

8 CARACTÉRISATION DES LIAISONS MÉCANIQUES

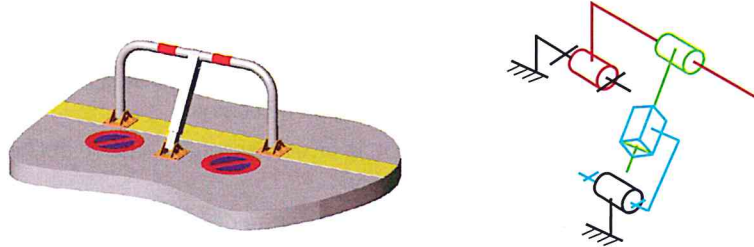
1 Analyse et classification des liaisons

Réaliser des liaisons demande de choisir des solutions technologiques. Le choix se fait selon des critères établis en fonction du type de liaison que l'on souhaite. Une liaison peut ainsi être :

- ▶ « **simple**/élémentaire » lorsqu'elle fait intervenir deux solides ou « **composée**/complexe » lorsqu'il y en a plus (roue de supermarché, essieu d'automobile...).
- ▶ **complète**, si aucun mouvement n'est possible, ou **partielle** dans le cas contraire ;
- ▶ **permanente** (si elle n'évolue pas dans le temps), ou **temporaire** (comme pour un embrayage par exemple, car il n'est pas toujours actionné par le conducteur). Dans ce cas on réalise différents schémas, avec et sans contact des liaisons temporaires.
- ▶ **élastique** si le mouvement qu'elle bloque peut tout de même avoir lieu sous un effort modéré, ou **rigide** si le mouvement ne peut avoir lieu que sous un effort important.
- ▶ **démontable** si on peut séparer les pièces en utilisant un outillage ou pas, ou **indémontable** s'il est nécessaire de dégrader ou détruire une partie d'une des pièces pour les séparer.
Ex. : les pièces soudées ou collées, emmanchées en force, rivetées, sont assemblées de manière indémontables.
- ▶ **durable** si elle résiste aux agressions (corrosion, vieillissement, altérations chimiques, démontages répétés...) durant une longue période ou **éphémère** dans le cas contraire.
- ▶ **recyclable**, caractère en partie lié au démontage et à la nature des matériaux (mono- ou bi-matériaux) ou **non recyclable**.

EXEMPLE

En position levée une barrière de parking ne peut pas bouger, elle est en liaison complète. Le blocage est réalisé par le verrouillage de la liaison glissière. Cette liaison n'est pas permanente puisqu'on peut la baisser sans utiliser d'outil de démontage. Lorsqu'on la baisse elle est guidée par une liaison pivot. L'ensemble de ces liaisons sont rigides et recyclables.



2 Caractérisation des liaisons parfaites par les actions transmissibles (selon NF EN 23952)

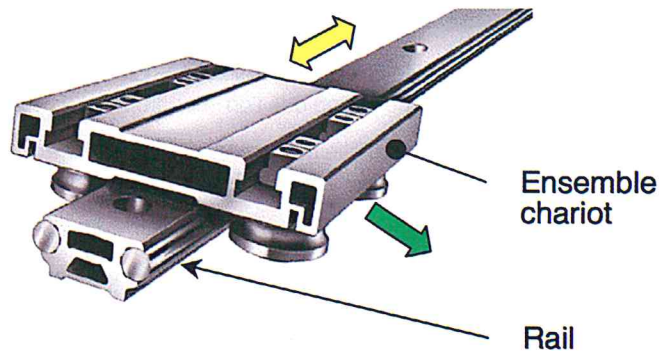
a Actions transmissibles dans une liaison

Lorsqu'un mouvement est impossible dans une liaison, cela est dû au fait que les surfaces de contact entre les deux éléments qui la composent sont telles qu'elles bloquent ce mouvement. Le contact entre ces deux surfaces peut ainsi transmettre une action mécanique. En poussant (respectivement en tirant) sur une pièce, on va pousser (respectivement tirer) sur l'autre.

EXEMPLE

Le chariot est libre de se déplacer selon l'axe du rail (flèche jaune). Le mouvement est possible, on ne peut donc pas transmettre d'effort selon l'axe du rail par l'intermédiaire de la liaison. En effet le déplacement du chariot selon cette direction ne provoque pas le déplacement du rail.

Les autres mouvements du chariot sont impossibles sans agir sur le rail c'est-à-dire que le fait de tirer le chariot selon la direction et le sens de la flèche verte provoque le déplacement du rail dans la même direction et le même sens, on a donc transmis l'action de traction du chariot au rail.



Une liaison mécanique résulte de la mise en contact de surfaces de pièces. Les surfaces de deux pièces réelles ont toujours des défauts (écarts sur les dimensions, les positions, les orientations, les formes, les états de surfaces).

Dans cette partie nous parlerons des liaisons parfaites c'est-à-dire en supposant que :

- ▶ les géométries des surfaces de contact représentées n'ont aucun défaut ;
- ▶ la liaison se fait sans jeu (pourtant nécessaire au fonctionnement) ;
- ▶ il n'y a pas de frottement dans la liaison ;
- ▶ les solides de la liaison sont des pièces complètement rigides, ne se déformant sous aucun effort.

Pour chaque liaison il existe des éléments privilégiés qu'il est nécessaire de préciser lors de la description :

- ▶ pour une ponctuelle, un appui plan ou une linéaire annulaire, un axe est privilégié : la normale, c'est-à-dire la perpendiculaire au plan tangent de contact ;
- ▶ pour la linéaire annulaire, la pivot, la pivot glissant, la glissière et l'hélicoïdale un axe est privilégié : l'axe de rotation et/ou de translation ;
- ▶ pour la rotule un point est privilégié : le centre de la rotule.

On associe à ces éléments un repère privilégié. Dans ce repère privilégié de la liaison, les efforts transmissibles et les degrés de libertés possibles sont complémentaires :

- ▶ à un degré de liberté nul correspond une composante non nulle des actions transmissibles ;
- ▶ suivant un même axe on ne peut avoir simultanément un degré de liberté et un degré de liaison de même nature.

