

---

---

**Calcul de la capacité de charge au grippage  
des engrenages cylindriques, coniques et  
hypoïdes —**

Partie 1:

**Méthode de la température-éclair**

iTeh STANDARD PREVIEW

*Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid  
gears*

*Part 1: Flash temperature method*

[ISO/TR 13989-1:2000](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000>



**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 13989-1:2000](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000>

© ISO 2000

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 Genève 20  
Tél. + 41 22 749 01 11  
Fax. + 41 22 734 10 79  
E-mail [copyright@iso.ch](mailto:copyright@iso.ch)  
Web [www.iso.ch](http://www.iso.ch)

Imprimé en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	vi
1 <b>Domaine d'application</b> .....	1
2 <b>Références normatives</b> .....	1
3 <b>Termes, définitions, symboles et unités</b> .....	1
3.1 <b>Termes et définitions</b> .....	1
3.2 <b>Symboles et unités</b> .....	2
4 <b>Grippage et usure</b> .....	6
4.1 <b>Apparition du grippage et de l'usure</b> .....	6
4.2 <b>Diagramme de transition</b> .....	7
4.3 <b>Frottement à l'amorçage du grippage</b> .....	8
5 <b>Formules de base</b> .....	9
5.1 <b>Température de contact</b> .....	9
5.2 <b>Formule de la température-éclair</b> .....	9
5.3 <b>Charge unitaire apparente</b> .....	11
5.4 <b>Répartition des températures de masse globales</b> .....	12
5.5 <b>Approximation grossière de la température de masse</b> .....	13
6 <b>Coefficient de frottement</b> .....	13
6.1 <b>Coefficient de frottement moyen, méthode A</b> .....	14
6.2 <b>Coefficient de frottement moyen, méthode B</b> .....	14
6.3 <b>Coefficient de frottement moyen, méthode C</b> .....	14
7 <b>Paramètre sur la ligne d'action</b> .....	15
8 <b>Facteur d'approche</b> .....	17
9 <b>Facteur de répartition de charge</b> .....	18
9.1 <b>Facteur de contrefort</b> .....	18
9.2 <b>Engrenages à denture droite à profils non corrigés</b> .....	19
9.3 <b>Engrenages à denture droite à profils corrigés</b> .....	20
9.4 <b>Engrenages à denture hélicoïdale étroits à profils non corrigés</b> .....	21
9.5 <b>Engrenages à denture hélicoïdale étroits à profils corrigés</b> .....	21
9.6 <b>Engrenages à denture hélicoïdale larges à profils non corrigés</b> .....	22
9.7 <b>Engrenages à denture hélicoïdale larges à profils corrigés</b> .....	22
9.8 <b>Engrenages coniques étroits</b> .....	23
9.9 <b>Engrenages coniques larges</b> .....	24
10 <b>Température de grippage et sécurité</b> .....	25
10.1 <b>Température de grippage</b> .....	25
10.2 <b>Facteur de structure</b> .....	25
10.3 <b>Durée de contact</b> .....	26
10.4 <b>Température de grippage dans les essais d'engrenage</b> .....	27
10.5 <b>Domaine de sécurité</b> .....	27
<b>Annexe A (informative) Présentation de la formule de la température-éclair</b> .....	29
<b>Annexe B (informative) Correction de profil optimale</b> .....	36
<b>Bibliographie</b> .....	38

## 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.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Exceptionnellement, un comité technique peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour toute autre raison, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, 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).

Les rapports techniques des types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données fournies ne soient plus jugées valables ou utiles.

Les rapports techniques sont rédigés conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 3.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments de la présente partie de l'ISO/TR 13989 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 13989-1, rapport technique du type 2, a été élaboré par le comité technique ISO/TC 60, *Engrenages*, sous-comité SC 2, *Calcul de la capacité des engrenages*.

Le présent document est publié dans la série des Rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.3.2.2. de la partie 1 des Directives ISO/CEI, 1995) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine de la capacité de charge au grippage des engrenages en raison de l'urgence d'avoir une indication quant à la manière dont il convient d'utiliser les normes dans ce domaine pour répondre à un besoin déterminé. En 1975, deux méthodes de calcul pour évaluer le risque de grippage ont été documentées pour être étudiées par le comité technique ISO/TC 60. Il a été admis qu'après une période d'expérimentation, une seule méthode doit être adoptée. Étant donné que le sujet est encore en développement technique et qu'il y a une possibilité future d'un accord en tant que Norme internationale, la publication en tant que Rapport technique de type 2 a été proposée.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en œuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Secrétariat central de l'ISO.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce Rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

L'ISO/TR 13989 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoïdes*:

- *Partie 1: Méthode de la température-éclair*
- *Partie 2: Méthode de la température intégrale*

Les annexes A et B de la présente partie de l'ISO/TR 13989 sont données uniquement à titre d'information.

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

[ISO/TR 13989-1:2000](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/12ec4a46-be78-4763-a86b-1eda660a8150/iso-tr-13989-1-2000>

## Introduction

Depuis 1990, la méthode de la température-éclair, présentée dans la présente partie de l'ISO/TR 13989, 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/TR 13989-2, 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 de la présente partie de l'ISO/TR 13989. 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 dentures, 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. Pour évaluer cette composante, elle peut être moyennée à partir des deux températures de masse des deux dentures 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. 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.

# Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoïdes —

## Partie 1: Méthode de la température-éclair

### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO/TR 13989 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.

iTeh STANDARD PREVIEW

### 2 Références normatives (standards.iteh.ai)

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO/TR 13989. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de l'ISO/TR 13989 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de l'ISO et de la CEI possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

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

ISO 6336-1:1996, *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 10300-1:—<sup>1)</sup>, *Calcul de la capacité de charge des engrenages coniques — Partie 1: Introduction et facteurs généraux d'influence.*

ISO 10825:1995, *Engrenages — Usure et défauts des dentures — Terminologie.*

### 3 Termes, définitions, symboles et unités

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie de l'ISO/TR 13989, les termes et définitions donnés dans l'ISO 1122-1 et l'ISO 10825 s'appliquent.

---

1) À publier.

3.2 Symboles et unités

Les symboles utilisés dans la présente partie de l'ISO/TR 13989 sont donnés dans le Tableau 1. Les unités de longueur mètre, millimètre et micromètre sont choisies conformément à l'usage en la matière. Pour obtenir un système cohérent, les unités pour  $B_M$ ,  $c_\gamma$ ,  $X_M$  sont adaptées à l'application combinée de mètre et millimètre ou de millimètre et micromètre.

Tableau 1 — Symboles et unités

Symbole	Description	Unité	Référence
$a$	entraxe	mm	Éq. (A.5)
$b$	largeur de denture, plus petite valeur du pignon ou de la roue <sup>a</sup>	mm	Éq. (11)
$b_{eff}$	largeur de denture effective	mm	Éq. (12)
$b_H$	demi-largeur de la bande de contact hertzien	mm	Éq. (3)
$B_M$	coefficient de contact thermique	$N/(mm^{1/2} \cdot m^{1/2} \cdot s^{1/2} \cdot K)$	Éq. (A.13)
$B_{M1}$	coefficient de contact thermique du pignon	$N/(mm^{1/2} \cdot m^{1/2} \cdot s^{1/2} \cdot K)$	Éq. (3)
$B_{M2}$	coefficient de contact thermique de la roue	$N/(mm^{1/2} \cdot m^{1/2} \cdot s^{1/2} \cdot K)$	Éq. (3)
$C_{a1}$	dépouille de tête du pignon	$\mu m$	Éq. (48)
$C_{a2}$	dépouille de tête de la roue	$\mu m$	Éq. (46)
$C_{eff}$	dépouille de tête optimale	$\mu m$	Éq. (46)
$C_{eq1}$	dépouille de tête équivalente du pignon	$\mu m$	Éq. (B.2)
$C_{eq2}$	dépouille de tête équivalente de la roue	$\mu m$	Éq. (B.3)
$C_{f1}$	dépouille de pied du pignon	$\mu m$	Éq. (B.3)
$C_{f2}$	dépouille de pied de la roue	$\mu m$	Éq. (B.2)
$c_{M1}$	chaleur spécifique par unité de masse du pignon	$J/(kg \cdot K)$	Éq. (9)
$c_{M2}$	chaleur spécifique par unité de masse de la roue	$J/(kg \cdot K)$	Éq. (10)
$c_\gamma$	raideur d'engrènement	$N/(mm \cdot \mu m)$	(Éq. B.1)
$d_1$	diamètre de référence du pignon	mm	Éq. (34)
$d_2$	diamètre de référence de la roue	mm	Éq. (35)
$d_{a1}$	diamètre de tête du pignon	mm	Éq. (34)
$d_{a2}$	diamètre de tête de la roue	mm	Éq. (35)
$E_1$	module d'élasticité du pignon	$N/mm^2$	Éq. (A.10)
$E_2$	module d'élasticité de la roue	$N/mm^2$	Éq. (A.10)
$E_r$	module d'élasticité réduit	$N/mm^2$	Éq. (A.9)
$F_{ex}$	force axiale externe	N	Éq. (18)
$F_n$	charge réelle de l'essai d'usure	N	Figure. 1
$F_t$	force tangentielle nominale	N	Éq. (11)

Tableau 1 — Symboles et unités (suite)

Symbole	Description	Unité	Référence
$H_1$	dimension auxiliaire	mm	Éq. (B.3)
$H_2$	dimension auxiliaire	mm	Éq. (B.2)
$h_{am1}$	saillie de denture au cône moyen du pignon	mm	Éq. (43)
$h_{am2}$	saillie de denture au cône moyen de la roue	mm	Éq. (44)
$K_A$	facteur d'application	—	Éq. (11)
$K_{B\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge (grippage)	—	Éq. (11)
$K_{B\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge (grippage)	—	Éq. (11)
$K_{H\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge (pression de contact)	—	Éq. (15)
$K_{H\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge (pression de contact)	—	Éq. (14)
$K_{mp}$	facteur d'engrènement multiple	—	Éq. (11)
$K_v$	facteur dynamique	—	Éq. (11)
$m_n$	module normal	mm	Éq. (B.2)
$n_1$	vitesse de rotation par minute du pignon	r/min	Éq. (5)
$n_p$	nombre de contacts d'engrènement	—	Éq. (16)
$Pe_1$	nombre de Péclét du matériau du pignon	—	Éq. (9)
$Pe_2$	nombre de Péclét du matériau de la roue	—	Éq. (10)
$Q$	classe de précision	—	Éq. (57)
$Ra_1$	rugosité de surface du flanc de dent du pignon	$\mu\text{m}$	Éq. (28)
$Ra_2$	rugosité de surface du flanc de dent de la roue	$\mu\text{m}$	Éq. (28)
$R_m$	génératrice du cône complémentaire moyen	mm	Éq. (A.16)
$r_{m1}$	rayon de référence du cône moyen du pignon	mm	Éq. (43)
$r_{m2}$	rayon de référence du cône moyen de la roue	mm	Éq. (44)
$S_B$	coefficient de sécurité relatif au grippage	—	Éq. (100)
$S_{FZG}$	niveau de charge (en essai FZG)	—	Éq. (99)
$t_1$	durée de contact sur le pignon	$\mu\text{s}$	Éq. (95)
$t_2$	durée de contact sur la roue	$\mu\text{s}$	Éq. (96)
$t_c$	durée de contact au coude de la courbe	$\mu\text{s}$	Éq. (97)
$t_{\max}$	durée de contact la plus longue	$\mu\text{s}$	Éq. (95)
$u$	rapport d'engrènement	—	Éq. (A.6)
$u_v$	rapport équivalent	—	Éq. (B.6)
$v_g$	vitesse de glissement	m/s	Figure 1
$v_{g1}$	vitesse tangentielle du pignon	m/s	Éq. (3)

Tableau 1 — Symboles et unités (suite)

Symbole	Description	Unité	Référence
$v_{g2}$	vitesse tangentielle de la roue	m/s	Éq. (3)
$v_{g\Sigma C}$	somme des vitesses tangentielles au point primitif	m/s	Éq. (25)
$v_t$	vitesse tangentielle au primitif de fonctionnement	m/s	Éq. (26)
$w_{Bn}$	charge unitaire normale	N/mm	Éq. (3)
$w_{Bt}$	charge unitaire apparente	N/mm	Éq. (5)
$X_{but}$	facteur de contrefort	—	Éq. (54)
$X_{butA}$	valeur de contrefort	—	Éq. (51)
$X_{butE}$	valeur de contrefort	—	Éq. (51)
$X_G$	facteur géométrique	—	Éq. (A.5)
$X_J$	facteur d'approche	—	Éq. (3)
$X_L$	facteur lubrifiant	—	Éq. (25)
$X_M$	facteur thermoélastique	$K \cdot N^{-3/4} \cdot s^{-1/2} \cdot m^{-1/2} \cdot mm$	Éq. (5)
$X_{mp}$	facteur de pignons conjugués multiples	—	Éq. (22)
$X_R$	facteur de rugosité	—	Éq. (25)
$X_S$	facteur système de lubrification	—	Éq. (22)
$X_W$	facteur de structure	—	Éq. (94)
$X_{\alpha\beta}$	facteur d'angle	—	Éq. (A.6)
$X_\Gamma$	facteur de répartition de charge	—	Éq. (3)
$X_\Theta$	gradient de la température de grippage	—	Éq. (97)
$z_1$	nombre de dents du pignon	—	Éq. (30)
$z_2$	nombre de dents de la roue	—	Éq. (30)
$\alpha_{a1}$	angle de pression de tête apparent du pignon	°	Éq. (31)
$\alpha_{a2}$	angle de pression de tête apparent de la roue	°	Éq. (30)
$\alpha_t$	angle de pression apparent	°	Éq. (34)
$\alpha_{wn}$	angle de pression de fonctionnement normal	°	Éq. (A.2)
$\alpha_{wt}$	angle de pression de fonctionnement apparent	°	Éq. (7)
$\alpha_{\gamma 1}$	angle d'incidence du pignon en un point quelconque	°	Éq. (29)
$\beta$	angle d'hélice	°	Éq. (18)
$\beta_b$	angle d'hélice de base	°	Éq. (49)
$\beta_{bm}$	angle d'hélice de base au demi-cône	°	Éq. (50)
$\beta_w$	angle d'hélice de fonctionnement	°	Éq. (A.2)
$\Gamma_A$	paramètre sur la ligne d'action au point A	—	Éq. (24)
$\Gamma_{AA}$	paramètre sur la ligne d'action au point AA	—	Éq. (68)

Tableau 1 — Symboles et unités (suite)

Symbole	Description	Unité	Référence
$\Gamma_{AB}$	paramètre sur la ligne d'action au point AB	—	Éq. (66)
$\Gamma_{AU}$	paramètre sur la ligne d'action au point AU	—	Éq. (49)
$\Gamma_B$	paramètre sur la ligne d'action au point B	—	Éq. (31)
$\Gamma_{BB}$	paramètre sur la ligne d'action au point BB	—	Éq. (70)
$\Gamma_D$	paramètre sur la ligne d'action au point D	—	Éq. (32)
$\Gamma_{DD}$	paramètre sur la ligne d'action au point DD	—	Éq. (72)
$\Gamma_{DE}$	paramètre sur la ligne d'action au point DE	—	Éq. (67)
$\Gamma_E$	paramètre sur la ligne d'action au point E	—	Éq. (24)
$\Gamma_{EE}$	paramètre sur la ligne d'action au point EE	—	Éq. (74)
$\Gamma_{EU}$	paramètre sur la ligne d'action au point EU	—	Éq. (49)
$\Gamma_M$	paramètre sur la ligne d'action au point M	—	Éq. (86)
$\Gamma_y$	paramètre sur la ligne d'action en un point arbitraire	—	Éq. (7)
$\gamma_1$	angle de direction de la vitesse tangentielle du pignon	—	Éq. (3)
$\gamma_2$	angle de direction de la vitesse tangentielle de la roue	—	Éq. (3)
$\delta_1$	angle du cône primitif de fonctionnement du pignon	°	Éq. (37)
$\delta_2$	angle du cône primitif de fonctionnement de la roue	°	Éq. (39)
$\varepsilon_\alpha$	rapport de conduite apparent	—	Éq. (76)
$\varepsilon_\beta$	rapport de recouvrement	—	Éq. (52)
$\eta_{oil}$	viscosité absolue (dynamique) à la température de l'huile	mPa·s	Éq. (27)
$\theta_B$	température de contact	°C	Éq. (1)
$\theta_{Bmax}$	température de contact maximale	°C	Éq. (2)
$\theta_{fl}$	température-éclair	K	Éq. (1)
$\theta_{film}$	température-éclair moyenne	K	Éq. (22)
$\theta_{filmmax}$	température-éclair maximale	K	Éq. (2)
$\theta_{filmmaxT}$	température-éclair maximale en cours d'essai	K	Éq. (94)
$\theta_M$	température de masse	°C	Éq. (22)
$\theta_{Mi}$	température de masse interfaciale	°C	Éq. (1)
$\theta_{M1}$	température de masse des dents du pignon	°C	Éq. (20)
$\theta_{M2}$	température de masse des dents de la roue	°C	Éq. (20)
$\theta_{MT}$	température de masse en cours d'essai	°C	Éq. (94)
$\theta_{oil}$	température d'huile avant d'atteindre l'engrènement	°C	Éq. (22)

Tableau 1 — Symboles et unités (suite)

Symbole	Description	Unité	Référence
$\theta_S$	température de grippage	°C	Éq. (94)
$\theta_{Sc}$	température de grippage pour une durée de contact longue	°C	Éq. (97)
$\lambda_{M1}$	conductivité thermique du pignon	N/(s·K)	Éq. (9)
$\lambda_{M2}$	conductivité thermique de la roue	N/(s·K)	Éq. (10)
$\mu$	coefficient de frottement dans l'essai pion-disque	—	Figure 1
$\mu_m$	coefficient de frottement moyen	—	Éq. (3)
$\nu_1$	coefficient de Poisson du matériau du pignon	—	Éq. (A.10)
$\nu_2$	coefficient de Poisson du matériau de la roue	—	Éq. (A.10)
$\rho_{M1}$	densité du matériau du pignon	kg/m <sup>3</sup>	Éq. (9)
$\rho_{M2}$	densité du matériau de la roue	kg/m <sup>3</sup>	Éq. (10)
$\rho_{relC}$	rayon de courbure relatif au point primitif	mm	Éq. (25)
$\rho_{y1}$	rayon de courbure en un point quelconque du pignon	mm	Éq. (5)
$\rho_{y2}$	rayon de courbure en un point quelconque de la roue	mm	Éq. (5)
$\rho_{yrel}$	rayon de courbure relatif en un point quelconque	mm	Éq. (5)
$\Sigma$	angle des axes	°	Éq. (A.15)
$\Phi$	torsion d'arbre torsible	°	Éq. (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 dans la présente partie de l'ISO/TR 13989.

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 antigrippage<sup>2)</sup>. Il est cependant important de noter que l'utilisation de ces additifs antigrippage comporte certains inconvénients: corrosion du cuivre, fragilisation des élastomères, difficulté d'approvisionnement, etc.

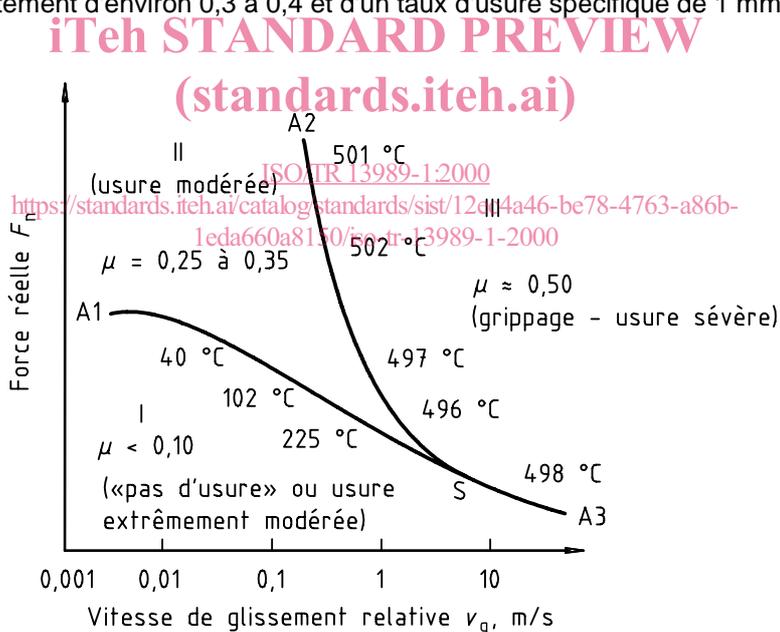
Les méthodes décrites dans la présente partie de l'ISO/TR 13989 ne s'appliquent pas au «grippage à froid», qui est en général associé à des engrenages traités dans la masse, lourdement chargés, de précision plutôt médiocre et travaillant à faible vitesse, inférieure à environ 4 m/s.

## 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  $10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  à  $10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  (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  $5 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ .



**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  $100 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  à  $1\,000 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  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.

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