

---

---

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

Partie 21:

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

*Calculation of load capacity of spur and helical gears —*

*Part 21: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel  
and hypoid gears) — Integral temperature method*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/ada36ebc-87ea-44b0-a29f-c12d72ca6604/iso-ts-6336-21-2017>



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

ISO/TS 6336-21:2017

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/ada36ebc-87ea-44b0-a29f-c12d72ca6604/iso-ts-6336-21-2017>



**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](mailto:copyright@iso.org)  
[www.iso.org](http://www.iso.org)

# Sommaire

Page

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Avant-propos</b>                                                    | <b>v</b>  |
| <b>Introduction</b>                                                    | <b>vi</b> |
| <b>1 Domaine d'application</b>                                         | <b>1</b>  |
| <b>2 Références normatives</b>                                         | <b>1</b>  |
| <b>3 Termes, définitions symboles et unités</b>                        | <b>1</b>  |
| 3.1 Termes et définitions                                              | 1         |
| 3.2 Symboles et unités                                                 | 1         |
| <b>4 Domaine d'application</b>                                         | <b>5</b>  |
| 4.1 Généralités                                                        | 5         |
| 4.2 Détérioration par grippage                                         | 5         |
| 4.3 Critère de la température intégrale                                | 6         |
| <b>5 Facteurs d'influence</b>                                          | <b>6</b>  |
| 5.1 Coefficient de frottement moyen, $\mu_{mC}$                        | 6         |
| 5.2 Facteur de rodage, $X_E$                                           | 8         |
| 5.3 Facteur thermique éclair, $X_M$                                    | 9         |
| 5.4 Facteur d'angle de pression, $X_{\alpha\beta}$                     | 10        |
| <b>6 Calcul</b>                                                        | <b>11</b> |
| 6.1 Engrenages cylindriques                                            | 11        |
| 6.1.1 Généralités                                                      | 11        |
| 6.1.2 Coefficient de sécurité au grippage $S_{intS}$                   | 11        |
| 6.1.3 Température intégrale admissible, $\vartheta_{intP}$             | 11        |
| 6.1.4 Température intégrale, $\vartheta_{int}$                         | 12        |
| 6.1.5 Température-éclair en tête de dent du pignon, $\vartheta_{flaE}$ | 12        |
| 6.1.6 Température de masse, $\vartheta_M$                              | 12        |
| 6.1.7 Coefficient de frottement moyen, $\mu_{mC}$                      | 13        |
| 6.1.8 Facteur de rodage, $X_E$                                         | 13        |
| 6.1.9 Facteur thermique éclair, $X_M$                                  | 13        |
| 6.1.10 Facteur d'angle de pression, $X_{\alpha\beta}$                  | 13        |
| 6.1.11 Facteur géométrique en tête du pignon, $X_{BE}$                 | 13        |
| 6.1.12 Facteur d'approche, $X_Q$                                       | 14        |
| 6.1.13 Facteur de dépouille de tête, $X_{Ca}$                          | 15        |
| 6.1.14 Facteur de rapport de conduite, $X_\epsilon$                    | 17        |
| 6.2 Engrenages coniques                                                | 19        |
| 6.2.1 Généralités                                                      | 19        |
| 6.2.2 Coefficient de sécurité au grippage $S_{intS}$                   | 20        |
| 6.2.3 Température intégrale admissible, $\vartheta_{intP}$             | 20        |
| 6.2.4 Température intégrale admissible, $\vartheta_{intP}$             | 20        |
| 6.2.5 Température-éclair en tête de dent du pignon, $\vartheta_{flaE}$ | 20        |
| 6.2.6 Température de masse, $\vartheta_M$                              | 20        |
| 6.2.7 Coefficient de frottement moyen, $\mu_{mC}$                      | 20        |
| 6.2.8 Facteur de rodage, $X_E$                                         | 20        |
| 6.2.9 Facteur thermique éclair, $X_M$                                  | 21        |
| 6.2.10 Facteur d'angle de pression, $X_{\alpha\beta}$                  | 21        |
| 6.2.11 Facteur géométrique en tête du pignon, $X_{BE}$                 | 21        |
| 6.2.12 Facteur d'approche, $X_Q$                                       | 21        |
| 6.2.13 Facteur de dépouille de tête, $X_{Ca}$                          | 21        |
| 6.2.14 Facteur de rapport de conduite $X_\epsilon$                     | 22        |
| 6.3 Engrenages hypoides                                                | 22        |
| 6.3.1 Généralités                                                      | 22        |
| 6.3.2 Coefficient de sécurité au grippage $S_{intS}$                   | 22        |
| 6.3.3 Température intégrale admissible, $\vartheta_{intP}$             | 22        |
| 6.3.4 Température intégrale, $\vartheta_{nt}$                          | 22        |

