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

Partie 20:

**Calcul de la capacité de charge au
grippage (applicable également aux
engrenages conique et hypoïde) -
Méthode de la température-éclair**

Calculation of load capacity of spur and helical gears —

*Part 20: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel
and hypoid gears) — Flash temperature method*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/419553c4-2385-42be-bdc4-95b283cdb85e/iso-ts-6336-20-2017>



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

ISO/TS 6336-20:2017

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/419553c4-2385-42be-bdc4-95b283cdb85e/iso-ts-6336-20-2017>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2017, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions, symboles et unités	1
3.1 Termes et définitions.....	1
3.2 Symboles et unités.....	1
4 Grippage et usure	5
4.1 Apparition du grippage et de l'usure.....	5
4.2 Diagramme de transition.....	6
4.3 Frottement à l'amorçage du grippage.....	8
5 Formules de base	8
5.1 Température de contact.....	8
5.2 Formule de la température-éclair.....	10
5.3 Charge unitaire apparente.....	11
5.4 Répartition des températures de masse globales.....	12
5.5 Approximation grossière de la température de masse.....	13
6 Coefficient de frottement	14
6.1 Généralités.....	14
6.2 Coefficient de frottement moyen, méthode A.....	14
6.3 Coefficient de frottement moyen, méthode B.....	14
6.4 Coefficient de frottement moyen, méthode C.....	15
7 Paramètre sur la ligne d'action	16
8 Facteur d'approche	18
9 Facteur de répartition de charge, X_{Γ}	18
9.1 Généralités.....	18
9.2 Engrenages à denture droite à profils non corrigés.....	19
9.3 Engrenages à denture droite à profils corrigés.....	20
9.4 Facteur de contrefort, $X_{\text{but},\Gamma}$	21
9.5 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_{\beta} \leq 0,8$ à profils non corrigés.....	22
9.6 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_{\beta} \leq 0,8$ à profils corrigés.....	23
9.7 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_{\beta} \geq 1,2$ à profils non corrigés.....	24
9.8 Engrenages à denture hélicoïdale avec $\varepsilon_{\beta} \geq 1,2$ à profils corrigés.....	24
9.9 Engrenages à denture hélicoïdale avec $0,8 < \varepsilon_{\beta} < 1,2$	26
9.10 Engrenages coniques de faible largeur.....	26
9.11 Engrenages coniques larges.....	26
10 Température de grippage et sécurité	27
10.1 Température de grippage.....	27
10.2 Facteur de structure.....	28
10.3 Durée de contact.....	28
10.4 Température de grippage dans les essais d'engrenage.....	29
10.5 Domaine de sécurité.....	30
Annexe A (informative) Présentation de la formule de la température-éclair	31
Annexe B (informative) Correction de profil optimale	39
Bibliographie	41

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/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*.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 6336 se trouve sur le site web de l'ISO.

Introduction

Depuis 1990, la méthode de la température-éclair a été enrichie par des recherches sur les temps de contact de courte durée, sur la prise en compte des diagrammes de transition, sur de nouvelles approximations sur le coefficient de frottement et sur un renouvellement complet des facteurs de répartition de charge. En 1991, le Professeur Blok a apporté une extension de la formulation de la température-éclair, la rendant directement applicable aux engrenages hypoides.

La méthode de la température intégrale, présentée dans l'ISO/TS 6336-21, moyenne la température-éclair et ajoute des facteurs d'influence empiriques au facteur de répartition de charge. Les valeurs résultantes arrondissent la température maximale de contact, donnant alors à peu de chose près la même évaluation du risque de grippage que la méthode de la température-éclair du présent document. La méthode de la température intégrale est moins sensible dans les cas présentant des pics de température localisés, habituellement dans les ensembles d'engrenages qui ont des faibles rapports de conduite ou qui présentent des contacts au voisinage du cercle de base ou des géométries sensibles.

