3. SCHEMATISATION DES MECANISMES

Elaboré par : Youssef RAHOU, octobre 2018

1. Introduction :

En vue de conduire une étude cinématique, statique ou dynamique d'un mécanisme, il est nécessaire de commencer par schématiser son fonctionnement, sans pourtant inclure les détails structurels de ce mécanisme. **Un outil pratique** pour réaliser cela**,** est **le schéma cinématique,**

Il s'agit donc d'un outil de communication technique sous forme de représentation plane ou spatiale, simplifiée, d'un mécanisme, utilisant les schématisations normalisées des liaisons mécaniques usuelles, ne reliant que les ensembles fonctionnels du mécanisme.

L'objectif de ce cours, est d'apprendre à construire des schémas cinématiques plans et spatiaux en vue de pouvoir les utiliser par la suite pour mener une étude cinématique, statique ou dynamique, ou dans le cas général, une étude de conception d'un mécanisme donné.

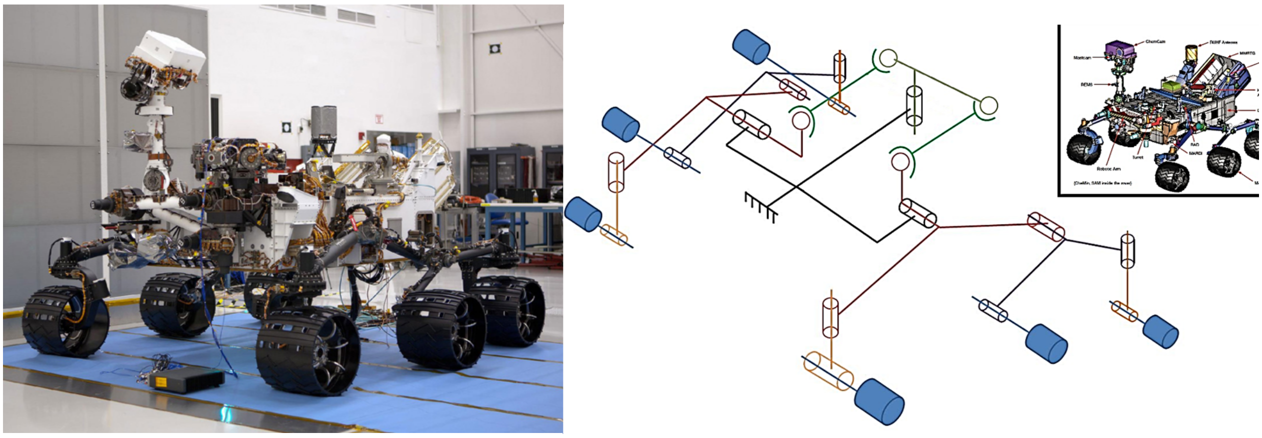


Figure.1. Sonde spatiale ''rover curiosity'', mécanisme réel et schéma cinématique spatiale.

2. Modélisation des mécanismes :

2.1. Modèle du solide indéformable :

Un mécanisme est un ensemble de **pièces mécaniques** reliées entre elles par **des liaisons**, en vue de réaliser une fonction donnée.

Ces pièces mécaniques, dans un premier temps, seront modélisées par **des solides indéformables**, à l'exception des pièces dont la déformation est nécessaire pour assurer le fonctionnement du mécanisme, les ressorts en consiste un exemple. Qu'est-ce qu'un solide indéformable donc ?

Une pièce mécanique (S) peut être modélisée par un solide indéformable, si pout tous points A et B de (S), **la distance AB reste constante** dans le temps.

.

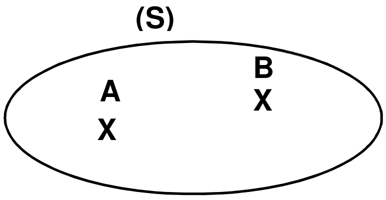


Figure.2. Modèle du solide indéformable, ∀(A, B) de (S), AB=Cte.

2.2. Modélisation des liaisons :

Rappelons que l'objectif global est d'associer un schéma cinématique, qui soit **le plus représentatif et le plus fidèle** au mécanisme, tout en **étant simple** à construire et à comprendre.

Ce mécanisme est composé de pièces modélisées par des solides indéformables, reste à modéliser les liaisons mécaniques entre ces pièces.

Pour caractériser les liaisons possibles entre les pièces mécaniques, **il faut commencer par caractériser les contacts existants entre ces pièces.**

2.2.1. **Les contacts :**

Par définition, un solide possède trois dimensions, par conséquent, entre deux solides indéformables donnés, il existe trois types de contact :

- **Contact surfacique**, à deux dimensions.
- **Contact linéique**, suivant une **ligne** quelconque (droite ou non), donc contact a une seule dimension.
- **Contact ponctuel**, sous forme de **point**, donc à zéro dimension.

En prenons trois volumes élémentaires, qui sont, le parallélépipède, le cylindre ainsi que la sphère, voyons la nature des surfaces de contact obtenues en combinant ces trois volumes :

A. Le contact surfacique :

Le contact surfacique peut être de type :

- **plan-plan**, dans ce cas, la forme du contact surfacique est plane.

- **Cylindre-cylindre**, dans ce cas, la forme du contact surfacique est cylindrique.
- **Sphère-sphère**, dans ce cas, la forme du contact surfacique est sphérique.

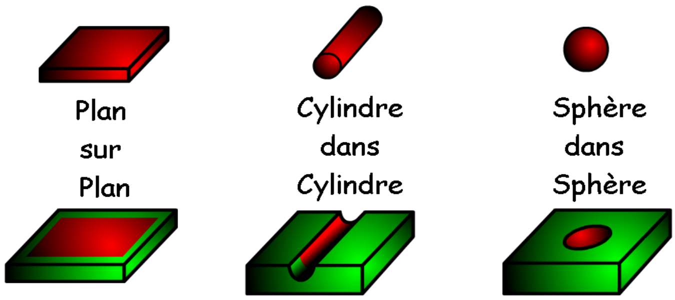


Figure.3. Le contact surfacique, trois configurations possibles.

