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

Partie 21:
**Calcul de la capacité de charge
au grippage — Méthode de la
température intégrale**

Calculation of load capacity of spur and helical gears —

*Part 21: Calculation of scuffing load capacity — Integral temperature
method*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/19f2b31d-b341-4c87-97cd-fa43a4a5d415/iso-ts-6336-21-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO/TS 6336-21:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/19f2b31d-b341-4c87-97cd-fa43a4a5d415/iso-ts-6336-21-2022>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
3.1 Termes et définitions	1
3.2 Symboles et unités	1
4 Domaine d'application	4
4.1 Généralités	4
4.2 Détérioration par grippage	4
4.3 Critère de la température intégrale	5
5 Facteurs d'influence	5
5.1 Coefficient de frottement moyen, μ_{mC}	5
5.2 Facteur de rodage, X_E	8
5.3 Facteur thermique éclair, X_M	8
5.4 Facteur d'angle de pression, $X_{\alpha\beta}$	10
6 Calcul	10
6.1 Engrenages cylindriques	10
6.1.1 Généralités	10
6.1.2 Coefficient de sécurité au grippage, S_{intS}	11
6.1.3 Température intégrale admissible, ϑ_{intP}	11
6.1.4 Température intégrale, ϑ_{int}	11
6.1.5 Température-éclair en tête de dent du pignon, ϑ_{flaE}	11
6.1.6 Température de masse, ϑ_M	12
6.1.7 Coefficient de frottement moyen, μ_{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	13
6.1.13 Facteur de dépouille de tête, X_{Ca}	14
6.1.14 Facteur de rapport de conduite, X_ε	16
6.2 Température intégrale de grippage	18
6.2.1 Généralités	18
6.2.2 Température intégrale de grippage, ϑ_{intS}	19
6.2.3 Facteur relatif de soudure X_{WrelT}	23
Annexe A (informative) Exemples	24
Annexe B (informative) Température de grippage en fonction de la durée de contact	32
Bibliographie	37

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 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 seconde édition annule et remplace la première édition (ISO/TS 6336-21:2017), qui a fait l'objet d'une révision technique.

Les principales modifications sont les suivantes:

- le contenu relatif aux engrenages coniques a été supprimé après la publication de l'ISO/TS 10300-20:2021 qui couvre précisément les engrenages coniques;
- le [paragraphe 5.1](#) a été réorganisé.

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

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Introduction

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

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

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

Toute demande de calculs selon l'ISO 6336 sans référence à des parties spécifiques nécessite d'utiliser uniquement les parties désignées comme Normes internationales (voir la liste du [Tableau 1](#)). En cas de demande de calculs supplémentaires, la ou les parties pertinentes de l'ISO 6336 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 la série ISO 6336

Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale	Norme internationale	Spécification technique	Rapport technique
Partie 1: Principes de base, introduction et facteurs généraux d'influence	X		
Partie 2: Calcul de la tenue en fatigue à la pression de contact (écaillage)	X		
Partie 3: Calcul de la tenue en fatigue à la flexion en pied de dent	X		
Partie 4: Calcul de la capacité de charge de la rupture en flanc de dent		X	
Partie 5: Résistance et qualité des matériaux	X		
Partie 6: Calcul de la durée de vie en service sous charge variable	X		
Partie 20: Calcul de la capacité de charge au grippage — Méthode de la température-éclair		X	
Partie 21: Calcul de la capacité de charge au grippage — Méthode de la température intégrale		X	
Partie 22: Calcul de la capacité de charge aux micropiqûres (remplace l'ISO/TR 15144-1)		X	
Partie 30: Exemples de calculs pour l'application des ISO 6336-1, 2, 3, 5			X
Partie 31: Exemples de calcul de la capacité de charge aux micropiqûres (remplace l'ISO/TR 15144-2)			X
Au moment de la publication de ce document, certaines des parties énumérées ici étaient en cours de développement. 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), 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, le 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, avec ou sans 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 — 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.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