Le risque de détérioration par grippage varie selon les propriétés des matériaux des dentsures, le lubrifiant utilisé, la rugosité de surface des flancs de denture, les vitesses de glissement et la charge. Par opposition au développement relativement long de la détérioration par fatigue, une surcharge instantanée unique peut initier la détérioration par grippage avec une telle sévérité que l'engrenage ne pourra être utilisé plus longtemps. D'après Blok[12][13][14][15][16][17], des températures de contact élevées du lubrifiant et des surfaces de denture au point de contact instantané peuvent entraîner une rupture du film de lubrifiant à l'interface du contact.

La température de contact à l'interface résulte de la somme de deux composantes.

- La température de masse de l'interface en mouvement, qui, si elle varie, le fait comparativement lentement. La température de masse, θ_M , est la température d'équilibre de la surface des dents d'engrenage, avant qu'elles n'entrent dans la zone de contact. Pour évaluer cette composante, elle peut être moyennée à partir des deux températures de masse des deux dentsures frottantes. Ces deux dernières températures de masse se déduisent de la théorie des réseaux thermiques[18].
- La fluctuation rapide de la température-éclair des surfaces en contact en mouvement. La température-éclair est l'augmentation calculée de la température à la surface d'une dent d'engrenage à un point donné de la ligne de conduite, résultant des effets combinés de la géométrie, de la charge, des frottements, de la vitesse et des propriétés du matériau de la dent d'engrenage durant le fonctionnement. Une attention toute particulière doit être apportée au coefficient de frottement. La pratique habituelle est d'utiliser un coefficient de frottement valide pour des conditions de fonctionnement normales, bien qu'il soit établi qu'au commencement du grippage le coefficient de frottement atteint des valeurs plus élevées.

Les relations complexes entre les phénomènes mécaniques, hydrodynamiques, thermodynamiques et chimiques furent l'objet d'importantes recherches et expérimentations, qui peuvent induire différents facteurs d'influence empiriques. Une suppléance directe des facteurs d'influence empiriques peut renforcer les paramètres fonctionnels associés dans la formule de base et les fixer à des valeurs moyennes. Cependant, un traitement correct des paramètres fonctionnels (c'est-à-dire coefficient de frottement, facteur de répartition de charge, coefficient thermique de contact) garde la formule principale intacte, ce qui est confirmé avec l'expérimentation et la pratique.

À côté de la température maximale de contact, l'évolution de la température de contact le long de la ligne d'action fournit l'information nécessaire pour la conception de l'engrenage.

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 dentsures 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 (état à la date de publication)

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	
<i>Partie 30: Exemples de calculs selon les normes ISO 6336-1 à ISO 6336-5</i>			X
<i>Partie 31: Exemples de calcul de la capacité de charge aux micropiqûres</i> (remplace: ISO/TR 15144-2)			X

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

Partie 20:

Calcul de la capacité de charge au grippage (applicable également aux engrenages conique et hypoïde) - Méthode de la température-éclair

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les méthodes et les formules pour l'évaluation des risques de grippage, en se basant sur le concept de la température de contact de Blok.

Le concept fondamental selon Blok est applicable à tous les éléments de machine ayant des zones de contact mobiles. Les formules de température-éclair sont valables pour une zone de contact hertzien en forme de bande ou quasiment en forme de bande et pour des conditions de fonctionnement caractérisées par des nombres de Péclet suffisamment élevés.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte 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 1122-1, *Vocabulaire des engrenages — Partie 1: Définitions géométriques*

ISO 10825, *Engrenages — Usure et défauts des dentures — Terminologie*

3 Termes et 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 et l'ISO 10825 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 les formules sont répertoriés dans le [Tableau 2](#). Les unités de longueur choisies sont le mètre, le millimètre et le micromètre conformément à la pratique courante. Pour obtenir un système cohérent, les unités pour B_M , c_γ et X_M sont adaptées à l'application combinée de mètre et millimètre ou de millimètre et micromètre.

