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

Partie 22:
**Calcul de la capacité de charge aux
micropiqûres**

*Calculation of load capacity of spur and helical gears —
Part 22: Calculation of micropitting load capacity*

[ISO/TS 6336-22:2018](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018>



iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO/TS 6336-22:2018](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2018

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
Fax: +41 22 749 09 47
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos.....	v
Introduction.....	vi
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes, définitions, symboles et unités	1
3.1 Termes et définitions.....	1
3.2 Symboles et unités.....	2
4 Micropiqûres	5
5 Formules de base	5
5.1 Généralités.....	5
5.2 Coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres, S_λ	6
5.3 Épaisseur spécifique locale du film lubrifiant, λ_{GFY}	6
5.4 Épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant, λ_{GFP}	8
5.5 Recommandation concernant le coefficient de sécurité minimal contre la formation de micropiqûres, $S_{\lambda,\mu\nu}$	9
6 Paramètre de matériau, G_M	10
6.1 Généralités.....	10
6.2 Module d'élasticité réduit, E_r	10
6.3 Coefficient de pression-viscosité à la température de masse, $\alpha_{\theta M}$	11
7 Paramètre de vitesse local, U_Y	11
7.1 Généralités.....	11
7.2 Somme des vitesses tangentielles au point, $v_{\Sigma,Y}$	12
7.3 Viscosité dynamique à la température de masse, $\eta_{\theta M}$	12
7.3.1 Généralités.....	12
7.3.2 Viscosité cinématique à la température de masse, $\nu_{\theta M}$	13
7.3.3 Densité du lubrifiant à la température de masse, $\rho_{\theta M}$	13
8 Paramètre de charge local, W_Y	13
8.1 Généralités.....	13
8.2 Pression de contact hertzienne locale $p_{dyn,Y,A}$ selon la Méthode A.....	14
8.3 Pression de contact hertzienne locale $p_{dyn,Y,B}$ selon la Méthode B.....	14
8.3.1 Généralités.....	14
8.3.2 Pression de contact hertzienne nominale locale, $p_{H,Y,B}$	15
9 Paramètre de glissement local, S_{GFY}	15
9.1 Généralités.....	15
9.2 Coefficient de pression-viscosité à la température locale de contact, $\alpha_{\theta B,Y}$	16
9.3 Viscosité dynamique à la température locale de contact, $\eta_{\theta B,Y}$	16
9.3.1 Généralités.....	16
9.3.2 Viscosité cinématique à la température locale de contact, $\nu_{\theta B,Y}$	16
9.3.3 Densité du lubrifiant à la température locale de contact, $\rho_{\theta B,Y}$	17
10 Définition du point de contact Y sur la ligne de conduite	17
11 Facteur de répartition de charge, X_Y	19
11.1 Généralités.....	19
11.2 Engrenages à denture droite à profils non corrigés.....	20
11.3 Engrenages à denture droite à profils corrigés.....	21
11.4 Facteur de contrefort local, $X_{but,Y}$	22
11.5 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_\beta \leq 0,8$ et à profils non corrigés.....	23
11.6 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_\beta \leq 0,8$ et à profils corrigés.....	24
11.7 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_\beta \geq 1,2$ et à profils non corrigés.....	25
11.8 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_\beta \geq 1,2$ et à profils corrigés.....	25
11.9 Engrenages à denture hélicoïdale avec $0,8 < \varepsilon_\beta < 1,2$	27

12	Température de contact locale, $\theta_{B,Y}$	27
13	Température-éclair locale, $\theta_{fl,Y}$	28
14	Température de masse, θ_M	28
14.1	Généralités.....	28
14.2	Coefficient de frottement moyen, μ_m	29
14.3	Facteur de pertes de charge, H_v	31
14.4	Facteur de dépouille de tête, X_{Ca}	31
14.5	Facteur de lubrification, X_S	34
Annexe A (informative) Calcul de l'épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant pour les huiles donnant un résultat d'essai de micropiqûres conforme à la Fiche d'information FVA n°54/7		35
Annexe B (informative) Lignes directrices pour les valeurs de référence d'λ_{GFP}		37
Bibliographie		40

iTeh Standards
(<https://standards.itih.ai>)
Document Preview

[ISO/TS 6336-22:2018](https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018)

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018>

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).

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).

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 le lien suivant: www.iso.org/iso/fr/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 60, *Engrenages*, sous-comité SC 2, *Calcul de la capacité des engrenages*.