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

ISO 1122-2, *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*

3 Termes et définitions

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 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 <https://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
B_M	coefficient de contact thermique	$N/(mm \cdot s^{1/2} \cdot K)$
b	largeur de denture, plus petite valeur du pignon ou de la roue	mm

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité
C_1, C_2, C_{2H}	facteurs de pondération	—
C_a	dépouille de tête nominale	μm
C_{eff}	dépouille de tête effective	μm
c_v	capacité thermique spécifique par unité de volume	$\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$
c'	raideur simple	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$
c_γ	raideur d'engrènement	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$
d	diamètre de référence	mm
d_{Na}	diamètre actif de tête	mm
d_a	diamètre de tête	mm
d_b	diamètre de base	mm
E	module d'élasticité (Module de Young)	N/mm^2
F_n	charge réelle sur les dents	N
F_t	charge tangentielle nominale au cercle de référence	N
$g_{\text{an}1,2}$	longueur de retraite du pignon, de la roue	mm
$g_{\text{fn}1,2}$	longueur d'approche du pignon, de la roue	mm
g^*	facteur de glissement	—
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)	—
$K_{H\alpha}$	facteur de distribution transversale de la charge	—
$K_{H\beta}$	facteur de distribution longitudinale de la charge	—
m	module	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
R_a	rugosité moyenne arithmétique	μm
S_{intS}	coefficient de sécurité au grippage	—
S_{Smin}	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
u	rapport d'engrenage	—
v	vitesse de la ligne de référence	m/s
$v_{\text{g}\gamma 1}$	vitesse de glissement maximale à la tête de pignon	m/s
$v_{\text{g}s}$	vitesse de glissement au point primitif	m/s
$v_{\text{g}1,2}$	vitesse de glissement	m/s
$v_{\text{g}\alpha 1}$	vitesse de glissement	m/s
$v_{\text{g}\beta 1}$	vitesse de glissement	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
X_{BE}	facteur géométrique en tête de dent du pignon	—

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité
X_E	facteur de rodage	—
X_{Ca}	facteur de dépouille de tête	—
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_{WrelT}	facteur relatif de soudure	—
X_{mp}	facteur de contact	—
$X_{\alpha\beta}$	facteur d'angle de pression	—
X_ε	facteur de rapport de conduite	—
z	nombre de dents	—
α	angle de pression	°
α_n	angle de pression normal	°
α_{sn}	angle de pression réel de l'engrenage gauche hélicoïdal	°
α_{st}	angle de pression apparent de l'engrenage gauche hélicoïdal	°
α_t	angle de pression apparent	°
α'_t	angle de pression de fonctionnement apparent	°
α_y	angle d'incidence arbitraire	°
β	angle d'hélice	°
β_b	angle d'hélice de base	°
β_s	angle d'hélice pour l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent	°
Γ	paramètre sur la ligne de conduite	—
γ	angle auxiliaire	°
ε_a	rapport de retrait	—
ε_f	rapport d'approche	—
ε_n	rapport de conduite du profil réel pour l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent	—
ε_1	rapport de conduite de saillie du pignon	—
ε_2	rapport de conduite de saillie de la roue	—
ε_α	rapport de conduite	—
η	coefficient auxiliaire hertzien	—
η_{huile}	viscosité dynamique à la température de l'huile	mPa · s
ϑ	angle auxiliaire hertzien	°
ϑ_{flaE}	température-éclair à la tête de dent de pignon lorsque la répartition de charge entre dents n'est pas prise en compte	K
ϑ_{flaint}	température-éclair moyenne	K
ϑ_{int}	température intégrale	K
ϑ_{intP}	température intégrale admissible	K
ϑ_{intS}	température intégrale de grippage (température intégrale acceptable)	K
$\vartheta_{flaintT}$	température-éclair moyenne de l'engrenage d'essai	K
ϑ_{huile}	température de l'huile du bain ou de l'injection	°C

Tableau 2 (suite)

Symbole	Description	Unité
ϑ_{M-C}	température de masse	°C
ϑ_{MT}	température de masse de l'essai	°C
λ_M	conductivité thermique	N/(s · K)
μ_{mC}	coefficient de frottement moyen	—
ν	coefficient de Poisson	—
ν_{40}	viscosité cinématique de l'huile à 40 °C	mm ² /s; cSt
ξ	coefficient auxiliaire hertzien	—
$\rho_{E1,2}$	rayon de courbure en tête du pignon, de la roue	mm
ρ_{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
ρ_{redC}	rayon de courbure équivalent au point primitif	mm
Σ	angle des axes d'engrenage gauche hélicoïdal équivalent	°
φ	angle des axes de l'engrenage gauche hélicoïdal équivalent	°
φ_E	degré de rodage	—
Indice		
1	pignon	
2	roue	
a	diamètre de tête de l'engrenage équivalent	
b	cercle de base de l'engrenage équivalent	
n	profil réel	
s	engrenage gauche hélicoïdal équivalent	
t	direction tangentielle	
T	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, 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.

NOTE Les additifs EP sont également connus sous le nom de additifs anti-grippage.

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, une certaine dispersion dans l'évaluation de la probabilité calculée du risque de grippage doit être prévue.

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 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, μ_{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, μ_{mC} , sur la longueur de conduite est déduite des mesures^[4] et est 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, η_{huile} , à la température de l'huile, ϑ_{huile} , lorsqu'ils sont introduits dans la [Formule \(1\)](#).

$$\mu_{mC} = 0,045 \cdot \left(\frac{w_{Bt} \cdot K_{B^3}}{v_{EC} \cdot \rho_{redC}} \right)^{0,2} \cdot \eta_{oil}^{-0,05} \cdot X_R \cdot X_L \quad (1)$$

où

w_{Bt} est la charge spécifique sur les dents, grippage;

- K_{By} est le facteur de charge hélicoïdale (grippage);
- $v_{\Sigma C}$ est la somme des vitesses tangentielles au point primitif;
- ρ_{redC} est le rayon de courbure équivalent au point primitif;
- η_{huile} est la viscosité dynamique à la température de l'huile;
- X_R est le facteur de rugosité;
- X_L est le facteur lubrifiant.

NOTE La [Formule \(1\)](#) est déduite d'essais d'engrenages d'entraxe $a \approx 100$ mm. Une autre formule de calcul de μ_{mC} basée sur des essais dans une plage de $a = 91,5$ mm à 200 mm est donnée dans la [Formule \(8\)](#).

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.

La formule utilisée pour le calcul de μ_{mC} a été déduite d'expérimentations effectuées dans le domaine ci-après de conditions de fonctionnement. Il est admis qu'une extrapolation donne lieu à des écarts entre le coefficient de frottement calculé et le coefficient de frottement réel.

$$1 \text{ m/s} \leq v \leq 50 \text{ m/s}$$

Aux vitesses tangentielles v inférieures à 1 m/s, des coefficients de frottement plus élevés sont attendus. Aux vitesses tangentielles, v , supérieures à 50 m/s, la valeur limite de $v_{\Sigma C}$ à $v = 50$ m/s doit être utilisée dans la [Formule \(1\)](#).

$$w_{Bt} \geq 150 \text{ N/mm}$$

Pour des valeurs inférieures de la charge spécifique réelle sur les dents, w_{Bt} , la valeur limite, $w_{Bt} = 150$ N/mm, doit être utilisée dans la [Formule \(1\)](#).

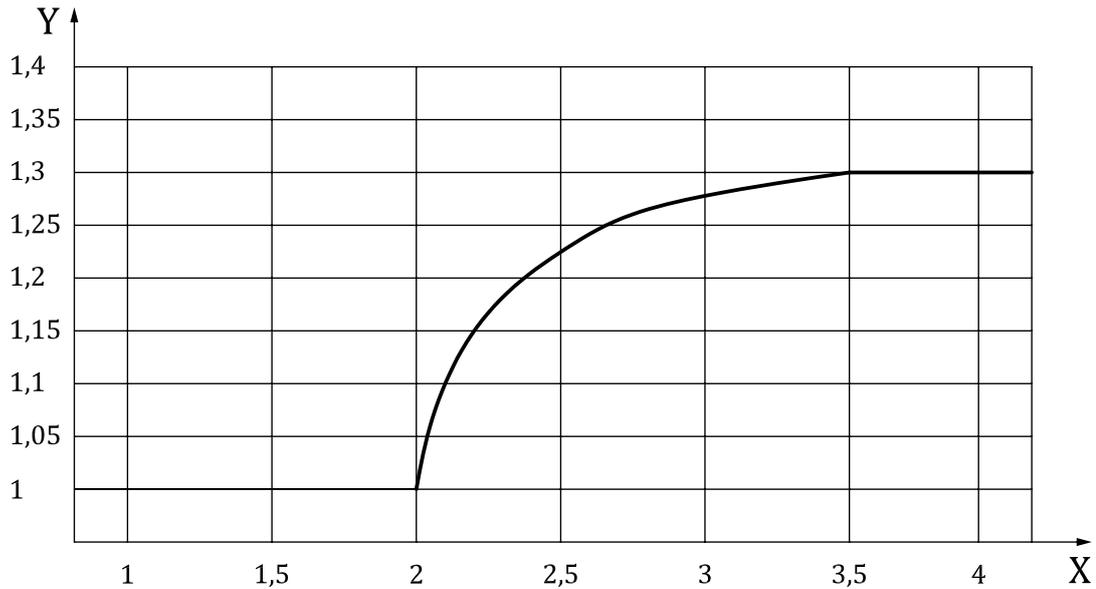
$$v_{\Sigma C} = 2 \cdot v \cdot \tan \alpha'_t \cdot \cos \alpha_t \quad (2)$$

$$\rho_{redC} = \frac{u}{(1+u)^2} \cdot a \cdot \frac{\sin \alpha'_t}{\cos \beta_b} \quad (3)$$

$$w_{Bt} = K_A \cdot K_v \cdot K_{B\beta} \cdot K_{B\alpha} \cdot \frac{F_t}{b} \quad (4)$$

Les définitions suivantes pour les paramètres K_{By} , X_R et X_L dans la [Formule \(1\)](#) s'appliquent.

K_{By} est le facteur de charge hélicoïdale. Le grippage tient compte de l'augmentation du frottement en fonction de l'augmentation du rapport total de conduite (voir la [Figure 1](#)).

**Légende**X rapport de conduite total, ε_γ Y facteur de charge hélicoïdale, $K_{B\gamma}$ **Figure 1 — Facteur de charge hélicoïdale, $K_{B\gamma}$**

$$K_{B\gamma} = 1$$

pour $\varepsilon_\gamma \leq 2$

$$K_{B\gamma} = 1 + 0,2 \cdot \sqrt{(\varepsilon_\gamma - 2) \cdot (5 - \varepsilon_\gamma)}$$

pour $2 < \varepsilon_\gamma < 3,5$

$$K_{B\gamma} = 1,3$$

pour $\varepsilon_\gamma \geq 3,5$

(5)

 X_R est le facteur de rugosité

où

$$X_R = 2,2 \cdot (Ra / \rho_{redC})^{0,25}$$

(6)

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

(7)

R_{a1} et R_{a2} sont les valeurs de rugosité des flancs de dent de pignon et de roue, mesurées sur le flanc à l'état neuf (par exemple, les valeurs Ra de l'engrenage d'essai de référence sont $\approx 0,35 \mu\text{m}$).

 X_L est le facteur lubrifiant

où

X_L est 1,0 pour les huiles minérales;

X_L est 0,8 pour les polyalphaoléfines;

X_L est 0,7 pour les polyglycols non solubles dans l'eau;

X_L est 0,6 pour les polyglycols solubles dans l'eau;