

# Ingénierie mécanique

## Transmission de puissance

### Tome 3. Du moteur au récepteur

Roues libres, courroies, chaînes, variateurs de vitesse,  
joints d'accouplement, rendements des transmissions

4<sup>e</sup> édition

**Francis Esnault**

Agrégé de mécanique et diplômé du Conservatoire national des arts et métiers.  
Il a d'abord enseigné en STS au lycée Ozanam (Cesson-Sévigné) et en CPGE  
au lycée l'Assomption (Rennes) avant de dispenser ses cours à l'ECAM Rennes,  
dont il a bâti la structure des enseignements du génie mécanique.

**DUNOD**

Illustration de couverture : Alexsey/istockphoto.com

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, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-079685-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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.

---

# Table des matières

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Avant-propos                                                                               | V         |
| <b>CHAPITRE 1 • ROUES LIBRES</b>                                                           | <b>1</b>  |
| 1.1 Fonction                                                                               | 1         |
| 1.2 Intérêt et applications particulières des roues libres                                 | 2         |
| 1.3 Principes mis en œuvre pour la réalisation des roues libres                            | 5         |
| 1.4 Dispositions constructives des roues libres à frottement                               | 9         |
| 1.5 Dispositions constructives des roues libres à obstacle                                 | 13        |
| 1.6 Exemples d'installation                                                                | 15        |
| <b>CHAPITRE 2 • COURROIES ASYNCHRONES</b>                                                  | <b>25</b> |
| 2.1 Généralités                                                                            | 25        |
| 2.2 Tensions dans les brins de la courroie                                                 | 30        |
| 2.3 Calcul approché d'une transmission par courroie                                        | 35        |
| 2.4 Calcul définitif d'une transmission par courroie. Démarche industrielle                | 39        |
| 2.5 Technologie de la courroie                                                             | 45        |
| 2.6 Exemples de réalisations                                                               | 50        |
| <b>CHAPITRE 3 • CHÂÎNES</b>                                                                | <b>53</b> |
| 3.1 Généralités                                                                            | 53        |
| 3.2 Effets spécifiques                                                                     | 55        |
| 3.3 Sollicitations dans les brins de la chaîne                                             | 64        |
| 3.4 Longueur de la chaîne                                                                  | 66        |
| 3.5 Calcul d'une transmission par chaîne. Démarche industrielle                            | 68        |
| 3.6 Dispositions constructives                                                             | 75        |
| 3.7 Exemples de réalisations                                                               | 84        |
| <b>CHAPITRE 4 • VARIATEURS DE VITESSE MÉCANIQUES À ÉLÉMENTS DÉFORMABLES</b>                | <b>91</b> |
| 4.1 Introduction                                                                           | 91        |
| 4.2 Situation et fonction d'un variateur de vitesse                                        | 92        |
| 4.3 Présentation des variateurs de vitesse hydrauliques                                    | 96        |
| 4.4 Présentation des variateurs de vitesse d'origine électrique                            | 97        |
| 4.5 Principes mis en œuvre pour la réalisation des variateurs mécaniques                   | 100       |
| 4.6 Étude des variateurs mécaniques à élément transmetteur déformable                      | 101       |
| 4.7 Dispositions constructives des variateurs mécaniques à élément transmetteur déformable | 107       |
| 4.8 Application à une transmission automatique pour véhicule « Volvo »                     | 112       |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPITRE 5 • VARIATEURS DE VITESSE MÉCANIQUES À ÉLÉMENT(S) RIGIDE(S)</b>                          | <b>115</b> |
| 5.1 Problème du contact entre solides                                                                | 115        |
| 5.2 Variateur à anneau métallique et poulies à gorges déformables                                    | 116        |
| 5.3 Variateur à galet cylindrique et poulies coniques                                                | 117        |
| 5.4 Variateurs à galet(s) cylindrique(s) et plateau(x) cylindrique(s)                                | 119        |
| 5.5 Variateurs à galet(s) sphérique(s)                                                               | 121        |
| 5.6 Variateurs épicycloïdaux                                                                         | 125        |
| 5.7 Dispositions constructives                                                                       | 130        |
| <b>CHAPITRE 6 • JOINTS D'ACCOUPLEMENT HOMOCINÉTIQUES</b>                                             | <b>139</b> |
| 6.1 Situation. Fonction                                                                              | 139        |
| 6.2 Caractère homocinétique d'un joint de transmission                                               | 140        |
| 6.3 Principes mis en œuvre pour la réalisation des joints d'accouplement homocinétiques              | 141        |
| 6.4 Étude cinématique du joint de Cardan                                                             | 142        |
| 6.5 Étude cinématique d'un joint à plan bissecteur Königs                                            | 147        |
| 6.6 Étude cinématique d'un joint tripode                                                             | 149        |
| 6.7 Phénomène de fatigue propre au joint de Cardan                                                   | 153        |
| 6.8 Inventaire des joints d'accouplement usuels                                                      | 156        |
| 6.9 Dispositions constructives de joints de Cardan                                                   | 157        |
| 6.10 Application à une transmission de véhicule automobile                                           | 169        |
| <b>CHAPITRE 7 • JOINTS D'ACCOUPLEMENT ÉLASTIQUES, POSITIFS, RIGIDES</b>                              | <b>173</b> |
| 7.1 Situation et fonction des joints d'accouplement élastiques et des joints d'accouplement positifs | 173        |
| 7.2 Homocinétie                                                                                      | 176        |
| 7.3 Étude dynamique des joints d'accouplement élastiques                                             | 179        |
| 7.4 Couples transmissibles par les joints d'accouplement rigides                                     | 185        |
| 7.5 Classification des joints d'accouplement élastiques et des joints d'accouplement positifs        | 189        |
| 7.6 Classification des joints d'accouplement rigides                                                 | 199        |
| <b>CHAPITRE 8 • ASPECT ÉNERGÉTIQUE DES TRANSMISSIONS DE PUISSANCE PAR ENGRENAGES</b>                 | <b>207</b> |
| 8.1 Rendement des systèmes mécaniques à train ordinaire                                              | 208        |
| 8.2 Couple disponible en sortie de transmission                                                      | 210        |
| 8.3 Cas particulier des transmissions à train épicycloïdal                                           | 210        |
| <b>INDEX</b>                                                                                         | <b>225</b> |