B. Le contact linéique :

Le contact linéique peut être de type :

- **Plan-cylindre**, dans ce cas, la forme du **contact linéique est une droite**.
- **Cylindre-cylindre**, dans ce cas, la forme du **contact linéique est une droite aussi**.
- **Sphère-cylindre**, dans ce cas, la forme du **contact linéique est annulaire, c'est-à-dire, en forme d'anneau.**
- **Sphère-trou**, dans ce cas, la forme du **contact linéique est aussi annulaire**.

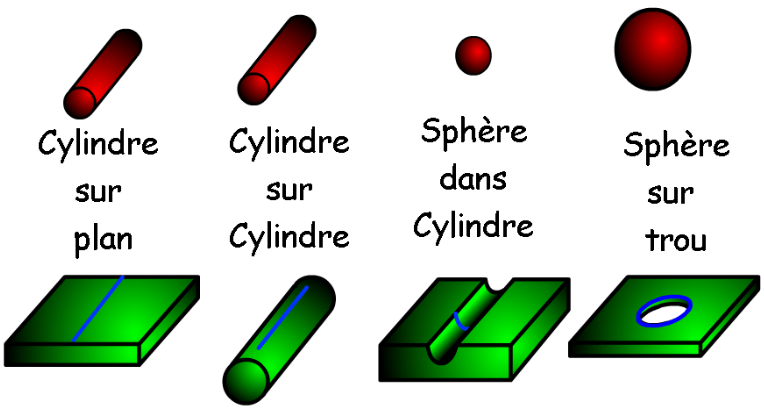


Figure.4. Le contact linéique, deux familles principales et quatre configurations possibles.

Remarque :

On remarque, que le contact linéique est, soit **rectiligne**, donc de forme droite (les deux premiers types), ou **annulaire**, donc en forme d'anneau (les deux derniers types).

C. Le contact ponctuel :

Le contact ponctuel est de type :

- Sphère-plan, dans ce cas, la forme du **contact est un point.**

Figure.5. Le contact ponctuel, une seule configuration possible.

En synthèse, **entre deux solides indéformables, il existe trois types de contact : surfacique (plan, cylindre ou sphère), linéique (rectiligne ou annulaire) ou ponctuel.**

2.2.2. Les modèles des liaisons :

Rappelons que, l'objectif est toujours d'établir un schéma cinématique associé au mécanisme réel, pour se faire, on modélise les pièces mécaniques par des solides indéformables. De même**, il faut modéliser les liaisons réelles entre pièces mécaniques par des liaisons théoriques**.

La typologie des contacts précédemment développés, permet de définir **les modèles de liaisons usuelles**, qui pourraient exister entre deux solides indéformables (S1) et (S2). On parle de **modèle de liaison**, puisqu'il s'agit d'une **liaison théorique** associée à une **liaison réelle** sous **quelques hypothèses**.

Il existe 11 modèles de liaisons usuelles permettant de décrire la liaison réelle entre deux solides indéformables quelconques.

Le **modèle de liaison** entre les deux solides (S1) et (S2), est un modèle théorique caractérisé par :

- Une définition géométrique.
- Les mouvements relatifs possibles entre (S1) et (S2) en termes de deux types de mouvements élémentaires, qui sont la translation (T) et la rotation (R) ainsi que **le nombre de degré de liberté,**

Le nombre de degré de liberté est le nombre de mouvements élémentaires indépendants de translation et de rotation que la liaison autorise.

- **Une désignation**, c'est-à-dire une caractérisation en termes d'éléments géométriques (axe, centre, normale).
- Une schématisation plane **normalisée**.
- Une schématisation spatiale **normalisée**.

Remarque :

Les modèles de liaison à définir sont orientés, pour cela, on définit un repère orthonormée R $(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$, **qui sera placé sur chaque modèle de liaison**, pour permettre de décrire les mouvements élémentaires relatifs possibles entre (S1) et (S2) (translation, rotation), suivant les axes $(O,\vec{x})$, $(O,\vec{y})$, $(O,\vec{z})$ qui sont respectivement (T_x, R_x), (T_y, R_y) et (T_z, R_z). Ce repère n'est lié à aucun des deux solides (S1) et (S2).

A. La liaison ponctuelle :

- <u>Définition géométrique :</u>

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison ponctuelle si, lors de leur mouvement relatif, **un point A_2** de (S2) reste dans **un plan P_1** de (S1) :

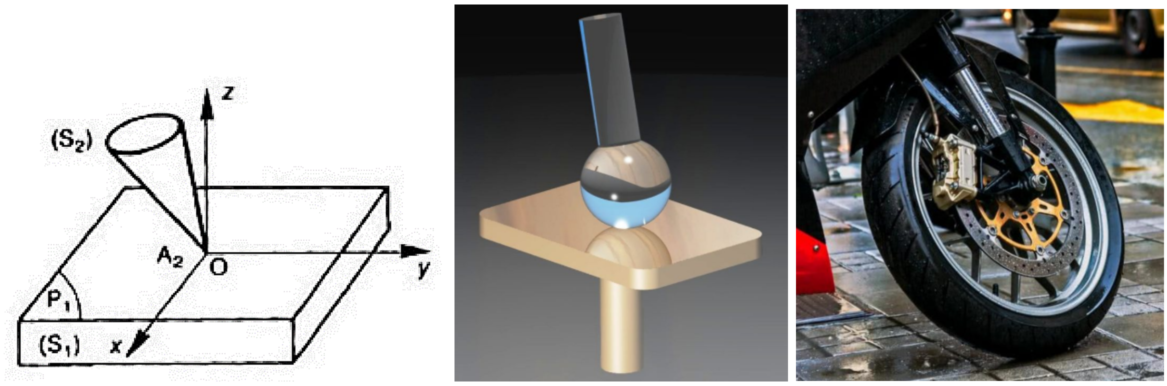


Figure.6. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison ponctuelle.

- <u>Les mouvements relatifs :</u>

Dans le repère **R**, tel que 0 et A_2 soient confondus et le vecteur $\vec{z}$ soit perpendiculaire au plan P_1. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 3 rotations R_X, R_y et R_z autour des axes (O,$\vec{x}$), (O,$\vec{y}$) et (O,$\vec{z}$).
- 2 translations T_x et T_y suivant les axes (O,$\vec{x}$) et (O,$\vec{y}$).

Le nombre de degré de liberté pour une liaison ponctuelle est donc 5.