Tableau 2 — Symboles et unités

Symbole	Description	Unité	Utilisé pour la première fois dans la formule
a	entraxe	mm	(A.5)
b	largeur de denture, plus petite valeur du pignon ou de la roue ^a	mm	[11]
b_{eff}	largeur de denture effective	mm	(13)
b_H	demi-largeur de la bande de contact hertzien	mm	[3]
B_M	coefficient de contact thermique	$\text{N}/(\text{mm}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$	(A.13)
B_{M1}	coefficient de contact thermique du pignon	$\text{N}/(\text{mm}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$	[3]
B_{M2}	coefficient de contact thermique de la roue	$\text{N}/(\text{mm}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$	[3]
C_{a1}	dépouille de tête du pignon	μm	(48)
C_{a2}	dépouille de tête de la roue	μm	(46)
C_{eff}	dépouille de tête optimale	μm	(46)
C_{eq1}	dépouille de tête équivalente du pignon	μm	(B.2)
C_{eq2}	dépouille de tête équivalente de la roue	μm	(B.3)
C_{f1}	dépouille de pied du pignon	μm	(B.3)
C_{f2}	dépouille de pied de la roue	μm	(B.2)
c_{M1}	chaleur spécifique par unité de masse du pignon	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	[9]
c_{M2}	chaleur spécifique par unité de masse de la roue	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	[10]
c_γ	raideur d'engrènement	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$	(B.1)
d_1	diamètre de référence du pignon	mm	[33]
d_2	diamètre de référence de la roue	mm	[34]
d_{a1}	diamètre de tête du pignon	mm	[33]
d_{a2}	diamètre de tête de la roue	mm	[34]
E_1	module d'élasticité du pignon	N/mm^2	(A.10)
E_2	module d'élasticité de la roue	N/mm^2	(A.10)
E_r	module d'élasticité réduit	N/mm^2	(A.9)
F_{ex}	force axiale externe	N	[18]
F_n	charge réelle de l'essai d'usure	N	Figure 1
F_t	force tangentielle nominale	N	[18]
H_1	dimension auxiliaire	mm	(B.3)
H_2	dimension auxiliaire	mm	(B.2)
h_{am1}	saillie de denture au cône moyen du pignon	mm	[42]
h_{am2}	saillie de denture au cône moyen de la roue	mm	[43]
K_A	facteur d'application	—	[11]
$K_{B\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge (grippage)	—	[11]
$K_{B\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge (grippage)	—	[11]
$K_{H\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge (pression de contact)	—	[15]
$K_{H\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge (pression de contact)	—	[14]
K_{mp}	facteur d'engrènement multiple	—	[11]
K_V	facteur dynamique	—	[11]

^a Le terme roue est utilisé pour le mobile conjugué d'un pignon.

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité	Utilisé pour la première fois dans la formule
m_n	module normal	mm	(B.2)
n_1	vitesse de rotation par minute du pignon	tr/min	[5]
n_p	nombre de contacts d'engrènement	—	[16]
$Pé_1$	nombre de Péclet du matériau du pignon	—	[9]
$Pé_2$	nombre de Péclet du matériau de la roue	—	[10]
Q	classe de précision	—	(57)
R_{a1}	rugosité de surface du flanc de dent du pignon	μm	[28]
R_{a2}	rugosité de surface du flanc de dent de la roue	μm	[28]
R_m	génératrice du cône complémentaire moyen	mm	(A.16)
R_{m1}	rayon de référence du cône moyen du pignon	mm	[42]
R_{m2}	rayon de référence du cône moyen de la roue	mm	[43]
S_B	coefficient de sécurité relatif au grippage	—	(98)
S_{FZG}	niveau de charge (en essai FZG)	—	(97)
T_1	durée de contact sur le pignon	μs	(93)
T_2	durée de contact sur la roue	μs	(94)
t_c	durée de contact au coude de la courbe	μs	(95)
t_{\max}	durée de contact la plus longue	μs	(95)
u	rapport d'engrènement	—	(A.9)
u_v	rapport équivalent	—	(B.6)
v_g	vitesse de glissement	m/s	Figure 1
v_{g1}	vitesse tangentielle du pignon	m/s	[3]
v_{g2}	vitesse tangentielle de la roue	m/s	[3]
$v_{g\Sigma C}$	somme des vitesses tangentielles au point primitif	m/s	[25]
v_t	vitesse tangentielle au primitif de fonctionnement	m/s	[26]
w_{Bn}	charge unitaire normale	N/mm	[3]
w_{Bt}	charge unitaire apparente	N/mm	[5]
$X_{\text{but},\Gamma}$	facteur de contrefort	—	(54)
$X_{\text{but},A}$	valeur de contrefort	—	(51)
$X_{\text{but},E}$	valeur de contrefort	—	(51)
X_G	facteur géométrique	—	(A.5)
X_J	facteur d'approche	—	[3]
X_L	facteur lubrifiant	—	[25]
X_M	facteur thermoélastique	$\text{K}\cdot\text{N}^{-3/4}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{m}^{-1/2}\cdot\text{mm}$	[5]
X_{mp}	facteur de pignons conjugués multiples	—	[22]
X_R	facteur de rugosité	—	[25]
X_S	facteur système de lubrification	—	[22]
X_W	facteur de structure	—	(92)
$X_{\alpha\beta}$	facteur d'angle	—	(A.6)
X_Γ	facteur de répartition de charge	—	[3]
X_θ	gradient de la température de grippage	—	(95)
z_1	nombre de dents du pignon	—	[30]