Tout retour d'expérience ou toute question est à adresser à l'organisme national de normalisation de l'utilisateur du présent document. Une liste exhaustive des organismes nationaux de normalisation est consultable à l'adresse www.iso.org/members.html.

Cette première édition de l'ISO/TS 6336-22 annule et remplace l'ISO/TR 15144-1:2014.

Une liste de toutes les parties de la série de normes ISO 6336 se trouve sur le site web de l'ISO. Une vue d'ensemble est également donnée dans l'Introduction.

Introduction

La série ISO 6336 se compose de Normes internationales, de Spécifications techniques (TS) et de Rapports techniques (TR) sous le titre général *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale* (voir [Tableau 1](#)).

- Les Normes internationales contiennent des méthodes de calcul basées sur des pratiques largement admises qui ont été validées.
- Les Spécifications techniques (TS) contiennent des méthodes de calcul qui font toujours l'objet de développements.
- Les Rapports techniques (TR) contiennent des données à caractère informatif, telles que des exemples de calcul.

Les procédures spécifiées dans les ISO 6336-1 à ISO 6336-19 couvrent les analyses de fatigue pour la classification des engrenages. Les procédures décrites dans les ISO 6336-20 à ISO 6336-29 sont principalement liées au comportement tribologique du contact sur la surface d'un flanc lubrifié. Les ISO 6336-30 à ISO 6336-39 incluent des exemples de calcul. La série ISO 6336 permet l'ajout de nouvelles parties en nombre suffisant pour refléter les connaissances qui pourront être acquises à l'avenir.

Toute demande de calculs selon l'ISO 6336 sans référence à des parties spécifiques nécessite d'utiliser uniquement les parties désignées comme Normes internationales (voir la liste du [Tableau 1](#)). Si des Spécifications techniques (TS) sont requises comme faisant partie du calcul de la capacité de charge, elles doivent être spécifiées. L'utilisation d'une Spécification technique en tant que critère d'acceptation pour une conception spécifique est soumise à un accord commercial.

Tableau 1 — Parties de l'ISO 6336

Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale	Norme internationale	Spécification technique	Rapport technique
<i>Partie 1: Principes de base, introduction et facteurs généraux d'influence</i>	X		
<i>Partie 2: Calcul de la résistance à la pression de contact (piqûre)</i>	X		
<i>Partie 3: Calcul de la résistance à la flexion en pied de dent</i>	X		
<i>Partie 4: Calcul de la capacité de charge de la rupture en flanc de dent</i>		X	
<i>Partie 5: Résistance et qualité des matériaux</i>	X		
<i>Partie 6: Calcul de la durée de vie en service sous charge variable</i>	X		
<i>Partie 20: Calcul de la capacité de charge au grippage (applicable également aux engrenages conique et hypoïde) — Méthode de la température-éclair</i> (Remplace: ISO/TR 13989-1)		X	
<i>Partie 21: Calcul de la capacité de charge au grippage (applicable également aux engrenages conique et hypoïde) — Méthode de la température intégrale</i> (Remplace: ISO/TR 13989-2)		X	
<i>Partie 22: Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres</i> (Remplace: ISO/TR 15144-1)		X	

Tableau 1 (suite)

Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale	Norme internationale	Spécification technique	Rapport technique
Partie 30: Exemples de calculs selon les normes ISO 6336 parties 1, 2, 3 et 5			X
Partie 31: Exemples de calcul de la capacité de charge aux micropiqûres (Remplace: ISO/TR 15144-2)			X
Certaines des parties répertoriées ici étaient en cours de d'élaboration au moment de la publication du présent document. Consulter le site web de l'ISO.			

Le présent document définit les principes de calcul de la résistance aux micropiqûres des engrenages cylindriques à dentures extérieures droite et hélicoïdale à profil en développante de cercle.

Le modèle de calcul de l'épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant en fonctionnement dans la zone de contact constitue la base pour le calcul de la capacité de charge aux micropiqûres d'un train d'engrenages. De nombreux paramètres peuvent influencer l'apparition de micropiqûres, 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, les études se poursuivent dans ce domaine et la science n'est pas encore parvenue à inclure l'intégralité de tous les aspects de 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 des micropiqûres et qu'il convient donc d'appliquer des valeurs appropriées. L'état de surface constitue un autre paramètre essentiel. *Ra* est actuellement utilisé, mais on a constaté que d'autres aspects, tels que *Rz* ou le vrillage, avaient des effets considérables susceptibles de se manifester selon le procédé de finition de denture utilisé.

