

---

---

**Calcul de la capacité de charge aux  
micropiqûres des engrenages  
cylindriques à dentures droite et  
hélicoïdale —**

Partie 1:

**Introduction et principes fondamentaux**

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)  
*Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical  
gears —*

*Part 1: Introduction and basic principles*

ISO/TR 15144-1:2010

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349fle/iso-tr-15144-1-2010>



**PDF – Exonération de responsabilité**

Le présent fichier PDF peut contenir des polices de caractères intégrées. Conformément aux conditions de licence d'Adobe, ce fichier peut être imprimé ou visualisé, mais ne doit pas être modifié à moins que l'ordinateur employé à cet effet ne bénéficie d'une licence autorisant l'utilisation de ces polices et que celles-ci y soient installées. Lors du téléchargement de ce fichier, les parties concernées acceptent de fait la responsabilité de ne pas enfreindre les conditions de licence d'Adobe. Le Secrétariat central de l'ISO décline toute responsabilité en la matière.

Adobe est une marque déposée d'Adobe Systems Incorporated.

Les détails relatifs aux produits logiciels utilisés pour la création du présent fichier PDF sont disponibles dans la rubrique General Info du fichier; les paramètres de création PDF ont été optimisés pour l'impression. Toutes les mesures ont été prises pour garantir l'exploitation de ce fichier par les comités membres de l'ISO. Dans le cas peu probable où surviendrait un problème d'utilisation, veuillez en informer le Secrétariat central à l'adresse donnée ci-dessous.

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 15144-1:2010](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349ffe/iso-tr-15144-1-2010)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349ffe/iso-tr-15144-1-2010>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2010

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, 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'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20  
Tel. + 41 22 749 01 11  
Fax + 41 22 749 09 47  
E-mail [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos .....	v
Introduction.....	vi
<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, définitions, symboles et unités .....</b>	<b>2</b>
<b>3.1</b> <b>Termes et définitions .....</b>	<b>2</b>
<b>3.2</b> <b>Symboles et unités .....</b>	<b>2</b>
<b>4</b> <b>Définition des micropiqûres .....</b>	<b>5</b>
<b>5</b> <b>Formules de base .....</b>	<b>5</b>
<b>5.1</b> <b>Généralités .....</b>	<b>5</b>
<b>5.2</b> <b>Coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres <math>S_\lambda</math>.....</b>	<b>6</b>
<b>5.3</b> <b>Épaisseur locale du film lubrifiant spécifique <math>\lambda_{GF,Y}</math> .....</b>	<b>6</b>
<b>5.4</b> <b>Épaisseur admissible du film lubrifiant spécifique <math>\lambda_{GFP}</math>.....</b>	<b>7</b>
<b>5.5</b> <b>Recommandation concernant le coefficient de sécurité minimal contre la formation de micropiqûres <math>S_{\lambda,min}</math>.....</b>	<b>8</b>
<b>6</b> <b>Paramètre de matériau <math>G_M</math> .....</b>	<b>9</b>
<b>6.1</b> <b>Module d'élasticité réduit <math>E_r</math>.....</b>	<b>9</b>
<b>6.2</b> <b>Coefficient de pression-viscosité à la température de masse <math>\alpha_{\theta M}</math>.....</b>	<b>9</b>
<b>7</b> <b>Paramètre de vitesse <math>U_Y</math> .....</b>	<b>10</b>
<b>7.1</b> <b>Somme des vitesses tangentielles <math>v_{z,Y}</math> .....</b>	<b>10</b>
<b>7.2</b> <b>Viscosité dynamique à la température de masse <math>\eta_{\theta M}</math>.....</b>	<b>11</b>
<b>8</b> <b>Paramètre de charge <math>W_Y</math> .....</b>	<b>12</b>
<b>8.1</b> <b>Pression de contact hertzienne locale <math>p_{dyn,Y,A}</math> selon la méthode A .....</b>	<b>12</b>
<b>8.2</b> <b>Pression de contact hertzienne locale <math>p_{dyn,Y,B}</math> selon la méthode B .....</b>	<b>13</b>
<b>9</b> <b>Paramètre de glissement <math>S_{GF,Y}</math> .....</b>	<b>14</b>
<b>9.1</b> <b>Coefficient de pression-viscosité à la température locale de contact <math>\alpha_{\theta B,Y}</math>.....</b>	<b>14</b>
<b>9.2</b> <b>Viscosité dynamique à la température locale de contact <math>\eta_{\theta B,Y}</math>.....</b>	<b>14</b>
<b>10</b> <b>Définition du point de contact Y sur la ligne de conduite.....</b>	<b>15</b>
<b>11</b> <b>Facteur de répartition de charge <math>X_Y</math> .....</b>	<b>18</b>
<b>11.1</b> <b>Engrenages à denture droite à profils non corrigés.....</b>	<b>18</b>
<b>11.2</b> <b>Engrenages à denture droite à profils corrigés .....</b>	<b>19</b>
<b>11.3</b> <b>Facteur de contrefort <math>X_{but,Y}</math> .....</b>	<b>20</b>
<b>11.4</b> <b>Engrenages à denture hélicoïdale avec <math>\varepsilon_p &lt; 1</math> et à profils non corrigés.....</b>	<b>21</b>
<b>11.5</b> <b>Engrenages à denture hélicoïdale avec <math>\varepsilon_p &lt; 1</math> et à profils corrigés .....</b>	<b>22</b>
<b>11.6</b> <b>Engrenages à denture hélicoïdale avec <math>\varepsilon_p \geq 1</math> et à profils non corrigés.....</b>	<b>23</b>
<b>11.7</b> <b>Engrenages à denture droite avec <math>\varepsilon_p \geq 1</math> et à profils corrigés .....</b>	<b>24</b>
<b>12</b> <b>Température de contact <math>\theta_{B,Y}</math>.....</b>	<b>25</b>
<b>13</b> <b>Température-éclair <math>\theta_{n,Y}</math>.....</b>	<b>25</b>
<b>14</b> <b>Température de masse <math>\theta_M</math> .....</b>	<b>26</b>
<b>14.1</b> <b>Coefficient de frottement moyen <math>\mu_m</math> .....</b>	<b>27</b>
<b>14.2</b> <b>Facteur de pertes de charge <math>H_v</math> .....</b>	<b>28</b>
<b>14.3</b> <b>Facteur de dépouille de tête <math>X_{Ca}</math> .....</b>	<b>29</b>
<b>14.4</b> <b>Facteur de lubrification <math>X_S</math>.....</b>	<b>30</b>