|                                                                                                |                                                             |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3.5                                                                                          | Température de masse, $\vartheta_M$ .....                   | 22        |
| 6.3.6                                                                                          | Coefficient de frottement moyen, $\mu_{mC}$ .....           | 22        |
| 6.3.7                                                                                          | Facteur de rodage, $X_E$ .....                              | 23        |
| 6.3.8                                                                                          | Facteur géométrique $X_G$ .....                             | 23        |
| 6.3.9                                                                                          | Facteur d'approche, $X_Q$ .....                             | 25        |
| 6.3.10                                                                                         | Facteur de dépouille de tête, $X_{Ca}$ .....                | 25        |
| 6.3.11                                                                                         | Facteur de rapport de conduite $X_\varepsilon$ .....        | 25        |
| 6.3.12                                                                                         | Calcul des engrenages gauches hélicoïdaux équivalents ..... | 25        |
| 6.4                                                                                            | Température intégrale de grippage .....                     | 29        |
| 6.4.1                                                                                          | Généralités .....                                           | 29        |
| 6.4.2                                                                                          | Température intégrale de grippage, $\vartheta_{intS}$ ..... | 29        |
| 6.4.3                                                                                          | Facteur relatif de soudure $X_{WrelT}$ .....                | 34        |
| <b>Annexe A (informative) Exemples .....</b>                                                   |                                                             | <b>35</b> |
| <b>Annexe B (informative) Température de grippage en fonction de la durée de contact .....</b> |                                                             | <b>43</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>                                                                     |                                                             | <b>48</b> |

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

[ISO/TS 6336-21:2017](https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/ada36ebc-87ea-44b0-a29f-c12d72ca6604/iso-ts-6336-21-2017)

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/ada36ebc-87ea-44b0-a29f-c12d72ca6604/iso-ts-6336-21-2017>

## Avant-propos

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

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

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

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

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

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

Cette première édition de l'ISO/TS 6336-21 annule et remplace l'ISO/TR 13989-2.

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 normes 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 — Aperçu général 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 superficielle (piqûres)</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 rupture du 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><br>(Remplace l'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><br>(Remplace l'ISO/TR 13989-2) |                      | X                       |                   |
| <i>Partie 22: Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres</i><br>(Remplace l'ISO/TR 15144-1)                                                                                           |                      | X                       |                   |
| <i>Partie 30: Exemples de calculs selon les normes ISO 6336-1, ISO 6336-2, ISO 6336-3 et ISO 6336-5</i>                                                                                     |                      |                         | X                 |
| <i>Partie 31: Exemples de calcul de la capacité de charge aux micropiqûres</i><br>(Remplace: ISO/TR 15144-2)                                                                                |                      |                         | X                 |
| Certaines des parties répertoriées ici étaient en cours d'élaboration au moment de la publication du présent document. Consulter le site web de l'ISO.                                      |                      |                         |                   |

Le présent document décrit la détérioration de surface d'engrenages cylindriques «grippage à chaud» (à denture droite et hélicoïdale), coniques et hypoïdes, pour les matériaux d'engrenages généralement utilisés combinés avec différents traitements thermiques. Le «grippage à chaud» est caractérisé par des marques de grippage et de griffures typiques qui peuvent donner lieu à une augmentation de la perte de puissance, de la charge dynamique, du bruit et de l'usure. Pour le «grippage à froid», généralement associé à des engrenages à basse température et faible vitesse, tournant à des vitesses inférieures à 4 m/s environ, trempés à cœur et soumis à des charges élevées, les formules ne conviennent pas.