^a Le terme roue est utilisé pour le mobile conjugué d'un pignon.

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité	Utilisé pour la première fois dans la formule
z_2	nombre de dents de la roue	—	[30]
α_{a1}	angle de pression de tête apparent du pignon	°	[31]
α_{a2}	angle de pression de tête apparent de la roue	°	[30]
α_t	angle de pression apparent	°	[33]
α_{wn}	angle de pression de fonctionnement normal	°	(A.2)
α_{wt}	angle de pression de fonctionnement apparent	°	[26]
α_{y1}	angle d'incidence du pignon en un point quelconque	°	[29]
β	angle d'hélice	°	[18]
β_b	angle d'hélice de base	°	(49)
β_{bm}	angle d'hélice de base au demi-cône	°	(50)
β_w	angle d'hélice de fonctionnement	°	(A.2)
Γ_A	paramètre sur la ligne d'action au point A	—	[24]
Γ_{AA}	paramètre sur la ligne d'action au point AA	—	(69)
Γ_{AB}	paramètre sur la ligne d'action au point AB	—	(67)
Γ_{AU}	paramètre sur la ligne d'action au point AU	—	(49)
Γ_B	paramètre sur la ligne d'action au point B	—	(57)
Γ_{BB}	paramètre sur la ligne d'action au point BB	—	(71)
Γ_D	paramètre sur la ligne d'action au point D	—	(64)
Γ_{DD}	paramètre sur la ligne d'action au point DD	—	(74)
Γ_{DE}	paramètre sur la ligne d'action au point DE	—	(68)
Γ_E	paramètre sur la ligne d'action au point E	—	[24]
Γ_{EE}	paramètre sur la ligne d'action au point EE	—	(75)
Γ_{EU}	paramètre sur la ligne d'action au point EU	—	(49)
Γ_M	paramètre sur la ligne d'action au point M	—	[24]
Γ_y	paramètre sur la ligne d'action en un point arbitraire	—	(87)
Γ_1	angle de direction de la vitesse tangentielle du pignon	—	[3]
Γ_2	angle de direction de la vitesse tangentielle de la roue	—	[3]
δ_1	angle du cône primitif de fonctionnement du pignon	°	[38]
δ_2	angle du cône primitif de fonctionnement de la roue	°	[38]
ε_α	rapport de conduite apparent	—	(80)
ε_β	rapport de recouvrement	—	(52)
ε_γ	rapport de conduite total	—	9.5
η_{oil}	viscosité absolue (dynamique) à la température de l'huile	mPa·s	[27]
θ_B	température de contact	°C	[1]
θ_{Bmax}	température de contact maximale	°C	[2]
θ_{fl}	température-éclair	K	[1]
θ_{flm}	température-éclair moyenne	K	[22]
θ_{flmax}	température-éclair maximale	K	[2]
θ_{flmaxT}	température-éclair maximale en cours d'essai	K	(95)
θ_M	température de masse	°C	[22]
θ_{Mi}	température de masse interfaciale	°C	[1]

^a Le terme roue est utilisé pour le mobile conjugué d'un pignon.