<b>Annexe A</b> (informative) <b>Calcul de l'épaisseur admissible du film lubrifiant spécifique <math>\lambda_{GFP}</math> pour les huiles donnant un résultat d'essai de micropiqûres conforme à la Fiche d'information FVA n° 54/7</b> .....	<b>31</b>
<b>Annexe B</b> (informative) <b>Exemple de calcul</b> .....	<b>33</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>55</b>

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 15144-1:2010](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349fle/iso-tr-15144-1-2010)  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349fle/iso-tr-15144-1-2010>

## 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 (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

Exceptionnellement, lorsqu'un comité technique a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales (ceci pouvant comprendre des informations sur l'état de la technique par exemple), il peut décider, à la majorité simple de ses membres, de publier un Rapport technique. Les Rapports techniques sont de nature purement informative et ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données fournies ne soient plus jugées valables ou utiles.

L'attention est appelée 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.

L'ISO/TR 15144-1 a été élaboré par le comité technique ISO/TC 60, *Engrenages*, sous-comité SC 2, *Calcul de la capacité des engrenages*.

L'ISO/TR 15144 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale*:

— *Partie 1: Introduction et principes fondamentaux*

## Introduction

La présente partie de l'ISO/TR 15144 définit les principes de calcul de la résistance aux micropiqûres des engrenages cylindriques à denture extérieure droite et hélicoïdale et à profil en développante de cercle.

Le modèle de l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant dans la zone de contact constitue la base pour le calcul de la capacité de charge aux micropiqûres d'un train d'engrenages. Il existe de nombreux paramètres d'influence, tels que la topographie de surface, le niveau de pression de contact et les composants chimiques du lubrifiant. Bien que l'influence de ces paramètres sur les performances aux micropiqûres d'un train d'engrenages soit connue, il est nécessaire d'indiquer que les études se poursuivent dans ce domaine et que la science n'est pas encore parvenue à inclure directement ces paramètres spécifiques dans les méthodes de calcul. Par ailleurs, il s'avère que l'application correcte des dépouilles de tête et de pied (correction de profil en développante de cercle) a une grande influence sur la formation de micropiqûres et qu'il convient donc d'appliquer des valeurs appropriées. L'état de surface constitue un autre paramètre essentiel.  $R_a$  est actuellement utilisé, mais on a constaté que d'autres aspects, tels que  $R_z$  ou le vrillage, avaient des effets considérables susceptibles de se manifester lors du processus de finition de surface utilisé.