Exemples : la porte d'un monospace est libre de se déplacer en translation, quand on la pousse pour l'ouvrir, elle ne transmet pas de force au reste du véhicule.

Un portillon est libre de se déplacer en rotation, quand on le pousse, il ne transmet pas de couple à sa barre de soutien.

Quand une translation n'est pas possible on peut transmettre une force par l'intermédiaire de la liaison. Quand une rotation n'est pas possible on peut transmettre un couple par l'intermédiaire de la liaison.

b Liaison encastrement (ou fixe)

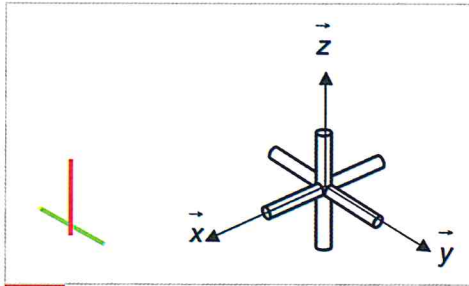


Fig. 1 Schéma de la liaison d'encastrement

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F_x	M_x	0
0	F_y	M_y	0
0	F_z	M_z	0

Cette liaison représente l'assemblage rigide de deux pièces ne pouvant pas bouger l'une par rapport à l'autre.



Fig. 2 Pot d'échappement soudé



Fig. 3 Clip de bac plastique

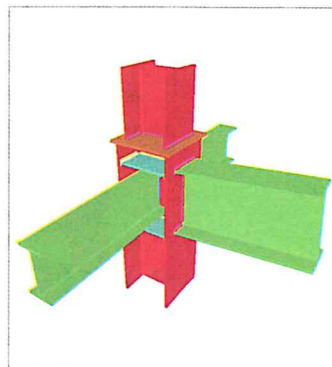


Fig. 4 Visuel de poutres de bâtiment

MATIERES ET STRUCTURES

c Liaison pivot

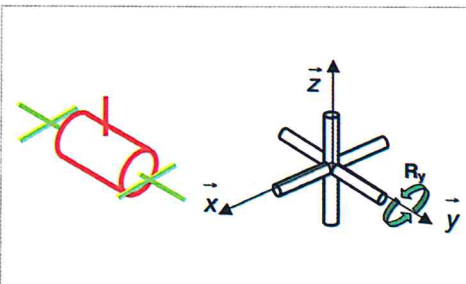


Fig. 5 Schéma spatial de la liaison pivot

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F_x	M_x	0
0	F_y	0	1
0	F_z	M_z	0

Liaison pivot d'axe \vec{Y} : transmet toutes les actions sauf le moment autour de \vec{Y} .

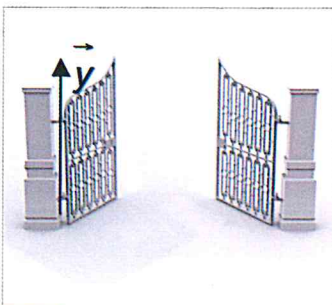


Fig. 6 Portail/mur



Fig. 7 Volant automobile



Fig. 8 Lame de scie

d Liaison glissière

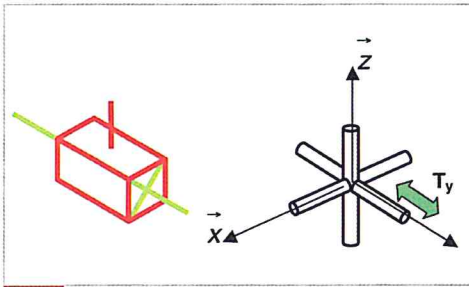


Fig. 9 Schéma spatial de la liaison glissière

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	Fx	Mx	0
1	0	My	0
0	Fz	Mz	0

Liaison glissière d'axe \vec{Y} : transmet toutes les actions sauf la force selon l'axe \vec{Y} .

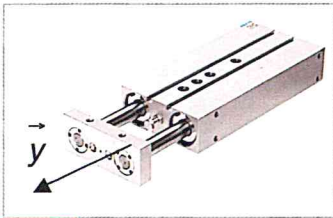


Fig. 10 Vérin

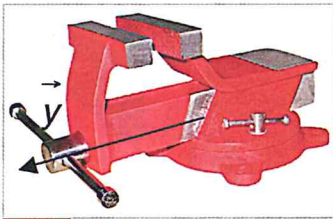


Fig. 11 Étau d'établi

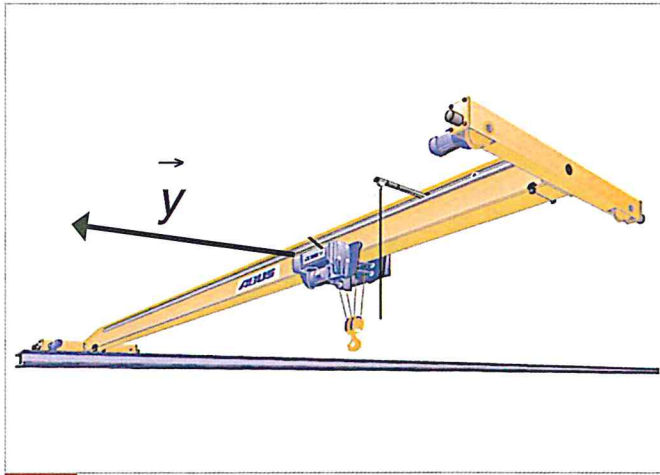


Fig. 12 Pont roulant de déchargement sur dock portuaire

e Liaison hélicoïdale

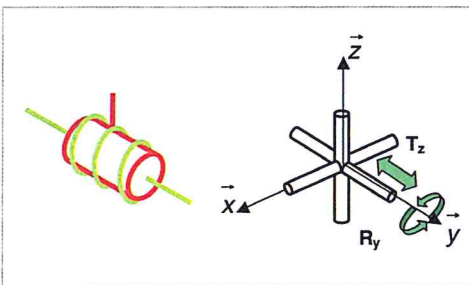


Fig. 13 Schéma spatial de la liaison hélicoïdale

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	Fx	Mx	0
1	Fy	My	1
0	Fz	Mz	0

Liaison hélicoïdale d'axe \vec{Y} : transmet toutes les actions, mais les deux efforts F_y et M_z sont liés par la relation $M_z = \frac{p}{2\pi} \cdot F_y$.

