s'agit d'une Norme internationale.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

| Projet       | Rapport de vote |
|--------------|-----------------|
| 10/1302/FDIS | 10/1305/RVD     |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous [www.iec.ch/members\\_experts/refdocs](http://www.iec.ch/members_experts/refdocs). Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous [www.iec.ch/publications](http://www.iec.ch/publications).

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

# Sample Document

get full document from [standards.iteh.ai](http://standards.iteh.ai)

## INTRODUCTION

L'analyse des gaz dissous (AGD) est l'un des outils de diagnostic les plus largement utilisés pour détecter et évaluer les défauts dans les matériels électriques remplis de liquide isolant, indépendamment qu'il s'agisse d'huile minérale, d'ester ou de liquide isolant silicone. Cependant, l'interprétation des résultats de l'AGD est souvent complexe et il convient de toujours la réaliser avec précaution, en impliquant un personnel expérimenté. Les normes pour l'interprétation des gaz dissous dans l'huile sont considérées comme des lignes directrices. En effet, même s'il existe une base scientifique pour expliquer la formation de gaz, l'interprétation des données en ce qui concerne la cause de défaillance n'est pas une science exacte, mais provient de preuves empiriques à partir desquelles des règles d'interprétation ont été déduites.

Des recommandations similaires pour l'évaluation de l'AGD (interprétation) existent déjà pour l'huile minérale dans de nombreuses normes nationales et internationales, par exemple l'IEC 60599 ou l'IEEE Std C57™.104-2019 [35]<sup>1</sup>. La norme IEEE Std C57™.155-2014 [36] décrit l'évaluation de l'analyse des gaz dissous des esters (principalement des esters naturels) à partir de valeurs absolues.

Les liquides isolants à base d'esters synthétiques sont utilisés dans les matériels électriques depuis la fin des années 70, les esters naturels depuis la fin des années 90. La demande en énergie électrique augmente et, avec elle, la demande en esters synthétiques et naturels. Les esters synthétiques et naturels sont souvent utilisés dans des environnements sensibles, en raison de leurs points d'éclair et de feu élevés (en cas d'exigences strictes en matière d'incendie), et étendus à de nombreuses applications, même indépendamment de leur inflammabilité limitée. Il existe des normes relatives à la maintenance du liquide en soi, mais peu de normes relatives à l'interprétation de l'analyse des gaz dissous. Le présent document fournit des recommandations pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous dans les matériels remplis d'esters.

---

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

## 1 Domaine d'application

Le présent document fournit des lignes directrices à l'opérateur de transformateur pour évaluer les données d'analyse des gaz dissous (AGD) obtenues à partir de transformateurs remplis de liquides à base d'ester naturel selon l'IEC 62770 [31] et d'ester synthétique selon l'IEC 61099 [29] et de matériels analogues. Les informations sur les matériels remplis de monoesters et d'esters mélangés (IEC 63012 [33]) étant limitées, celles-ci sont actuellement incluses dans l'Annexe D.

Les esters liquides sont présents dans l'ensemble des applications, y compris les réseaux de transport et de distribution, les transformateurs industriels, de traction, d'énergie éolienne et solaire, comme cela est indiqué dans les tableaux relatifs aux données recueillies dans le présent document. Aujourd'hui, leur utilisation a été étendue aux transformateurs de puissance. Les esters liquides sont également de plus en plus utilisés en combinaison avec des changeurs de prises. En raison de l'insuffisance des données d'AGD disponibles, le matériel de commutation est exclu du présent document.

Le présent document comprend les éléments suivants:

- production de gaz dans un transformateur rempli d'esters naturels ou synthétiques;
- valeurs indicatives de concentration de gaz valables pour l'utilisation d'outils d'interprétation de l'AGD;
- méthodes pour l'interprétation des résultats des gaz dissous;
- actions recommandées en fonction de l'interprétation des résultats de l'analyse des gaz dissous;
- exemples de matériels défectueux.