Il s'agit là d'une forme particulièrement sévère de détérioration de la surface de la denture d'un engrenage, au cours de laquelle un arrachement ou une soudure par fusion des surfaces en contact apparaît, due à l'absence ou à la rupture du film de lubrifiant entre les flancs de dents en contact d'engrenages conjugués, due à des températures et des pressions élevées. Cette forme de détérioration est appelée «grippage»; elle est d'autant plus importante que les vitesses de surface sont élevées. Le grippage peut également apparaître à de faibles vitesses de glissement lorsque les pressions à la surface des dentures sont suffisamment élevées, soit de manière uniforme, soit dans des zones discrètes du fait d'une géométrie et d'une distribution de charge sur les flancs inégales.

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. Une aération excessive ou la présence de contaminants dans le lubrifiant, tels que des particules métalliques en suspension, augmente également le risque de détérioration par grippage. En conséquence du grippage, les engrenages à grande vitesse peuvent subir des niveaux de charge dynamique élevés du fait de l'augmentation des vibrations qui conduisent généralement à une détérioration accrue par grippage, formation de piqûres ou rupture de dent.

Les températures superficielles élevées, induites par des pressions de contact et des vitesses de glissement élevées, peuvent conduire à la rupture des films de lubrifiant. Sur la base de cette hypothèse, deux approches permettant de corréler la température et la rupture du film de lubrifiant sont présentées:

- la méthode de la température-éclair (présentée dans l'ISO/TS 6336-20), basée sur les températures de contact qui varient sur la longueur de conduite;
- la méthode de la température intégrale (présentée dans le présent document), basée sur la moyenne pondérée des températures de contact sur la longueur de conduite.

La méthode de la température intégrale est basée sur l'hypothèse que le grippage apparaît probablement lorsque la valeur moyenne de la température de contact (température intégrale) est supérieure ou égale à une valeur critique correspondante. Le risque de grippage d'une transmission par engrenages réelle peut être prédit en comparant la température intégrale à la valeur critique, issue d'essais sur engrenages de la résistance des lubrifiants au grippage. La méthode de calcul tient compte de tous les paramètres d'influence significatifs, c'est-à-dire le lubrifiant (huile minérale sans ou avec additifs EP, huile synthétique), la rugosité de surface, les vitesses de glissement, la charge, etc.

Il est admis que d'autres méthodes peuvent être nécessaires afin de s'assurer que tous les types de grippage et formes comparables de détérioration de surface dus aux interactions complexes entre phénomènes hydrodynamiques, thermodynamiques et chimiques, sont traités. Le développement de ces méthodes fait actuellement l'objet de recherches poussées.





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

## Partie 21:

# Calcul de la capacité de charge au grippage (applicable également aux engrenages conique et hypoïde) — Méthode de la température intégrale

## 1 Domaine d'application

Le présent document spécifie la méthode de la température intégrale pour calculer la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoïdes.

## 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 53, *Engrenages cylindriques de mécanique générale et de grosse mécanique — Tracé de référence*

ISO 1122-2, *Vocabulaire des engrenages — Partie 2: Définitions géométriques relatives aux engrenages à vis*

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 10300-1, *Calcul de la capacité de charge des engrenages coniques — Partie 1: Introduction et facteurs généraux d'influence*

## 3 Termes, définitions symboles et unités

### 3.1 Termes et définitions

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

L'ISO et la CEI maintiennent des bases de données terminologiques pour utilisation dans le domaine de la normalisation 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 et les abréviations utilisés dans le présent document sont donnés dans le [Tableau 2](#).

Tableau 2 — Symboles et unités

| Symbole            | Description                                                                              | Unité                      |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| $a$                | Entraxe                                                                                  | mm                         |
| $a_v$              | entraxe équivalent de l'engrenage cylindrique à denture droite équivalent                | mm                         |
| $b$                | largeur de denture, plus petite valeur du pignon ou de la roue                           | mm                         |
| $b_{eB}$           | largeur de denture effective pour le grippage                                            | mm                         |
| $c_v$              | capacité thermique spécifique par unité de volume                                        | N/(mm <sup>2</sup> ·K)     |
| $c'$               | raideur simple                                                                           | N/(mm·μm)                  |
| $c_\gamma$         | raideur d'engrènement                                                                    | N/(mm·μm)                  |
| $d$                | diamètre de référence                                                                    | mm                         |
| $d_{Na}$           | diamètre actif de tête                                                                   | mm                         |
| $d_a$              | diamètre de tête                                                                         | mm                         |
| $d_b$              | diamètre de base                                                                         | mm                         |
| $d_m$              | diamètre à mi-largeur de la denture                                                      | mm                         |
| $d_s$              | cercle de référence d'une roue équivalente d'un engrenage gauche hélicoïdal              | mm                         |
| $d_v$              | diamètre de référence de la roue cylindrique à denture droite équivalente                | mm                         |
| $d_{va}$           | diamètre de tête de la roue cylindrique à denture droite équivalente                     | mm                         |
| $d_{vb}$           | diamètre de base de la roue cylindrique à denture droite équivalente                     | mm                         |
| $g_{an1,2}$        | longueur de retraite du pignon, de la roue                                               | mm                         |
| $g_{fn1,2}$        | longueur d'approche du pignon, de la roue                                                | mm                         |
| $g^*$              | facteur de glissement                                                                    | —                          |
| $h_{am}$           | saillie à mi-largeur de la denture d'engrenage hypoïde                                   | mm                         |
| $m$                | Module                                                                                   | mm                         |
| $m_{mn}$           | module réel à mi-largeur de la denture d'engrenage hypoïde                               | mm                         |
| $m_{sn}$           | module réel d'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                                     | mm                         |
| $n_p$              | nombre de roues dentées en prise                                                         | —                          |
| $p_{en}$           | pas de base réel                                                                         | mm                         |
| $u$                | rapport d'engrenage                                                                      | —                          |
| $u_v$              | rapport d'engrenage de l'engrenage cylindrique équivalent                                | —                          |
| $v$                | vitesse de la ligne de référence                                                         | m/s                        |
| $v_{tl,2}$         | vitesse tangentielle du pignon, de la roue d'un engrenage hypoïde                        | m/s                        |
| $v_{gyl}$          | vitesse de glissement maximale à la tête de pignon                                       | m/s                        |
| $v_{gs}$           | vitesse de glissement au point primitif                                                  | m/s                        |
| $v_{g1,2}$         | vitesse de glissement                                                                    | m/s                        |
| $v_{g\alpha 1}$    | vitesse de glissement                                                                    | m/s                        |
| $v_{g\beta 1}$     | vitesse de glissement                                                                    | m/s                        |
| $v_{mt}$           | vitesse tangentielle au cône de référence à mi-largeur de la denture d'engrenage conique | m/s                        |
| $v_{\Sigma C}$     | somme des vitesses tangentielles au point primitif                                       | m/s                        |
| $v_{\Sigma s}$     | vitesse tangentielle                                                                     | m/s                        |
| $v_{\Sigma h}$     | vitesse tangentielle                                                                     | m/s                        |
| $w_{Bt}$           | charge spécifique sur les dents, grippage                                                | N/mm                       |
| $z$                | nombre de dents                                                                          | —                          |
| $z_v$              | nombre de dents de l'engrenage cylindrique équivalent                                    | —                          |
| $B_M$              | coefficient de contact thermique                                                         | N/(mm·s <sup>1/2</sup> ·K) |
| $C_1, C_2, C_{2H}$ | facteurs de pondération                                                                  | —                          |

Tableau 2 (suite)

| Symbole               | Description                                                                  | Unité           |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $C_a$                 | dépouille de tête nominale                                                   | $\mu\text{m}$   |
| $C_{\text{eff}}$      | dépouille de tête effective                                                  | $\mu\text{m}$   |
| $E$                   | module d'élasticité (module de Young)                                        | $\text{N/mm}^2$ |
| $F_{\text{mt}}$       | charge tangentielle nominale au cône de référence à mi-largeur de la denture | N               |
| $F_n$                 | charge réelle sur les dents                                                  | N               |
| $F_t$                 | charge tangentielle nominale au cercle de référence                          | N               |
| $K_A$                 | facteur d'application                                                        | —               |
| $K_v$                 | facteur dynamique                                                            | —               |
| $K_{B\alpha}$         | = $K_{H\alpha}$ facteur de distribution transversale de la charge (grippage) | —               |
| $K_{B\beta}$          | = $K_{H\beta}$ facteur de distribution longitudinale de la charge (grippage) | —               |
| $K_{B\gamma}$         | facteur de charge hélicoïdale (grippage)                                     | —               |
| $K_{B\beta\text{be}}$ | facteur de portée                                                            | —               |
| $K_{H\alpha}$         | facteur de distribution transversale de la charge                            | —               |
| $K_{H\beta}$          | facteur de distribution longitudinale de la charge                           | —               |
| $K_{H\beta\text{be}}$ | facteur de portée                                                            | —               |
| $L$                   | paramètre de contact                                                         | —               |
| $R_a$                 | rugosité moyenne arithmétique                                                | $\mu\text{m}$   |
| $S_{\text{intS}}$     | coefficient de sécurité au grippage                                          | —               |
| $S_{\text{min}}$      | coefficient de sécurité au grippage minimal exigé                            | —               |
| $T_1$                 | couple sur le pignon                                                         | Nm              |
| $T_{1T}$              | couple de grippage sur le pignon d'essai                                     | Nm              |
| $X_{BE}$              | facteur géométrique en tête de dent du pignon                                | —               |
| $X_E$                 | facteur de rodage                                                            | —               |
| $X_{Ca}$              | facteur de dépouille de tête                                                 | —               |
| $X_G$                 | facteur géométrique des engrenages hypoides                                  | —               |
| $X_L$                 | facteur lubrifiant                                                           | —               |
| $X_M$                 | facteur thermique éclair                                                     | —               |
| $X_Q$                 | facteur d'approche                                                           | —               |
| $X_R$                 | facteur de rugosité                                                          | —               |
| $X_S$                 | facteur de lubrification                                                     | —               |
| $X_W$                 | facteur de soudure de l'engrenage fabriqué                                   | —               |
| $X_{WT}$              | facteur de soudure de l'engrenage d'essai                                    | —               |
| $X_{W\text{relT}}$    | facteur relatif de soudure                                                   | —               |
| $X_{\text{mp}}$       | facteur de contact                                                           | —               |
| $X_{\alpha\beta}$     | facteur d'angle de pression                                                  | —               |
| $X_\varepsilon$       | facteur de rapport de conduite                                               | —               |
| $\alpha$              | angle de pression                                                            | °               |
| $\alpha_{\text{mn}}$  | angle de pression réel à mi-largeur de denture pour l'engrenage hypoides     | °               |
| $\alpha_n$            | angle de pression normal                                                     | °               |
| $\alpha_{\text{sn}}$  | angle de pression réel de l'engrenage gauche hélicoïdal                      | °               |
| $\alpha_{\text{st}}$  | angle de pression apparent de l'engrenage gauche hélicoïdal                  | °               |
| $\alpha_t$            | angle de pression apparent                                                   | °               |
| $\alpha_t'$           | angle de pression de fonctionnement apparent                                 | °               |
| $\alpha_{\text{vt}}$  | angle de pression apparent pour l'engrenage cylindrique équivalent           | °               |

Tableau 2 (suite)

| Symbole                    | Description                                                                                                           | Unité                   |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| $\alpha_y$                 | angle d'incidence arbitraire                                                                                          | °                       |
| $\beta$                    | angle d'hélice                                                                                                        | °                       |
| $\beta_b$                  | angle d'hélice de base                                                                                                | °                       |
| $\beta_m$                  | angle d'hélice au cône de référence à mi-largeur de la denture pour l'engrenage hypoïde                               | °                       |
| $\beta_s$                  | angle d'hélice pour l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                                                          | °                       |
| $\gamma$                   | angle auxiliaire                                                                                                      | °                       |
| $\delta$                   | angle du cône de référence                                                                                            | °                       |
| $\varepsilon_a$            | rapport de retrait                                                                                                    | —                       |
| $\varepsilon_f$            | rapport d'approche                                                                                                    | —                       |
| $\varepsilon_n$            | rapport de conduite du profil réel pour l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                                      | —                       |
| $\varepsilon_1$            | rapport de conduite de saillie du pignon                                                                              | —                       |
| $\varepsilon_2$            | rapport de conduite de saillie de la roue                                                                             | —                       |
| $\varepsilon_\alpha$       | rapport de conduite                                                                                                   | —                       |
| $\varepsilon_{v\alpha}$    | rapport de conduite apparent pour l'engrenage cylindrique équivalent                                                  | —                       |
| $\varepsilon_{v1}$         | rapport de conduite de tête pour le pignon cylindrique équivalent                                                     | —                       |
| $\varepsilon_{v2}$         | rapport de conduite de tête pour la roue cylindrique équivalente                                                      | —                       |
| $\xi$                      | coefficient auxiliaire hertzien                                                                                       | —                       |
| $\mu_{mC}$                 | coefficient de frottement moyen                                                                                       | —                       |
| $\eta_{\text{huile}}$      | viscosité dynamique à la température de l'huile                                                                       | mPa · s                 |
| $\lambda_M$                | conductivité thermique                                                                                                | N/(s · K)               |
| $\nu$                      | coefficient de Poisson                                                                                                | —                       |
| $\nu_{40}$                 | viscosité cinématique de l'huile à 40 °C                                                                              | mm <sup>2</sup> /s; cSt |
| $\rho_{E1,2}$              | rayon de courbure en tête du pignon, de la roue                                                                       | mm                      |
| $\rho_{Cn}$                | rayon de courbure équivalent au point primitif du profil réel                                                         | mm                      |
| $\rho_{n1,2}$              | rayon de courbure au point primitif du profil réel                                                                    | mm                      |
| $\rho_{redC}$              | rayon de courbure équivalent au point primitif                                                                        | mm                      |
| $\eta$                     | coefficient auxiliaire hertzien                                                                                       | —                       |
| $\vartheta$                | angle auxiliaire hertzien                                                                                             | °                       |
| $\vartheta_{flaE}$         | température-éclair à la tête de dent de pignon lorsque la répartition de charge entre dents n'est pas prise en compte | K                       |
| $\vartheta_{flaint}$       | température-éclair moyenne                                                                                            | K                       |
| $\vartheta_{flainth}$      | température-éclair moyenne pour l'engrenage hypoïde                                                                   | K                       |
| $\vartheta_{int}$          | température intégrale                                                                                                 | K                       |
| $\vartheta_{intP}$         | température intégrale admissible                                                                                      | K                       |
| $\vartheta_{intS}$         | température intégrale de grippage (température intégrale acceptable)                                                  | K                       |
| $\vartheta_{flaintT}$      | température-éclair moyenne de l'engrenage d'essai                                                                     | K                       |
| $\vartheta_{\text{huile}}$ | température de l'huile du bain ou de l'injection                                                                      | °C                      |
| $\vartheta_{M-C}$          | température de masse                                                                                                  | °C                      |
| $\vartheta_{MT}$           | température de masse de l'essai                                                                                       | °C                      |
| $\varphi$                  | angle des axes de l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                                                            | °                       |
| $\Sigma$                   | angle des axes d'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                                                               | °                       |

Tableau 2 (suite)

| Symbole     | Description                                               | Unité |
|-------------|-----------------------------------------------------------|-------|
| $\varphi_E$ | degré de rodage                                           | —     |
| $\Gamma$    | paramètre sur la ligne de conduite                        | —     |
| Indices:    |                                                           |       |
| 1           | au pignon                                                 |       |
| 2           | à la roue                                                 |       |
| a           | au diamètre de tête de l'engrenage équivalent             |       |
| b           | au cercle de base de l'engrenage équivalent               |       |
| m           | à mi-largeur de denture de l'engrenage conique ou hypoïde |       |
| n           | au profil réel                                            |       |
| s           | à l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent                |       |
| t           | à la direction tangentielle                               |       |
| T           | à l'engrenage d'essai                                     |       |

## 4 Domaine d'application

### 4.1 Généralités

Les méthodes de calcul sont fondées sur des résultats d'essai obtenus sur banc d'engrenages avec des vitesses tangentielles inférieures à 80 m/s. Les formules peuvent être utilisées pour des engrenages tournant à des vitesses plus élevées, en sachant que l'incertitude augmente en fonction de la vitesse. Cette incertitude concerne l'estimation de la température de masse, du coefficient de frottement, des températures admissibles, etc., lorsque les vitesses dépassent le domaine couvert par les retours expérimentaux.

### 4.2 Détérioration par grippage

Une fois initiée, la détérioration par grippage peut entraîner une dégradation globale de la surface des flancs des dents avec une augmentation: de la perte de puissance, de la charge dynamique, du bruit et de l'usure. Elle peut également donner lieu à une rupture des dents, si la sévérité des conditions de fonctionnement n'est pas réduite. En cas de grippage dû à une surcharge instantanée, immédiatement suivie d'une réduction de charge, par exemple par une redistribution de la charge, les flancs des dents peuvent «s'auto-réparer» en se rodant eux-mêmes dans une certaine mesure. Même ainsi, la détérioration résiduelle restera une cause d'augmentation de la perte de puissance, de la charge dynamique et du bruit.

Dans la plupart des cas, la résistance des engrenages au grippage peut être améliorée en utilisant un lubrifiant ayant des propriétés EP (extrême pression) augmentées. Il est cependant important de noter que l'utilisation des huiles EP comporte certains inconvénients: corrosion du cuivre, fragilisation des élastomères, difficulté d'approvisionnement, etc. Ces inconvénients doivent être pris en compte pour un choix optimal de l'huile, ce qui signifie: aussi peu d'additifs que possible, autant que nécessaire.

Du fait de la variation constante des divers paramètres, la complexité des propriétés chimiques et des processus thermo-hydroélastiques dans la zone de contact instantané, on peut prévoir une certaine dispersion dans l'évaluation de la probabilité calculée du risque de grippage.

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 plus être utilisé. Il convient de tenir compte de ces considérations lors du choix du coefficient de sécurité approprié sur l'engrenage considéré, spécialement pour les engrenages qui doivent fonctionner à des vitesses tangentielles élevées.

### 4.3 Critère de la température intégrale

Cette approche de l'évaluation de la probabilité de grippage est basée sur l'hypothèse selon laquelle le grippage risque d'apparaître lorsque la valeur moyenne des températures de contact sur la longueur de conduite est supérieure ou égale à une «valeur critique» correspondante. Dans la méthode présentée ici, la somme de la température de masse et la moyenne pondérée des valeurs intégrées des températures-éclair sur la longueur de conduite constitue la «température intégrale». La température de masse est estimée comme décrit en 6.1.6 et une approximation de la valeur moyenne de la température-éclair est obtenue en utilisant des valeurs moyennes du coefficient de frottement, de la charge dynamique, etc., sur la longueur de conduite. Un facteur de pondération est introduit afin de tenir compte des éventuelles influences différentes d'une valeur réelle de température de masse et d'une valeur moyenne, mathématiquement intégrée, de la température-éclair sur le phénomène de grippage.

La probabilité de grippage est évaluée en comparant la température intégrale à une valeur critique correspondante, résultant d'essais de lubrifiants sur des engrenages, afin de vérifier leur résistance au grippage (par exemple différentes procédures d'essai FZG, les essais d'engrenages IAE et Ryder), ou à partir d'engrenages qui ont grippé en fonctionnement.

## 5 Facteurs d'influence

### 5.1 Coefficient de frottement moyen, $\mu_{mC}$

Le coefficient réel de frottement entre les flancs de dent est une valeur instantanée et locale qui dépend de plusieurs propriétés de l'huile, de la rugosité de surface, de la disposition des irrégularités de surface, telles que celles laissées par l'usinage, les propriétés des matériaux de flanc de dent, des vitesses tangentielles, des forces au niveau des surfaces ainsi que des dimensions. Il est difficile d'évaluer le coefficient de frottement instantané car il n'y a pas actuellement de méthode disponible pour le quantifier par mesure.

La valeur moyenne du coefficient de frottement,  $\mu_{mC}$ , sur la longueur de conduite a été déduite des mesures<sup>[4]</sup> et calculée par approximation au moyen de la [Formule \(1\)](#). Bien que le coefficient de frottement local soit proche de zéro au niveau du point primitif C, on peut calculer sa valeur moyenne par approximation au moyen des paramètres déterminés au niveau du point primitif et de la viscosité de l'huile,  $\eta_{huile}$ , à la température de l'huile,  $\vartheta_{huile}$ , lorsqu'ils sont introduits dans la [Formule \(1\)](#).

$$\mu_{mC} = 0,045 \cdot \left( \frac{w_{Bt} \cdot K_{B\gamma}}{v_{\Sigma C} \cdot \rho_{redC}} \right)^{0,2} \cdot \eta_{oil}^{-0,05} \cdot X_R \cdot X_L \quad (1)$$

Note La [Formule \(1\)](#) est déduite d'essais d'engrenages d'entraxe  $a \approx 100$  mm.

Le coefficient de frottement de la méthode de la température intégrale tient compte de la dimension de l'engrenage d'une manière différente du coefficient de frottement de la méthode de la température-éclair. Il convient de ne pas appliquer la [Formule \(1\)](#) pour le calcul du coefficient de frottement, hors du domaine d'application de la partie où il est présenté, par exemple le coefficient de frottement pour la capacité thermique.