- <u>Désignation de la liaison ponctuelle :</u>

La liaison ponctuelle est désignée par :

- Le point unique de contact.
- La normale suivant la direction ou il n y a pas de mouvement de translation possible.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison ponctuelle de normale (O,$\vec{z}$)**.

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

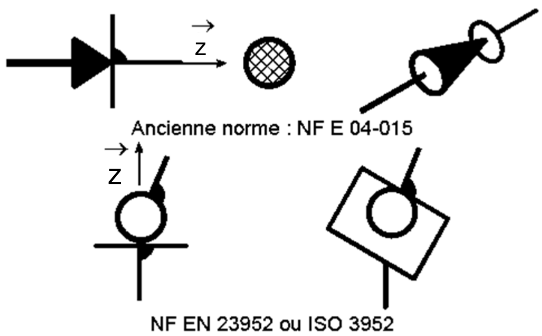


Figure.7. Schématisations normalisée de la liaison ponctuelle, à gauche : sch. plan, à droite : sch. spatial.

B. La liaison linéaire rectiligne :

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison linéaire rectiligne si, lors de leur mouvement relatif, **une droite D_2** de (S2) reste dans **un plan P_1** de (S1) :

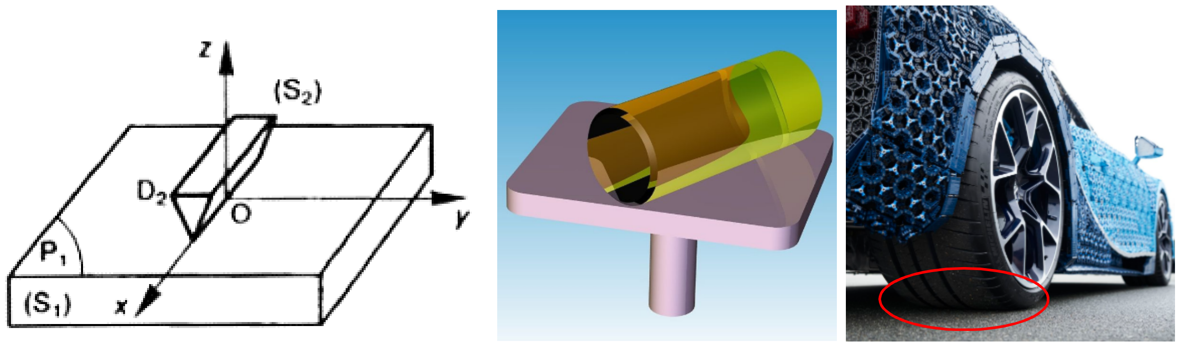


Figure.8. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison linéaire rectiligne.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, tel que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec la droite D_2 et le vecteur $\vec{z}$ soit perpendiculaire au plan P_1.
Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 2 rotations R_X, R_z autour des axes $(O,\vec{x})$ et $(O,\vec{z})$.
- 2 translations T_x et T_y suivant les axes $(O,\vec{x})$ et $(O,\vec{y})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison linéaire rectiligne est donc 4

- Désignation de la liaison linéaire rectiligne :

La liaison linéaire rectiligne est désignée par :

- Un point quelconque de la droite de contact.
- Un axe, qui est confondu avec la droite de contact.
- Une normale suivant la direction ou il n y a pas de mouvement de translation possible.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison linéaire rectiligne d'axe $(O,\vec{x})$, de normale $(O,\vec{z})$.**

- Schématisations plane et spatiale normalisées :

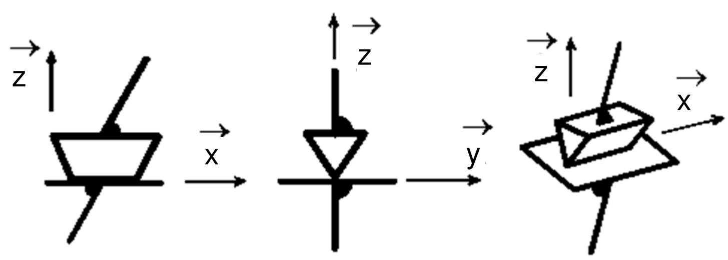


Figure.9. Schématisations normalisées de la liaison linéaire rectiligne, à gauche et milieu: sch. plan, à droite : sch. spatial.

C. La liaison linéaire annulaire :

- <u>Définition géométrique :</u>

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison linéaire annulaire si, lors de leur mouvement relatif, **un point A_2** de (S2) reste sur **une droite D_1** de (S1) :

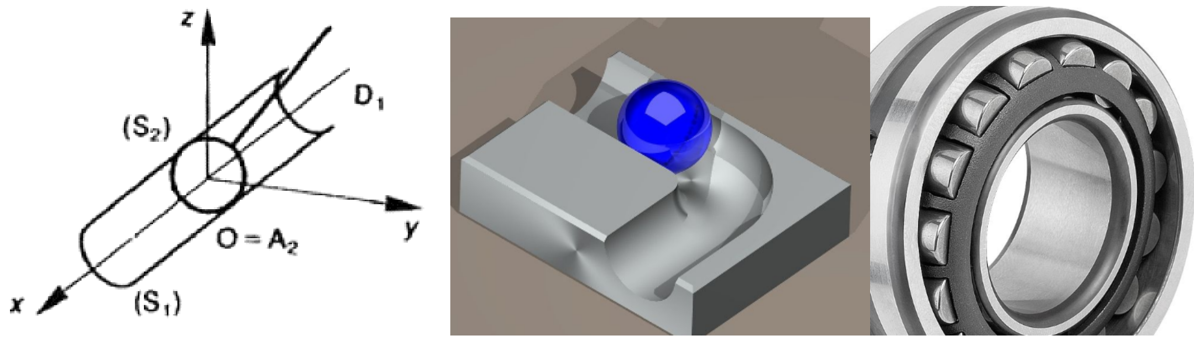


Figure.10. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel (roulement à rotule) de la liaison linéaire annulaire.

- <u>Les mouvements relatifs :</u>

Dans le repère **R**, d'origine $O=A_2$, tel que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec la droite D_1.
Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 3 rotations R_X, R_y et R_z autour des axes $(O,\vec{x})$, $(O,\vec{y})$.et $(O,\vec{z})$.
- 1 translation T_x suivant l'axe $(O,\vec{x})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison linéaire annulaire est donc 4.