# **Avant-propos**

Cet ouvrage est le dernier d'une collection de trois tomes destinés à la formation des étudiants dans le domaine de l'ingénierie mécanique. Alors que le tome 1 s'intéresse essentiellement aux dispositions constructives transversales (que l'on peut rencontrer dans tout mécanisme, quelle que soit sa destination), les tomes 2 et 3 étudient un à un les systèmes mécaniques installés dans une chaîne de transmission de puissance entre un moteur et un récepteur (embrayages, boîtes de vitesses, etc.). Ainsi ce tome 3 est-il la suite logique du tome 2. Il analyse les systèmes non traités dans le tome 2, dont la présence est très souvent inévitable dans une transmission de puissance (courroies, chaînes, joints d'accouplement, etc.).

Notons que deux chapitres sont consacrés aux variateurs de vitesse mécaniques à friction, bien que ces derniers se voient aujourd'hui progressivement remplacés par des variateurs électroniques. Pour cette raison, le lecteur pourrait en première réflexion juger anachroniques les analyses cinématiques proposées. En réalité, de nombreuses réalisations actuelles en génie mécanique résultent de principes qui sont devenus pertinents au terme de progrès réalisés dans différents domaines (traitement de surface, nouveaux matériaux, tribologie, etc.). S'agissant des variateurs, l'augmentation du coefficient de frottement en milieu lubrifié, par exemple, tout comme la mise en œuvre de matériaux composites aux caractéristiques mécaniques spécifiques, peuvent rendre aujourd'hui envisageable la transmission de forts couples sans glissement ni usure importante.

Gageons que ce dernier tome de la collection saura donner toute satisfaction aux étudiants en ingénierie mécanique se trouvant face à des problématiques de conception pour lesquelles les solutions n'auraient pas été fournies par les deux premiers tomes.

Francis Esnault



# Roues libres

## Introduction

Dans une chaîne de transmission de puissance, la roue libre appartient à l'ensemble des organes mécaniques destinés à l'accouplement d'arbres ou autres éléments. Sa fonction d'**embrayage automatique** (sans commande extérieure) et **unidirectionnel** lui confère un large champ d'application où elle intervient, selon le cas, comme **antidévireur**, **survireur** ou encore pour la **commande d'avance alternative**.