Bien que le calcul de l'épaisseur spécifique du film lubrifiant ne fournisse pas une méthode directe d'évaluation de la résistance aux micropiqûres, il peut néanmoins fournir des critères d'évaluation lorsqu'il est appliqué en tant que tel dans une procédure comparative appropriée basée sur des performances connues des engrenages.

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 15144-1:2010](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349f1e/iso-tr-15144-1-2010)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349f1e/iso-tr-15144-1-2010>

# Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale —

## Partie 1: Introduction et principes fondamentaux

### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO/TR 15144 décrit une procédure de calcul de la résistance aux micropiqûres des engrenages cylindriques à denture extérieure. Elle a été élaborée sur la base d'essais et d'observations réalisés sur des transmissions par engrenages lubrifiés à l'huile ayant des modules compris entre 3 mm et 11 mm et des vitesses primitives de fonctionnement comprises entre 8 m/s et 60 m/s. Cependant, la procédure peut être appliquée à toute paire d'engrenages ayant des données de référence convenables, à condition que les critères spécifiés ci-dessous soient satisfaits.

Les formules spécifiées sont applicables aux engrenages cylindriques menants ainsi qu'aux engrenages cylindriques menés avec des profils de denture conformes à la crémaillère de référence spécifiée dans l'ISO 53. Elles sont également applicables à des dentures conjuguées à d'autres crémaillères de référence lorsque le rapport de conduite équivalent est inférieur à  $\varepsilon_{\text{an}} = 2,5$ . Les résultats concordent bien avec d'autres méthodes pour des angles de pression normaux jusqu'à 25°, pour des angles d'hélice de référence jusqu'à 25° et dans les cas où la vitesse primitive de fonctionnement est supérieure à 2 m/s.

La présente partie de l'ISO/TR 15144 n'est pas applicable à l'évaluation de types d'endommagement de surface de dentures d'engrenages autres que les micropiqûres.

### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 53:1998, *Engrenages cylindriques de mécanique générale et de grosse mécanique — Tracé de référence*

ISO 1122-1:1998, *Vocabulaire des engrenages — Partie 1: Définitions géométriques*

ISO 1328-1:1995, *Engrenages cylindriques — Système ISO de précision — Partie 1: Définitions et valeurs admissibles des écarts pour les flancs homologues de la denture*

ISO 6336-1:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale — Partie 1: Principes de base, introduction et facteurs généraux d'influence*

ISO 6336-2:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale — Partie 2: Calcul de la résistance à la pression de contact (piqûre)*

ISO 21771:2007, *Engrenages — Roues et engrenages cylindriques à développante — Concepts et géométrie*

ISO/TR 13989-1:2000, *Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoides — Partie 1: Méthode de la température-éclair*

ISO/TR 13989-2:2000, *Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoides — Partie 2: Méthode de la température intégrale*

### 3 Termes, définitions, symboles et unités

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 1122-1, l'ISO 6336-1 et l'ISO 6336-2 s'appliquent.

#### 3.2 Symboles et unités

Les symboles utilisés dans le présent document sont donnés dans le Tableau 1. Les unités de longueur mètre, millimètre et micromètre sont choisies conformément à l'usage en la matière. Les conversions des unités sont déjà comprises dans les équations données.

Tableau 1 — Symboles et unités

Symbole	Description	Unité
$a$	entraxe	mm
$B_{M1}$	coefficient de contact thermique du pignon	$N/(m \cdot s^{0.5} \cdot K)$
$B_{M2}$	coefficient de contact thermique de la roue	$N/(m \cdot s^{0.5} \cdot K)$
$b$	largeur de denture	mm
$C_{a1}$	dépouille de tête du pignon	$\mu m$
$C_{a2}$	dépouille de tête de la roue	$\mu m$
$C_{eff}$	dépouille de tête effective	$\mu m$
$c_{M1}$	chaleur spécifique par unité de masse du pignon	$J/(kg \cdot K)$
$c_{M2}$	chaleur spécifique par unité de masse de la roue	$J/(kg \cdot K)$
$c'$	rigidité maximale par unité de largeur de denture (rigidité simple) d'une paire de dents	$N/(mm \cdot \mu m)$
$c_{\gamma\alpha}$	valeur moyenne de la rigidité d'engrènement par unité de largeur de denture	$N/(mm \cdot \mu m)$
$d_{a1}$	diamètre de tête du pignon	mm
$d_{a2}$	diamètre de tête de la roue	mm
$d_{b1}$	diamètre de base du pignon	mm
$d_{b2}$	diamètre de base de la roue	mm
$d_{w1}$	diamètre primitif du pignon	mm
$d_{w2}$	diamètre primitif de la roue	mm
$d_{Y1}$	diamètre du cercle Y du pignon	mm
$d_{Y2}$	diamètre du cercle Y de la roue	mm
$E_r$	module d'élasticité réduit	$N/mm^2$
$E_1$	module d'élasticité du pignon	$N/mm^2$
$E_2$	module d'élasticité de la roue	$N/mm^2$
$F_{bt}$	force nominale apparente dans le plan d'action (plan tangent aux cylindres de base)	N
$F_t$	force tangentielle (nominale) sur le cylindre de référence par engrènement	N