Bien que le calcul de l'épaisseur spécifique du film lubrifiant (également appelé dans la littérature «rapport d'épaisseur de film» ou «rapport lambda») 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.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/733c53ec-cfb0-4f34-8fe7-019bcb20f497/iso-ts-6336-22-2018>

Calcul de la capacité de charge des engrenages à dentures droite et hélicoïdale —

Partie 22: Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres

1 Domaine d'application

Le présent document 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 correspondants 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 ($\epsilon_{\alpha n}$) est inférieur à 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.

Le présent document 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 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 53, *Engrenages cylindriques de mécanique générale et de grosse mécanique — Tracé de référence*

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

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

ISO 6336-1, *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, *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)*

3 Termes, définitions, symboles et unités

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'ISO 1122-1, l'ISO 6336-1, l'ISO 6336-2, 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 <http://www.electropedia.org/>

3.2 Symboles et unités

Les symboles utilisés dans le présent document sont donnés dans le [Tableau 2](#). 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 formules données.

Tableau 2 — Symboles et unités

Symbole	Description	Unité
a	entraxe	mm
A	classe de tolérance ISO, conformément à l'ISO 1328-1	—
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	constante auxiliaire	mm
C_{a1}	dépouille de tête du pignon	μm
C_{a2}	dépouille de tête de la roue	μm
C_{eff}	dépouille de tête effective	μm
c_{M1}	capacité thermique spécifique du pignon	$J/(kg \cdot K)$
c_{M2}	capacité thermique spécifique 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 du pignon	mm
d_{b1}	diamètre de tête de la roue	mm
d_{b2}	diamètre de base du pignon	mm
d_{w1}	diamètre de base de la roue	mm
d_{w2}	diamètre primitif du pignon	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
EAP	fin du profil actif (pour le pignon menant: point de contact E, pour la roue menante: point de contact A)	—
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
G_M	paramètre de matériau	—
g_Y	paramètre sur la ligne de conduite (distance du point Y au point A)	mm
g_α	longueur de la ligne de conduite	mm
H_v	facteur de pertes de charge	—
h_Y	épaisseur locale du film lubrifiant	μm

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité
K_A	facteur d'application	—
$K_{B\gamma}$	facteur de charge hélicoïdale	—
$K_{H\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge	—
$K_{H\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge	—
K_v	facteur dynamique	—
K_γ	facteur de charge d'engrènement	—
n_1	vitesse de rotation du pignon	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	N/mm^2
$p_{H,Y}$	pression de contact hertzienne nominale locale	N/mm^2
R_a	rugosité arithmétique moyenne effective	μm
R_{a1}	rugosité arithmétique moyenne du pignon	μm
R_{a2}	rugosité arithmétique moyenne de la roue	μm
$S_{GF,Y}$	paramètre de glissement local	—
S_λ	coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres	—
$S_{\lambda,min}$	coefficient de sécurité minimum requis contre la formation de micropiqûres	—
SAP	début du profil actif (pour le pignon menant: point de contact A, pour la roue menante: point de contact E)	—
T_1	couple nominal sur le pignon	Nm
U_γ	paramètre de vitesse local	—
u	rapport d'engrenage	—
$v_{g,Y}$	vitesse de glissement locale	m/s
ν	indice de viscosité	—
$v_{r1,Y}$	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_γ	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	—
α_t	angle de pression apparent	$^\circ$
α_{wt}	angle de pression sur le cylindre primitif de fonctionnement	$^\circ$
$\alpha_{\theta B,Y}$	coefficient de pression-viscosité à la température locale de contact	m^2/N
$\alpha_{\theta M}$	coefficient de pression-viscosité à la température de masse	m^2/N
α_{38}	coefficient de pression-viscosité à 38 °C	m^2/N