## 1.1 FONCTION

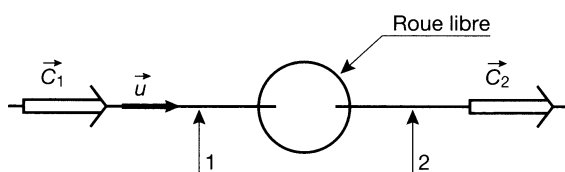


Figure 1.1

Une roue libre peut être définie comme étant un **embrayage sans glissement, dépourvu de commande extérieure**, destiné à assurer, dans un **seul sens**, la transmission d'un couple entre deux éléments d'une transmission. Son mode de fonctionnement est défini dans le tableau 1.1 associé au schéma Figure 1.1, où :

- $\vec{C}_1 = C\vec{u}$   $C > 0$  est le couple sur l'arbre d'entrée 1 ;
- $\vec{C}_2$  est le couple disponible sur l'arbre de sortie 2

Notons que le choix d'un type de roue libre (A ou B) dépend de la fonction (embrayage ou non) qu'elle doit assurer dans une chaîne cinématique, à partir du sens de rotation donné de l'arbre d'entrée. Ajoutons que la symétrie dans la réalisation de la plupart des roues libres confère à celles-ci un comportement de type A ou B, simplement fonction du sens de montage retenu.

TABLEAU 1.1

| $\vec{C}_1$ | $\vec{C}_2$          |                      | Nature de la liaison (1-2) |                          |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|
|             | Roue libre de type A | Roue libre de type B | Roue libre de type A       | Roue libre de type B     |
| $C\vec{u}$  | $C\vec{u}$           | $\vec{0}$            | Encastrement (embrayage)   | Pivot (débrayage)        |
| $-C\vec{u}$ | $\vec{0}$            | $-C\vec{u}$          | Pivot (débrayage)          | Encastrement (embrayage) |

Pour la roue libre, nous allons adopter la représentation schématique de la figure 1.2 où  $E$  symbolise l'ensemble du mécanisme destiné à transformer la liaison pivot (1–2) en liaison encastrement.

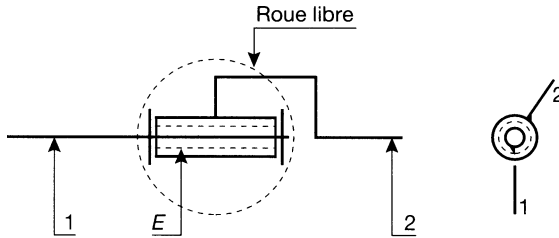


Figure 1.2

## 1.2 INTÉRÊT ET APPLICATIONS PARTICULIÈRES DES ROUES LIBRES

Les roues libres assurent, de façon automatique, et en toute autonomie, des fonctions particulières dans des mécanismes variés. **Aucun asser-**

**vissement mécanique ou hydraulique n'est nécessaire**, ce qui n'est pas le cas pour les embrayages ou les freins en général. Ainsi, elles peuvent être utilisées :

- pour la **commande d'avance alternative**. Pour cette application (fig. 1.3), la roue libre dans une chaîne cinématique, participe à la transformation d'un mouvement de rotation continu d'un arbre moteur en un mouvement de rotation alternatif d'un élément récepteur ;
- comme **antidévireur**. Pour cette application, l'un des deux arbres (1 ou 2, fig. 1.5) est solidaire d'un bâti fixe, et l'autre d'un élément dont la rotation n'est autorisée que dans un sens ;
- comme **survireur**. Pour cette application, la roue libre supprime automatiquement toute possibilité de liaison mécanique entre deux sources motrices indépendantes, chacune d'elles pouvant entraîner l'un des deux arbres (1 ou 2, fig. 1.6) à des vitesses angulaires différentes.