Tableau 1 (suite)

Symbole	Description	Unité
$G_M$	paramètre de matériau	-
$g_Y$	paramètre sur la ligne de conduite (distance du point Y au point A)	mm
$g_\alpha$	longueur de la ligne de conduite	mm
$H_V$	facteur de pertes de charge	-
$h_Y$	épaisseur locale du film lubrifiant	$\mu\text{m}$
$K_A$	facteur d'application	-
$K_{H\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge	-
$K_{H\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge	-
$K_V$	facteur dynamique	-
$n_1$	vitesse de rotation du pignon	$\text{min}^{-1}$
$P$	puissance transmise	kW
$p_{et}$	pas de base apparent sur la ligne de conduite	mm
$p_{dyn,Y}$	pression de contact hertzienne locale comprenant les facteurs de charge K	$\text{N/mm}^2$
$p_{H,Y}$	pression de contact hertzienne nominale locale	$\text{N/mm}^2$
$R_a$	rugosité arithmétique moyenne effective	$\mu\text{m}$
$R_{a1}$	rugosité arithmétique moyenne du pignon	$\mu\text{m}$
$R_{a2}$	rugosité arithmétique moyenne de la roue	$\mu\text{m}$
$S_{GF,Y}$	paramètre de glissement local	-
$S_\lambda$	coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres	-
$S_{\lambda,min}$	coefficient de sécurité minimum requis contre la formation de micropiqûres	-
$T_1$	couple nominal sur le pignon	Nm
$U_Y$	paramètre de vitesse local	-
$u$	rapport d'engrenage	-
$v_{g,Y}$	vitesse de glissement locale	m/s
$v_{r1,Y}$	vitesse tangentielle locale sur le pignon	m/s
$v_{r2,Y}$	vitesse tangentielle locale sur la roue	m/s
$v_{\Sigma,C}$	somme des vitesses tangentielles au point primitif	m/s
$v_{\Sigma,Y}$	somme des vitesses tangentielles au point Y	m/s
$W_W$	facteur de matériau	-
$W_Y$	paramètre de charge local	-
$X_{but,Y}$	facteur de contrefort local	-
$X_{Ca}$	facteur de dépouille de tête	-
$X_L$	facteur lubrifiant	-
$X_R$	facteur de rugosité	-
$X_S$	facteur de lubrification	-
$X_Y$	facteur de répartition de charge locale	-
$Z_E$	facteur d'élasticité	$(\text{N/mm}^2)^{0,5}$
$z_1$	nombre de dents du pignon	-
$z_2$	nombre de dents de la roue	-
$\alpha_t$	angle de pression apparent	°
$\alpha_{wt}$	angle de pression sur le cylindre primitif de fonctionnement	°

Tableau 1 (suite)

