

# ENGRENAGES



Georges Henriot

# ENGRENAGES

Conception • Fabrication  
• Mise en œuvre

Préface de  
**Jacques Boisset**  
Président de l'Union nationale  
des industries de transmissions mécaniques

**8<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

Les premières éditions de cet ouvrage sont parues sous le titre *Traité théorique et pratique des engrenages, tomes 1 et 2*

6<sup>e</sup> édition © Bordas, Paris, 1979 pour le tome 1

5<sup>e</sup> édition © Bordas, Paris, 1983 pour le tome 2

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 1999, 2007, 2013 et 2020 pour la nouvelle présentation  
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-082196-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Préface

---

Préfacer la huitième édition de ce traité technique à l'origine en deux tomes est un redoutable honneur.

D'abord parce que le livre en question doit être un ouvrage indispensable pour justifier un intérêt si constant, ensuite parce que l'auteur et ses préfaciers sont des personnages très importants. Quant à l'objet de l'ouvrage, en tant qu'engrenagiste et fabricant de réducteurs et multiplicateurs, je suis obligé de confesser que c'est un sujet passionnant et fondamental.

L'auteur, Monsieur Georges Henriot, est un des pères fondateurs mondiaux de la théorie de l'engrenage. Il a été reconnu sur tous les continents, comme un de ceux qui ont permis la vulgarisation claire et simple de la technologie et sa mise à la portée du plus grand nombre. À ce titre, il a même reçu le prix spécial de la fondation allemande Sew Blickle décerné aux personnes ayant le plus contribué au développement de l'industrie de l'engrenage. Il est très significatif aussi que le Recteur Capelle, lui qui fut à l'origine des Instituts d'enseignement supérieur, ait été son premier préfacier. La contribution de Monsieur Henriot est immense en tant que somme la plus complète et la plus accessible du savoir nécessaire pour calculer, fabriquer, construire des engrenages ou des ensembles à la base d'engrenages.

Bien sûr, son passage chez Maag lui a donné l'accès aux clés du temple, mais c'est son expérience, pratique d'ingénieur des Arts et Métiers, à la SEIE et d'industriel chez Citroën, Messian, Durand, qui a donné à son ouvrage cet aspect simple, direct et pratique qui en fait son succès. Tous les bureaux d'études de mécanique disposent de ce traité. Il existe même encore de très grandes sociétés comme EDF qui font toujours systématiquement référence à la méthode Henriot. C'est dire si ses calculs sont fiables.

Au moment où les filières scientifiques n'attirent curieusement plus autant de jeunes, nous nous apercevons tous les jours que l'existence de ces traités complets dans une technique évolutive est un outil précieux indispensable pour les ingénieurs et techniciens de l'engrenage.

Et nous sommes bien là au cœur de la mécanique ; l'engrenage n'est-il pas le symbole le plus fréquent des entreprises ou associations opérant dans la mécanique ?

Dans ce métier du calcul et de la conception des engrenages où personne n'aboutit exactement à la même solution, où la détermination du module, du nombre de dents, du déport de denture, de l'hélice, de la largeur de la denture, des traitements thermiques, confine à l'art, le recours à un ouvrage tel que celui-ci permettra aux jeunes de mieux comprendre les paroles de Monsieur

Naegli, grand spécialiste des calculs chez Maag : « de même que vous ne confiez pas vos dents à n'importe quel dentiste, ne confiez pas vos dentures à qui que ce soit autre qu'un véritable engrenagiste ».

Ainsi, les mécaniciens pourront se référer à votre bible. Les linguistes ont le Larousse, nous autres mécaniciens nous avons le Henriot.

Et que vive l'involute !

Jacques Boisset  
Président de l'Unitram  
Union nationale des industries  
de transmissions mécaniques

# Table des matières

---

Avant-propos

XXI

## A

---

### Conception des engrenages

<b>1 • Rappel des notions fondamentales</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Théorie élémentaire sur les vecteurs</b>	<b>3</b>
1.1.1 Composition des forces, 3	
1.1.2 Rappel sur les moments, 5	
1.1.3 Systèmes de forces équivalents, 7	
<b>1.2 Vitesses et composition des vitesses</b>	<b>7</b>
1.2.1 Mouvements fondamentaux, 8	
1.2.2 Composition des mouvements : mouvement relatif, mouvement d'entraînement, mouvement absolu, 11	
<b>1.3 Mouvement d'un plan sur un plan fixe</b>	<b>15</b>
1.3.1 Centre instantané de rotation, 15	
1.3.2 Base et roulante du mouvement, 16	
1.3.3 Exemple d'application des propriétés du centre instantané de rotation, 18	
1.3.4 Formule et construction d'Euler-Savary, 19	
<b>2 • Surfaces primitives et surfaces de denture</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Surfaces primitives</b>	<b>24</b>
2.1.1 Engrenages parallèles, 24	
2.1.2 Engrenages concourants, 27	
2.1.3 Engrenages gauches, 31	
<b>2.2 Surfaces de denture</b>	<b>31</b>
2.2.1 Engrenages parallèles, 32	
2.2.2 Engrenage concourants, 89	