## 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 60475, *Méthode d'échantillonnage des liquides isolants*

IEC 60567:2023, *Matériels électriques immergés - Échantillonnage de gaz libres et analyse des gaz libres et dissous dans les huiles minérales et d'autres liquides isolants - Recommandations*

IEC 60599:2022, *Matériels électriques remplis d'huile minérale en service - Recommandations relatives à l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres*

## 3 Termes, définitions, abréviations, noms et formules chimiques

### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

NOTE Des termes plus spécifiques à l'interprétation de l'AGD et validés par les experts du CE 10 sont également utilisés.

### **3.1.1 isolants liquides**

#### **3.1.1.1 ester naturel**

huiles végétales obtenues à partir de graines et huiles obtenues à partir d'autres matériaux biologiques appropriés et composées de triglycérides

[SOURCE: IEC 62770:2024 [31], 3.1.2]

#### **3.1.1.2 ester synthétique**

esters organiques de synthèse destinés aux matériels électriques conformes aux exigences de la feuille de spécification 1 (Ester pour transformateur – Type T1) de l'IEC 61099

Note 1 à l'article: Voir l'IEC 61099:2010, Article 9.

### **3.1.2 défaut**

événement imprévu ou défectuosité (anomalie) d'un dispositif qui peut donner lieu à une ou plusieurs défaillances de ce dispositif, ou d'autres dispositifs associés

[SOURCE: IEC 60599:2022, 3.1.1]

### **3.1.3 défaillance**

perte de l'aptitude à fonctionner comme cela est exigé

Note 1 à l'article: Dans les matériels électriques, une défaillance est la conséquence d'un défaut, un dommage ou d'un incident qui nécessite la mise hors service, la réparation ou le remplacement du matériel, tel qu'un claquage interne, une rupture de la cuve, un incendie ou une explosion.

[SOURCE: IEC 60599:2022, 3.1.5]

### **3.1.4 défaut électrique**

décharge partielle ou disruptive à travers l'isolation

[SOURCE: IEC 60599:2022, 3.1.6]

### **3.1.5 décharge partielle**

décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'isolation gazeuse, liquide ou solide

Note 1 à l'article: Des décharges partielles par effet couronne peuvent se former dans les vides gazeux d'une isolation solide mal imprégnée d'huile, ou dans les bulles d'air piégées. Les décharges partielles par effet couronne produisent des gaz bien spécifiques (principalement de l'hydrogène) et sont abrégées par convention dans l'IEC 60599 en "DP" ou "DP couronne". En raison des très grands nombres de DP couronne, de la cire X (solide polymérisé à partir du liquide isolant) peut parfois se former. Il est souvent difficile de le déterminer par examen visuel.

Note 2 à l'article: Les scintillations de faible énergie et le "cheminement" à la surface de matériaux isolants, détectés lors d'essais électriques, sont souvent décrits comme des décharges partielles, mais il convient plutôt de les considérer comme des décharges disruptives de faible énergie, étant donné qu'ils sont le résultat de claquages diélectriques locaux de haute densité d'ionisation, ou de petits arcs, selon les conventions de la physique. Ils sont caractérisés par la formation d'acétylène.

[SOURCE: IEC 60599:2022, 3.1.7, modifié – L'article a été modifié pour inclure une description détaillée.]

### 3.1.6

#### **décharge disruptive**

passage d'un arc électrique à la suite d'un claquage électrique

Note 1 à l'article: En fonction de la quantité d'énergie contenue dans la décharge, elle sera décrite comme décharge de basse ou haute énergie, fondée sur le courant maximal, et la quantité de dommage subi par le matériau isolant.