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité	Utilisé pour la première fois dans la formule
θ_{M1}	température de masse des dents du pignon	°C	[20]
θ_{M2}	température de masse des dents de la roue	°C	[20]
θ_{MT}	température de masse en cours d'essai	°C	(95)
θ_{oil}	température d'huile avant d'atteindre l'engrènement	°C	(97)
θ_S	température de grippage	°C	(96)
θ_{Sc}	température de grippage pour une durée de contact longue	°C	(96)
λ_{M1}	conductivité thermique du pignon	N/(s·K)	[9]
λ_{M2}	conductivité thermique de la roue	N/(s·K)	[10]
μ	coefficient de frottement dans l'essai pion-disque	—	Figure 1
μ_m	coefficient de frottement moyen	—	[3]
ν_1	coefficient de Poisson du matériau du pignon	—	(A.10)
ν_2	coefficient de Poisson du matériau de la roue	—	(A.10)
ρ_{M1}	densité du matériau du pignon	kg/m ³	[9]
ρ_{M2}	densité du matériau de la roue	kg/m ³	[10]
ρ_{yrel}	rayon de courbure relatif au point primitif	mm	[25]
ρ_{y1}	rayon de courbure en un point quelconque du pignon	mm	[5]
ρ_{y2}	rayon de courbure en un point quelconque de la roue	mm	[5]
ρ_{yrel}	rayon de courbure relatif en un point quelconque	mm	[5]
Σ	angle des axes	°	(A.15)
Φ	torsion d'arbre torsible	°	[17]
^a Le terme roue est utilisé pour le mobile conjugué d'un pignon.			

4 Grippage et usure

4.1 Apparition du grippage et de l'usure

Lorsque les dents d'engrenage sont entièrement séparées par un film fluide complet de lubrifiant, il n'y a pas de contact entre les aspérités de surface des dents et, habituellement, il n'y a pas de grippage ou d'usure. Dans ce cas, le coefficient de frottement est plutôt faible. Dans des cas exceptionnels, une détérioration semblable au grippage peut être provoquée par une instabilité thermique soudaine[19] dans un film d'huile épais, mais ce phénomène n'est pas traité ici.

Pour des films élastohydrodynamiques plus minces, il y a contact fortuit des aspérités. Au fur et à mesure que l'épaisseur moyenne du film décroît, le nombre de contacts augmente. L'usure par abrasion, l'usure par micro-soudage ou le grippage deviennent alors possibles. L'usure par abrasion peut apparaître du fait de l'action de roulement des dents d'engrenage ou du fait de la présence de particules abrasives dans le lubrifiant. L'usure par adhésion est due à une soudure par fusion locale suivie d'un arrachement et d'un transfert des particules de l'une ou des deux dents en prise. L'usure abrasive ou par adhésion peut ne pas être nuisible si elle est modérée et si elle s'atténue avec le temps, comme lors d'un processus normal de rodage.

Contrairement à l'usure modérée, le grippage est une forme grave d'usure par adhésion qui peut entraîner une détérioration progressive des dents des roues. Contrairement à la formation de piqûres et à la rupture de fatigue qui présentent une période d'incubation, une surcharge provisoire de courte durée peut entraîner une défaillance par grippage.

Une aération excessive ou la présence de contaminants dans le lubrifiant, tels que des particules métalliques en suspension ou de l'eau, augmente également le risque de détérioration par grippage. Après grippage, les engrenages à grande vitesse sont soumis à des charges dynamiques élevées produites par des vibrations qui conduisent généralement à une détérioration ultérieure par grippage, pitting ou rupture de dent.

Dans la plupart des cas, la résistance des engrenages au grippage peut être améliorée en utilisant un lubrifiant enrichi d'additifs anti-grippage.

NOTE L'appellation moins correcte Extrême Pression, EP, est remplacée par anti-grippage.

Il est cependant important de noter que l'utilisation de ces additifs anti-grippage comporte certains inconvénients: corrosion du cuivre, fragilisation des élastomères, difficulté d'approvisionnement, etc.