<b>3 • Étude de l'engrènement des engrenages parallèles</b>	<b>116</b>
<b>3.1 Continuité d'engrènement</b>	<b>116</b>
3.1.1 Engrenages parallèles extérieurs, à denture droite,	116
3.1.2 Denture intérieure droite,	125
3.1.3 Denture hélicoïdale. Rapport de recouvrement. Rapport total de conduite,	127
<b>3.2 Interférences</b>	<b>134</b>
3.2.1 Engrenages parallèles extérieurs,	134
3.2.2 Engrenages parallèles intérieurs,	146
<b>3.3 Glissement</b>	<b>155</b>
3.3.1 Généralités,	155
3.3.2 Glissement relatif total de deux profils conjugués depuis le début jusqu'à la fin de l'action,	159
3.3.3 Glissement spécifique,	161
<b>4 • Corrections de denture</b>	<b>169</b>
<b>4.1 Mécanisme géométrique des corrections de denture</b>	<b>169</b>
4.1.1 Définitions,	169
4.1.2 Dentures déportées sans variation d'entraxe,	172
4.1.3 Dentures déportées avec variation d'entraxe,	177
<b>4.2 Utilisation des dentures déportées         pour éviter les interférences</b>	<b>194</b>
4.2.1 Engrenage parallèle, extérieur, à denture droite,	194
4.2.2 Engrenages à denture hélicoïdale,	197
<b>4.3 Équilibrage du glissement spécifique maximum         sur le pignon et la roue aux points extrêmes de contact</b>	<b>197</b>
4.3.1 Généralités,	197
4.3.2 Détermination des dépports,	199
<b>4.4 Propositions ISO</b>	<b>201</b>
4.4.1 Diagramme,	201
4.4.2 Choix des dépports $x_1$ et $x_2$ ,	201
<b>4.5 Influence des dépports sur la géométrie des dentures</b>	<b>203</b>
<b>4.6 Engrenages multiplicateurs</b>	<b>204</b>
<b>4.7 Dentures hélicoïdales</b>	<b>205</b>
<b>4.8 Dentures intérieures</b>	<b>206</b>
<b>5 • Engrenages gauches : étude générale</b>	<b>214</b>
<b>5.1 Engrenages gauches hélicoïdaux</b>	<b>214</b>
5.1.1 Généralités,	214
5.1.2 Glissement relatif des dentures conjuguées,	220



5.1.3	Corrections de denture,	222
5.1.4	Calcul des éléments d'un engrenage gauche hélicoïdal,	222
<b>5.2</b>	<b>Engrenages à vis sans fin</b>	<b>226</b>
5.2.1	« Surfaces primitives »,	226
5.2.2	Formes de filets de vis,	228
5.2.3	Relations géométriques entre les éléments des dentures,	232
5.2.4	Vis à filet trapézoïdal ZA,	233
5.2.5	Vis en hélicoïde développable ZI,	243
5.2.6	Comparaison des différents types de filets de vis,	247
5.2.7	Étude technologique de l'engrenage à vis sans fin (proportions normales),	249
5.2.8	Zone de portée sur la roue et la vis,	254
5.2.9	Influence des déports. Fonctionnement en « retraite »,	256
5.2.10	Engrenage à vis sans fin à pas différentiels (vis duplex),	263
5.2.11	Engrenages à vis globique,	266
<b>5.3</b>	<b>Engrenage « hypoïd » (appellation Gleason)</b>	<b>271</b>
<b>5.4</b>	<b>Engrenage de champ ou Face-Gear</b>	<b>273</b>
<b>5.5</b>	<b>Engrenage spiroïd et helicon</b>	<b>278</b>
<b>6 •</b>	<b>Étude dynamique</b>	<b>281</b>
6.1	Unités adoptées	281
6.2	Efforts sur les dentures, les arbres et les paliers	281
6.2.1	Engrenages parallèles à denture droite,	281
6.2.2	Engrenages parallèles à denture hélicoïdale,	285
6.2.3	Engrenages concourants à denture droite,	287
6.2.4	Engrenages concourants à denture hélicoïdale ou spirale,	290
6.2.5	Engrenages à vis sans fin,	293
<b>7 •</b>	<b>Calcul des dentures des engrenages parallèles</b>	<b>299</b>
	<b>INTRODUCTION : CONTRAINTES DE BASE</b>	<b>299</b>
<b>7.1</b>	<b>Pression superficielle</b>	<b>299</b>
7.1.1	Denture droite extérieure,	299
7.1.2	Denture droite intérieure,	303
7.1.3	Denture extérieure hélicoïdale,	305
7.1.4	Formule de base (méthode B),	308
<b>7.2</b>	<b>Résistance à la rupture</b>	<b>314</b>
7.2.1	Facteur de forme : méthode ISO,	316
7.2.2	Facteur de conduite : $Y_{gr}$ ,	325
7.2.3	Facteur d'inclinaison : $Y_{\beta r}$ ,	327

7.2.4	Facteur de concentration de contrainte : $Y_{Sa}$	327
7.2.5	Formule de base ISO	328
<b>FACTEURS GÉNÉRAUX D'INFLUENCE</b>		<b>330</b>
7.3	Méthode A	330
7.4	Méthodes B, C (D, E)	330
7.5	Force tangentielle, couple, puissance	331
7.6	Facteur d'application : $K_A$	331
7.6.1	Méthode B	331
7.6.2	Méthode C	331
7.7	Facteur dynamique : $K_V$	333
7.7.1	Détermination du facteur $K_{V.Br}$	333
7.7.2	Détermination du facteur $K_{V.Cr}$	341
7.8	Facteurs de distribution de charge longitudinale : $K_{H\beta} - K_{F\beta}$	344
7.8	Facteurs de distribution de charge longitudinale	344
7.8.1	Détermination du facteur : $K_{H\beta.Br}$	344
7.8.2	Détermination du facteur : $K_{H\beta.Cr}$	344
7.8.3	Détermination du facteur $K_{H\beta.D}$ par méthode D	349
7.9	Facteurs de distribution de charge transversale : $K_{H\alpha} \cdot K_{F\alpha}$	352
7.9.1	Méthode B	352
7.9.2	Méthode simplifiée C	354
7.10	Rigidités des dents	354
7.10.1	Méthode B	354
7.10.2	Méthode C	356
<b>RÉSISTANCE À LA PRESSION SUPERFICIELLE</b>		<b>356</b>
7.11	Rappel des formules de base (méthode B)	356
7.12	Limite d'endurance pour la pression de Hertz du matériau : $\sigma_{H.lim}$	357
7.13	Facteur de durée : $Z_{NT}$	359
7.14	Facteurs d'influence sur la formation du film d'huile	362
7.14.1	Méthode B	363
7.14.2	Méthode C	366
7.15	Facteur de rapport de duretés : $Z_W$	366
7.16	Facteur de dimension : $Z_X$	367
7.17	Courbe de Wohler à la pression superficielle	367