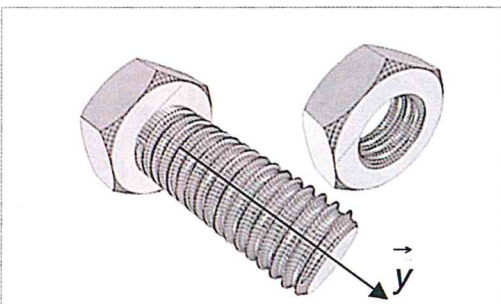


Fig. 14 Boulon d'assemblage

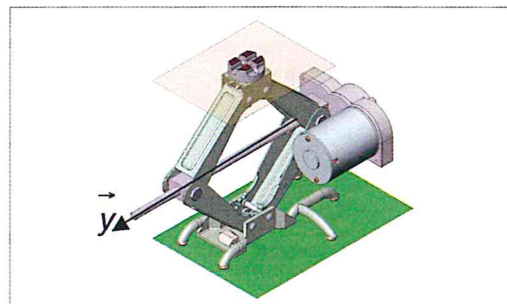


Fig. 15 Cric électrique automobile

f Liaison pivot glissant

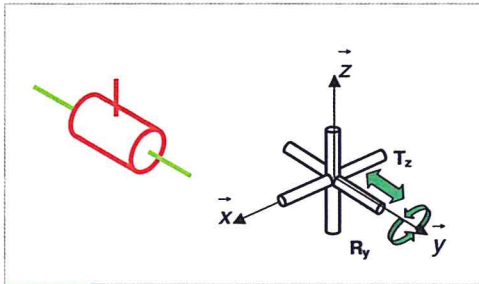


Fig. 16 Schéma spatial de la liaison pivot glissant

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F_x	M_x	0
1	0	0	1
0	F_z	M_z	0

Liaison pivot glissant d'axe \vec{Y} : ne peut pas transmettre de force ni de moment selon l'axe \vec{Y} .



Fig. 17 Barre de baby-foot



Fig. 18 Montage sur coussinet



Fig. 19 Pompe à vélo

MATÉRIEL ET STRUCTURES

g Liaison rotule à doigt

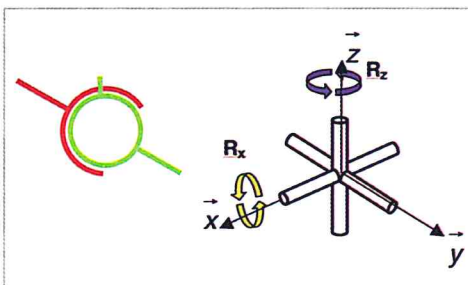


Fig. 20 Schéma spatial de la liaison rotule à doigt

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F_x	0	1
0	F_y	M_y	0
0	F_z	0	1

Liaison rotule à doigt d'axe \vec{Z} : peut transmettre toutes les forces et le moment autour de l'axe \vec{Y} .

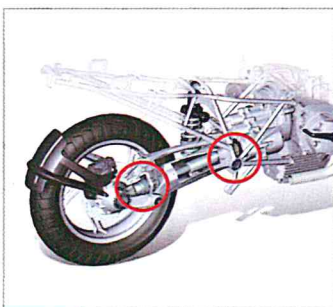


Fig. 21 Cardan de BMW 1200 GS



Fig. 22 Joint de cardan universel



Fig. 23 Joystick

h Liaison appui plan

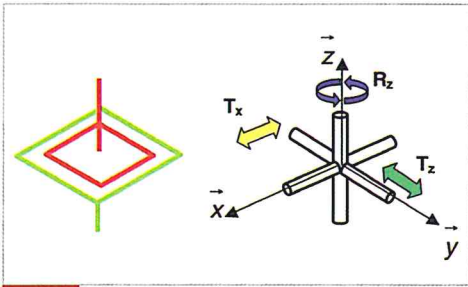


Fig. 24 Schéma spatial de la liaison appui plan

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
1	0	M_x	0
1	0	M_y	0
0	F_z	0	1

Liaison appui plan de normale \vec{Z} : peut transmettre une force selon \vec{Z} et des moments autour des axes X et Y .



Fig. 25 Tabouret à trois pieds



Fig. 26 Contact de scie sauteuse/planche

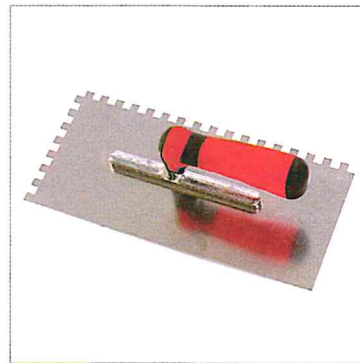


Fig. 27 Taloche de maçon

i Liaison rotule ou sphérique

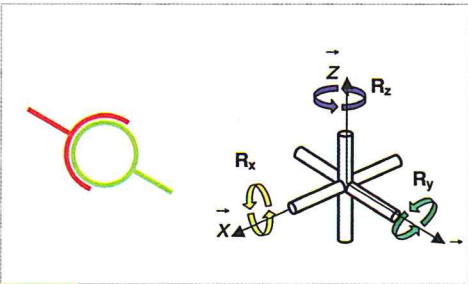


Fig. 28 Schéma spatial de la liaison rotule

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F_x	0	1
0	F_y	0	1
0	F_z	0	1

Liaison rotule : transmet toutes les forces mais ne peut transmettre aucun moment.