- <u>Désignation de la liaison linéaire annulaire :</u>

La liaison linéaire annulaire est désignée par :

- Un point quelconque de la droite D_2.
- Un axe, qui est confondu avec la droite D_2.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison linéaire annulaire d'axe $(O,\vec{x})$.**

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

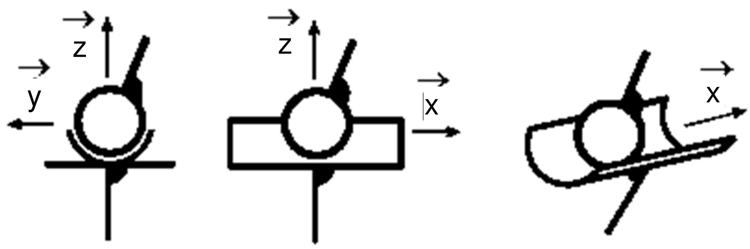


Figure.11. Schématisations normalisées de la liaison linéaire annulaire, à gauche et milieu: sch. plan, à droite : sch. spatial.

D. La liaison rotule ou sphérique :

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison sphérique si, lors de leur mouvement relatif, **un point A_2** de (S2) reste confondu avec **un point A_1** de (S1) :

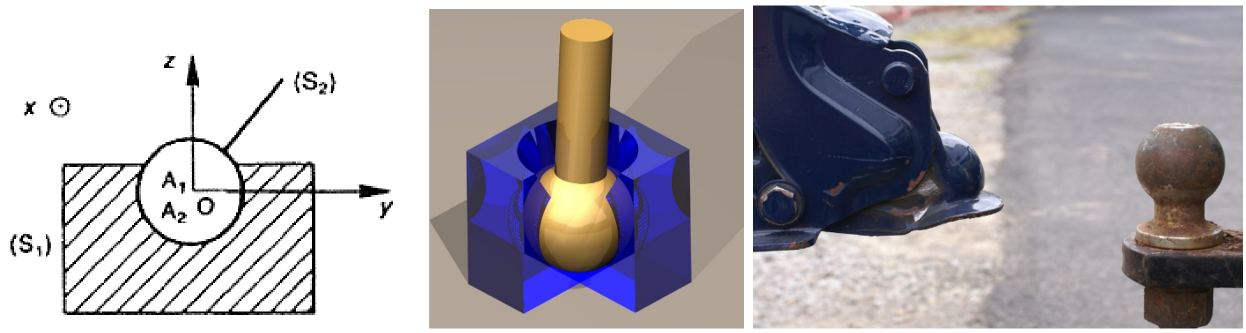


Figure.12. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison rotule.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, d'origine O= A_1=A_2. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 3 rotations R_X, R_y et R_z autour des axes $(O,\vec{x})$, $(O,\vec{y})$.et $(O,\vec{z})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison rotule est donc 3.

- Désignation de la liaison rotule :

La liaison rotule est désignée par :

- Un centre, qui correspond au point fixe lors du mouvement relatif entre (S1) et (S2), ici O=A_1=A_2.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison rotule de centre 0.**

- Schématisations plane et spatiale normalisées :

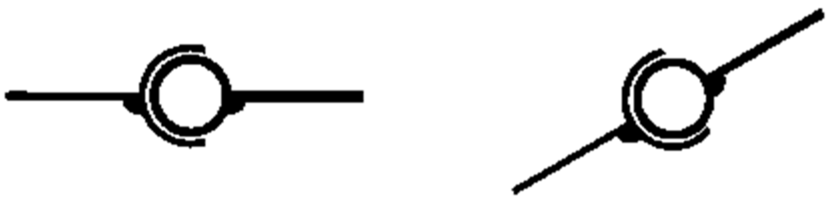


Figure.13. Schématisation normalisée de la liaison rotule (schémas plan et spatial identiques).

E. La liaison appui plan :

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison appui plan si, lors de leur mouvement relatif, **un plan P_2** de (S2) reste confondu avec **un plan P_1** de (S1) :

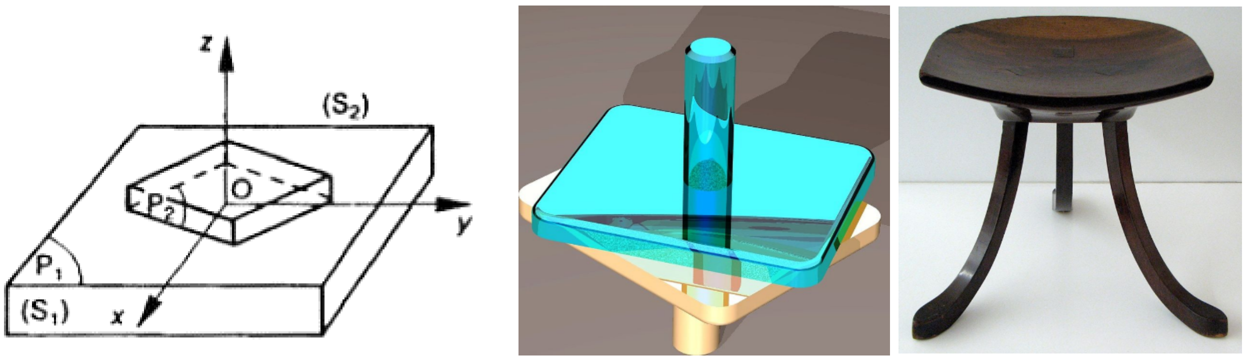


Figure.14. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison appui plan.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, te que le vecteur $\vec{z}$ soit perpendiculaire aux plans P_1 et P_2. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 1 rotation R_z autour de l'axe $(O,\vec{z})$.
- 2 translations T_x et T_y suivant les axes $(O,\vec{x})$ et $(O,\vec{y})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison appui plan est donc 3.

- Désignation de la liaison appui plan :

La liaison appui plan est désignée par :

- Un point quelconque du plan de contact, O par exemple.
- La normale suivant la direction ou il n y a pas de mouvement de translation possible.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison appui plan de normale $(O,\vec{z})$**.