<b>RÉSISTANCE À LA RUPTURE</b>	<b>368</b>
<b>7.18 Rappel des formules de base (méthode B)</b>	<b>368</b>
<b>7.19 Limite d'endurance du matériau : <math>\sigma_{FE}</math></b>	<b>368</b>
<b>7.20 Facteur de durée : <math>Y_{NT}</math></b>	<b>370</b>
<b>7.21 Facteur de sensibilité à l'entaille : <math>Y_{\delta \cdot rel \cdot T}</math></b>	<b>372</b>
<b>7.22 Facteur de rugosité : <math>Y_{R \cdot rel \cdot T}</math></b>	<b>373</b>
<b>7.23 Facteur de dimension : <math>Y_x</math> (méthode B)</b>	<b>374</b>
<b>7.24 Courbe de Wohler à la rupture</b>	<b>375</b>
<b>MÉTHODE D'APPLICATION POUR ENGRENAGES DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE</b>	<b>375</b>
<b>7.25 Méthode détaillée (<i>detailed method</i>)</b>	<b>376</b>
7.25.1 Limites d'application, 376	
7.25.2 Facteurs d'influence, 377	
7.25.3 Résistance superficielle, 378	
7.25.4 Résistance à la rupture, 378	
7.25.5 Conclusion, 379	
<b>7.26 Méthode simplifiée (<i>simplified method</i>)</b>	<b>379</b>
7.26.1 Limites d'application, 379	
7.26.2 Charge nominale, 379	
7.26.3 Résistance à la pression superficielle, 379	
7.26.4 Résistance à la rupture, 385	
<b>7.27 Applications : calcul de vérification de la capacité de charge d'un engrenage</b>	<b>389</b>
7.27.1 Méthode « détaillée », 389	
7.27.2 Méthode « simplifiée », 391	
<b>7.28 Utilisation de la méthode simplifiée au stade du projet</b>	<b>392</b>
7.28.1 Facteur de service, 392	
7.28.2 Résistance superficielle, 392	
7.28.3 Résistance à la rupture, 394	
<b>7.29 Cas d'un diagramme de charge variable</b>	<b>394</b>
7.29.1 Courbe de Wohler à la pression superficielle, 394	
7.29.2 Courbe de Wohler à la résistance à la rupture, 395	
7.29.3 Diagramme de charge variable, 396	
7.29.4 Pression superficielle – Facteur d'application, 396	
7.29.5 Résistance à la rupture, 398	
7.29.6 Exemple d'application, 399	

<b>8 • Calcul des dentures des engrenages concourants</b>	<b>402</b>
<b>8.1 Formules générales</b>	<b>402</b>
<b>8.2 Facteurs d'influence</b>	<b>403</b>
8.2.1 Facteur d'application $K_{Ar}$	403
8.2.2 Facteur dynamique $K_{Vr}$	404
8.2.3 Facteurs de répartition longitudinale $K_{H\beta C}$ et $K_{F\beta C}$	405
8.2.4 Facteurs de répartition transversale $K_{H\alpha}$ et $K_{F\alpha}$	407
<b>8.3 Résistance superficielle</b>	<b>408</b>
8.3.1 Pression de contact nominale $\sigma_{HOR}$	408
8.3.2 Pression de contact de fonctionnement	410
8.3.3 Pression de contact admissible $\sigma_{HPr}$	410
<b>8.4 Résistance à la rupture</b>	<b>411</b>
8.4.1 Contrainte de rupture nominale $\sigma_{FOR}$	411
8.4.2 Contrainte de rupture de fonctionnement	414
8.4.3 Contrainte de rupture admissible	415
<b>8.5 Méthode industrielle simplifiée</b>	<b>415</b>
8.5.1 Pression superficielle	415
8.5.2 Utilisation de la norme AGMA 2005 C96	418
<b>9 • Modifications de la forme des dentures des engrenages parallèles</b>	<b>421</b>
<b>9.1 Modifications dans le sens du profil</b>	<b>421</b>
9.1.1 Compensation de la flexion des dents	421
9.1.2 Utilisation d'une denture High Contact Ratio (grand rapport de conduite)	424
9.1.3 Compensation des écarts thermiques	431
<b>9.2 Modifications dans le sens longitudinal</b>	<b>432</b>
9.2.1 Compensation de la déformation du corps du pignon	432
9.2.2 Influence du faux parallélisme	434
9.2.3 Cas de l'utilisation de paliers lisses avec un engrenage à denture hélicoïdale	434
9.2.4 Exécution d'un bombé longitudinal sans distorsion ou faux parallélisme	435
9.2.5 Exécution d'un bombé longitudinal avec distorsion	442
9.2.6 Compensation de déformation thermique	443
<b>9.3 Modification éventuelle des dentures HCR</b>	<b>445</b>
<b>10 • calcul de résistance des engrenages à vis sans fin</b>	<b>447</b>
<b>10.1 Proposition DIN 3996</b>	<b>447</b>
10.1.1 Résistance superficielle au pitting	447
10.1.2 Résistance à la rupture des dents de la roue	449

<b>10.2 Norme BS 721</b>	<b>452</b>
10.2.1 Résistance au pitting (de la roue),	452
10.2.2 Résistance à la rupture,	455
<b>11 • Rendement dans les différents types d'engrenages. Capacité thermique</b>	<b>458</b>
<b>11.1 Généralités</b>	<b>458</b>
<b>11.2 Engrenages parallèles</b>	<b>459</b>
11.2.1 Perte dans les dentures dépendant de la charge : $P_{Mr}$ ,	459
11.2.2 Perte dans les paliers dépendant de la charge : $P_{Br}$ ,	462
11.2.3 Perte dans les joints ne dépendant pas de la charge : $P_{Sr}$ ,	463
11.2.4 Perte par brassage et ventilation dans les engrenages : $P_{WGr}$ ,	463
11.2.5 Perte par brassage dans les paliers : $P_{WGr}$ ,	463
11.2.6 Dissipation thermique,	464
11.2.7 Facteurs de correction de la capacité thermique,	464
11.2.8 Lubrification par injection,	464
<b>11.3 Engrenages à vis sans fin</b>	<b>466</b>
11.3.1 Perte dans les dentures dépendant de la charge,	467
11.3.2 Perte de puissance dans les paliers dépendant de la charge,	469
<b>12 • Détériorations des engrenages. Formation du film d'huile. Choix du lubrifiant</b>	<b>470</b>
<b>12.1 Détériorations des engrenages</b>	<b>470</b>
12.1.1 Détériorations par rupture,	470
12.1.2 Détériorations superficielles,	473
<b>12.2 Formation du film d'huile</b>	<b>480</b>
12.2.1 Unités de viscosité,	480
12.2.2 Formation du film d'huile. Épaisseur minimale du film d'huile,	481
12.2.3 Influence du lubrifiant sur les détériorations superficielles,	486
12.2.4 Détermination de la viscosité du lubrifiant,	489
12.2.5 Essai d'huile : appareil FZG,	493
12.2.6 Cas extrêmes de problèmes de lubrification,	495
<b>13 • Trains planétaires</b>	<b>500</b>
<b>13.1 Trains planétaires simples</b>	<b>500</b>
13.1.1 Trains plans à roues cylindriques,	500
13.1.2 Trains planétaires à roues coniques,	534
<b>13.2 Trains planétaires spéciaux pour grands rapports</b>	<b>537</b>
13.2.1 Train imbriqué,	537
13.2.2 Variante du train III,	544
13.2.3 Train avec satellite simple récepteur,	546