Fig. 29 Pied photo



Fig. 30 Pied réglable d'échelle



Fig. 31 Stabilisateur d'engin de chantier

j Liaison linéaire rectiligne

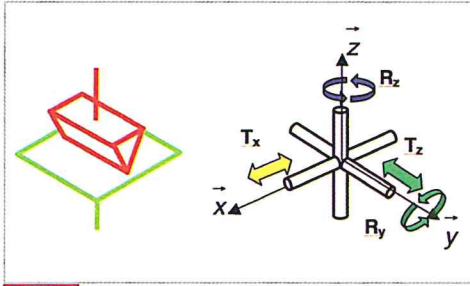


Fig. 32 Schéma spatial de la liaison linéaire rectiligne

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
1	0	M _x	0
1	0	0	1
0	F _z	0	1

Liaison Linéaire rectiligne d'axe \vec{Y} et de normale \vec{Z} : transmet une force selon \vec{Z} et un moment autour de l'axe X .

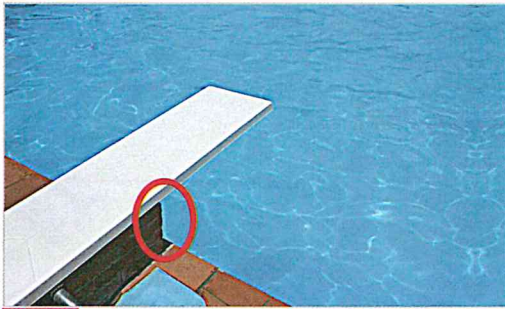


Fig. 33 Plongeur

k Liaison sphère-cylindre (linéaire annulaire)

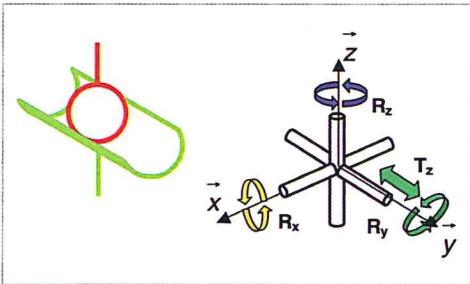


Fig. 34 Schéma spatial de la liaison linéaire annulaire

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
0	F _x	0	1
1	0	0	1
0	F _z	0	1

Liaison sphère-cylindre d'axe \vec{Y} : ne peut transmettre aucun moment ni de force selon l'axe \vec{Y} .

l Liaison sphère-plan (ponctuelle)

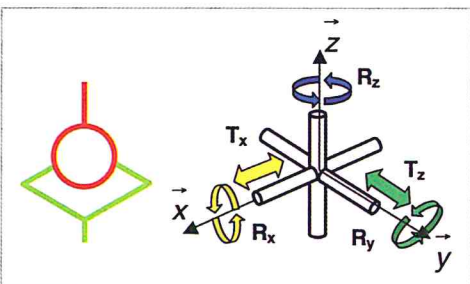


Fig. 35 Schéma spatial de la liaison linéaire ponctuelle

Translations	Actions transmissibles		Rotations
	Forces	Moments	
1	0	0	1
1	0	0	1
0	F _z	0	1

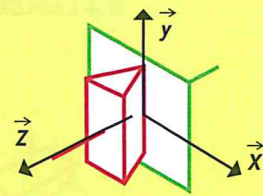
Liaison Sphère-plan de normale \vec{Z} : ne peut transmettre qu'une force selon l'axe \vec{Z} .

autres combinaisons de mouvements sont possibles, mais n'ont pas fait l'objet d'une formalisation. Elles peuvent souvent être modélisées comme un assemblage de liaisons formalisées.

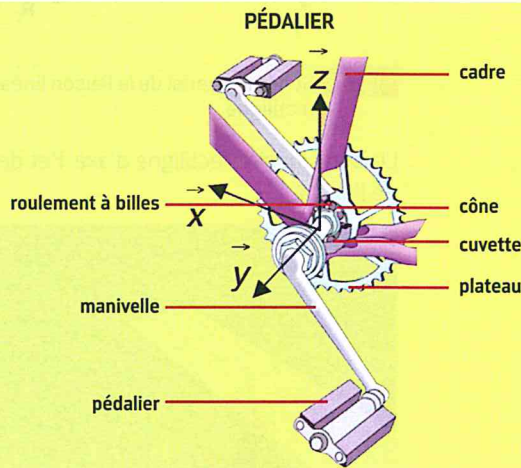
Changer l'orientation de l'axe de la liaison modifie les directions des efforts qu'elle peut transmettre, excepté pour la liaison rotule qui a pas d'axe privilégié.

Il est possible d'utiliser l'outil mathématique appelé tenseur pour résumer les caractéristiques des actions entre de la liaison, le tenseur de projection (force, moment) on parle alors de tenseur des actions transmissibles d'une liaison.

ACTIVITÉ 1 Déterminer les actions transmissibles par la liaison ci-contre.



ACTIVITÉ 2 L'image ci-contre représente la liaison entre l'axe du pédalier et le cadre d'un vélo. Quels mouvements sont possibles entre ces deux ensembles ? En déduire la nature de la liaison axe/cadre. Lorsque l'on appuie sur la pédale, quels sont les mouvements que l'on transmet au cadre ? En déduire les efforts transmissibles par cette liaison.



À partir des liaisons normalisées il est possible d'étudier deux cas limites :

1. Les solides ne sont pas infiniment rigides ce qui a pour premier effet d'écraser les géométries au droit des contacts (un point de contact est un peu écrasé et devient une petite surface circulaire ou sphérique, une ligne devient un rectangle ou une portion de cylindre) on parle alors d'actions mécaniques localisées. Le deuxième effet est la possible déformation des pièces accompagnée d'une certaine raideur. C'est le cas des liaisons élastiques pour lesquelles certains mouvements sont possibles mais à condition de fournir un effort minimal correspondant à l'effort nécessaire pour déformer les pièces.

2. Les contacts ne se font pas sans frottement, mais les géométries restent parfaites, on parle alors de liaisons réelles.

3 Caractérisation des liaisons réelles (avec frottement) par les actions transmissibles (selon NF EN 23952)

L'influence du frottement a été présentée dans le chapitre 7 sur les caractéristiques des matériaux. Les répercussions des frottements sur les liaisons sont présentées selon trois types de résistance au déplacement.

a Résistance au glissement

La résistance au glissement concerne plutôt les liaisons dont l'élément privilégié est la normale au contact c'est-à-dire les liaisons ponctuelle, linéaire rectiligne et appui plan, mais s'applique à tout point de contact susceptible de se déplacer en translation.