- Schématisations plane et spatiale normalisées :

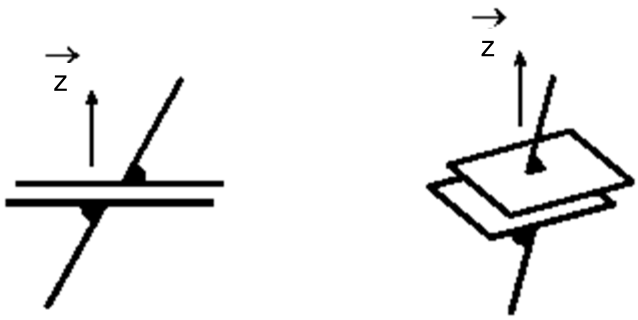


Figure.15. Schématisations normalisées de la liaison appui plan, à gauche : sch. plan, à droite : sch. spatial.

F. La liaison pivot glissant :

- <u>Définition géométrique :</u>

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison pivot glissant si, lors de leur mouvement relatif, **une droite D_2** de (S2) reste confondue avec **une droite D_1** de (S1) :

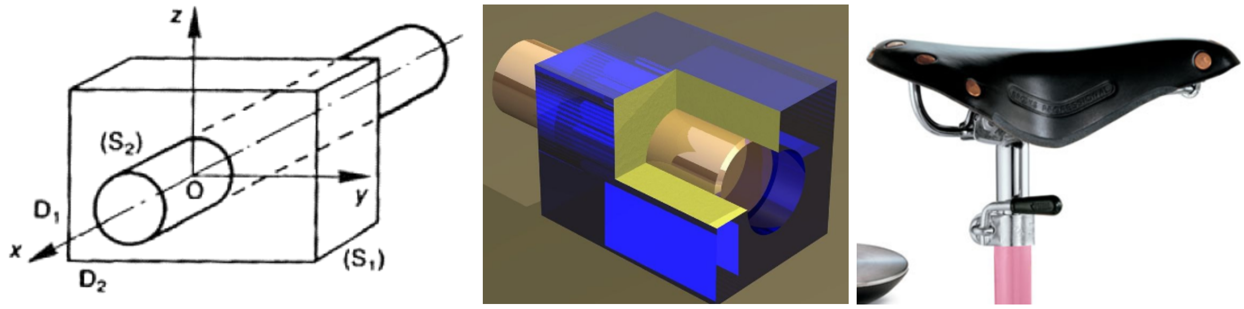


Figure.16. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison pivot glissant.

- <u>Les mouvements relatifs :</u>

Dans le repère **R**, te que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec les droites D_1 et D_2**.** Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 1 rotation R_X autour de l'axe $(O,\vec{x})$.
- 1 translation T_x suivant l'axe $(O,\vec{x})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison pivot glissant est donc 2.

- <u>Désignation de la liaison pivot glissant :</u>

La liaison pivot glissant est désignée par :

- Un point quelconque de la droite $D_1=D_2$, O par exemple.
- Un axe, qui est confondu avec la droite $D_1=D_2$.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison pivot glissant d'axe $(O,\vec{x})$**.

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

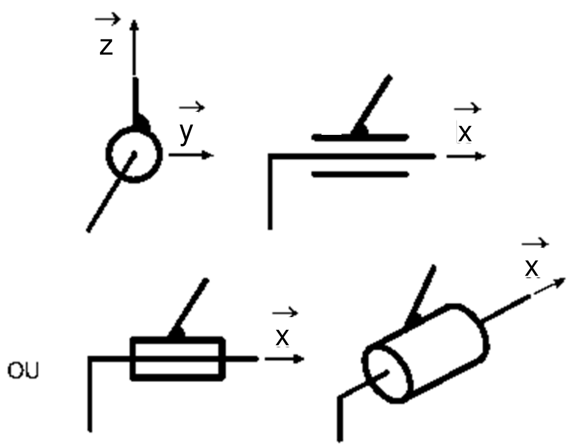


Figure.17. Schématisations normalisées de la liaison pivot glissant.

G. La liaison sphérique à doigt :

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison sphérique à doigt si, lors de leur mouvement relatif, d'une part, **un point A_2** de (S2) reste confondu avec **un point A_1** de (S1), et d'autre part, un autre **point B_2** de (S2) reste dans **un plan P_1 de (S1) contenant le point A_1**.