<b>13.3 Trains composés</b>	<b>548</b>
<b>13.4 Calculs de résistance</b>	<b>557</b>
13.4.1 Résistance superficielle, 557	
13.4.2 Résistance à la rupture, 558	
13.4.3 Égalisation de la résistance superficielle et de la résistance à la rupture, 559	
13.4.4 Influence du nombre de cycles, 560	
<b>14 • Matériaux. Traitements thermiques</b>	<b>563</b>
<b>14.1 Introduction</b>	<b>563</b>
<b>14.2 Aciers</b>	<b>566</b>
14.2.1 Traitements thermiques complets, 566	
14.2.2 Traitements thermiques superficiels, 567	
14.2.3 Trempe superficielle par induction, 575	
14.2.4 Domaines d'application des procédés de traitements thermiques superficiels, 576	
<b>14.3 Fontes</b>	<b>576</b>
14.3.1 Fontes grises, 576	
14.3.2 Fontes ductiles, 579	
<b>14.4 Bronzes</b>	<b>581</b>
14.4.1 Bronzes à l'étain et phosphore, 581	
14.4.2 Bronzes au manganèse, 581	
14.4.3 Bronzes à l'aluminium, 581	
14.4.4 Bronzes au silicium, 582	

## **B**

---

### Fabrication et contrôle des engrenages

<b>15 • Taillage des roues cylindriques</b>	<b>585</b>
<b>15.1 Taillage par fraise de forme</b>	<b>585</b>
<b>15.2 Taillage par génération</b>	<b>586</b>
15.2.1 Taillage par outil-crémaillère, 587	
15.2.2 Taillage par fraise mère, 593	
15.2.3 Taillage par outil-pignon, 607	

<b>16 • Taillage des roues coniques</b>	<b>614</b>
<b>16.1 Introduction</b>	<b>614</b>
<b>16.2 Denture droite</b>	<b>615</b>
<b>16.3 Denture hélicoïdale</b>	<b>618</b>
<b>16.4 Dentures spirales</b>	<b>618</b>
16.4.1 Denture spirale Gleason, 619	
16.4.2 Denture spirale Oerlikon-Klingelberg, 625	
<b>17 • Taillage des engrenages à vis sans fin</b>	<b>629</b>
<b>17.1 Vis sans fin</b>	<b>629</b>
17.1.1 Taillage de la vis sans fin, 629	
17.1.2 Rectification du filet de vis, 630	
<b>17.2 Roues à vis sans fin</b>	<b>631</b>
17.2.1 Taillage par avance radiale, 631	
17.2.2 Taillage par avance tangentielle, 631	
17.2.3 Répercussion de l'usure de la fraise mère, 632	
17.2.4 Taillage par outils-mouches, 632	
17.2.5 Utilisation d'une fraise de diamètre augmenté, 634	
<b>18 • Rectification des roues cylindriques</b>	<b>635</b>
<b>18.1 Introduction</b>	<b>635</b>
<b>18.2 Rectification par génération</b>	<b>635</b>
18.2.1 Procédé Maag, 635	
18.2.2 Procédé Hofler, 639	
18.2.3 Procédé Reishauer, 641	
<b>18.3 Rectification par meule de forme</b>	<b>642</b>
18.3.1 Cas de la denture hélicoïdale, 646	
<b>19 • Rasage (shaving) et super finition (honing) des roues cylindriques</b>	<b>647</b>
<b>19.1 Rasage (shaving)</b>	<b>647</b>
19.1.1 Méthode longitudinale, 648	
19.1.2 Méthode « oblique », 649	
19.1.3 Méthode « transversale », 649	
19.1.4 Méthode « en plongée », 650	
<b>19.2 Honing</b>	<b>652</b>

<b>20 • Tolérances des dentures. Contrôle</b>	<b>656</b>
<b>20.1 ISO 1328 Partie 1</b>	<b>657</b>
20.1.1 Division, 657	
20.1.2 Profil, 658	
20.1.3 Erreurs d'hélice, 661	
<b>20.2 ISO 1328 Partie 2</b>	<b>663</b>
20.2.1 Faux rond de denture : Fr, 663	
20.2.2 Erreur composée radiale d'une roue, 663	
20.2.3 Erreur composée tangentielle d'une roue, 664	
<b>20.3 Bases d'établissement du système de tolérances</b>	<b>664</b>
20.3.1 Tolérances des écarts d'erreurs de denture d'une roue, 665	
20.3.2 Épaisseur des dents, 666	
20.3.3 Contrôle du corps de roue, 668	
20.3.4 Contrôle de l'engrenage monté, 668	
20.3.5 Jeu entre dents, 669	
20.3.6 Groupes de fonction de tolérances, 669	
<b>20.4 Contrôles relatifs aux flancs homologues</b>	<b>671</b>
20.4.1 Division, 671	
20.4.2 Profil, 674	
20.4.3 Contrôle de l'hélice, 681	
20.4.4 Contrôle de l'épaisseur des dents, 681	
20.4.5 Contrôle de l'erreur composée, 690	
20.4.6 Appareils combinés 3D, 692	
20.4.7 Contrôle de l'état de surface, 693	
20.4.8 Valeurs indicatives de $R_a$ , 699	