La force de résistance au glissement des deux solides se situe dans le plan tangent au contact.

Elle est en relation avec le coefficient de frottement statique μ_0 si les deux solides sont immobiles et dynamiques μ si les deux solides sont en déplacement.

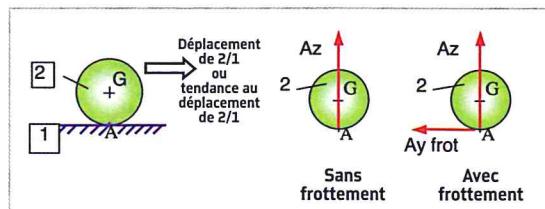


Fig. 36 Représentation de l'action de liaison résistance au glissement

b Résistance au roulement

La résistance au roulement concerne plutôt les liaisons : linéaire rectiligne et ponctuelle, mais s'applique à tout solide susceptible de se déplacer en rotation autour d'un axe contenu dans le plan tangent.

Lors du roulement, il y a création d'un « bourrelet ». Ce dernier tend à se déformer élastiquement ce qui provoque une résistance.

La force de résistance au roulement est en proportionnelle au résistance au roulement homogène à une longueur.

Elle a pour effet de créer un couple de résistance au roulement (parfois fourni par les fabricants) porté par le même axe que celui du mouvement de rotation.

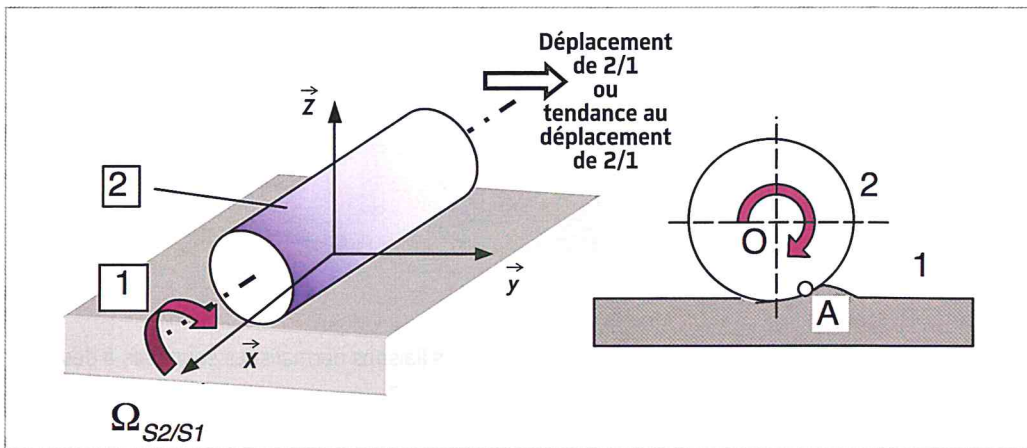


Fig. 37 Représentation de l'action de résistance au glissement

c Résistance au pivotement

La résistance au pivotement concerne plutôt les liaisons linéaire rectiligne, appui plan et pivot lissant, mais s'applique à tout solide susceptible de se déplacer en rotation autour de la normale au plan tangent de contact ou autour de l'axe cylindre de contact.

Lors du pivotement, chaque point de contact entre les deux solides glisse. Le frottement en chaque point provoque alors une résistance au déplacement en rotation.

La force de résistance au pivotement est proportionnelle au coefficient résistance au pivotement qui est homogène à une longueur.

Elle a pour effet de créer un couple de résistance au pivotement (parfois fourni par les fabricants) porté par la normale au plan de contact.

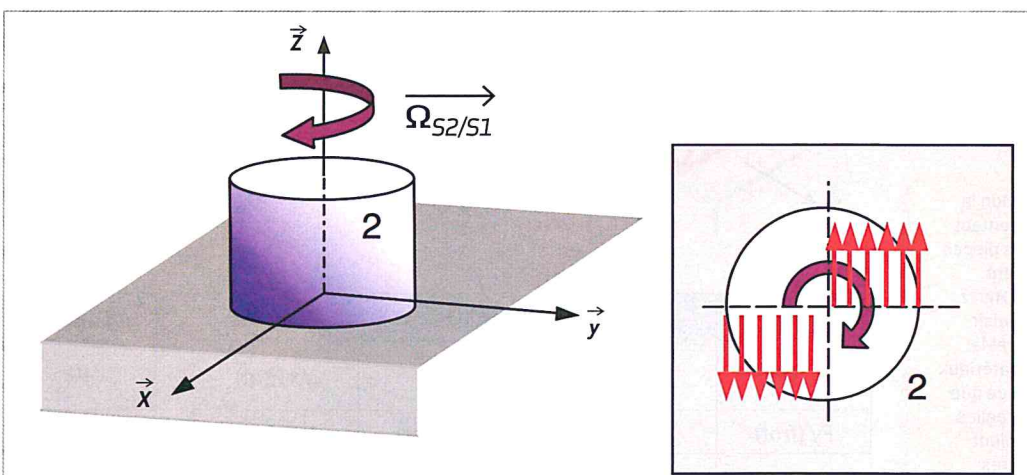


Fig. 38 Représentation de l'action de résistance au pivotement

ACTIVITÉ 3

La figure ci-dessous représente une poignée à ventouse qui ne demande aucune autre fixation et permet à l'utilisateur d'avoir une prise pour sortir de son bain. On modélise cette liaison par une liaison appui plan avec frottement. Déterminer les actions mécaniques transmissibles par cette liaison.