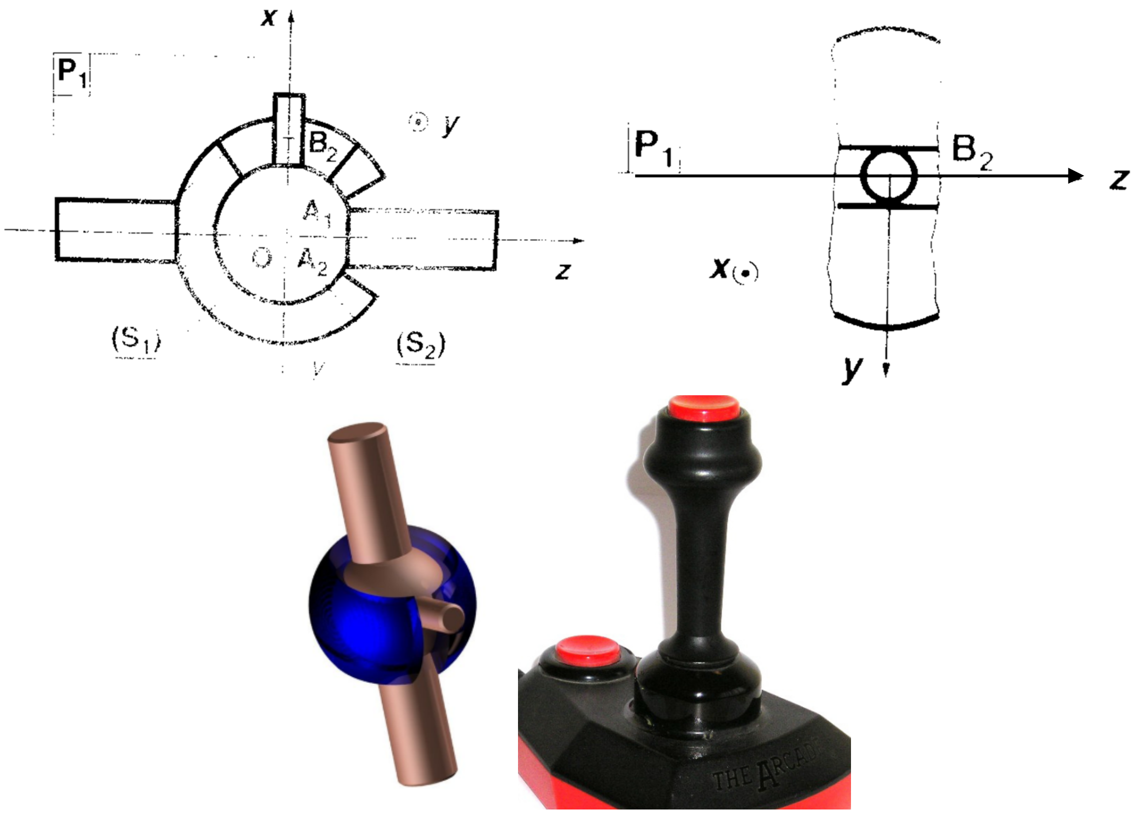


Figure.18. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison sphérique à doigt.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, d'origine O= A_1=A_2, l'axe (O,$\vec{x}$) suivant A_2B_2 et l'axe (O,$\vec{y}$) normal au plan P_1. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 2 rotations R_x et R_y autour des axes (O,$\vec{x}$) et (O,$\vec{y}$), le doigt empêche la rotation R_z.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison sphérique à doigt est donc 2.

- Désignation de la liaison sphérique à doigt :

La liaison sphérique à doigt est désignée par :

- Un centre, qui correspond au point fixe lors du mouvement relatif entre (S1) et (S2), ici O=A_1=A_2.
- Un axe, qui est confondu avec le doigt, ici (O,$\vec{x}$).
- Un autre axe, normal au plan P_1, ici (O,$\vec{y}$).

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison sphérique à doigt d'axes (O,$\vec{x}$) et (O,$\vec{y}$).**

- Schématisations plane et spatiale normalisées :

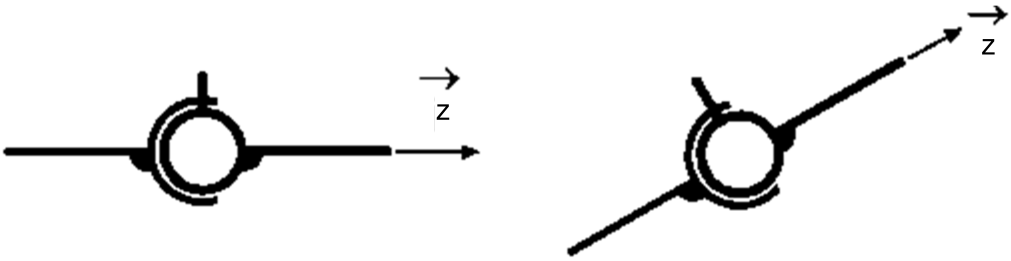


Figure.19. Schématisation normalisée de la liaison sphérique à doigt (schémas plan et spatial identiques).

H. La liaison pivot :

- <u>Définition géométrique :</u>

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison pivot si, lors de leur mouvement relatif, **deux points A_2 et B_2** de (S2), distants d'une longueur l, reste confondus avec **deux points A_1 et B_1** de (S1), distants d'une même longueur l.

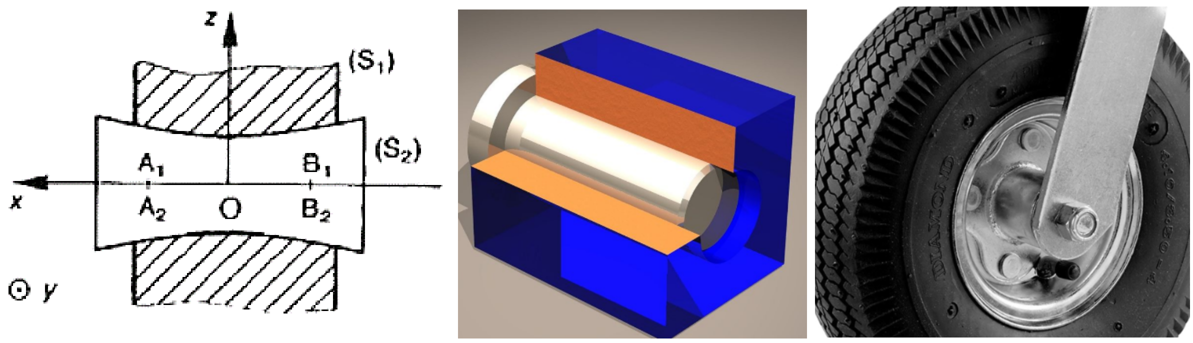


Figure.20. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison pivot.

- <u>Les mouvements relatifs :</u>

Dans le repère **R**, te que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec les droites A_1B_1 et A_2B_2. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se compose de :

- 1 rotation R_X autour de l'axe $(O,\vec{x})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison pivot est donc 1.

- <u>Désignation de la liaison pivot :</u>

La liaison pivot est désignée par :

- Un point quelconque de la droite $A_1B_1=A_2B_2$, O par exemple.
- Un axe, qui est confondu avec la droite $A_1B_1=A_2B_2$.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison pivot d'axe $(O,\vec{x})$**.

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

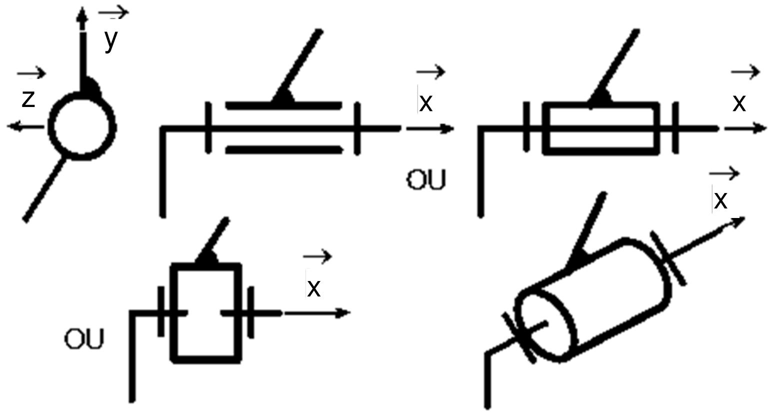


Figure.21. Schématisations normalisées de la liaison pivot.