## C

### Ensembles à engrenages

<b>21 • Ensembles simples de mécanique générale</b>	<b>703</b>
<b>21.1 Classification. Dispositions générales</b>	<b>703</b>
<b>21.2 Gamme d'entraxes</b>	<b>709</b>
<b>21.3 Capacité de charge mécanique</b>	<b>709</b>
<b>21.4 Rapports normalisés</b>	<b>712</b>
<b>21.5 Proportions des roues</b>	<b>712</b>
<b>21.6 Réducteurs à deux trains</b>	<b>712</b>



<b>21.7 Réducteurs à trois trains</b>	<b>714</b>
<b>21.8 Capacité thermique : <math>P_{th}</math></b>	<b>715</b>
<b>21.9 Calcul des arbres</b>	<b>717</b>
<b>21.10 Lubrification</b>	<b>718</b>
21.10.1 Modes de lubrification par barbotage, 718	
21.10.2 Lubrification par injection, 719	
21.10.3 Types de lubrifiants, 720	
<b>21.11 Frettage</b>	<b>721</b>
21.11.1 Formules de base, 721	
21.11.2 Pression de contact entre les deux éléments, 722	
21.11.3 Effort total de contact entre les deux éléments, 722	
21.11.4 Sécurité au glissement $K$ , 722	
21.11.5 Coefficient de frottement $f$ , 722	
21.11.6 Cas d'un centre de roue de forme plus compliquée, 723	
21.11.7 Contraintes de frettage, 723	
<b>22 • Exemples de transmissions dans l'industrie du ciment</b>	<b>730</b>
<b>22.1 Commande latérale de broyeur et de four à ciment horizontaux</b>	<b>730</b>
<b>22.2 Commande centrale des broyeurs horizontaux</b>	<b>733</b>
22.2.1 Réducteurs à trains d'engrenages parallèles, 734	
22.2.2 Réducteurs à trains planétaires, 736	
<b>22.3 Broyeurs verticaux</b>	<b>737</b>
<b>23 • Transmissions pour industrie sidérurgique</b>	<b>740</b>
<b>24 • Facteurs de service pour ensembles de mécanique générale</b>	<b>744</b>
<b>25 • Ensembles à grande vitesse</b>	<b>746</b>
<b>25.1 Introduction</b>	<b>746</b>
<b>25.2 Dispositions générales</b>	<b>746</b>
25.2.1 Denture en chevron, 746	
25.2.2 Denture hélicoïdale simple, 746	
25.2.3 Denture hélicoïdale simple avec collets de butée, 746	
25.2.4 Denture hélicoïdale simple avec arbre de liaison torsible du côté roue, 746	
25.2.5 Denture hélicoïdale simple avec arbres de liaison torsibles du côté roue et du côté pignon, 748	
<b>25.3 Proportions de denture</b>	<b>748</b>
<b>25.4 Calculs de résistance</b>	<b>749</b>
<b>25.5 Série de « très grande largeur » pour réducteurs à très grande vitesse et faibles rapports</b>	<b>753</b>

25.6	Facteurs de service	755
25.7	Lubrification	756
<b>26 •</b>	<b>Transmissions de marine</b>	<b>757</b>
26.1	Transmissions par turbine	757
26.2	Transmissions par moteurs diesel	760
26.3	Transmissions couplées moteurs diesel-turbines à gaz	763
<b>27 •</b>	<b>Ensembles à engrenages à vis sans fin</b>	<b>765</b>
27.1	Dispositions générales	765
27.2	Normalisation	768
27.3	Capacité de charge mécanique	769
27.4	Capacité thermique	769
<b>28 •</b>	<b>Essais des ensembles à engrenages. Codes de réception</b>	<b>771</b>
28.1	Essais des ensembles à engrenages	771
28.1.1	Méthode d'essais avec freins, 771	
28.1.2	Méthode d'essais avec disposition à « cycle fermé » (back to back), 772	
28.1.3	Essai pour ensembles à grande vitesse et grande puissance, 774	
28.2	Réception des ensembles à engrenages aux vibrations	775
28.2.1	Généralités, 775	
28.2.2	Recommandations ISO et AGMA, 777	
28.2.3	Vibrations en régime de résonance, 777	
28.2.4	Différentes causes de vibrations, 784	
28.3	Réception des ensembles à engrenage au bruit	784
28.3.1	Différentes causes de bruit provenant d'un engrenage, 784	
28.3.2	Rappels d'acoustique, 786	
28.3.3	Processus de mesure. Correction pour bruits ambiants, 789	
28.3.4	Surfaces de mesure, 790	
28.3.5	Intérêt du spectre de fréquences, 792	
28.3.6	Recommandations pratiques sur les niveaux sonores, 792	
<b>29 •</b>	<b>Accouplements. Alignement des axes</b>	<b>796</b>
29.1	Accouplements rigides (n'acceptant pas de désalignement)	796
29.2	Désalignement	799
29.2.1	Accouplements à denture, 799	
29.2.2	Accouplements à ressorts métalliques, 805	
29.2.3	Accouplements avec éléments métalliques flexibles, 806	
29.2.4	Accouplements avec éléments en élastomère, 810	

<b>29.3 Alignement des arbres accouplés en service</b>	<b>812</b>
29.3.1 Détails pratiques d'installation, 813	
29.3.2 Détails pratiques du montage, 815	
29.3.3 Méthode d'alignement du pignon sur la couronne d'entraînement latéral d'un broyeur à ciment, 816	
<b>30 • Contrôle de la portée des dentures</b>	<b>819</b>
<b>30.1 Engrenages parallèles</b>	<b>819</b>
<b>30.2 Engrenages concourants</b>	<b>820</b>
<b>30.3 Engrenages à vis sans fin</b>	<b>823</b>
<b>31 • Paliers : conception, détériorations, maintenance</b>	<b>825</b>
<b>31.1 Paliers à roulements</b>	<b>825</b>
31.1.1 Influence des conditions de fonctionnement sur la durée de vie, 829	
31.1.2 Systèmes de lubrification, 830	
31.1.3 Maintenance et entretien des roulements, 831	
<b>31.2 Paliers lisses</b>	<b>835</b>
31.2.1 Introduction, 835	
31.2.2 Calculs propres aux paliers lisses, 837	
<b>32 • Problèmes liés à la lubrification et à l'évacuation des calories</b>	<b>843</b>
<b>32.1 Maintenance liée à la surveillance         des détériorations des dentures</b>	<b>843</b>
32.1.1 Huiles, 843	
32.1.2 Surveillance des dentures, 848	
<b>32.2 Problèmes liés à l'évacuation des calories</b>	<b>851</b>
32.2.1 Introduction, 851	
32.2.2 Exemple, 852	
32.2.3 Puissance dissipée : $P_o$ , 858	
32.2.4 Capacité thermique, 858	
32.2.5 Rendement, 858	
32.2.6 Évacuation des calories par le carter, 859	
<b>33 • Maintenance pour bruit et vibrations</b>	<b>866</b>
<b>33.1 Document ISO/WD 8579-1 (bruit)</b>	<b>866</b>
33.1.1 Introduction, 866	
33.1.2 Méthodes de détermination, 866	
33.1.3 Maintenance, 870	
<b>33.2 Document ISO/WD 8579-2 (vibrations)</b>	<b>870</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>871</b>
<b>Index</b>	<b>873</b>