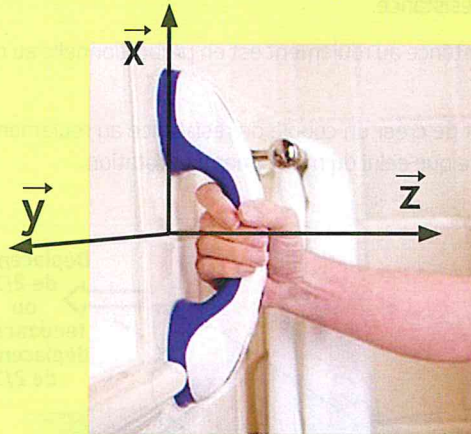
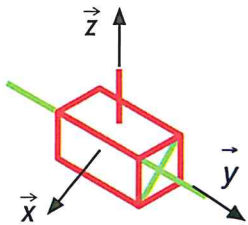
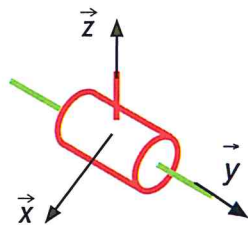


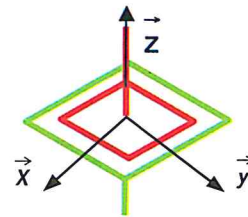
Tableau des actions transmissibles dans les liaisons normalisées soumises à des frottements



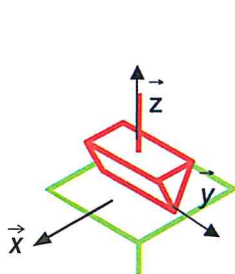
Forces	Moments
F_x	M_x
F_y (frot)	M_y
F_z	M_z



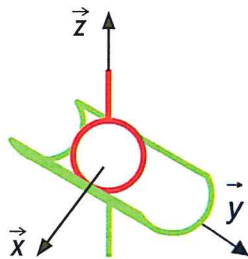
Forces	Moments
F_x	M_x
F_y (frot)	M_y (frot)
F_z	M_z



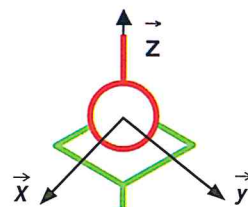
Forces	Moments
F_x (frot)	M_x
F_y (frot)	M_y
F_z	M_z (frot)



Forces	Moments
F_x (frot)	M_x
F_y (frot)	M_y (frot)
F_z	M_z (frot)



Forces	Moments
F_x	M_x (frot)
F_y (frot)	M_y (frot)
F_z	M_z (frot)

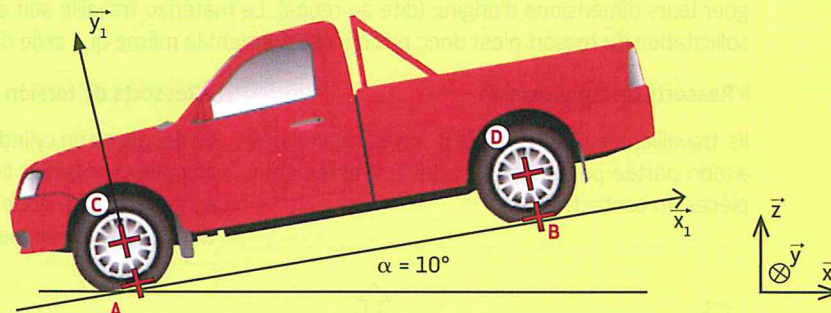


Forces	Moments
F_x	M_x (frot)
F_y (frot)	M_y (frot)
F_z	M_z (frot)

Pour une liaison ponctuelle le mouvement de rotation autour de la normale au plan est possible. La surface de contact étant réduite à un point, la résistance au roulement et la résistance au pivotement sont nuls.

Les efforts selon la normale au contact déforment les pièces par écrasement. La théorie de Hertz permet de choisir la résistance et la dureté des matériaux de manière à ce que les surfaces réelles de contact soient les plus réduites possibles.

ACTIVITÉ 4 La figure ci-dessous représente un véhicule en pente :



On émet les hypothèses suivantes :

- ▶ les pneus sont indéformables ;
- ▶ le contact pneu/sol peut être modélisé par une liaison ponctuelle, avec frottement.

Les liaisons des essieux avec le châssis en C et D sont modélisées par des pivots dans lesquelles les frottements résistent au roulement.

Exprimer les actions mécaniques transmissibles par les liaisons ponctuelles en A, B et C dans le repère $R(A, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$.

Que deviennent les actions mécaniques en A si le conducteur décide de tourner le volant ?

MATIÈRES ET STRUCTURES

4 Caractérisation des liaisons élastiques (avec déformation) (selon NF EN 23952)

L'influence des efforts sur la déformation d'un solide a été présentée dans le chapitre 7 sur les comportements mécaniques des matériaux.

La figure ci-dessous représente des étaux destinés à maintenir une pièce pendant son usinage.

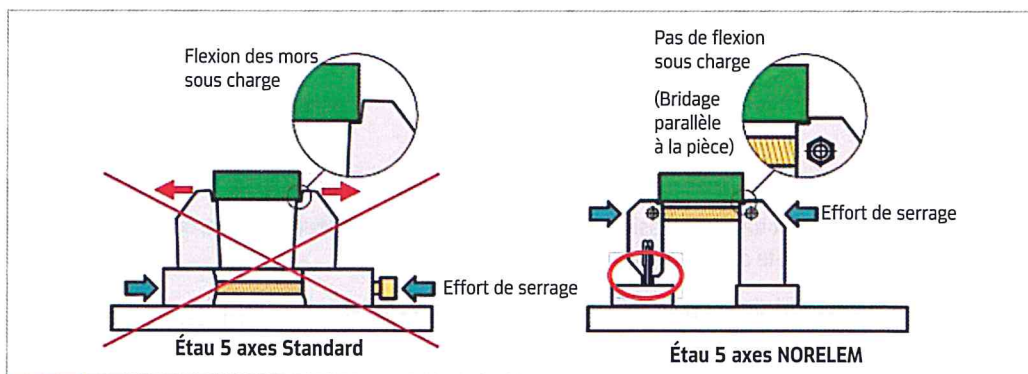


Fig. 39 Exemple de liaison encastrement élastique

L'étau standard ne permettait pas de tenir correctement la pièce. Il a été remplacé par une nouvelle version dans laquelle le mors mobile a été volontairement aminci de manière à rendre élastique la liaison complètement précédemment rigide. Quels efforts cette liaison peut-elle transmettre pour résister aux efforts de coupe qui ont lieu lors de l'usinage ?