### 1.2.1 Application pour la commande d'avance alternative (fig. 1.3)

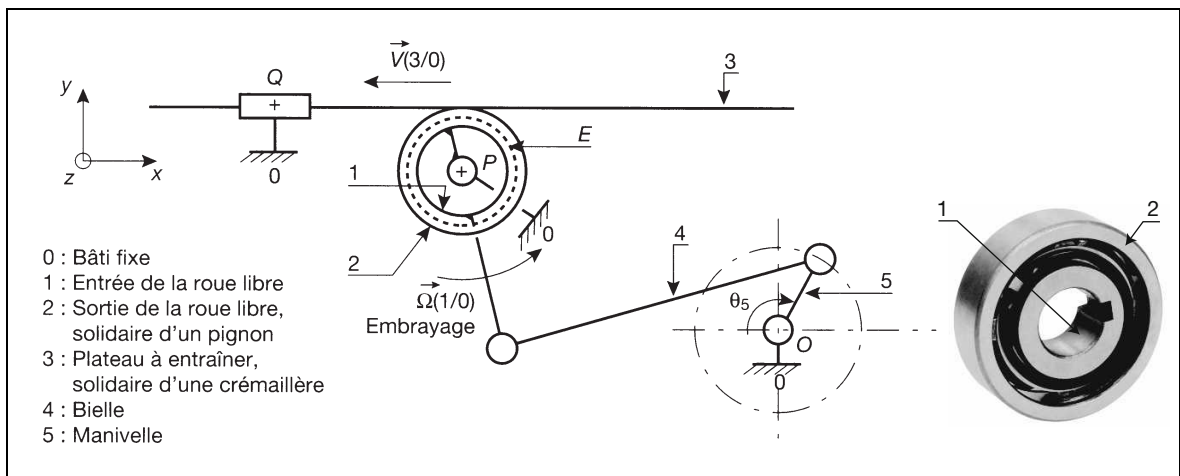


Figure 1.3 RABOTEUSE

Le système bielle-manivelle formé des éléments **1, 4 et 5** transforme la rotation continue (5/0) d'axe  $(O, \vec{z})$  en rotation alternative (1/0) d'axe  $(P, \vec{z})$ . La roue libre {**1, 2**} n'assurant ici la fonction d'embrayage (1 → 2) que pour

$\vec{\Omega}(1/0) = \omega_1 \vec{z}$ ,  $\omega_1 > 0$  le mouvement (3/0) est une translation intermittente d'axe  $(Q, -\vec{x})$  tel que décrit sur le graphe figure 1.4 où  $\vec{V}(3/0) = -v_3 \vec{x}$   $v_3 > 0$ .

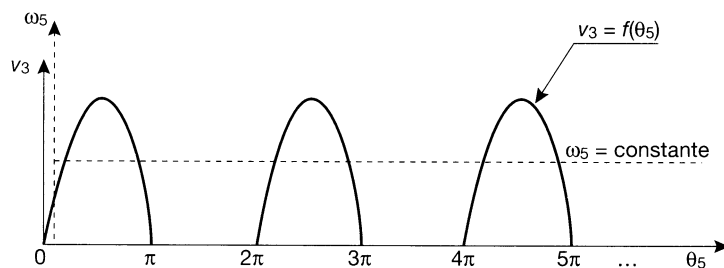


Figure 1.4

L'application des roues libres pour la commande d'avance alternative concerne de nombreux domaines. On peut citer ceux :

- de la machine outil :
  - pour l'alimentation de matière première sur presses à emboutir, découper ou estamper,
  - pour le déroulement de fil sur tréfileuses,
  - pour la commande d'avance de l'outil sur raboteuses ;
- de l'imprimerie : pour la commande du défillement de papier ;
- de la machine agricole : pour la réalisation de variateurs de vitesse pour semoirs ;
- de l'automobile : pour la commande automatique de rattrapage d'usure sur les freins.