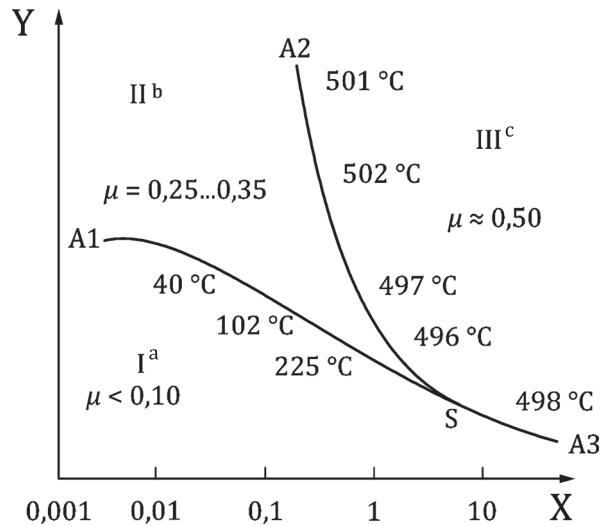
Les méthodes décrites ne s'appliquent pas au «grippage à froid», qui est en général associé à des engrenages travaillant à faible vitesse, inférieure à environ 4 m/s, traités dans la masse, lourdement chargés, de précision plutôt médiocre.

4.2 Diagramme de transition

Les conditions de lubrification de contacts concentrés glissants de pièces en acier, qui fonctionnent dans un lubrifiant liquide, peuvent être décrites[20][21][22][23] en termes de diagrammes de transition. Un diagramme de transition conforme à la [Figure 1](#) est considéré applicable aux contacts fonctionnant à des températures de bain d'huile constante.

Pour des combinaisons de force réelle, F_n , et de vitesse de glissement relative, v_g , situées au-dessous de la ligne A1-S, dans la région I (voir la [Figure 1](#)), les conditions de lubrification sont caractérisées par un coefficient de frottement de l'ordre de 0,1 et d'un taux d'usure spécifique de $10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N} \times \text{m})$ à $10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \times \text{m})$ (c'est-à-dire une usure volumique par unité de force normale, par unité de distance de glissement).

Si, avec v_g n'étant pas supérieure à une valeur correspondant au point S, on augmente la charge dans la région II, il y a transition dans un second état de lubrification. Cette condition de lubrification à usure modérée est caractérisée par un coefficient de frottement d'environ 0,3 à 0,4 et d'un taux d'usure spécifique de $1 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ à $5 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$.



Légende

- X force réelle, F_n
Y vitesse de glissement relative, v_g , en m/s
a «Pas d'usure» ou usure extrêmement modérée.
b Usure modérée.
c Grippage — usure sévère.

Figure 1 — Diagramme de transition pour des contacts de contre-forme avec exemple de températures de contact calculées

Si la charge augmente encore, il y a transition en un troisième état de lubrification, région III, à l'intersection de la ligne A2-S. Cette région est caractérisée par un coefficient de frottement de 0,4 à 0,5. Le taux d'usure est cependant beaucoup plus élevé que dans les régions I et II, c'est-à-dire de 100 mm³/(N·m) à 1 000 mm³/(N·m) et les surfaces usées révèlent des traces d'usure sévères sous la forme de grippage. Si la charge augmente à des vitesses de glissement relatives au-delà du point S, il y a transition directe de la région I à la région III.

Il est prouvé que la position de la ligne A1-S-A3 dépend de la viscosité du lubrifiant[24] ainsi que de la pression de contact hertzienne[20][21]. Pour des combinaisons de F_n et v_g s'inscrivant sous cette ligne, on considère que les surfaces sont séparées par un mince film de lubrifiant, qui est cependant traversé par les aspérités de rugosité. Dans ce contexte, le terme «lubrification élastohydrodynamique partielle» est utilisé[21].

La région II présente une absence totale d'effets de film liquide. Cette région est identique à la région d'«amorce de grippage»[25]. Il est prouvé que la transition qui apparaît à l'intersection de ligne A2-S est associée à l'atteinte d'une valeur critique de la température de contact. Il s'agit du concept fondamental selon les Références [12],[13],[14],[15],[16],[17],[18].