Symbole	Description	Unité
$\alpha_{\theta B,Y}$	coefficient de pression-viscosité à la température locale de contact	$\text{m}^2/\text{N}$
$\alpha_{\theta M}$	coefficient de pression-viscosité à la température de masse	$\text{m}^2/\text{N}$
$\alpha_{38}$	coefficient de pression-viscosité à 38 °C	$\text{m}^2/\text{N}$
$\beta_b$	angle d'hélice de base	°
$\varepsilon_{\max}$	rapport maximal de conduite de saillie	-
$\varepsilon_a$	rapport de conduite apparent	-
$\varepsilon_{an}$	rapport de conduite équivalent, rapport de conduite apparent de l'engrenage équivalent à denture droite	-
$\varepsilon_\beta$	rapport de recouvrement	-
$\varepsilon_\gamma$	rapport de conduite total	-
$\varepsilon_1$	rapport de conduite de saillie du pignon	-
$\varepsilon_2$	rapport de conduite de saillie de la roue	-
$\eta_{\theta B,Y}$	viscosité dynamique à la température locale de contact	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\eta_{\theta M}$	viscosité dynamique à la température de masse	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\eta_{\theta \text{oil}}$	viscosité dynamique à la température d'huile en entrée/au bain	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\eta_{38}$	viscosité dynamique à 38 °C	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$\theta_{B,Y}$	température locale de contact	°C
$\theta_{n,Y}$	température-éclair locale	°C
$\theta_M$	température de masse	°C
$\theta_{\text{oil}}$	température au carter d'huile	°C
$\lambda_{GF,\min}$	épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant dans la zone de contact	-
$\lambda_{GF,Y}$	épaisseur spécifique locale du film lubrifiant	-
$\lambda_{GFP}$	épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant	-
$\lambda_{GFT}$	épaisseur spécifique limite du film lubrifiant des engrenages d'essai	-
$\lambda_{M1}$	conductivité thermique spécifique du pignon	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
$\lambda_{M2}$	conductivité thermique spécifique de la roue	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
$\mu_m$	coefficient de frottement moyen	-
$\nu_{\theta B,Y}$	viscosité cinématique à la température locale de contact	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\nu_{\theta M}$	viscosité cinématique à la température de masse	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\nu_1$	coefficient de Poisson du pignon	-
$\nu_2$	coefficient de Poisson de la roue	-
$\nu_{100}$	viscosité cinématique à 100 °C	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\nu_{40}$	viscosité cinématique à 40 °C	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\rho_{M1}$	densité du pignon	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_{M2}$	densité de la roue	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho_{n,C}$	rayon de courbure relative normal au diamètre primitif	mm
$\rho_{n,Y}$	rayon de courbure relative normal au point Y	mm
$\rho_{t,Y}$	rayon de courbure relative apparent au point Y	mm
$\rho_{t1,Y}$	rayon de courbure apparent du pignon au point Y	mm
$\rho_{t2,Y}$	rayon de courbure apparent de la roue au point Y	mm

Tableau 1 (suite)

Symbole	Description	Unité
$\rho_{\theta B, Y}$	densité du lubrifiant à la température locale de contact	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\theta M}$	densité du lubrifiant à la température de masse	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{15}$	densité du lubrifiant à 15 °C	kg/m <sup>3</sup>
<b>Indices des symboles</b>		
paramètre pour tout point de contact Y dans la zone de contact pour la méthode A et sur la ligne d'action pour la méthode B; (tous les paramètres indicés Y doivent être calculés avec des valeurs locales)		

## 4 Définition des micropiqûres

L'apparition de micropiqûres est un phénomène qui se produit lors d'un contact de type hertzien en présence de roulement et de glissement dans des régimes de lubrification élastohydrodynamique ou limite. La formation de micropiqûres est influencée par les conditions de fonctionnement telles que charge, vitesse, glissement, température, topographie des surfaces, épaisseur spécifique du film lubrifiant et composition chimique du lubrifiant. Les micropiqûres sont plus couramment observées sur des matériaux ayant une dureté superficielle élevée.

Ce phénomène se traduit par la formation de nombreuses fissures superficielles. Les fissures se propagent à un angle peu profond par rapport à la surface, formant ainsi des micropiqûres. Les micropiqûres sont petites par rapport à la dimension de la zone de contact, en général de l'ordre de 10 à 20 µm de profondeur. Les micropiqûres peuvent fusionner pour produire une surface fissurée continue ayant l'aspect d'une surface terne et matte lors d'un examen visuel sans grossissement.

«Micropiqûres» est le terme préféré pour désigner ce phénomène, mais il peut aussi être désigné par décoloration grise, petite tâche grise, dépolissage et pelade. Des exemples de micropiqûres sont illustrés dans l'ISO 10825 [8].

La formation de micropiqûres peut s'interrompre. Toutefois, si elle continue de progresser, cela peut entraîner une réduction de la précision de la denture des engrenages ainsi qu'une augmentation des charges dynamiques et du bruit. Si le phénomène ne cesse pas et continue de se propager, cela peut entraîner la formation de macropiqûres ainsi que d'autres modes de défaillance de dentures.

## 5 Formules de base

### 5.1 Généralités

Le calcul de la résistance aux micropiqûres est basé sur l'épaisseur spécifique locale  $\lambda_{GF, Y}$  du film lubrifiant dans la zone de contact et sur l'épaisseur spécifique admissible  $\lambda_{GFP}$  [11] du film lubrifiant. On suppose que la formation de micropiqûres peut avoir lieu lorsque l'épaisseur spécifique minimale  $\lambda_{GF, min}$  du film lubrifiant est inférieure à une valeur critique correspondante  $\lambda_{GFP}$ . Les deux valeurs  $\lambda_{GF, min}$  et  $\lambda_{GFP}$  doivent être calculées séparément pour le pignon et la roue dans la zone de contact. On doit admettre que la détermination de l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant et l'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant doivent être basées sur les paramètres de fonctionnement.