D'après les lois de déformation des solides (loi de Hooke), tout solide qui se déforme dans le domaine élastique peut être considéré comme un ressort.

Le ressort est un élément déformable et élastique qui peut absorber de l'énergie mécanique lors de sa déformation et la restituer à tout instant et ce pour :

- ▶ assurer une fonction de rappel sur une pièce (repositionner une pièce à sa position initiale après un fonctionnement) ;
- ▶ amortir ou freiner le déplacement d'un composant.

a Classification des ressorts

Les ressorts sont classés à partir de la sollicitation reçue à laquelle ils s'opposent en essayant de regagner leurs dimensions d'origine (dite au repos). Le matériau travaille soit en torsion, soit en flexion. La sollicitation du ressort n'est donc pas nécessairement la même que celle du matériau.

► Ressorts de compression

Ils travaillent en se détendant, en générant une action portée par leur axe et qui écarte les deux pièces en contact.

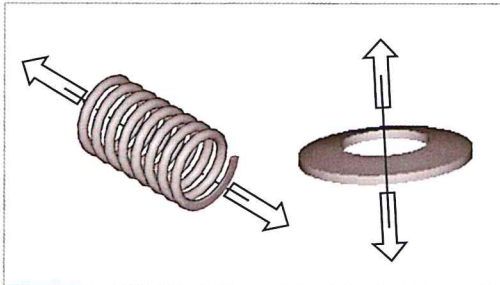


Fig. 40 Ressort hélicoïdal et rondelle ressort

► Ressorts de traction

Souvent munis de crochets aux extrémités, ils travaillent en se comprimant et génèrent une action portée par leur axe et qui rapprochent les deux pièces en contact.

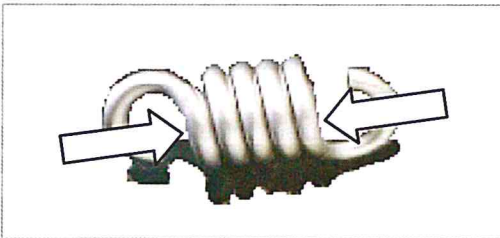


Fig. 41 Ressort hélicoïdal de traction

► Ressorts de torsion

En spirale ou en cylindre, leurs extrémités se fixent aux pièces voisines. Ils travaillent en se détendant et génèrent un couple porté par leur axe et qui tend à faire tourner les deux pièces en contact.

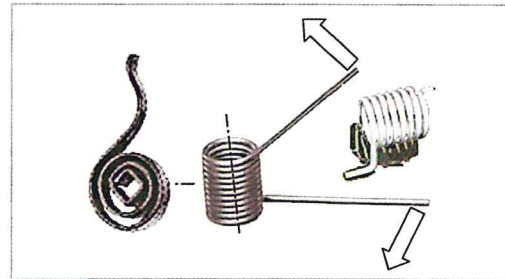


Fig. 42 Ressort hélicoïdal de torsion

► Ressorts de flexion

Souvent en forme de lame, ils travaillent en fléchissant et génèrent une action, portée par la perpendiculaire à leur forme allongée, tendant à faire s'éloigner ou se rapprocher les deux pièces en contact.

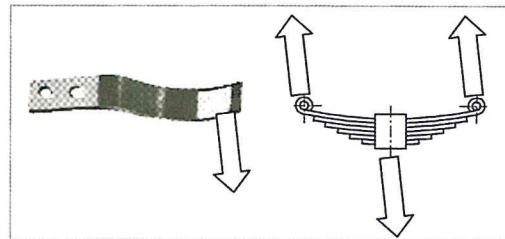


Fig. 43 Ressort hélicoïdal à lame

b Étude mécanique d'un ressort cylindrique de compression

Un ressort de compression est caractérisé par sa longueur à vide L_0 , son nombre de spires n , le diamètre du fil d et le diamètre moyen d'enroulement du fil D .

Le ressort de la figure 44 comporte 7 spires utiles ou 8 spires $\frac{1}{2}$ totales.

Il est soumis à une charge F qui tend à le comprimer.

En statique l'effort restitué par le ressort est proportionnel à sa déformation x ou flèche.

$$F(N) = K \cdot x \\ = K \cdot (L_0 - L) \quad \text{avec} \quad K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3}$$

L_0 : longueur avant déformation

L : longueur après déformation

x : flèche ($L_0 - L$)

n : nombre de spires utiles

G : module d'élasticité transversal

(ex. : 85 000 MPa pour l'acier).

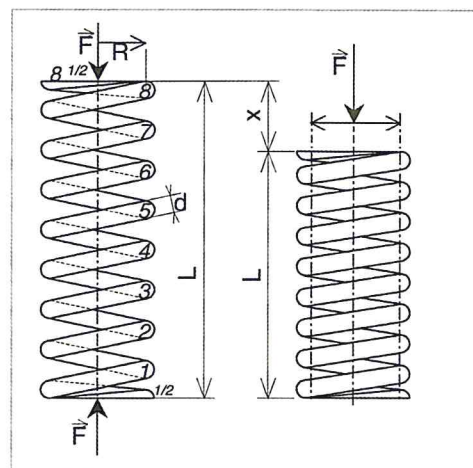


Fig. 44 Caractéristiques d'un ressort hélicoïdal de compression

c Étude mécanique d'un ressort hélicoïdal de torsion à fil rond

Un ressort de torsion est caractérisé par son nombre de spires n , le diamètre du fil d et le diamètre moyen d'enroulement du fil D .

À partir de ces données, on peut calculer sa longueur L , et selon la distance à laquelle on applique l'effort r , on peut déduire l'angle de distorsion α dont l'extrémité a tourné sous l'action de l'effort F .

$$\alpha = \frac{64.F.L.r}{\pi.E.d^4} \text{ avec } L = \pi.D.n.$$

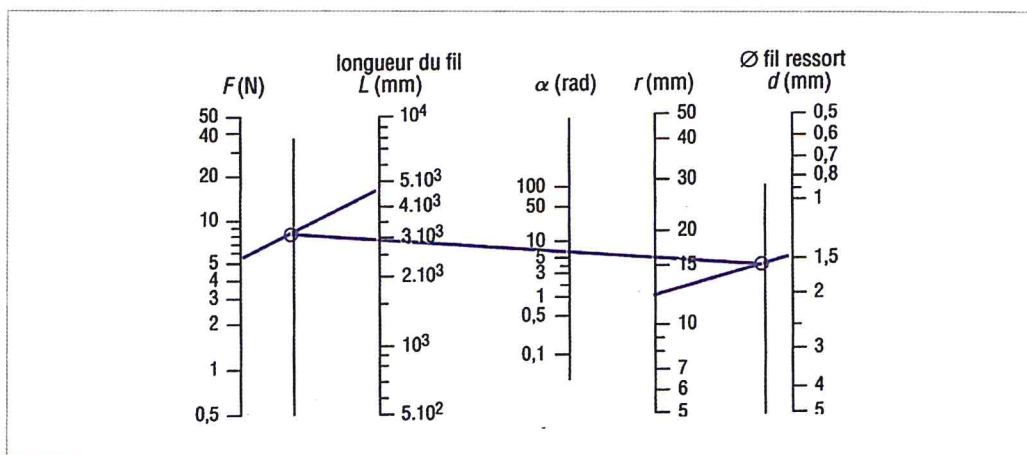


Fig. 45 Abaque de calcul de la déviation angulaire d'un ressort de torsion

MATIÈRES ET STRUCTURES

5 Modéliser par des liaisons

Modéliser, c'est faire un choix. Le choix d'une liaison lors de la conception d'un produit ou d'un ouvrage peut se faire selon plusieurs critères :

- ▶ le mouvement souhaité entre les deux pièces (à choisir parmi les 3 rotations et 3 translations possibles) comme vu précédemment ;
- ▶ la direction et l'intensité des actions mécaniques à transmettre ;
- ▶ les dimensions relatives des pièces (étendue des surfaces de contact).

La modélisation se fait en fonction du comportement attendu de la liaison. Elle peut varier en fonction :

- ▶ Les frottements, par exemple d'une roue libre de vélo qui, selon le sens de rotation, est considérée encastree avec le pignon arriere ou en liaison pivot ;
- ▶ des jeux, par exemple le contact entre une barre cylindrique et un alésage cylindrique peut être modélisé par un pivot glissant si le guidage est long ou par une linéaire annulaire si la prise en compte du jeu permet de dire que l'on doit tenir compte des trois rotations possibles pour établir le modèle de liaison ;
- ▶ des déformations des pièces. Par exemple l'assemblage de deux poutres métalliques par des rivets pourrait être considéré comme une liaison encastrement, mais selon le mode de réalisation, les concepteurs de bâtiments modélisent cette solution par une rotule car ils considèrent que la déformation de la liaison laisse libre le mouvement du reste de la structure du bâtiment.

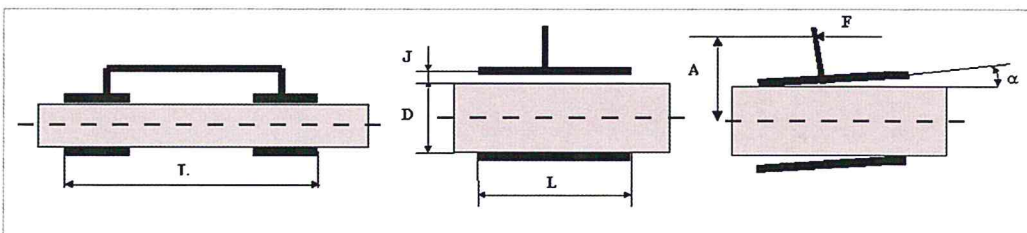
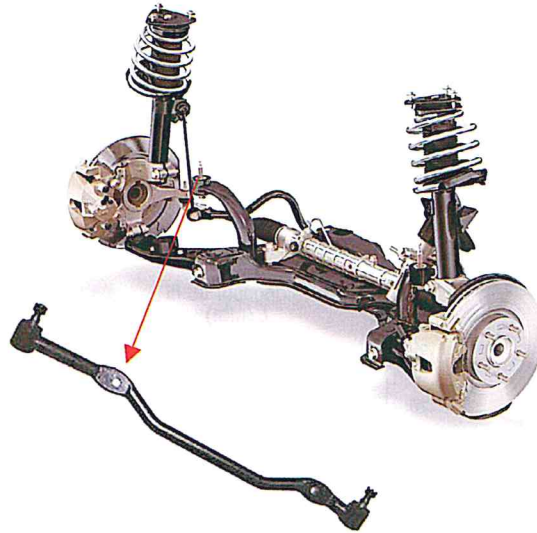


Fig. 46 Guidage cylindrique

EXEMPLE

Barre de torsion automobile



Cette pièce est encastrée à ces deux extrémités.

On pourrait donc la modéliser comme appartenant à un ensemble cinématique avec les deux bras de suspension.

Pourtant sa longueur et son diamètre sont tels que, sous les efforts appliqués, elle se déforme et se comporte comme un ressort de torsion.

Le modèle est donc choisi en fonction du comportement de la pièce dans le système.

SYNTHÈSE

Méthode pour déterminer les actions transmissibles par une liaison

1. Identifier les volumes des pièces (cylindre, parallélépipède, cône...).
2. En déduire les points, lignes, ou surfaces de contact.
3. Déterminer les mouvements possibles en considérant les contacts parfaits.
4. Compléter le tableau des déplacements.

$$\begin{matrix} T & R \\ \left(\begin{matrix} T_x & R_x \\ T_y & R_y \\ T_z & R_z \end{matrix} \right) \end{matrix}$$

5. En déduire les actions mécaniques selon le principe suivant :

- à chaque mouvement qu'il est possible d'effectuer entre les deux solides correspond une action mécanique nulle sur le même axe de déplacement ;

- il existe au maximum 6 mouvements c'est-à-dire 6 degrés de liberté ; si les 6 mouvements sont bloqués on peut transmettre 3 efforts et 3 couples.

6. Étudier les conditions de frottement pour ajouter des actions de résistance au déplacement.