I. La liaison glissière :

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison glissière si, lors de leur mouvement relatif, d'une part, **un plan P_2** de (S2) reste confondu avec **un plan P_1** de (S1), et d'autre part, **une droite D_2 liée à (S2) et située dans le plan P_2** reste confondue avec **une droite D_1 liée à (S1) et située dans le plan P_1.**

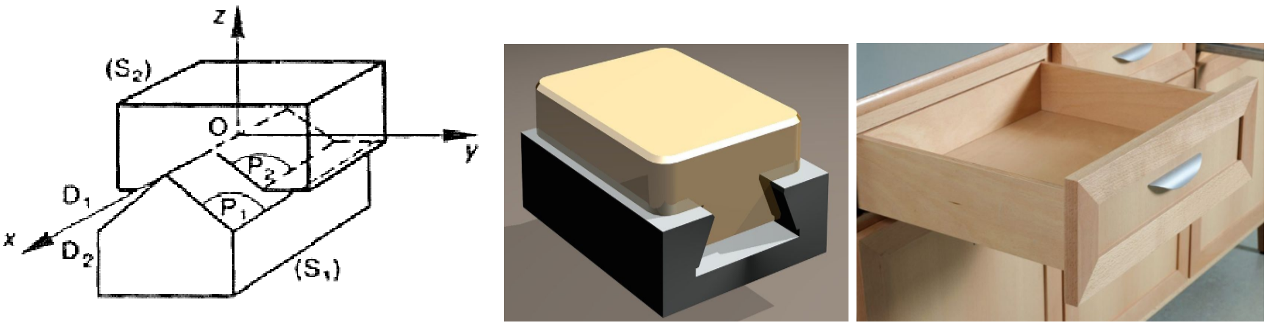


Figure.22. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison glissière.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, te que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec les droites D_1 et D_2. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se compose de :

- 1 translation T_X suivant l'axe $(O,\vec{x})$.

Le nombre de degré de liberté pour une liaison glissière est donc 1.

- Désignation de la liaison glissière :

La liaison glissière est désignée par :

- Un point quelconque de la droite $D_1=D_2$, O par exemple.
- Un axe, qui est confondu avec la droite $D_1=D_2$.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison glissière d'axe $(O,\vec{x})$**.

- Schématisations plane et spatiale normalisées :

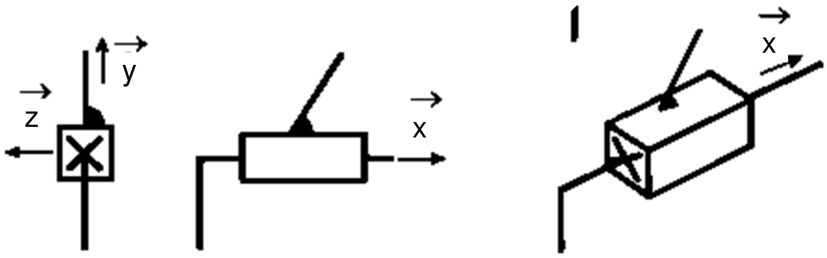


Figure.23. Schématisations normalisées de la liaison glissière.

J. *La liaison hélicoïdale :*

- Définition géométrique :

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison pivot si, lors de leur mouvement relatif, d'une part, **une droite D_2** de (S2) reste confondue avec **l'axe D_1** d'une hélice circulaire H_1 de rayon r liée à (S1), et d'autre part, un point A_2 de (S2) situé à une distance r de D_2 décrit l'hélice circulaire H_1.

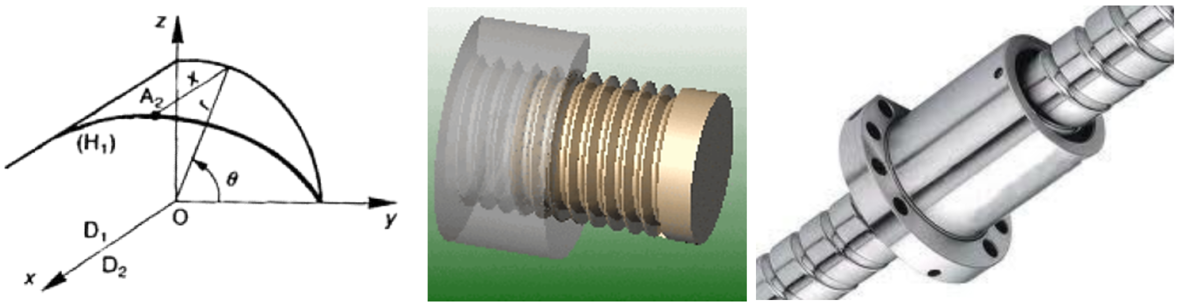


Figure.24. Représentation géométrique générale, modèle et exemple réel de la liaison hélicoïdale.

- Les mouvements relatifs :

Dans le repère **R**, te que l'axe $(O,\vec{x})$ soit confondu avec les droites D_1 et D_2. Le mouvement relatif de (S2) par rapport (S1) se décompose en :

- 1 rotation R_X autour de l'axe $(O,\vec{x})$.
- 1 translation T_X suivant l'axe $(O,\vec{x})$.

Cependant, ces deux mouvements ne sont pas indépendants, en effet, on ne peut pas réaliser la rotation sans entraîner la translation, ni l'inverse. Par conséquent **le nombre de degré de liberté pour une liaison hélicoïdale est donc 1.**

Remarque :

Il existe une relation linéaire entre le mouvement de translation et le mouvement de rotation.

- <u>Désignation de la liaison hélicoïdale :</u>

La liaison hélicoïdale est désignée par :

- Un point quelconque de la droite $D_1=D_2$, O par exemple.
- Un axe, qui est confondu avec la droite $D_1=D_2$.

Dans la configuration ci-dessus, on parle de **liaison hélicoïdale d'axe (O,$\vec{x}$)**.

