

---

---

**Engrenages — Usure et défauts des  
dentures —**

**Partie 2:  
Informations supplémentaires**

*Gears — Wear and damage to gear teeth —*

*Part 2: Supplementary information*

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 10825-2:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e3040025-1489-4510-a367-0f9eefaa7d27/iso-tr-10825-2-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 10825-2:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e3040025-1489-4510-a367-0f9eefaa7d27/iso-tr-10825-2-2022>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, 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, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Avant-propos .....                                                                                          | vi        |
| Introduction .....                                                                                          | vii       |
| <b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2</b> <b>Références normatives</b> .....                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>4</b> <b>Aperçu général et avertissements</b> .....                                                      | <b>1</b>  |
| 4.1    Aperçu général .....                                                                                 | 1         |
| 4.2    Avertissements .....                                                                                 | 2         |
| <b>5</b> <b>Endommagements tribologiques (non dus à la fatigue)</b> .....                                   | <b>2</b>  |
| 5.1    Généralités .....                                                                                    | 2         |
| 5.2    Usure type poli miroir .....                                                                         | 3         |
| 5.2.1    Généralités .....                                                                                  | 3         |
| 5.2.2    Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque d'usure<br>type poli miroir ..... | 3         |
| 5.3    Rayures .....                                                                                        | 3         |
| 5.4    Usure abrasive .....                                                                                 | 4         |
| 5.4.1    Généralités .....                                                                                  | 4         |
| 5.4.2    Sources de particules provoquant l'usure abrasive .....                                            | 4         |
| 5.4.3    Méthodes pour réduire l'usure abrasive .....                                                       | 4         |
| 5.5    Grippage .....                                                                                       | 6         |
| 5.5.1    Généralités .....                                                                                  | 6         |
| 5.5.2    Méthodes pour réduire le risque de grippage .....                                                  | 7         |
| 5.5.3    Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de<br>grippage .....              | 8         |
| 5.6    Usure adhésive (Adhésion) .....                                                                      | 9         |
| 5.6.1    Généralités .....                                                                                  | 9         |
| 5.6.2    Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque d'usure<br>adhésive .....         | 10        |
| 5.7    Corrosion de contact .....                                                                           | 10        |
| 5.7.1    Généralités .....                                                                                  | 10        |
| 5.7.2    Faux effet Brinell .....                                                                           | 11        |
| 5.7.3    Corrosion de contact .....                                                                         | 11        |
| 5.7.4    Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de<br>corrosion de contact .....  | 12        |
| 5.8    Usure par interférence .....                                                                         | 12        |
| <b>6</b> <b>Endommagement par fatigue</b> .....                                                             | <b>12</b> |
| 6.1    Fissures de fatigue .....                                                                            | 12        |
| 6.2    Fatigue de contact .....                                                                             | 13        |
| 6.2.1    Généralités .....                                                                                  | 13        |
| 6.2.2    Microécaillage .....                                                                               | 13        |
| 6.2.3    Macroécaillage .....                                                                               | 17        |
| 6.2.4    Dislocation (fatigue en sous-couche) .....                                                         | 22        |
| 6.2.5    Formation de la couche blanche .....                                                               | 23        |
| 6.2.6    Rupture en flanc de dent (TFF) (fatigue de flexion initiée en sous-couche) .....                   | 23        |
| 6.2.7    Rupture par fatigue en intérieur de dent, TIFF .....                                               | 25        |
| 6.3    Fatigue de flexion .....                                                                             | 25        |
| 6.3.1    Fissuration par fatigue de flexion en pied de dent .....                                           | 25        |
| 6.3.2    Fissures dans la jante, le voile et le moyeu .....                                                 | 32        |
| <b>7</b> <b>Rupture non due à la fatigue</b> .....                                                          | <b>33</b> |
| 7.1    Généralités .....                                                                                    | 33        |
| 7.1.1    Rupture fragile .....                                                                              | 33        |