# Avant-propos

---

Comme pour la septième édition, nous avons procédé à une modification fondamentale, consistant à ne présenter qu'un seul volume au lieu de deux. L'ouvrage actuel est donc naturellement très important. Il est divisé en trois parties, couvrant tout le domaine de l'engrenage :

- première partie : conception des engrenages ;
- deuxième partie : fabrication et contrôle ;
- troisième partie : exemples de réalisation d'ensembles à engrenages, réception et maintenance.

La première partie reprend la plupart des éléments des éditions précédentes, relatifs à la conception de base que nous appellerons théorique : nous avons conservé le caractère pédagogique permettant la compréhension fondamentale des différents types d'engrenages. Nous retrouvons évidemment les méthodes de calcul de résistance : elles sont basées sur les dernières recommandations ISO que nous avons mises à jour par rapport à la 7<sup>e</sup> édition, ce qui est très important. Nous avons insisté sur les méthodes industrielles simplifiées et suffisamment précises dont nous sommes l'auteur, à la suite d'une expérience de plus de cinquante ans dans les principales firmes d'engrenages, dans des domaines très variés et de haute performance, et d'un contact constant et très fructueux avec les spécialistes français et étrangers à l'ISO et l'AGMA.

Nous avons également insisté sur une évolution actuelle des dentures, par exemple les dentures dites HCR (High Contact Ratio), qui ont de plus en plus la faveur dans la lutte contre le bruit et les vibrations.

Le chapitre consacré aux trains planétaires est également très développé, étant donné l'importance accrue de ces ensembles dans les transmissions modernes.

Nous avons introduit un chapitre important consacré aux matériaux et aux exigences pour certains procédés de traitements thermiques.

La deuxième partie est consacrée aux principales méthodes de fabrication des engrenages, pour les différents types, avec les machines les plus récentes à commande numérique, pour le taillage, la rectification, le shaving et le honing.

Le chapitre consacré au contrôle est très développé. Il comporte non seulement la revue des différents critères de qualité des dentures, mais également les différents documents ISO concernant les tolérances des classes de qualité proposées. Les appareils de contrôle les plus modernes sont également décrits, la plupart d'entre eux étant d'ailleurs à commande numérique.

La troisième partie de l'ouvrage est consacrée aux ensembles à engrenages. Nous indiquons les réalisations les plus intéressantes et modernes dans les domaines suivants :

- mécanique générale ;
- industrie du ciment ;
- industrie sidérurgique ;
- ensembles à grande vitesse ;
- transmissions de marine ;
- ensembles à engrenages à vis sans fin.

Nous mentionnons quelques aspects fondamentaux comme par exemple la lubrification et la capacité thermique.

Une partie très importante est consacrée à la réception des ensembles à engrenages, par exemple au sujet du bruit et des vibrations. Il était également important de donner des informations au sujet des accouplements, qui jouent un rôle primordial entre les organes menants et menés.

L'examen et le contrôle des portées des dentures sont également mentionnés étant donné leur importance dans une appréciation globale de la qualité des engrènements. Il est également intéressant de consacrer un chapitre aux différents types de paliers, paliers lisses et paliers à roulements à billes et galets, avec indication des précautions à prendre pour leur maintenance.

Pour être complet, cette troisième partie est très axée sur tous les problèmes de maintenance des ensembles à engrenages.

Qu'il me soit permis d'exprimer dans cette dernière édition, tout le plaisir que m'ont procuré ces longues années consacrées aux engrenages, depuis le début de ma coopération avec mon maître, le Recteur Capelle, grâce à un contact très profond avec tout le monde technique spécialisé, aussi bien en France qu'à l'étranger.

Pour la 7<sup>e</sup> édition de mon ouvrage, j'avais eu le plaisir de compter sur les préfaces de Messieurs Allard et Octrue : je les remercie encore pour leur marque de sympathie.

Pour cette 8<sup>e</sup> édition, je suis heureux d'accueillir Monsieur Jacques Boisset, un fidèle ami que j'ai eu le plaisir et l'honneur de fréquenter durant mes belles années de coopération avec la prestigieuse société Maag de Zurich. Il continue la réalisation d'ensembles à engrenages de haute technicité, et a consacré ces dernières années à la présidence de la fédération Unitram.

Pour cette dernière édition, je me dois d'exprimer toute ma reconnaissance à la maison Dunod pour l'excellente collaboration et la qualité des ouvrages édités depuis 1949.

Georges Henriot

# A

---

## Conception des engrenages





# 1 • RAPPEL DES NOTIONS FONDAMENTALES

## 1.1 Théorie élémentaire sur les vecteurs

On appelle *axe* une droite indéfinie  $xx'$  sur laquelle on a défini un sens de parcours, positif ou négatif (figure 1.1). Un *vecteur* est un segment  $AB$  de cet axe sur lequel on a fixé un sens. Un vecteur est défini par les trois données suivantes :

- sa direction : qui est celle de l'axe  $xx'$  qui lui sert de support ;

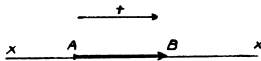


Figure 1.1 – Vecteur

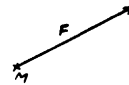


Figure 1.2 – Vecteur force

- son sens : qui est positif ou négatif comparativement au sens positif choisi pour l'axe ;
- son intensité : déterminée par sa longueur  $AB$ .