### 1.2.2 Application comme antidévireur (fig. 1.5)

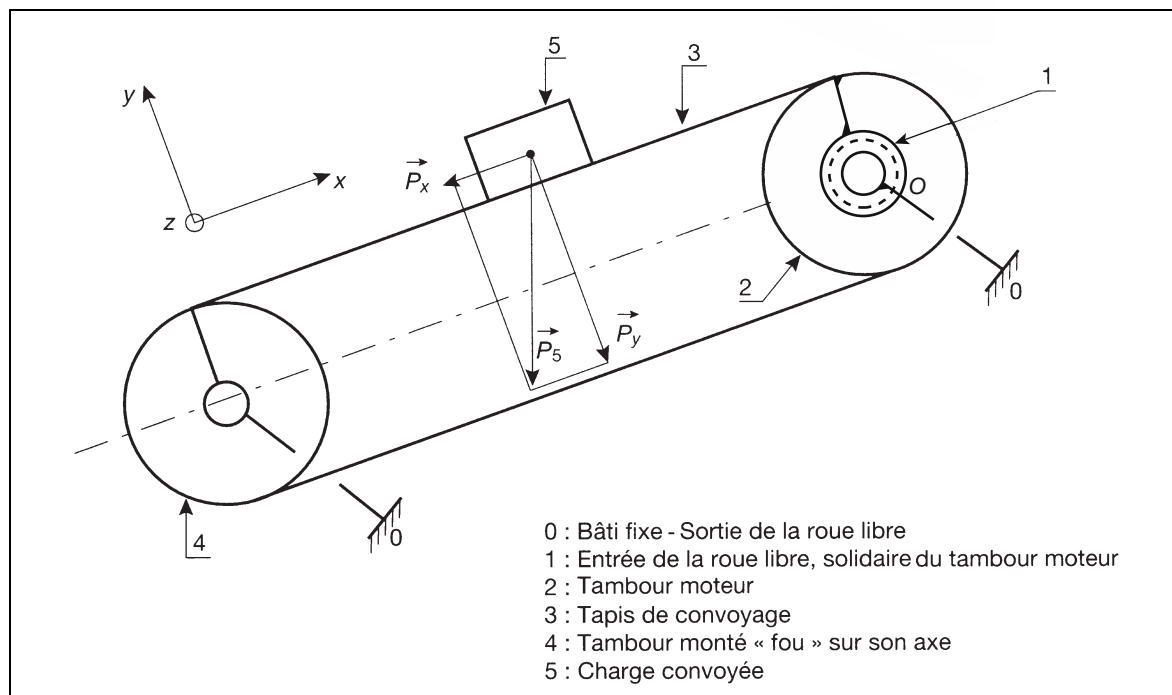


Figure 1.5 CONVOYEUR

L'arbre moteur entraîne en rotation d'axe  $(O, \vec{z})$  l'arbre d'entrée 1 de la roue libre à la vitesse angulaire  $\vec{\Omega}(1/0) = -\omega_1 \vec{z}$ ,  $\omega_1 > 0$ . Ainsi est mis en mouvement le tapis de con-

voyage 3 destiné au déplacement de la charge 5. En cas d'arrêt du moteur (mise hors circuit, ou panne d'énergie), la composante  $\vec{P}_x$  de la charge ne peut entraîner le mouvement inverse

du tapis. Par ailleurs, une commande manuelle de ce dernier vers le haut (opération de maintenance) demeure possible, moteur arrêté.

L'application des roues libres comme antidévi-reurs concerne de nombreux domaines. On peut citer ceux :

- du convoyage et de la manutention : tapis transporteurs inclinés, élévateurs à godets, ponts élévateurs, treuils, grues... ;
- de l'hydraulique : convertisseurs de couple : arrêt en rotation, dans un sens, du réacteur (voir paragraphe 1.6.2) ; pompes pour empêcher, après arrêt, un dévirement en raison de la pression exercée par le fluide véhiculé ;

**5** (et le rotor du moteur principal **3**) à vitesse lente, par l'intermédiaire de la roue libre **{1, 2}** qui assure alors sa fonction d'embrayage. Cette opération est ici destinée à prévenir les dépôts de résidus dans le compresseur à vis.

L'application des roues libres comme survireurs concerne de nombreux domaines comme :

- l'automobile :
  - dans les démarreurs, la roue libre sépare, après la mise en route du moteur, le lanceur du moteur à combustion interne (voir paragraphe 1.6.3 c) ;