|           |                                                                                                        |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.1.2     | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de rupture fragile.....               | 35        |
| 7.1.3     | Rupture ductile.....                                                                                   | 36        |
| 7.1.4     | Rupture en mode mixte.....                                                                             | 36        |
| 7.2       | Rupture en pied de dent.....                                                                           | 36        |
| 7.3       | Rupture en extrémité de largeur de denture.....                                                        | 36        |
| 7.4       | Rupture par cisaillement de la dent.....                                                               | 37        |
| <b>8</b>  | <b>Déformation plastique.....</b>                                                                      | <b>37</b> |
| 8.1       | Généralités.....                                                                                       | 37        |
| 8.2       | Empreinte.....                                                                                         | 37        |
| 8.3       | Brinelling.....                                                                                        | 37        |
| 8.4       | Fluage à froid.....                                                                                    | 37        |
| 8.5       | Fluage à chaud.....                                                                                    | 38        |
| 8.6       | Déformation plastique du profil de raccordement en pied de dent.....                                   | 38        |
| 8.7       | Rupture après déformation plastique.....                                                               | 38        |
| 8.8       | Déformation plastique par roulement.....                                                               | 38        |
| 8.9       | Déformation plastique par martèlement des dents.....                                                   | 38        |
| 8.10      | Traces de broutage.....                                                                                | 38        |
| 8.11      | Sillons.....                                                                                           | 38        |
| 8.12      | Bavures.....                                                                                           | 39        |
| 8.13      | Déformation par interférence.....                                                                      | 39        |
| 8.13.1    | Interférence entre sommet et pied de dents.....                                                        | 39        |
| 8.13.2    | Interférence entre sommet et creux.....                                                                | 39        |
| 8.13.3    | Engrènement sans jeu.....                                                                              | 39        |
| <b>9</b>  | <b>Problèmes de fabrication.....</b>                                                                   | <b>39</b> |
| 9.1       | Fissures de forgeage.....                                                                              | 39        |
| 9.2       | Tapures de trempe.....                                                                                 | 39        |
| 9.2.1     | Généralités.....                                                                                       | 39        |
| 9.2.2     | Contraintes thermiques.....                                                                            | 40        |
| 9.2.3     | Concentration de contraintes due au traitement thermique.....                                          | 40        |
| 9.2.4     | Sévérité de trempe.....                                                                                | 40        |
| 9.2.5     | Transformation de phase.....                                                                           | 40        |
| 9.2.6     | Défauts matières.....                                                                                  | 41        |
| 9.2.7     | Pratique de traitement thermique.....                                                                  | 41        |
| 9.2.8     | Pratique de revenu.....                                                                                | 41        |
| 9.2.9     | Détection des tapures de trempe.....                                                                   | 41        |
| 9.2.10    | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de tapures de trempe.....             | 41        |
| 9.3       | Criques de rectification.....                                                                          | 42        |
| 9.3.1     | Généralités.....                                                                                       | 42        |
| 9.3.2     | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de criques de rectification.....      | 42        |
| 9.4       | Défaillances des roues dentées par présence d'hydrogène et contrainte résiduelle interne.....          | 43        |
| 9.4.1     | Généralité.....                                                                                        | 43        |
| 9.4.2     | Flocons d'hydrogène.....                                                                               | 43        |
| 9.4.3     | L'œil de poisson.....                                                                                  | 44        |
| 9.4.4     | Fissure de ségrégation.....                                                                            | 45        |
| 9.4.5     | Rupture différée.....                                                                                  | 46        |
| 9.5       | Brûlure de rectification (revenu dû à une rectification).....                                          | 46        |
| 9.6       | Entaille de rectification.....                                                                         | 46        |
| 9.7       | Pelage.....                                                                                            | 46        |
| 9.8       | Séparation de la couche durcie par rapport au cœur.....                                                | 46        |
| 9.8.1     | Généralités.....                                                                                       | 46        |
| 9.8.2     | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de séparation couche durcie/cœur..... | 47        |
| <b>10</b> | <b>Autres endommagements de surface.....</b>                                                           | <b>48</b> |

|        |                                                                                                               |           |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 10.1   | Corrosion.....                                                                                                | 48        |
| 10.1.1 | Généralités.....                                                                                              | 48        |
| 10.1.2 | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque de corrosion.....                            | 49        |
| 10.2   | Cavitation.....                                                                                               | 49        |
| 10.3   | Érosion.....                                                                                                  | 49        |
| 10.4   | Étincelage.....                                                                                               | 49        |
| 10.4.1 | Généralités.....                                                                                              | 49        |
| 10.4.2 | Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque d'endommagement par décharge électrique..... | 50        |
| 10.5   | Surchauffe.....                                                                                               | 50        |
|        | <b>Bibliographie.....</b>                                                                                     | <b>51</b> |

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 10825-2:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e3040025-1489-4510-a367-0f9eefaa7d27/iso-tr-10825-2-2022>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets)).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir [www.iso.org/avant-propos](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 60, *Engrenages*, sous-comité SC 1, *Nomenclature et engrenages à vis*.