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité
β_b	angle d'hélice de base	°
ε_{\max}	rapport maximal de conduite de saillie	—
ε_α	rapport de conduite apparent	—
$\varepsilon_{\alpha n}$	rapport de conduite équivalent, rapport de conduite apparent de l'engrenage équivalent à denture droite	—
ε_β	rapport de recouvrement	—
ε_γ	rapport de conduite total	—
ε_1	rapport de conduite de saillie du pignon	—
ε_2	rapport de conduite de saillie de la roue	—
$\eta_{\theta B,Y}$	viscosité dynamique à la température locale de contact	N·s/m ²
$\eta_{\theta M}$	viscosité dynamique à la température de masse	N·s/m ²
$\eta_{\theta \text{oil}}$	viscosité dynamique à la température d'huile en entrée/au bain	N·s/m ²
η_{38}	viscosité dynamique à 38 °C	N·s/m ²
$\theta_{B,Y}$	température locale de contact	°C
$\theta_{fl,Y}$	température-éclair locale	°C
θ_M	température de masse	°C
θ_{oil}	température d'huile en entrée/au bain	°C
$\lambda_{GF,\min}$	épaisseur spécifique minimale du film lubrifiant dans la zone de contact	—
$\lambda_{GF,Y}$	épaisseur spécifique locale du film lubrifiant	—
λ_{GFP}	épaisseur spécifique admissible du film lubrifiant	—
λ_{GFT}	épaisseur spécifique limite du film lubrifiant des engrenages d'essai	—
λ_{M1}	conductivité thermique spécifique du pignon	W/(m·K)
λ_{M2}	conductivité thermique spécifique de la roue	W/(m·K)
μ_m	coefficient de frottement moyen	—
$\nu_{\theta B,Y}$	viscosité cinématique à la température locale de contact	mm ² /s
$\nu_{\theta M}$	viscosité cinématique à la température de masse	mm ² /s
ν_1	coefficient de Poisson du pignon	—
ν_2	coefficient de Poisson de la roue	—
ν_{100}	viscosité cinématique à 100 °C	mm ² /s
ν_{40}	viscosité cinématique à 40 °C	mm ² /s
ρ_{M1}	densité du pignon	kg/m ³
ρ_{M2}	densité de la roue	kg/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
$\rho_{\theta B,Y}$	densité du lubrifiant à la température locale de contact	kg/m ³
$\rho_{\theta M}$	densité du lubrifiant à la température de masse	kg/m ³
ρ_{15}	densité du lubrifiant à 15 °C	kg/m ³
Indices des symboles		
Y	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 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 mixtes 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 μm 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 (micropitting)» est le terme préféré pour désigner ce phénomène, mais il peut aussi être désigné par décoloration grise, petite tâche grise, dépolissage et pelade, voir l'ISO 10825.

La formation de micropiqûres peut s'interrompre. Toutefois, si elle continue de progresser, cela peut entraîner une réduction de l'exactitude 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 λ_{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 λ_{GFP} . Les deux valeurs $\lambda_{GF,min}$ et λ_{GFP} doivent être calculées séparément pour le pignon et la roue dans la zone de contact. Il est nécessaire d'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.

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 ($\varepsilon_{\alpha n}$) est inférieur à 2,5.

La température de masse est déterminée par l'équilibre thermique de l'engrenage. Il existe plusieurs sources de chaleur dans un engrenage. La plus importante d'entre elles est générée par le frottement de la denture et du roulement. D'autres sources de chaleur, telles que les joints et les écoulements d'huile contribuent à cet équilibre, dans une certaine mesure. A des vitesses primitives de fonctionnement de plus de 80 m/s, la chaleur générée par le barratage de l'huile lors de l'engrènement et les pertes de puissance par ventilation pouvant devenir significative, est prise en compte (voir Méthode A). La chaleur est transférée à l'environnement via les parois du logement, par conduction, convection ou radiation et en conditions de lubrification, par pulvérisation à travers l'huile dans un échangeur de chaleur externe.

A vitesse primitive de fonctionnement décroissante, l'épaisseur du film lubrifiant, h , et par conséquent, le coefficient de sécurité contre la formation de micropiqûres, S_λ , diminuent. A faible vitesse de fonctionnement, l'usure peut devenir le mécanisme prédominant, comme observé au cours d'études expérimentales, avec une épaisseur du film lubrifiant au point primitif $h_C \leq 0,1 \mu\text{m}$. Pour de telles applications, des études expérimentales selon la Méthode A ou la Méthode B, dans des conditions (d'essai) représentatives, sont conduites avec des épaisseurs du film lubrifiant similaires à celles utilisées en condition de fonctionnement, afin de vérifier si la formation de micropiqûres demeure le principal mécanisme.

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 est exprimée par le coefficient de sécurité S_λ 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 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_λ

Pour représenter la résistance aux micropiqûres, le coefficient de sécurité S_λ est défini selon la [Formule \(1\)](#):

$$S_\lambda = \frac{\lambda_{GF,\min}}{\lambda_{GFP}} \geq S_{\lambda,\min} \quad (1)$$

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](#));

λ_{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 la [Formule \(2\)](#).

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

Pour la détermination du coefficient de sécurité S_λ , 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.

$$\lambda_{GF,Y} = \frac{h_Y}{Ra} \quad (2)$$

où

$$Ra = 0,5 \cdot (Ra_1 + Ra_2) \quad (3)$$