Le diagramme de transition présenté ci-avant est applicable à des contacts acier fraîchement employés, c'est-à-dire non oxydés, tels qu'ils se présentent dans les engrenages, cames et galets, etc. Le diagramme s'est révélé applicable aux résultats d'essai quatre-billes et pion-disque.

Sur la courbe A1-S-A3, la température s'étend d'une température de bain d'huile, respectivement une température de masse globale, une température de masse interfaciale, de 28 °C à $v_g = 0,001$ m/s à une température de contact de 498 °C à $v_g = 10$ m/s. Ce comportement thermique suggère fortement qu'une dégradation de la lubrification élastohydrodynamique (partielle) n'apparaît pas à une température de masse interfaciale ou à une température de contact constante lorsqu'elle est associée par exemple à la fusion d'un matériau à absorption chimique. Par contre, la réduction prononcée de la capacité de charge, au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de glissement, est supposée être due à une diminution de la viscosité[24][26][27][28][29].

Au contraire, les températures de contact calculées sur la courbe A2-S-A3 ont tendance à atteindre une valeur constante, par exemple dans le cas d'éprouvettes d'acier AISI 52100, environ 500 °C (voir la [Figure 1](#)). Cela suggère que la transition II-III est associée à une transformation de l'acier qui entraîne une modification du mécanisme d'usure des surfaces, qui, de adhésive modérée devient adhésive sévère, et implique probablement un mécanisme d'instabilité thermoélastique[30][31].

Par conséquent, les résultats indiquent que le grippage est associé à une valeur critique de la température de contact. Pour l'acier lubrifié à l'huile minérale, la valeur critique ne dépend ni de la charge ni de la vitesse ni de la géométrie et est voisine de 500 °C.

4.3 Frottement à l'amorçage du grippage

Comme illustré dans le diagramme de transition, dans la [Figure 1](#), en cas de grippage, le coefficient de frottement passe de 0,25 à environ 0,5. La température de contact correspondante est d'environ 500 °C. Cette température de contact est la somme d'une température de masse interfaciale mesurée de 28 °C et d'une température-éclair calculée de 470 °C. Lors du calcul de la température-éclair, le coefficient de frottement juste avant transition, $\mu = 0,35$ est utilisé. Si cette méthode doit être appliquée non seulement aux essais pion-disque, mais également (lors de l'étape de conception) aux transmissions par engrenages, il faut convenir du choix de la valeur critique de la température de contact d'une part, et de la valeur du coefficient de frottement à utiliser dans les calculs d'autre part.

Il est possible de prédire une capacité de charge de l'engrenage

- conservative, avec le coefficient de frottement $\mu = 0,50$,
- précise, avec le coefficient de frottement compris entre $\mu = 0,25$ et $\mu = 0,35$ selon le lubrifiant, et
- selon la méthode précédente, avec un faible coefficient de frottement dans des conditions de fonctionnement normales, à condition que la température de contact limite soit par conséquent faible.

Selon la méthode précédente, pour les huiles minérales sans additifs et à faible teneur en additifs, toute combinaison d'huiles et de matériaux de roulement à une température de grippage critique qui, en général, est constante quelles que soient les conditions de fonctionnement, de charge, de vitesse et de géométrie.

Pour les lubrifiants à haute teneur en additifs et certains types de lubrifiants synthétiques, il est admis que la température de grippage critique varie d'un ensemble de conditions de fonctionnement à l'autre. Ainsi, cette température critique doit alors être déterminée séparément pour chaque ensemble de conditions de fonctionnement, sur la base d'essais qui simulent étroitement les conditions de fonctionnement de l'engrenage.

5 Formules de base

5.1 Température de contact

Comme indiqué dans l'introduction, la température de contact est la somme de la température de masse interfaciale, θ_{Mi} (voir [5.3](#)), et de la température-éclair θ_{fl} , (voir [5.2](#)), comme montré dans la [Formule \(1\)](#):

$$\theta_B = \theta_{Mi} + \theta_{fl} \quad (1)$$