Cette première édition de l'ISO/TR 10825-2, avec l'ISO 10825-1, annule et remplace l'ISO 10825:1995, qui a fait l'objet d'une révision technique.

Les principales modifications sont les suivantes:

- l'ISO 10825:1995 se compose maintenant de deux parties: l'ISO 10825-1 et l'ISO/TR 10825-2 qui fournit des informations supplémentaires sur les modes de défaillance.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 10825 se trouve sur le site web de l'ISO.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Le présent document a été élaboré pour aider les lecteurs à identifier les causes possibles de défaillance de denture, et donner des indications sur les moyens d'éviter des défaillances futures. Cependant, il n'est pas destiné à donner une raison définitive pour chaque défaillance observée. Certaines causes incluses font encore l'objet de recherches et de discussions, mais sont présentées dans l'intention d'offrir des possibilités. De plus, dans certains cas, les mesures prises pour réduire le risque d'un type d'endommagement peuvent augmenter le risque d'un autre type d'endommagement.

Le présent document est un complément à l'ISO 10825-1. Pour faciliter la corrélation des informations des deux parties, les deux documents ont la même structure. Certaines sections du présent document sont principalement destinées à garder les structures parallèles.

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 10825-2:2022](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e3040025-1489-4510-a367-0f9eefaa7d27/iso-tr-10825-2-2022)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/e3040025-1489-4510-a367-0f9eefaa7d27/iso-tr-10825-2-2022>





# Engrenages — Usure et défauts des dentures —

## Partie 2: Informations supplémentaires

### 1 Domaine d'application

Le présent document fournit des informations sur l'usure et l'endommagement des dentures. Le contenu présenté est destiné à aider l'utilisateur à mieux comprendre les modes d'endommagement des dents d'engrenages, mais les raisons potentielles d'endommagement et les mesures préventives discutées ne sont pas définitives. De plus, pour des cas individuels, il peut exister d'autres raisons d'endommagements ou de mesures qui ne sont pas mentionnées dans le présent document. Dans le même temps, les raisons des endommagements ou des mesures mentionnées dans le présent document ne sont pas toujours importantes. Dans de nombreux cas, les endommagements peuvent être le résultat de plusieurs facteurs en interaction. Certaines causes qui sont incluses font encore l'objet de recherches et de discussions, mais sont présentées dans le but d'offrir des possibilités.

La solution à de nombreux problèmes de roues dentées implique une étude et une analyse détaillées par des spécialistes; le présent document n'est pas destiné à remplacer une telle expertise.

### 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).

ISO 10825-1, *Engrenages — Usure et défauts des dentures — Partie 1: Nomenclature et caractéristiques*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 10825-1 ainsi que les 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:

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

### 4 Aperçu général et avertissements

#### 4.1 Aperçu général

Les roues dentées peuvent être endommagées par différents mécanismes. L'endommagement peut aller d'une dégradation mineure dont il n'y a pas lieu de tenir compte, ou prendre la forme d'un endommagement rendant l'engrenage inutilisable. Le terme «défaillance de denture» est subjectif et est source de désaccords considérables. Dans le cas de l'endommagement de la surface des flancs, il n'existe pas une seule définition de la défaillance de denture, car la question de savoir si une roue dentée est considérée comme endommagée dépend de l'application spécifique. Lorsqu'il n'y a que de petits changements à la surface, par exemple, quand les dents ont un aspect brillant, aspect poli

miroir, une personne les observant peut croire que les roues dentées ont été «rodées» correctement. Cependant, un autre observateur peut penser que les dents ont été endommagées par une usure par poli miroir. La surface d'une dent peut évoluer de nombreuses manières au fil du temps. La réponse à la question de savoir si les dentures sont considérées comme endommagées ou non dépend de l'ampleur du changement tolérable.

Une rupture, de tout ou partie, d'une dent ou de plusieurs dents, qui se détachent, peut se produire en raison d'un matériau défectueux suite à une seule application d'une contrainte élevée, ou à la suite d'un mécanisme de fatigue qui initie une fissure à la surface de la dent, ou à la suite d'un mécanisme de fatigue qui initie une fissure sous la surface de la dent. Ces cas sont traités séparément.