La résistance aux micropiqûres peut être déterminée en comparant l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant avec la valeur limite correspondante déduite à partir d'engrenages en service ou d'essais d'engrenages spécifiques. Cette comparaison sera exprimée par le coefficient de sécurité  $S_{\lambda}$  qui doit être égal ou supérieur à un coefficient de sécurité minimal  $S_{\lambda, min}$  contre la formation de micropiqûres.

La formation de micropiqûres se produit principalement dans des zones de glissement spécifique négatif. Le glissement spécifique négatif doit se situer le long de la ligne de conduite (voir Figure 1) entre les points A et

C sur la roue menante et entre les points C et E sur la roue menée. En tenant compte des influences du lubrifiant, de la rugosité de surface, de la géométrie des engrenages et des conditions de fonctionnement, l'épaisseur spécifique du film lubrifiant  $\lambda_{GF,Y}$  peut être calculée pour chaque point dans la zone de contact.

**5.2 Coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres  $S_\lambda$**

Pour représenter la résistance aux micropiqûres, le coefficient de sécurité  $S_\lambda$  est défini selon l'Équation (1).

$$S_\lambda = \frac{\lambda_{GF,min}}{\lambda_{GFP}} \geq S_{\lambda,min} \tag{1}$$

où

$\lambda_{GF,min} = \min(\lambda_{GF,Y})$  est l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant dans la zone de contact;  $\lambda_{GF,Y}$  est l'épaisseur spécifique locale du film lubrifiant (voir 5.3);

$\lambda_{GFP}$  est l'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant (voir 5.4);

$S_{\lambda,min}$  est le coefficient de sécurité minimal requis (voir 5.5).

L'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant est déterminée à partir de toutes les valeurs locales calculées de l'épaisseur spécifique du film lubrifiant  $\lambda_{GF,Y}$  obtenue à partir de l'Équation (2).

**5.3 Épaisseur spécifique locale du film lubrifiant  $\lambda_{GF,Y}$**

Pour la détermination du coefficient de sécurité  $S_\lambda$ , l'épaisseur locale du film lubrifiant  $h_Y$  selon Dowson/Higginson [5] dans la zone de contact doit être connue et comparée avec la rugosité de surface effective.

$$\lambda_{GF,Y} = \frac{h_Y}{Ra} \tag{2}$$

ISO/TR 15144-1:2010  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4dc1cf0c-a215-4759-bb2f-605352349f1e/iso-tr-15144-1-2010>

où

$$Ra = 0,5 \cdot (Ra_1 + Ra_2) \tag{3}$$

$$h_Y = 1600 \cdot \rho_{n,Y} \cdot G_M^{0,6} \cdot U_Y^{0,7} \cdot W_Y^{-0,13} \cdot S_{GF,Y}^{0,22} \tag{4}$$

$Ra$  est la valeur de la rugosité arithmétique moyenne effective;

$Ra_1$  est la rugosité arithmétique moyenne du pignon (comparer avec l'ISO 6336-2);

$Ra_2$  est la rugosité arithmétique moyenne de la roue (comparer avec l'ISO 6336-2);

$h_Y$  est l'épaisseur locale du film lubrifiant;

$\rho_{n,Y}$  est le rayon de courbure relative normal au point Y (voir Article 10);

$G_M$  est le paramètre de matériau (voir Article 6);

$U_Y$  est le paramètre de vitesse local (voir Article 7);

$W_Y$  est le paramètre de charge local (voir Article 8);

$S_{GF,Y}$  est le paramètre local de glissement (voir Article 9).

Dans le cas de la méthode B, il convient de calculer l'Équation (4) pour les sept points locaux (Y) définis en 5.3 b) en utilisant les valeurs pour  $\rho_{n,Y}$ ,  $U_Y$ ,  $W_Y$  et  $S_{GF,Y}$  qui existent en chaque point Y. La valeur minimale parmi les sept valeurs de  $h_Y$  ( $\lambda_{GF,Y}$ ) doit être utilisée dans l'Équation (1).

Un exemple de calcul est présenté dans l'Annexe B.

#### a) Méthode A

L'épaisseur spécifique locale du film lubrifiant peut être déterminée dans l'ensemble de la zone de contact à l'aide d'un programme de calcul approprié des engrenages. Afin de déterminer l'épaisseur spécifique locale du film lubrifiant, la distribution de la charge, l'influence de la vitesse normale et du glissement en fonction des changements de phase d'engrènement et les conditions réelles de fonctionnement doivent être prises en compte.