En mécanique, les vecteurs servent à matérialiser les *forces* appliquées à un système déterminé. Le vecteur  $\vec{F}$ , par exemple (figure 1.2), fixe la direction de la force, son sens, son intensité et son point d'application  $M$ . (Au sujet de l'intensité, il suffit de choisir une échelle.)

### 1.1.1 Composition des forces

#### ■ Deux forces concourantes

La *somme*  $\vec{R}$  des deux forces  $F_1$  et  $F_2$  concourantes au point  $M$  est déterminée facilement par la règle dite « du parallélogramme ». C'est la diagonale d'un parallélogramme dont les côtés sont respectivement égaux aux vecteurs représentatifs des forces  $F_1$  et  $F_2$  (figure 1.3).

Nous écrivons :

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (1.1)$$

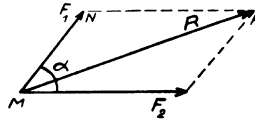


Figure 1.3 – Deux forces concourantes

L'intensité de la somme est déterminée facilement ; dans le triangle  $MNP$  nous avons :

$$\overline{MP}^2 = \overline{MN}^2 + \overline{NP}^2 - 2MN \cdot NP \cos \widehat{MNP}$$

soit :

$$|R| = \sqrt{\overline{F_1}^2 + \overline{F_2}^2 + 2F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \alpha} \quad (1.2)$$

### ■ Deux forces parallèles

#### □ Premier cas (figure 1.4)

Les deux forces  $F_1$  et  $F_2$  sont parallèles et de même sens.

La somme  $\vec{R}$  est déterminée :

- par sa direction, qui est parallèle à la direction des deux forces composantes ;
- par son sens, qui est évidemment le même que celui de  $F_1$  et  $F_2$  ;
- par son intensité :

$$|R| = |F_1| + |F_2| \quad (1.3)$$

– par son point d'application  $M$ , situé à l'intérieur du segment joignant les points d'application  $M_1$  et  $M_2$  des forces  $F_1$  et  $F_2$ , à une distance de ceux-ci déterminée par la relation connue suivante :

$$|F_1| \cdot MM_1 = |F_2| \cdot MM_2$$

soit :

$$\frac{MM_1}{MM_2} = \frac{|F_2|}{|F_1|} \quad (1.4)$$

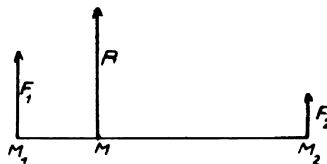


Figure 1.4 – Deux forces parallèles et de même sens

#### □ Second cas (figure 1.5)

Les deux forces  $F_1$  et  $F_2$  sont parallèles, mais de sens contraires.

La somme  $\vec{R}$  a même direction que les deux forces composantes, le sens de celle qui a la plus forte intensité. Son intensité est égale à la différence des intensités des deux composantes.

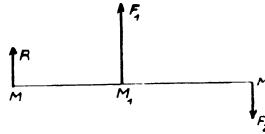


Figure 1.5 – Deux forces parallèles et de sens opposés

Son point d'application  $M$  est situé, dans ce cas, à l'extérieur du segment  $M_1 M_2$ , du côté de la force ayant la plus forte intensité et il vérifie la relation :

$$|F_1| \cdot MM_1 = |F_2| \cdot MM_2$$

soit :

$$\frac{MM_1}{MM_2} = \frac{|F_2|}{|F_1|} \quad (1.5)$$

### ■ Système de forces (figure 1.6)

Soit un ensemble de forces  $F_1, F_2, F_3, F_4 \dots$  réparties d'une façon quelconque. Leur somme est obtenue simplement de la façon suivante.

Par un point  $O$  quelconque de l'espace, mener un vecteur équipollent à  $\vec{F}_1$ . Par l'extrémité de  $\vec{F}_1$ , mener un vecteur équipollent à  $\vec{F}_2$  et ainsi de suite. La somme  $\vec{R}$  est le vecteur  $\vec{OA}$ ,  $A$  étant l'extrémité du dernier des vecteurs portés bout à bout. Il est bien évident que le vecteur  $\vec{R}$  reste équipollent à lui-même, quelle que soit la position du point  $O$  dans l'espace.

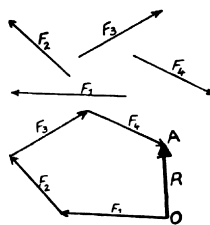


Figure 1.6 – Système de forces

### 1.1.2 Rappel sur les moments

Le moment d'un vecteur  $\vec{F}$  par rapport à un point  $M$  est un vecteur  $\vec{MG}$  dont l'intensité est égale au produit de l'intensité du vecteur  $\vec{F}$  par la distance de  $M$  au support de celui-ci :

$$|MG| = |F| \cdot MH \quad (1.6)$$

Sa direction est perpendiculaire au plan formé par le point  $M$  et le vecteur représentatif  $\vec{F}$ .

Son sens est tel qu'un observateur traversé des pieds à la tête par ce vecteur  $\vec{MG}$  voit le vecteur  $\vec{F}$  dirigé dans le sens positif (sens trigonométrique, inverse du sens de rotation des aiguilles d'une montre) (figure 1.7).

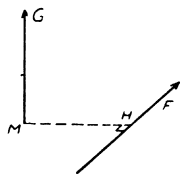


Figure 1.7 – Vecteur moment

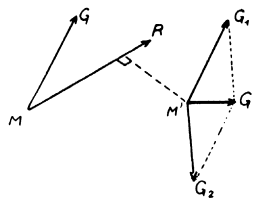


Figure 1.8 – Réduction d'un système en un autre point  $M'$

### ■ Moment résultant d'un système de vecteurs par rapport à un point $M$

Il suffit de déterminer séparément les moments des différents vecteurs par rapport au point  $M$ . On compose ensuite les vecteurs représentatifs de ces moments d'après la règle donnée précédemment. On obtient ainsi le moment résultant  $\vec{G}$ .