La charge est un facteur crucial pour les engrenages, de sorte que tous les facteurs d'influence augmentant la charge locale ou globale d'un engrenage sont importants. Quelques exemples sont les vibrations torsionnelles, les forces externes transmises par les arbres, l'accélération et la surcharge.

Les affirmations sur ce qui peut être fait pour atténuer les risques d'usure et d'endommagement des dentures qui sont données dans le présent document ne sont pas des recommandations ou des exigences, puisque l'application détermine ce qui est approprié. Si un train d'engrenages a un risque extrêmement faible d'être endommagé par une cause particulière, alors il n'est pas pertinent d'essayer de réduire le risque d'endommagement provenant de cette cause. Le présent document comprend plusieurs articles qui contiennent un résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire, dans certains cas, les risques d'usure ou d'endommagement. Selon la situation, il se peut qu'aucune ne soit appropriée et il est rare, voire impossible, de les suivre toutes. Les recommandations énumérées tout au long de ce document sont souvent basées sur l'expérience, et beaucoup ne sont pas couvertes par les normes ou les méthodes de calcul respectives.

## 4.2 Avertissements

Les méthodes données pour réduire le risque d'un mode d'endommagement ou de défaillance sont spécifiques à ce mode, et une mise en œuvre peut parfois aggraver ou créer d'autres endommagements ou modes de défaillance. Des changements peuvent entraîner des conséquences inattendues, à la fois sur les engrenages et sur les autres composants du réducteur/multiplicateur, par conséquent, il est prudent d'évaluer rigoureusement tout remède proposé avant mise en œuvre et de tester et évaluer ensuite, après mise en œuvre.

Le présent document est basé sur une expérience avec des roues dentées en acier; cependant, beaucoup d'endommagements et modes de défaillance étudiés s'appliquent à des roues dentées fabriquées dans d'autres matériaux.

Le présent document n'est pas destiné à être utilisé pour déterminer la responsabilité d'une défaillance. Dans de nombreux cas, la responsabilité est impossible à déterminer. Une défaillance de denture peut être provoquée par des événements complètement extérieurs aux boîtes à engrenages, par l'interaction de la boîte à engrenages avec l'équipement relié, par des systèmes de boîtes à engrenages ou des composants autres que les roues dentées, par les matériaux utilisés, par le procédé de fabrication (y compris traitement thermique) ou par la conception des roues dentées. Par exemple, une défaillance «par surcharge» peut être due à une conception insuffisante des roues dentées ou au fait qu'une puissance supérieure à la capacité de charge nominale des dentures ait été imposée sur celles-ci; et il peut ne pas être possible de déterminer de façon concluante la cause principale.

NOTE Dans le présent document, «roue dentée» désigne une roue ou un pignon, à moins que la roue ne soit précisément identifiée.

## 5 Endommagements tribologiques (non dus à la fatigue)

### 5.1 Généralités

Un endommagement tribologique non dû à la fatigue est souvent désigné «usure». Il peut être produit par des particules entraînées dans le lubrifiant, des particules incrustées dans les dents de la roue

dentée conjuguée, une épaisseur de film d'huile insuffisante, ou une perte de lubrifiant. L'usure est l'enlèvement de matière de la surface d'une dent, et telle que décrite dans l'ISO 10825-1, peut aller d'un poli miroir léger à la destruction des dents.

Dans certaines applications, aucune usure n'est acceptable. Cependant, dans d'autres applications, une usure légère est considérée comme normale. L'usure modérée et parfois même sévère sont acceptables dans certaines applications.

## 5.2 Usure type poli miroir

### 5.2.1 Généralités

L'usure type poli miroir est une abrasion à échelle fine (voir Référence [22]) qui confère aux dents une finition brillante et d'aspect poli miroir. En fonction de sa sévérité, le poli miroir peut être classé comme léger, modéré ou sévère. Si elle est extrême, l'usure type poli miroir peut réduire les épaisseurs en sommet des dents jusqu'à avoir une arête tranchante comme un couteau.

Lorsqu'une surface dure est conjuguée à une surface moins dure, l'usure type poli miroir peut se produire préférentiellement sur la surface dure parce que les abrasifs s'incrudent dans la surface moins dure et créent une abrasion à deux corps sur la surface dure.