[SOURCE: IEC 60050-212:2010 [23], 212-11-46]

### 3.1.7

#### **défaut thermique**

élévation (augmentation) excessive de la température dans l'isolation

Note 1 à l'article: Les causes types sont

- un refroidissement insuffisant ou un manque de circulation du liquide isolant;
- une chaleur excessive qui circule dans des parties métalliques adjacentes (par exemple, en raison de mauvais contacts);
- des pertes dues à des courants de Foucault, des pertes vagabondes ou des flux de fuite;
- des courants trop élevés qui circulent dans l'isolation (en raison de pertes diélectriques élevées), conduisant à un emballement thermique;
- un échauffement d'enroulement interne, de sélecteur ou de jonction de traversée;
- une surcharge.

[SOURCE: IEC 60599:2022, 3.1.9]

### 3.1.8

#### **90<sup>e</sup> ou 95<sup>e</sup> percentile des concentrations en gaz et taux d'augmentation des gaz**

concentrations en gaz supérieures déterminées dans un pourcentage arbitraire de matériels en service (par exemple, 90 % ou 95 % de la population) classés par ordre croissant de concentration en gaz

Note 1 à l'article: En variante, d'autres valeurs fondées sur l'expérience service ou utilisateur justifiée peuvent être appliquées.

Note 2 à l'article: Ces valeurs diffèrent selon les types de matériels et les réseaux, en fonction de l'âge du transformateur, du type et de l'emplacement du défaut, des pratiques d'exploitation (niveaux de charge, climat, etc.) et dépendent également du nombre disponible de matériels et d'analyses inclus dans les bases de données évaluées.

Note 3 à l'article: Le 90<sup>e</sup> et le 95<sup>e</sup> percentile n'ont pas pour objet de servir de seuils, d'alertes ou de limites d'alarme, mais sont destinés à déclencher des diagnostics avec des investigations plus approfondies.

## 3.2 Abréviations, noms et formules chimiques

### 3.2.1 Noms et formules chimiques

| Nom                 | Formule                       |
|---------------------|-------------------------------|
| Azote               | N <sub>2</sub>                |
| Oxygène             | O <sub>2</sub>                |
| Hydrogène           | H <sub>2</sub>                |
| Monoxyde de carbone | CO                            |
| Dioxyde de carbone  | CO <sub>2</sub>               |
| Méthane             | CH <sub>4</sub>               |
| Éthane              | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
| Éthylène            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |
| Acétylène           | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |

NOTE L'acétylène et l'éthyne sont tous deux utilisés pour le C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; l'éthylène et l'éthène sont tous deux utilisés pour le C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Dans le présent document, les noms chimiques éthylène et acétylène sont utilisés.

### 3.2.2 Abréviations

|                                          |                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D                                        | décharge disruptive – voir le 3.1.6                                                                                                                             |
| AGD                                      | analyse des gaz dissous (voir l'IEC 60567)                                                                                                                      |
| FAT (Factory Acceptance Tests)           | essais de réception en usine                                                                                                                                    |
| OLTC (On-Load Tap-Changer)               | changeur de prises en charge                                                                                                                                    |
| DP                                       | décharges partielles – voir le 3.1.5                                                                                                                            |
| PFAE (Palm Fatty Acid Ester)             | ester d'acides gras de palme                                                                                                                                    |
| SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) | analyse de la réponse en fréquence de balayage                                                                                                                  |
| T                                        | défaut thermique – voir le 3.1.7                                                                                                                                |
| µl/l                                     | $V_{\text{gaz}}/V_{\text{huile}}$ en µl/l, ce qui correspond aux parties par million (1 ppm) en volume de gaz dans l'huile. Voir l'IEC 60567:2023, 9.7, Note 1. |

## 4 Exemples de production de gaz dans un transformateur rempli d'esters naturels et synthétiques

### 4.1 Généralités

#### 4.1.1 Généralités

Les esters sont utilisés dans des environnements sensibles et dans les applications éoliennes sur terre et en mer. Cependant, l'élimination des esters, des produits chimiques et des conteneurs d'échantillons mentionnés dans le présent document peut être soumise à des exigences réglementaires et il convient de prendre toutes les précautions pour empêcher leur rejet dans l'environnement.