#### b) Méthode B

Cette méthode implique l'hypothèse selon laquelle l'épaisseur spécifique locale déterminante du film lubrifiant se situe sur le flanc de la dent dans la zone de glissement négatif. Pour des raisons de simplification, le calcul de l'épaisseur spécifique locale du film lubrifiant est limité à certains points sur la ligne d'action. Pour cela, le point le plus bas A et le point le plus haut E sur la ligne de conduite, le point le plus bas B et le point le plus haut D en contact unique d'une paire de dents, le point médian AB entre A et B, le point médian DE entre D et E ainsi que le point primitif C sont étudiés.

### 5.4 Épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant $\lambda_{GFP}$

Pour la détermination de l'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant  $\lambda_{GFP}$ , différentes procédures sont applicables.

#### a) Méthode A

Pour la méthode A, des études expérimentales ou l'expérience pratique concernant la formation de micropiqûres sur des engrenages réels sont utilisées.

Le fait de faire fonctionner des engrenages réels dans des conditions où la formation de micropiqûres vient juste de se produire permet de calculer l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant conformément à 5.3 a). Cette valeur est équivalente à l'épaisseur spécifique limite du film lubrifiant utilisée pour calculer la capacité de charge aux micropiqûres.

De telles études expérimentales peuvent être réalisées sur des engrenages ayant la même conception que la paire d'engrenages réels. Dans ce cas, la fabrication des engrenages, leur précision, les conditions de fonctionnement, le lubrifiant et la température de fonctionnement doivent être appropriés pour le système réel de transmission de puissance par engrenages.

Le coût de cette méthode ne se justifie généralement que pour le développement de nouveaux produits ou pour des systèmes de transmission par engrenages dont la défaillance aurait de graves conséquences.

Autrement, l'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant  $\lambda_{GFP}$  peut être issue de la prise en considération des dimensions, des conditions de service et de la performance des engrenages de référence contrôlés en essai avec le plus grand soin et utilisés avec leur lubrifiant respectif. Plus les dimensions et les conditions de service des engrenages réels ressemblent étroitement à celles des engrenages de référence, plus l'application de ces valeurs sera efficace pour des puissances calculées ou des vérifications de calculs.

#### b) Méthode B

La méthode adoptée est validée en réalisant avec beaucoup de soin des études comparatives des suivis bien documentés d'un grand nombre d'engrenages d'essai applicables au type, à la qualité et à la fabrication des engrenages étudiés. L'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant  $\lambda_{GFP}$  est calculée à partir de l'épaisseur spécifique critique du film lubrifiant  $\lambda_{GFT}$  obtenue selon toute méthode d'essai normalisée applicable pour évaluer la résistance aux micropiqûres de lubrifiants ou de matériaux au moyen d'engrenages

d'essai mis en service dans des conditions d'essai spécifiées. L'épaisseur spécifique critique du film lubrifiant  $\lambda_{GFT}$  est fonction de la température, de la viscosité de l'huile, de l'huile de base et de la composition chimique des additifs; elle peut être calculée à partir de l'Équation (2) au niveau du point de contact des engrenages d'essai définis lorsque l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant doit être déterminée et pour les conditions d'essai lorsque la limite de défaillance concernant les micropiqûres dans la procédure d'essai normalisée a été atteinte.

Les engrenages d'essai et les conditions d'essai (par exemple, la température d'essai) doivent être appropriés pour les engrenages réels étudiés.

Tout essai normalisé peut être utilisé pour déterminer les données. Si aucune procédure d'essai spécifique n'est disponible ni prescrite, il existe un grand nombre de méthodes d'essai normalisées à l'échelle internationale pour l'évaluation de la performance des engrenages, des lubrifiants et des matériaux face aux micropiqûres. Il existe des méthodes d'essai largement utilisées telles que l'essai de micropiqûres FVA-FZG [7], l'essai aux micropiqûres Flender [12], l'essai aux micropiqûres BGA-DU [2] et l'essai aux micropiqûres selon [3]. L'Annexe A fournit quelques données générales d'essai (uniquement pour référence) qui ont été obtenues à l'aide de la procédure d'essai selon la Fiche d'information FVA n° 54/7 [7] où une valeur de  $\lambda_{GFP}$  peut être calculée pour une référence généralisée à partir de l'Équation (A.1).