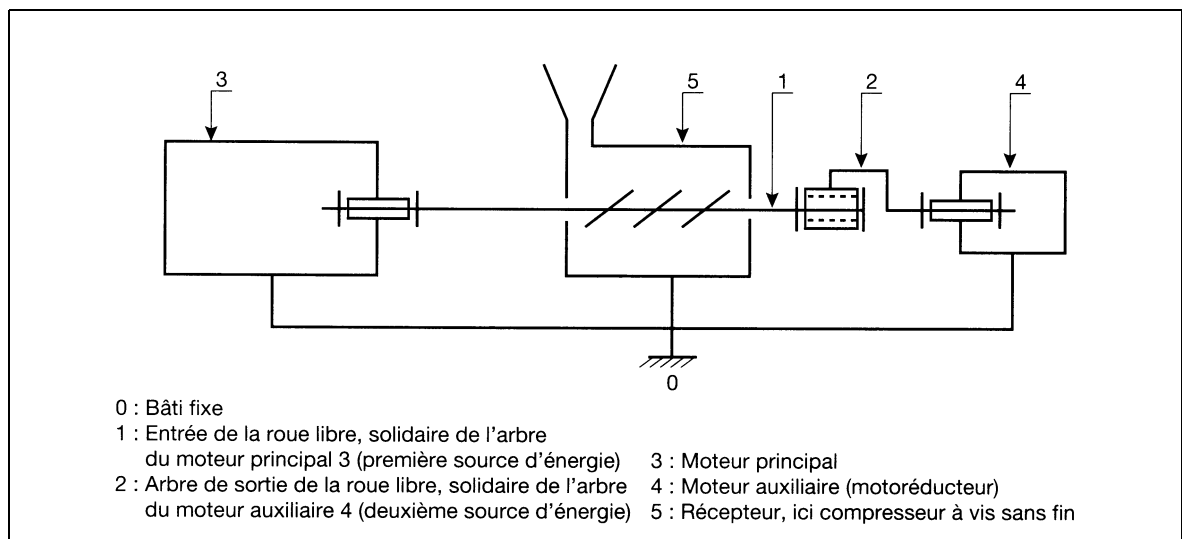


Figure 1.6 COMPRESSEUR

- de l'automobile : boîte de vitesses automatiques à trains épicycloïdaux : autorise l'existence d'un «frein moteur» en arrêtant la rotation d'un pignon dans un sens.

### 1.2.3 Application comme survireur

Un schéma d'installation est donné figure 1.6. Les deux sources d'énergie indépendantes consistent ici en un moteur principal **3** entraînant l'arbre **1**, et un moteur auxiliaire **4** entraînant l'arbre **2**.

En régime normal, le compresseur **5** est entraîné par le moteur principal **3** tandis que la roue libre **{1, 2}** désaccouple automatiquement le moteur auxiliaire **4**. À l'arrêt du moteur principal, le motoréducteur **4** peut entraîner le compresseur

- dans les boîtes de vitesses automatiques à train épicycloïdal, la roue libre assure une fonction combinée d'embrayage et frein ;
- dans les ventilateurs, la roue libre autorise l'arrêt instantané du moteur alors que, par leur inertie, les éléments mobiles poursuivent leur mouvement décéléré ;
- le convoyage et la manutention :
  - sur les convoyeurs à rouleaux des lami-noirs, les roues libres permettent au produit transporté d'aller plus vite que la vitesse initiale donnée par les rouleaux ;
  - sur les treuils (par exemple Winch utilisés en navigation à voile), la roue libre autorise l'existence d'un réducteur à deux rapports de transmission, selon le sens de rotation de la manivelle (voir paragraphe 1.6.3 b).

1.3 PRINCIPES MIS EN ŒUVRE  
POUR LA RÉALISATION  
DES ROUES LIBRES

1.3.1 Classification

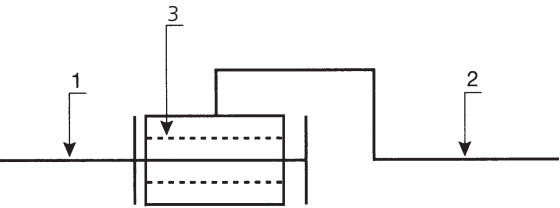


Figure 1.7

Les éléments de l'ensemble *E* (fig. 1.7) destinés à assurer une liaison (1–2) de type «encastrement» dans un sens de rotation, et une liaison (1–2) de type «pivot» dans l'autre sens, sont :

- des **organes transmetteurs 3**, fortement sollicités lors de la transmission du couple, de forme sphérique (**billes**), cylindrique (**rouleaux**), ou diverse (**galets** de forme, cliquets) ;
- des **ressorts 4** destinés à garantir, en permanence, le bon positionnement des organes transmetteurs.

La fonction de liaison (1–2) de type «encastrement» peut être assurée par **coincement**, **arc-boutement** ou **obstacle** comme le montre le tableau figure 1.2.

TABEAU 1.2 PRINCIPES MIS EN ŒUVRE

| Différents types de roues libres | Éléments transmetteurs 3 | Principes mis en œuvre |               | Commentaires                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Roues libres à frottement        | Billes, rouleaux         |                        | Coincement    | En position «embrayage», la condition de non glissement (1/2) conduit à vérifier une relation existant entre le coefficient de frottement en A et B, et les paramètres géométriques de la construction (voir paragraphe 1.3.2). |
|                                  | Galets de forme          |                        | Arc-boutement |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Roues libres à obstacle          | Cliquets                 |                        | Obstacle      | L'action de contact par obstacle $\vec{A}(3 \rightarrow 2)$ empêche tout glissement possible (2/1) en position «embrayage».                                                                                                     |