Une usure type poli miroir peut être favorisée par des additifs chimiquement agressifs lorsque le lubrifiant est contaminé par des abrasifs fins (voir Référence [22]). Bien que les dentures polies peuvent sembler bonnes, l'usure type poli miroir peut être indésirable si elle réduit la précision des roues dentées en usant les profils des dents jusqu'à leur faire perdre leur profil idéal. Des additifs anti-grippage qui contiennent du soufre ou du phosphore sont utilisés dans les lubrifiants pour empêcher le grippage, voir 4.5.1. Ils fonctionnent en formant des films de sulfure de fer et de phosphate de fer sur les zones de denture atteignant des températures élevées. Idéalement, les réactifs réagissent seulement à des températures auxquelles il existe un risque de soudure. Si la vitesse de réaction est trop élevée, et qu'un enlèvement continu des films de surface est provoqué par des abrasifs très fins dans le lubrifiant, l'usure type poli miroir peut devenir excessive (voir Référence [22]).

L'usure type poli miroir peut être évitée en utilisant des additifs moins actifs chimiquement (voir Référence [23]) et une huile propre. Les additifs anti-grippage qui sont appropriés pour les conditions de service peuvent réduire l'usure type poli miroir. Lorsqu'un matériau dispersé, tel que certains additifs anti-grippages, est utilisé, la surveillance peut être utilisée pour détecter si ce matériau bénéfique précipite ou est filtré. Les abrasifs contenus dans le lubrifiant peuvent être éliminés en utilisant une filtration fine ou des vidanges d'huile fréquentes.

### 5.2.2 Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque d'usure type poli miroir

Les méthodes suivantes peuvent être envisagées pour réduire le risque d'usure type poli miroir:

- utilisation d'un système d'additifs moins agressifs chimiquement;
- élimination des abrasifs du système;
- surfaces durcies superficiellement pour le pignon et la roue;
- épaisseur suffisante du film d'huile (par exemple, viscosité, vitesse).

## 5.3 Rayures

Les rayures peuvent être provoquées lors des procédures de manutention ou de montage incorrectes, ou par le passage d'un morceau de matière dure ou abrasive dans l'engrènement.

## 5.4 Usure abrasive

### 5.4.1 Généralités

L'usure abrasive, également appelée abrasion, est l'enlèvement ou le transfert de matière provoqué par la présence de particules dures (comme des débris métalliques, scories, rouille, sable, ou poudre abrasive) dans les réducteurs (ou multiplicateurs). Les particules peuvent être libérées (en suspension dans le lubrifiant) ou incrustées sur la surface des dents de l'engrenage.

L'usure abrasive provoque des rayures ou des griffures sur la surface de la dent, qui sont orientées dans le sens du glissement. Sous grossissement, les rayures prennent l'aspect de sillons parallèles qui sont lisses et propres.

L'abrasion à deux corps se produit lorsque des particules ou des aspérités incrustées sur une dent d'engrenage abrasent la surface de la dent conjuguée. L'abrasion due à des contaminants lâches est appelée abrasion à trois corps. En général, l'abrasion à deux corps est plus dommageable que l'abrasion à trois corps car l'abrasif est fixé dans un corps et s'abrase directement sur l'autre corps. L'abrasion à trois corps est généralement beaucoup moins sévère, car l'abrasif peut rouler, glisser et varier son angle d'approche.

NOTE L'usure abrasive n'est pas limitée aux dentures; elle peut également dégrader sévèrement les roulements, les joints d'étanchéité et d'autres composants. L'abrasion des roulements peut favoriser la défaillance de la denture en provoquant un désalignement.

### 5.4.2 Sources de particules provoquant l'usure abrasive

La contamination pénètre les réducteurs (ou multiplicateurs) en étant présente au moment du montage, générée en interne, absorbée par les reniflards et les joints d'étanchéité, acheminée par le lubrifiant depuis un système de lubrification incorrectement nettoyé, ou ajoutée par inadvertance pendant la maintenance.

ISO/TR 10825-2:2022

Le sable, les scories, la rouille, les copeaux d'usinage, la poussière de rectification, les projections de soudure ou d'autres débris peuvent se frayer un chemin jusqu'à des engrenages neufs.

Les particules générées en interne sont normalement des débris d'usure de roues dentées, de roulements ou d'autres composants dus à la fatigue hertzienne, à l'usure adhésive, et à l'usure abrasive. Les particules d'usure peuvent devenir plus abrasives parce qu'elles s'écrouissent lorsqu'elles sont emprisonnées entre les dents. Les débris d'usure générés en interne peuvent être réduits au maximum en utilisant une denture précise et durcie superficiellement (avec une résistance élevée au macroécailage), des surfaces de dent lisses et des lubrifiants de viscosité appropriés.