### 5.5 Recommandation concernant le coefficient de sécurité minimal contre la formation de micropiqûres $S_{\lambda, \min}$

Pour une application donnée, la justification d'une résistance adaptée aux micropiqûres consiste à calculer la valeur du coefficient de sécurité  $S_{\lambda}$  qui doit être supérieure ou égale à la valeur  $S_{\lambda, \min}$ .

Certaines valeurs minimales doivent être déterminées pour le coefficient de sécurité. Des recommandations sur le choix de ces valeurs minimales (sont données ci-après, sans pour autant proposer de valeurs numériques.

Pour obtenir la fiabilité exigée au juste coût, une probabilité de défaillance appropriée et le coefficient de sécurité doivent être choisis avec précaution. Si les performances de l'engrenage peuvent être analysées de manière précise, au moyen d'essais sur un engrenage réel, dans des conditions de charge réelles, un coefficient de sécurité plus faible et un procédé de fabrication plus économique peuvent être permis:

$$\text{Coefficient de sécurité} = \frac{\text{Épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant calculée}}{\text{Épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant}}$$

En plus des exigences générales et des exigences particulières concernant l'épaisseur spécifique du film lubrifiant, le coefficient de sécurité doit être choisi après avoir soigneusement pris en compte les influences suivantes:

- fiabilité des valeurs de charge utilisées dans le calcul: si le chargement sur la denture ou la réponse de l'engrenage aux vibrations sont estimés plutôt que mesurés, il convient d'utiliser un coefficient de sécurité plus élevé;
- variations des caractéristiques géométriques et de l'état de surface de la denture dues aux tolérances de fabrication;
- variations dans l'alignement des axes;
- variations des caractéristiques du matériau dues aux variations de la composition chimique, de la propreté et de la microstructure (qualité du matériau et traitement thermique);
- variations dans la lubrification et sa maintenance pendant toute la durée de vie en service de l'engrenage.

Selon la fiabilité des hypothèses sur lesquelles les calculs sont basés (par exemple, les hypothèses sur le chargement des dentures) et selon la fiabilité exigée pour l'engrenage (conséquences de l'apparition d'une dégradation), un coefficient de sécurité approprié doit être choisi.

Lorsque les engrenages sont réalisés suivant une spécification ou dans le cadre d'un appel d'offres (devis), pour lequel le fabricant de l'engrenage doit fournir des roues dentées ou une transmission de puissance par engrenages ayant une capacité spécifique calculée suivant le présent rapport technique (en dimensionnement), la valeur du coefficient de sécurité pour les micropiqûres doit être convenue entre le fabricant et l'utilisateur.

## 6 Paramètre de matériau $G_M$

Le paramètre de matériau  $G_M$  tient compte de l'influence du module d'élasticité réduit  $E_r$  et du coefficient de pression-viscosité du lubrifiant à la température de masse  $\alpha_{\theta M}$ .

$$G_M = 10^6 \cdot \alpha_{\theta M} \cdot E_r \quad (5)$$

où

$E_r$  est le module d'élasticité réduit (voir 6.1);

$\alpha_{\theta M}$  est le coefficient de pression-viscosité à la température de masse (voir 6.2).

### 6.1 Module d'élasticité réduit $E_r$

Pour les roues conjuguées réalisées à partir de matériaux différents ayant des modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$  différents, le module d'élasticité réduit  $E_r$  peut être déterminé par l'Équation (6). Pour les roues conjuguées réalisées à partir du même matériau  $E = E_1 = E_2$ , l'Équation (7) peut être utilisée.

$$E_r = 2 \cdot \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$E_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{pour } E_1 = E_2 = E \text{ et } \nu_1 = \nu_2 = \nu \quad (7)$$

où

$E_1$  est le module d'élasticité du pignon (pour l'acier:  $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ );

$E_2$  est le module d'élasticité de la roue (pour l'acier:  $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ );

$\nu_1$  est le coefficient de Poisson du pignon (pour l'acier:  $\nu = 0,3$ );

$\nu_2$  est le coefficient de Poisson de la roue (pour l'acier:  $\nu = 0,3$ ).

### 6.2 Coefficient de pression-viscosité à la température de masse $\alpha_{\theta M}$

Si les données relatives au coefficient de pression-viscosité à la température de masse  $\alpha_{\theta M}$  pour le lubrifiant spécifique ne sont pas disponibles, elles peuvent être approchées par l'Équation (8) (voir [9]).

$$\alpha_{\theta M} = \alpha_{38} \cdot \left[ 1 + 516 \cdot \left( \frac{1}{\theta_M + 273} - \frac{1}{311} \right) \right] \quad (8)$$

où

$\alpha_{38}$  est le coefficient de pression-viscosité du lubrifiant à  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ ;