

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	1
AVANT PROPOS	3
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS	5
I Problèmes généraux posés par les engrenages	5
I.1 Définition	5
I.2 Fonctions principales d'un engrenage	5
I.3 Analyse des solutions techniques	7
I.4 Évaluation des pertes dissipées au contact et conséquences	8
I.5 Remarque sur la nature du contact et ses conséquences	8
II Recherche des surfaces axoïdes et classification des engrenages	9
II.1 Premier Problème	9
II.2 Deuxième problème	10
III Schématisation cinématique des engrenages	19
III.1 But et intérêt de la schématisation	19
III.2 Schématisation cinématique des engrenages	20
III.3 Exemples	21
IV Recherche des surfaces conjuguées	22
IV.1 Rappels de cinématique	22
IV.2 Enveloppe d'une surface	23
IV.3 Recherche de la ligne caractéristique de l'enveloppe de S1 dans le mouvement de S1/S2	24
IV.4 Surfaces conjuguées d'un engrenage	25
V Interférences	34
CHAPITRE II : ENGRENAGES CYLINDRIQUES À DENTURE DROITE EN DÉVELOPPANTE DE CERCLE	35
I Définition d'une Développante de Cercle	37
II Propriétés Géométriques des Développantes de Cercle	38
III Conjugaison des Profils en Développante de Cercle	38
III.1 Terminologie	40
III.2 Relations géométriques et cinématique	40
III.3 Influence d'une variation d'entraxe	41
IV Propriété Dynamique des Profils en Développante de Cercle	41
V Condition d'engrènement	44
VI Pas Primitif de Fonctionnement "p"	45
VII Module de Fonctionnement "m"	45
VIII Relation entre le Pas de base et le Pas primitif de fonctionnement	46
IX Génération des Profils en Développante de Cercle	46
IX.1 Outil élémentaire	46
IX.2 Génération d'une développante de cercle, comme enveloppe d'une droite	47

X Crémaillère Normalisée	52
XI Définition Géométrique d'un Pignon	54
XI.1 Épure de taillage	54
XI.2 Déport de denture, coefficient de déport	55
XI.3 Limites des dentures	56
XI.4 Définition normalisée de la géométrie nominale d'un pignon	56
XI.5 Définition de la géométrie réelle d'un pignon	57
XII Paramètres Influent sur la Forme de la Dent	59
XII.1 Influence du coefficient de déport	59
XII.2 Influence de l'angle de pression	59
XII.3 Influence du nombre de dents	59
XIII Cas d'une Denture Intérieure	63
XIII.1 Définition géométrique d'une couronne dentée	63
XIII.2 Limites des dentures	63
XIV Entraxe de Référence " a_0 "	65
XIV.1 Définition	65
XIV.2 Relations géométriques, caractéristiques de référence	65
XV Équation de la Développante de Cercle	65
XV.1 Fonction involute(α)	66
XV.2 Détermination de $\text{Arcinv}(\alpha)$ à partir d'une table numérique	67
XV.3 Calcul de $\text{Arcinv}(\alpha)$ – Méthode itérative	73
XV.4 Calcul de $\text{Arcinv}(\alpha)$ – Tableur Excel	73
XVI Épaisseur Curviligne " s_p "	74
XVII Équation traduisant le fonctionnement sans jeu	76
XVII.1 Problème posé	76
XVII.2 Cas d'un engrenage extérieur	76
XVII.3 Cas d'un engrenage intérieur	78
XVII.4 Terminologie	80
XVIII Méthode de calcul des caractéristiques géométriques théoriques d'un engrenage	80
XVIII.1 Bilan des équations et inconnues	80
XVIII.2 Méthode de résolution	82
XVIII.3 Intérêts d'une correction de denture avec variation d'entraxe	87
XIX Équation de fonctionnement avec jeu	87
XIX.1 Problème posé	88
XIX.2 Cas d'un engrenage extérieur	88
XIX.3 Cas d'un engrenage intérieur	89
XIX.4 Méthode de calcul des caractéristiques géométriques d'un engrenage fonctionnant avec jeu	90
XX Métrologie	94
XX.1 Cote sur "k" dents : " E_k "	96
XX.2 Cote sur piges	100
XX.3 Problèmes de métrologies classiques rencontrés en production	111
XX.4 Métrologie sur machine à mesurer tridimensionnelle	114
XXI Interférences	116
XXI.1 Définition :	116
XXI.2 Interférence de taille.	117
XXI.3 Interférence de fonctionnement	143

XXII Conduite	145
XXII.1 Première définition	145
XXII.2 Deuxième définition	145
XXII.3 Engrenage extérieur	147
XXII.4 Engrenage intérieur	150
XXIII Glissement spécifique	153
XXIII.1 Mise en évidence	153
XXIII.2 Application à un engrenage extérieur	154
XXIII.3 Équilibre des “gsMax”	158
XXIII.4 Équilibrage à l’usure	159

CHAPITRE III : ENGRENAGES CYLINDRIQUES À DENTURE

HÉLICOÏDALE EN DÉVELOPPANTE DE CERCLE **161**

I Définitions géométriques élémentaires	161
I.1 Première définition élémentaire	161
I.2 Deuxième définition élémentaire	161
I.3 Terminologie	161
II Angle d’hélice “ β ”	162
III Crémaillère de taille	163
IV Génération d’un pignon à denture hélicoïdale à profil en développante de cercle	164
IV.1 Définition géométrique du profil de denture comme enveloppe du plan générateur	164
IV.2 Cinématique des machines à tailler avec crémaillère	167
V Relations géométriques	168
V.1 Relation entre (β_b , β et α_t) et (β_{b0} , β_0 et α_{t0})	168
V.2 Relation entre (β , α_n et α_t) et (β , α_{n0} et α_{t0})	169
V.3 Relation entre les pas : p_{bn} , p_{bt} , p_t , p_n , p_{t0} et p_{n0}	169
VI Condition d’engrènement de deux pignons	171
VII Normalisation des pignons à denture hélicoïdale en développante de cercle	172
VII.1 Crémaillère	172
VII.2 Pignon	172
VIII Entraxe de référence “ a_0 ”	175
VIII.1 Définition	175
VIII.2 Relations géométriques, caractéristiques de référence	175
IX Caractéristiques de fonctionnement	175
IX.1 Primitifs de fonctionnement	175
IX.2 Pas primitif apparent de fonctionnement p_t	175
IX.3 Module apparent de fonctionnement m_t	176
IX.4 Module normal de fonctionnement m_n	176
IX.5 Angle d’hélice de fonctionnement	176
IX.6 Condition de conjugaison des profils	177
IX.7 Condition de fonctionnement sans jeu	177
IX.8 Méthode pratique de calcul	178
X Équation de fonctionnement avec jeu	182
X.1 Problème posé	182
X.2 Cas d’un engrenage extérieur	183
X.3 Cas d’un engrenage intérieur	185

X.4 Méthode de calcul des caractéristiques géométriques d'un engrenage fonctionnant avec jeu	186
XI Conduite, recouvrement	189
XI.1 Définitions	189
XI.2 Conduite de profil $C\alpha$	190
XI.3 Conduite de recouvrement Cb	194
XII Glissement spécifique	195
XII.1 Expression de "gsi"	195
XIII Métrologie	198
XIII.1 Cote sur k dents	198
XIII.2 Cote sur billes	203
XIII.3 Problèmes de métrologies classiques rencontrés en production	213
XIII.4 Métrologie sur machine à mesurer tridimensionnelle	216
XIV Analyse des efforts	218
XIV.1 Action mécanique sur un pignon	218
XIV.2 Équilibrage des efforts axiaux	226
XIV.3 Avantages des engrenages cylindriques à denture hélicoïdale	229
CHAPITRE IV : FABRICATION DES ENGRENAGES, PROCÉDÉS D'OBTENTION DES ENGRENAGES CYLINDRIQUES	233
I Plan fonctionnel d'un pignon	234
I.1 Cote dimensionnelle	234
I.2 Tolérances géométriques	234
I.3 Plan fonctionnel d'un pignon	235
I.4 Extrait de la norme I.S.O. 1328-1:2013	236
II Génération par outil crémaillère	238
II.1 Données techniques	238
II.2 Machines MAAG	239
II.3 Schéma cinématique d'une machine MAAG	240
II.4 Réglage d'une machine MAAG	240
II.5 Les outils crémaillères	243
II.6 Modes opératoires	248
III Génération à Partir d'un Outil Pignon	250
III.1 Données techniques	250
III.2 Principe	251
III.3 Géométrie d'un outil pignon	251
III.4 Exemples d'outils pignons	253
III.5 Mouvements nécessaires au taillage	253
III.6 Analyse d'une machine conventionnelle.	258
III.7 Analyse d'une machine outil à commande numérique	261
III.8 Réglage de la profondeur de passe	263
III.9 Usinage des couronnes de grandes dimensions	265
IV Génération à Partir d'une Fraise Mère	267
IV.1 Données techniques	267
IV.2 Génération	268
IV.3 Outil fraise mère	273
IV.4 Génération d'un pignon cylindrique	277
IV.5 Architecture d'une machine conventionnelle à axes horizontaux.	281

IV.6 Analyse d'une machine à commande numérique.	283
IV.7 Calcul de la profondeur de passe	285
V Le Power Skiving	286
VI Le frittage	287
VI.1 Données techniques	287
VI.2 Exemples de réalisations	287
VII Le roulage	288
VI.1 Le roulage tangentiel par crémaillère :	288
VI.2 Le roulage par galetage axial :	290
VIII Les traitements thermiques	292
VIII.1 Données techniques:	292
IX Le forgeage	294
IX.1 Données techniques:	294
IX.2 Exemples de réalisations:	294
X Le chanfreinage - ébavurage	296
XI Le rasage	298
XI.1 Principe	298
XI.2 Outil de rasage	298
XI.3 Données techniques	299
XI.4 Machine de rasage à commande numérique	299
XII Le Honing	300
XII.1 Principe	300
XII.2 Outil de honage	300
XIII Rectification par meule-mère	302
XIII.1 Principe de la rectification par meule-mère	302
XIII.2 Données techniques	302
XIII.3 Exemple de machine	303
XIV Rectification de forme et de génération par meule pleine	304
XIV.1 Rectification de forme	304
XIV.2 Rectification de génération avec meule pleine	305
XIV.3 Rectification combinée avec meule pleine	306
XV La rectification par génération MAAG	307
XV.1 Données techniques	307
XV.2 Principe de la rectification par génération MAAG	307
XV.3 Exemple de machines MAAG	310
BIBLIOGRAPHIE	312