Les différentes propriétés entraînent différentes valeurs dans les procédures de maintenance, par exemple l'acidité, comme cela est décrit dans l'IEC 61203 [30] et l'IEC 62975 [32], et elles peuvent influencer le comportement de gassing des esters synthétiques et naturels.

Les esters liquides sont déjà utilisés depuis de nombreuses années dans les matériels électriques. L'utilisation la plus courante est celle des transformateurs de distribution et des transformateurs industriels (de traction et offshore). Jusqu'à présent, l'expérience avec les transformateurs de moyenne puissance est limitée, en raison du nombre relativement faible de transformateurs remplis d'esters de ce type. Cela se reflète dans les bases de données rassemblées.

Les gaz de défaut produits dans les esters liquides dans des conditions de défaut sont les mêmes que ceux produits dans l'huile minérale, mais les rapports et les taux peuvent être différents. Cela peut être dû à leurs différences de structure moléculaire par rapport aux huiles minérales. Il existe une ambiguïté, par exemple en ce qui concerne les valeurs absolues à utiliser comme valeurs de déclenchement ou les rapports de gaz.

Les comportements de solubilité et de volatilité des gaz en fonction de la température dans les esters suivent des règles similaires à l'huile minérale.

Comme cela a été mentionné dans l'introduction, les schémas d'interprétation pour l'huile minérale et les esters doivent être considérés comme des lignes directrices et non comme des règles exactes.

#### 4.1.2 Propriétés physiques et chimiques

Les esters naturels et synthétiques présentent des propriétés chimiques et physiques différentes de celles des huiles minérales (voir l'IEC 62770 [31] et l'IEC 61099 [29]). La viscosité plus élevée par rapport aux huiles minérales isolantes peut entraîner des durées de formation d'arc plus longues avec les OLTC de type rupture d'arc [1]. Pour cette raison, les OLTC de type sous vide sont privilégiés.

Les esters peuvent être hydrolysés par l'eau, ce qui peut conduire à une acidité plus élevée et finalement à une concentration plus élevée en dioxyde de carbone. L'oxydation dans un matériel à respiration libre dans le cas des esters synthétiques peut également conduire à une concentration plus élevée en dioxyde de carbone. Cependant, il n'existe aucune preuve que les gaz CO et CO<sub>2</sub> générés sont liés à la dégradation des matériaux cellulosiques (comme cela est prouvé dans l'huile minérale). Comme de nombreux transformateurs remplis d'esters peuvent avoir une isolation en papier ou en aramide (ou les deux), il est difficile à ce stade d'évaluer la source d'une concentration élevée en dioxyde de carbone.

Les molécules d'ester naturel sont composées de longues chaînes d'hydrocarbures et peuvent avoir une ou plusieurs liaisons doubles appelées insaturations. Plusieurs liaisons doubles insaturées provoquent la formation d'éthane et d'hydrogène, en particulier en présence d'air. Cette formation de gaz est principalement due à la décomposition d'acides gras polyinsaturés spécifiques, comme l'acide linoléique, qui sont davantage présents dans certains types d'esters tels que ceux à base de soja et de colza que dans ceux à base de tournesol à haute teneur en acide oléique. Les liaisons insaturées facilitent l'oxydation, de sorte que les esters naturels neufs sont recommandés uniquement pour les matériels qui ne sont pas situés à l'air libre, car ces liquides sont sujets à une oxydation rapide. L'éthane est présumé être présent dans les liquides à base d'esters naturels en raison de la réaction des radicaux libres. La concentration en gaz se stabilise généralement au fil du temps; toutefois, si l'éthane continue d'augmenter, cela peut indiquer la présence d'air dans le transformateur.

NOTE Certains monoesters et mélanges de monoesters peuvent avoir une plus faible viscosité, voir l'Annexe D.