### 5.4.3 Méthodes pour réduire l'usure abrasive

#### 5.4.3.1 Généralités

Un lubrifiant propre est essentiel pour empêcher l'usure abrasive. Les particules étrangères dans le lubrifiant endommagent les roues dentées, les roulements et les joints d'étanchéité et peuvent provoquer une dégradation de l'intégrité de l'ensemble à engrenages.

Des bouchons magnétiques peuvent être utilisés pour capturer les particules ferreuses qui sont présentes au démarrage, ou sont générées pendant le fonctionnement. Un contrôle périodique du bouchon magnétique peut être réalisé pour suivre le développement des particules ferreuses pendant le fonctionnement. Des détecteurs magnétiques de copeaux d'usure à alarmes sont également disponibles.

Un système de lubrification soigneusement entretenu et surveillé peut garantir que les roues dentées reçoivent une quantité adéquate de lubrifiant non pollué. La contamination peut être éliminée en vidant et en rinçant le lubrifiant du carter et en changeant le filtre à lubrifiant (s'il y en a un) après un temps de fonctionnement approprié. Habituellement, le fabricant du réducteur recommandera l'intervalle de temps approprié pour changer le filtre ou le lubrifiant. Pour les systèmes de circulation d'huile, une

filtration fine aide à enlever la contamination. Des filtrations très fines ont été utilisées pour augmenter considérablement la durée de vie des engrenages, mais plus la filtration est fine, plus la perte de charge est élevée. Des filtres hors ligne (circuits de filtration externes) peuvent également être utilisés pour nettoyer l'huile. Ils retiennent efficacement les très petites particules (plus fin que ce qui est réalisable avec des filtres) parce qu'ils traitent seulement une faible proportion du débit total. Ils peuvent utiliser des systèmes d'agglomération électrostatique pour réduire la quantité de particules très fines qui normalement traverseraient les filtres. D'autres systèmes peuvent être utilisés pour retirer l'eau de l'huile. Il est à noter qu'une filtration fine peut éliminer certains additifs bénéfiques de certains lubrifiants; le fournisseur de lubrifiant peut être consulté au sujet du niveau de filtration et du type de filtre.

Le lubrifiant peut être changé ou traité pour éliminer les contaminants et maintenir des niveaux d'additifs. Pour les lubrifiants à base minérale, l'eau est normalement considérée comme un contaminant. Pour les engrenages lubrifiés par barbotage, changer le lubrifiant est le seul moyen de retirer la contamination, ce qui se fait généralement fréquemment. Le lubrifiant doit être changé plus fréquemment lorsque la température de fonctionnement est élevée. Voir l'ISO/TR 18792 pour des informations supplémentaires. Pour des engrenages critiques, un programme périodique de contrôle du lubrifiant peut être appliqué pour évaluer l'état du lubrifiant. Le contrôle du lubrifiant peut comprendre des mesures telles qu'une analyse spectrographique et ferrographique de la contamination, accompagnée d'une analyse de l'indice d'acide, de la viscosité, et de la teneur en eau. Les éléments filtrants utilisés peuvent être examinés pour détecter d'éventuels débris d'usure et contaminants.

Des reniflards sont utilisés sur des engrenages pour libérer la pression interne qui se produit lorsque l'air entre par des joints ou lorsque l'air situé à l'intérieur du réducteur (multiplicateur) se dilate et se comprime pendant les échauffements et les refroidissements normaux.

L'emplacement d'un évent de reniflard avec un filtre dans une zone propre et non pressurisée peut empêcher la pénétration de contaminants en suspension dans l'air. Un absorbeur d'humidité dans l'évent peut éliminer l'eau. Dans les environnements particulièrement rudes, le réducteur peut parfois être complètement étanche, et la variation de pression peut être supportée grâce à une chambre de dilatation munie d'un diaphragme flexible.

La contamination du réducteur peut être minimisée en fournissant un environnement aussi propre que possible lors de l'exécution de toute procédure de maintenance impliquant l'ouverture d'une partie de la boîte à engrenages ou du système de lubrification.

À moins que les surfaces des dents d'une roue dentée durcie superficiellement présentent une finition lisse, elles peuvent agir comme un outil abrasif si la roue dentée conjuguée est sensiblement moins dure. C'est la raison pour laquelle une vis sans fin est polie après rectification avant qu'elle ne soit utilisée avec une roue à vis en bronze.