Le moment d'un vecteur ou d'un système de vecteurs par rapport à un point  $M$  dépend donc de la position de ce point dans l'espace : sa direction étant variable suivant le point  $M$ , il est possible de trouver un point  $M$  particulier tel que le vecteur moment résultant  $\vec{G}$  ait même support que le vecteur somme  $\vec{R}$  : le support commun aux deux vecteurs  $\vec{G}$  et  $\vec{R}$  est alors appelé *axe central* du système de vecteurs.

Connaissant les éléments de réduction d'un système de vecteurs en un point  $M$  c'est-à-dire la somme  $\vec{R}$  et le moment résultant  $\vec{G}$ , les éléments de réduction en un autre point  $M'$  s'en déduisent comme suit (figure 1.8) :

- somme  $\vec{R}'$  : équipollente à  $\vec{R}$  ;
- moment résultant  $\vec{G}' =$  somme géométrique du vecteur  $\vec{G}_1$  équipollent à  $\vec{G}$  et du vecteur  $\vec{G}_2$  représentant le moment de la somme  $\vec{R}$  par rapport au point  $M'$ .

### ■ Couple

Dans le cas de forces par exemple, un couple est un système de deux forces parallèles, de sens inverses et de même intensité. La somme  $\vec{R}$  est alors nulle

et le moment résultant  $\vec{G}$  est le même par rapport à tous les points de l'espace (en effet, en se reportant au paragraphe précédent,  $\vec{G}_2$  est toujours nul). En prenant, par exemple, le point  $M$  situé sur le support du vecteur représentatif  $\vec{F}_2$  nous obtenons (figure 1.9) :

$$|G| = |F_1| \cdot MH$$

(le moment de  $\vec{F}_2$  par rapport à  $M$  est nul).

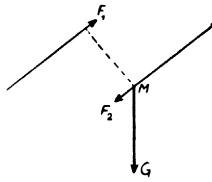


Figure 1.9 – Couple

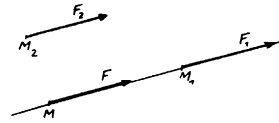


Figure 1.10 – Systèmes de forces équivalentes

### 1.1.3 Systèmes de forces équivalents

Deux systèmes de forces sont équivalents par rapport à un point  $M$  de l'espace si les éléments de réduction de ces deux systèmes par rapport à  $M$ , à savoir somme  $\vec{R}$  et moment résultant  $\vec{G}$ , sont identiques.

Si nous transportons le vecteur force  $\vec{F}$  le long de son support, de  $\vec{F}$  en  $\vec{F}_1$  par exemple (figure 1.10), nous ne changeons pas le système de forces ( $\vec{R}$  et  $\vec{G}$  ne sont pas modifiés).

En revanche, si nous le transportons en  $\vec{F}_2$ , le vecteur  $\vec{F}_2$  étant équipollent à  $\vec{F}$ , le système de forces n'est plus équivalent ; en effet, si  $\vec{R}$  a toujours la même valeur, il n'en est plus de même pour  $G$ .

## 1.2 Vitesses et composition des vitesses

Soit  $(C)$  la trajectoire du point matériel  $M$  (figure 1.11). À l'instant  $t$ , le point  $M$  est en  $M_0$ , et à l'instant  $(t + \Delta t)$  il est en  $M_1$ . La *vitesse moyenne* du point matériel de  $M_0$  à  $M_1$  peut être représentée par le vecteur  $\vec{v}_m$ , ayant comme support le segment  $M_0M_1$ , dirigé de  $M_0$  à  $M_1$  et ayant comme intensité :

$$|\vec{v}_m| = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$\Delta s$  étant la longueur de l'arc  $\widehat{M_0M_1}$  de la trajectoire.

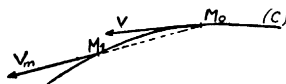


Figure 1.11 – Vitesse

Pour obtenir la *vitesse instantanée* du point matériel au temps  $t$ , il suffit de faire tendre  $\Delta t$  vers zéro. Le vecteur vitesse moyenne  $\vec{v}_m$  tend vers le vecteur vitesse instantanée en  $M_0$ , soit  $\vec{v}$ .

Ce vecteur  $\vec{v}$  est donc tangent en  $M_0$  à  $(C)$  et est dirigé dans le sens du mouvement. Son intensité est égale à :

$$|\vec{v}| = \frac{ds}{dt} \quad (1.7)$$

$ds$  et  $dt$  désignant des quantités infiniment petites.

Si  $s = f(t)$  est l'équation du mouvement de trajectoire  $(C)$ , la vitesse du point matériel s'obtient donc en dérivant cette fonction par rapport au temps.

Un corps solide étant formé d'une infinité de points matériels, son mouvement sera donc connu si nous connaissons les fonctions du temps  $s = f(t)$  définissant les trajectoires de chacun de ses points. Si le solide est indéformable, et c'est le cas général, les positions de trois de ses points déterminent complètement son mouvement.

### 1.2.1 Mouvements fondamentaux

Il existe trois mouvements fondamentaux. (Notons que nous supposons toujours le solide comme indéformable.)

#### ■ Mouvement de translation

Un solide est animé d'un mouvement de translation quand il se déplace de manière que les segments de droite joignant les points du corps deux à deux restent équipollents à eux-mêmes (figure 1.12).

Soit par exemple  $A_0$ ,  $B_0$  et  $C_0$  les positions de trois points du solide  $(S)$  à l'instant  $t$ . À l'instant  $(t + \Delta t)$ , ces points occupent les positions  $A_1$ ,  $B_1$  et  $C_1$ . Nous avons alors :

- $A_1B_1$  équipollent à  $A_0B_0$  ;
- $A_1C_1$  équipollent à  $A_0C_0$ , etc.

Nous pouvons donc écrire que dans un mouvement de translation les trajectoires des différents points du solide sont identiques ; les vitesses instantanées de tous les points à un instant quelconque sont donc représentées par des vecteurs équipollents :

$$\vec{v}_A = \vec{v}_B = \vec{v}_C \quad (1.8)$$

Si les trajectoires des différents points du solide sont rectilignes, celui-ci est animé d'un *mouvement de translation rectiligne*.

Si la vitesse instantanée conserve une valeur constante, le mouvement est dit *uniforme*.