### 4.1.3 Comportement de gassing sous claquage diélectrique et contrainte thermique dans des expériences en laboratoire

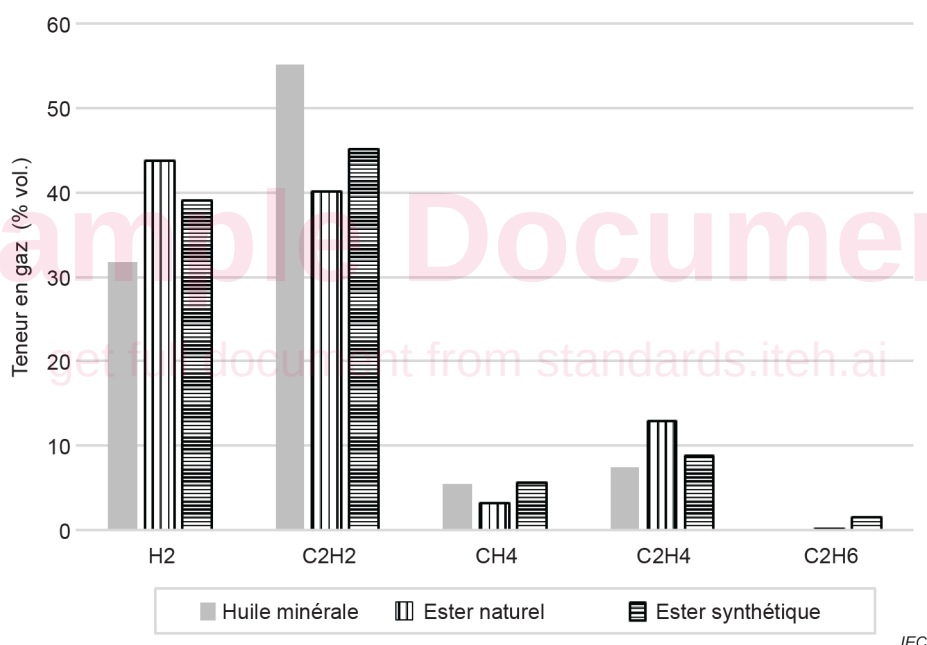
#### 4.1.3.1 Généralités

L'expérience utilisateur d'essais en laboratoire montre que les principales manifestations de défaut dans les analyses des gaz dissous dans l'huile sont similaires à celles de l'huile minérale. De nombreuses recherches systématiques sur l'expérience de gassing et des comparaisons ont été réalisées. Les résultats du comportement des gaz dissous dans l'huile lors de l'extraction sous vide d'huile minérale non inhibée, d'ester synthétique et d'ester naturel à base de soja dans des conditions diélectriques et thermiques sont donnés ci-dessous.

NOTE Par rapport aux huiles minérales, les esters présentent un comportement différent sous contrainte diélectrique, comme la formation et la propagation des streamers, polarités positives et négatives par rapport aux huiles minérales. En outre, leur tendance au chargement électrostatique est différente [2], [3]. La tendance au gassing (selon l'IEC 60628 [27]) des esters synthétiques et naturels est également différente.

#### 4.1.3.2 Exemple pour la production de gaz dans des conditions de claquage diélectrique [4]

Un exemple pour la production de gaz dans des conditions de claquage est donné à la Figure 1.