#### 5.4.3.2 Résumé des méthodes qui ont été observées pour réduire le risque d'usure abrasive

Les méthodes suivantes peuvent être envisagées pour réduire le risque d'usure abrasive:

- réduire la contamination du lubrifiant en:
  - rinçant minutieusement l'appareil avant le fonctionnement initial;
  - éliminant la contamination introduite dans les réducteurs neufs en vidangeant le lubrifiant et en rinçant l'appareil après une période d'exploitation appropriée (suivant les préconisations du fabricant du réducteur et du fournisseur de lubrifiant), en refaisant le plein avec le lubrifiant recommandé propre et s'il y a un filtre le remplacer;
  - réduisant au maximum les débris d'usure générés en interne en utilisant une denture durcie superficiellement, des surfaces de dent lisses et des lubrifiants de viscosité adaptée;
  - réduisant au maximum la contamination absorbée en entretenant les joints d'étanchéité et en utilisant des reniflards à filtre situés dans des zones propres et non pressurisées;



- réduisant au maximum la contamination qui est ajoutée pendant la maintenance en utilisant de bonnes procédures d'entretien;
- les systèmes de circulation d'huile en:
  - utilisant une filtration fine en consultation avec le fabricant du réducteur et le fournisseur de lubrifiant;
  - utilisant un filtre hors ligne (circuits de filtration externes) pour éliminer les très petites particules;
  - utilisant un système d'agglomération pour éliminer les particules très fines;
- maintenir le lubrifiant en:
  - changeant ou traitant le lubrifiant pour éliminer la pollution par l'eau;
  - changeant le lubrifiant, pour les systèmes de lubrification à barbotage, comme recommandé par le fabricant du réducteur, ou comme déterminé par une analyse d'échantillonnage de lubrifiants;
  - surveillant le lubrifiant avec une analyse spectrographique et ferrographique accompagnée d'une analyse de l'indice d'acide, de la viscosité et de la teneur en eau. Un échantillonnage de l'huile est la meilleure méthode pour déterminer les intervalles de changement du lubrifiant.

## 5.5 Grippage

### 5.5.1 Généralités

Le grippage est une adhérence sévère qui peut se produire sur une denture lorsqu'elle fonctionne dans le régime de lubrification limite. Si le film lubrifiant est insuffisant pour empêcher un contact métal contre métal important, le tribo-film et les couches d'oxyde qui protègent normalement les surfaces des dents peuvent être percés, et les surfaces de métal nu peuvent se souder. Le glissement qui se produit entre des dents provoque un arrachement des jonctions soudées, un transfert de métal d'une surface de dent à une autre, et une détérioration.

Par contraste avec la fatigue hertzienne et la fatigue de flexion, qui se produisent seulement après une période de fonctionnement, le grippage peut se manifester dès la mise en marche. En fait, les roues dentées sont plus vulnérables au grippage lorsqu'elles sont neuves et que les surfaces de leurs dents n'ont pas encore été préconditionnées par le rodage. Pour réduire le risque de grippage, les roues dentées neuves peuvent être rodées sous charge partielle. Dans certains cas, une série graduelle d'étapes d'augmentation de la charge et de la vitesse, pour réduire la rugosité de surface et permettre la formation de tribo-films sur les dents avant que la charge complète ne soit appliquée. Des augmentations substantielles de la résistance à l'abrasion ont été signalées en raison d'un bon rodage. Les dents peuvent être revêtues de phosphate de fer et de manganèse ou plaquées de cuivre ou d'argent pour réduire le risque de grippage pendant la période critique de rodage. L'utilisation d'une huile avec un additif anti-grippage peut être utile pendant le rodage pour aider à la fois à empêcher le grippage et à faciliter le poli miroir. Cependant, si une huile différente est utilisée pour le rodage, à la fin de la période de rodage, le réducteur (ou multiplicateur) est normalement complètement vidangé et rincé, de sorte que seule l'huile recommandée est présente pendant le fonctionnement en service.

Le mécanisme de base du grippage n'est pas clairement compris, mais il existe un consensus sur le fait qu'il est causé par un échauffement par frottement généré par la combinaison d'une vitesse de glissement élevée et d'une pression de surface intense. La théorie de la température critique (voir Référence [27]) est souvent utilisée pour prévoir le grippage. Elle stipule que le grippage se produit sur des dents qui glissent dans des conditions de lubrification limite, lorsque la température de contact maximale des dents atteint une magnitude critique.