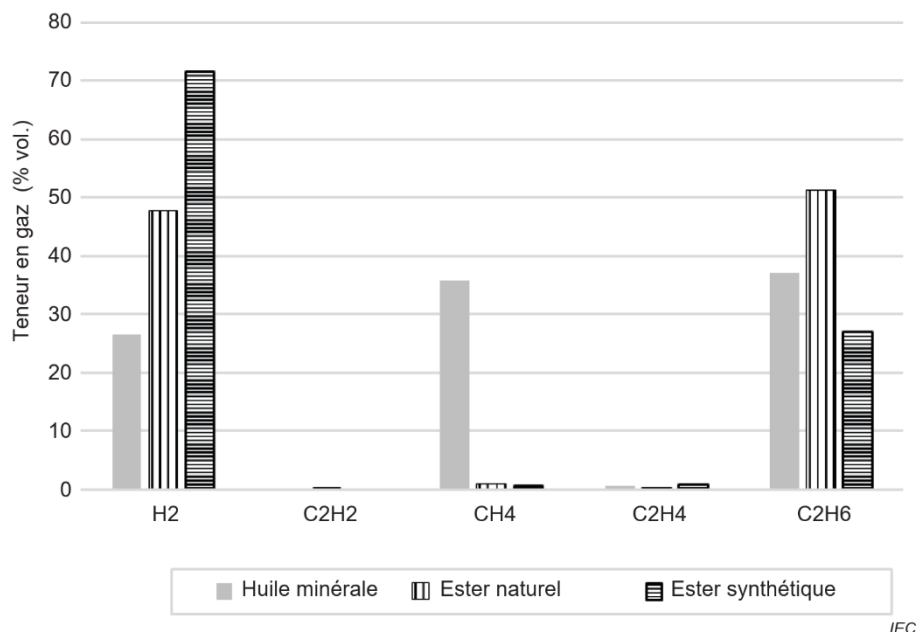
IEC

NOTE Lors de cette expérience, une huile minérale non inhibée stray gassing selon l'IEC 60296 et un ester naturel à base de soja ont été utilisés.

**Figure 1 – Production relative de gaz après 100 claquages conformément à l'IEC 60156 [37] (5 s de pause entre les claquages sans entraînement)**

#### 4.1.3.3 Exemple pour la production de gaz dans des conditions de contraintes thermiques [4]

Un exemple pour la production de gaz après vieillissement à 120 °C pendant 64 h sur des liquides isolants saturés en air (c'est-à-dire stray gassing thermique de l'huile selon la définition de [7]) est donné à la Figure 2. À cette température, un niveau de gassing comparable au stray gassing (voir le 4.1.4) est attendu. Cependant, dans le cas d'un défaut thermique, la quantité de méthane et d'éthylène produite est beaucoup plus élevée [5], [6].



NOTE Lors de cette expérience, une huile minérale non inhibée stray gassing selon l'IEC 60296 et un ester naturel à base de soja ont été utilisés.

**Figure 2 – Production de gaz après vieillissement à 120 °C pendant 64 h sur des liquides isolants saturés en air**

La similitude du profil des gaz entre les esters liquides et l'huile minérale dans des conditions de décharges partielles par effet couronne a été établie dans d'autres publications [8], [9]. Même si les profils de gaz des esters synthétiques et naturels pour les décharges partielles, les décharges et les défauts thermiques sont similaires à ceux des huiles minérales, les concentrations particulières en gaz peuvent être différentes.

#### 4.1.4 Stray gassing sous contrainte thermo-oxydative

Des études de stray gassing en présence et en l'absence d'air, ainsi qu'en présence et en l'absence de cuivre, ont été effectuées par le CIGRE WG D1.70 à 105 °C pendant 48 h [10]. Les résultats pour l'ester synthétique (voir l'IEC 61099 [29]) et pour l'ester naturel à base de soja (voir l'IEC 62770 [31]) par rapport à l'huile minérale non inhibée (voir l'IEC 60296 [26]) sont donnés aux Figures 3 a) à 3 c) (hydrogène), Figures 4 a) à 4 c) (méthane), Figures 5 a) à 5 c) (éthane) et Figures 6 a) à 6 c) (monoxyde de carbone), respectivement. Aucun acétylène n'a été produit dans ces conditions d'essai. La quantité d'éthylène produite dans ces conditions en utilisant ces liquides isolants est négligeable, et n'est donc pas représentée sur le graphique. Le comportement d'autres types d'esters naturels peut être différent.