Pour des huiles minérales sans additifs anti-grippage, chaque combinaison d'huile et de matériau de denture a une température de grippage critique qui est constante indépendamment des conditions de

fonctionnement (voir Référence [28]). La température de grippage critique n'est pas toujours constante pour des lubrifiants synthétiques et des lubrifiants avec des additifs anti-grippage, et il convient qu'elle soit déterminée à partir d'essais qui simulent étroitement les conditions de fonctionnement des engrenages ou avec des essais réalisés sur place sur les engrenages réels.

La plupart des additifs anti-grippage sont des composés soufre-phosphore, qui forment des films de lubrification limite en réagissant chimiquement avec les surfaces métalliques des dents en des points locaux de température élevée. Les films anti-grippage permettent d'empêcher un grippage en formant des films solides sur les surfaces des dents et en interdisant un véritable contact métal contre métal. Les films de sulfure de fer et de phosphate de fer ont des points de fusion élevés, ce qui leur permet de rester aussi solides sur les surfaces des dents même à des températures de contact élevées.

Le taux de réaction des additifs anti-grippage est plus importante lorsque les températures de contact entre dents sont les plus élevées. Du fait de l'action de glissement des dents, les films de surface sont éliminés par grattage et se reforment de manière répétée. En effet, le grippage est empêché en étant remplacé par une corrosion légère. Des additifs anti-grippage peuvent favoriser un microécaillage. Certains additifs anti-grippage peuvent être trop actifs chimiquement et favoriser une usure par poli miroir (voir 5.2). Cela peut nécessiter le choix d'additifs anti-grippage moins agressifs, qui déposent un film limite sans réagir avec le métal. Le spécialiste des lubrifiants peut être consulté pour plus d'indications.

Les boîtes à engrenages dotées d'embrayages à friction ou d'antidériveurs peuvent, dans certains cas, être impactées négativement si des additifs qui modifient le coefficient de frottement sont utilisés dans le lubrifiant. Le fabricant de la boîte à engrenages et le fournisseur de lubrifiant peuvent être consultés pour déterminer si le remplacement d'un lubrifiant par un autre est conseillé.

Pour des huiles minérales sans additifs anti-grippage, la température de grippage critique comprise entre 150 °C et 300 °C, s'accroît avec l'augmentation de la viscosité. On considère que la résistance accrue au grippage des lubrifiants à viscosité élevée est due à des différences de composition chimique plutôt qu'à une viscosité accrue. Cependant, une augmentation de la viscosité contribue aussi à réduire le risque de grippage en augmentant l'épaisseur de film élastohydrodynamique (EHL) et en réduisant la température de contact générée par un contact métal contre métal.

Les méthodes de calcul de la température critique sont données dans l'ISO/TS 6336-20 et l'ISO/TS 6336-21. L'ISO 14635 donne des méthodes d'essai pour déterminer la résistance au grippage des lubrifiants pour engrenages.

Le manque ou la perte de lubrifiant et un effet de refroidissement insuffisant (quantité, sens de l'injection) peuvent également provoquer du grippage.

Dans certains cas, le grippage initial peut se produire, mais il cesse ensuite de se développer pendant une opération ultérieure.

Le grippage peut modifier les caractéristiques du matériau de la couche peu profonde près de la surface, avec un re-durcissement et/ou un revenu, ce qui peut entraîner d'autres endommagements ou modes de défaillance.

La nitruration peut améliorer la résistance au frottement en raison du changement de composition chimique de la couche de surface, à condition que la couche blanche reste en place (c'est-à-dire qu'elle ne soit pas éliminée par la rectification après le processus de nitruration final). La cémentation et le durcissement par induction n'ont pas le même effet que la nitruration, mais pour certaines conceptions, ces méthodes de durcissement sont préférées.

### 5.5.2 Méthodes pour réduire le risque de grippage

Tout ce qui réduit la température de masse ou la température-éclair réduit la température de contact totale et atténue le risque de grippage. Des lubrifiants de viscosité plus élevée ou des surfaces de dent plus lisses permettent d'augmenter l'épaisseur de film spécifique, ce qui en retour réduit alors la chaleur par frottement, et donc la température-éclair. Le coefficient de friction du lubrifiant et le paquet d'additifs contribuent fortement à la probabilité de frottement.