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

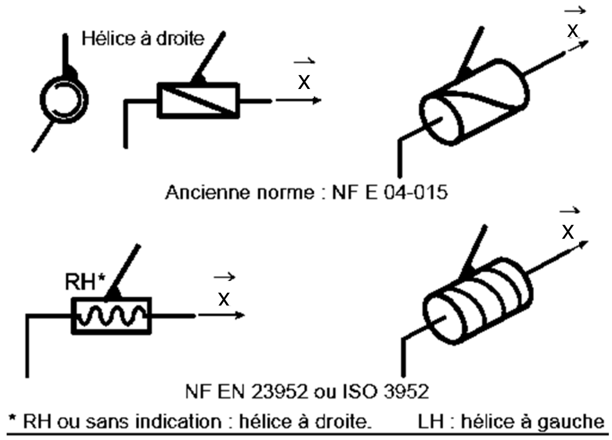


Figure.25. Schématisations normalisées de la liaison hélicoïdale.

K. La liaison encastrement :

- <u>Définition géométrique :</u>

Le deux solides (S1) et (S2) ont une liaison encastrement si, lors de leur mouvement relatif, d'une part, **une droite D_2** de (S2) reste confondue avec **une droite D_1** de (S1), et d'autre part, un point A_2 de (S2) situé à une distance d non nulle de D_2, reste confondu avec un point A_1 de (S1) situé à la même distance d de D_1.

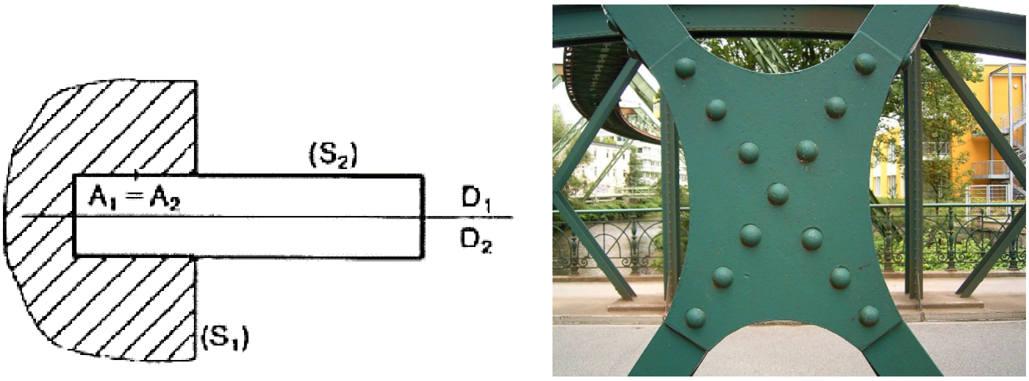


Figure.26. Représentation géométrique générale et exemple réel de la liaison encastrement.

- <u>Les mouvements relatifs :</u>

La liaison encastrement ne permet aucun mouvement relatif entre (S1) et (S2).

- <u>Désignation de la liaison encastrement :</u>

Simplement, **liaison encastrement**.

- <u>Schématisations plane et spatiale normalisées :</u>

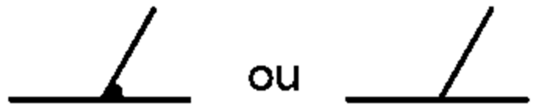


Figure.27. Schématisation normalisée de la liaison encastrement.

2.3. La notion de classe d'équivalence (ou sous-ensemble fonctionnel) :

Un mécanisme est toujours composé de plusieurs pièces mécaniques, mais beaucoup d'entre elles ne présentent aucun mouvement relatif, c'est-à-dire, qu'elles sont liées par des liaisons encastrement.

Une classe d'équivalence cinématique est l'ensemble des **pièces mécaniques reliées entre elles par des liaisons encastrement**, ces pièces mécaniques sont dites **cinématiquement équivalentes.**

Remarque :

- Présenter des pièces mécaniques en liaison encastrement dans un schéma cinématique ne présente que peu d'intérêt. C'est pour cela **qu'on ne s'intéressera qu'aux ensembles de pièces mécaniques en mouvement relatif**. D'où le besoin de **définir la notion de classe d'équivalence**.
- Une classe d'équivalence est souvent désignée par une lettre majuscule. Il est pratique de présenter chaque classe d'équivalence avec une couleur différente.

2.4. La notion de graphe des liaisons :

Il s'agit d'un **outil simple et pratique permettant d'établir un schéma cinématique**, en particulier quand le mécanisme étudié présente plusieurs pièces en mouvement relatif.

Le graphe des liaisons a d'autres utilisations, comme l'étude des liaisons équivalentes, l'étude statique ou dynamique d'un mécanisme donné**, avec un objectif clé, qui est celui de représenter l'ensemble des classes d'équivalence du mécanisme ainsi que les liaisons entre elles** avec un seul graphe, claire et communicatif.

Dans un graphe des liaisons, les classes d'équivalence sont représentées par des cercles et les liaisons par des arcs liant ces cercles.

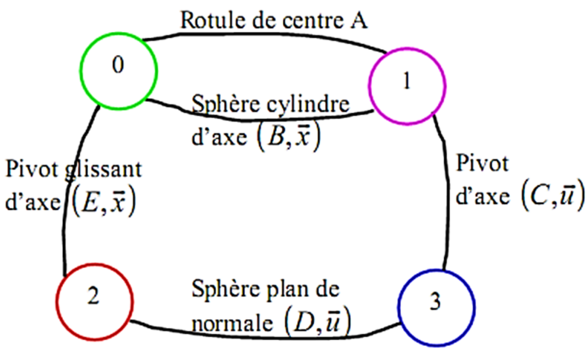


Figure.28. Exemple d'un graphe des liaisons d'un mécanisme de pompe de voiture.

2.5. Méthodologie pratique pour établir un schéma cinématique :

Pour mettre en évidence cette méthodologie, prenant un cas d'étude concret qui est celui de la bride hydraulique, ce mécanisme permet d'assurer le maintien en position d'une pièce à usiner, en appliquant un effort de serrage à l'aide d'un piston soumis à la pression hydraulique de l'huile. La bride hydraulique est fixée sur une table de machine-outil.

2.5.1. **Etape 1 : identifier les classes d'équivalence :**

A partir du mécanisme représenté sur un dessin de définition, on identifie les classes d'équivalence présentes, et ce, en observant toutes les pièces mécaniques, à l'exception d'éléments élastiques comme les ressorts, ou d'éléments roulants comme les billes et les rouleaux de roulements.

Dans le cas de la bride hydraulique, Le mécanisme comprend 10 pièces (et un ressort), que l'on peut regrouper en 3 classes d'équivalence distinctes 0, A et B.

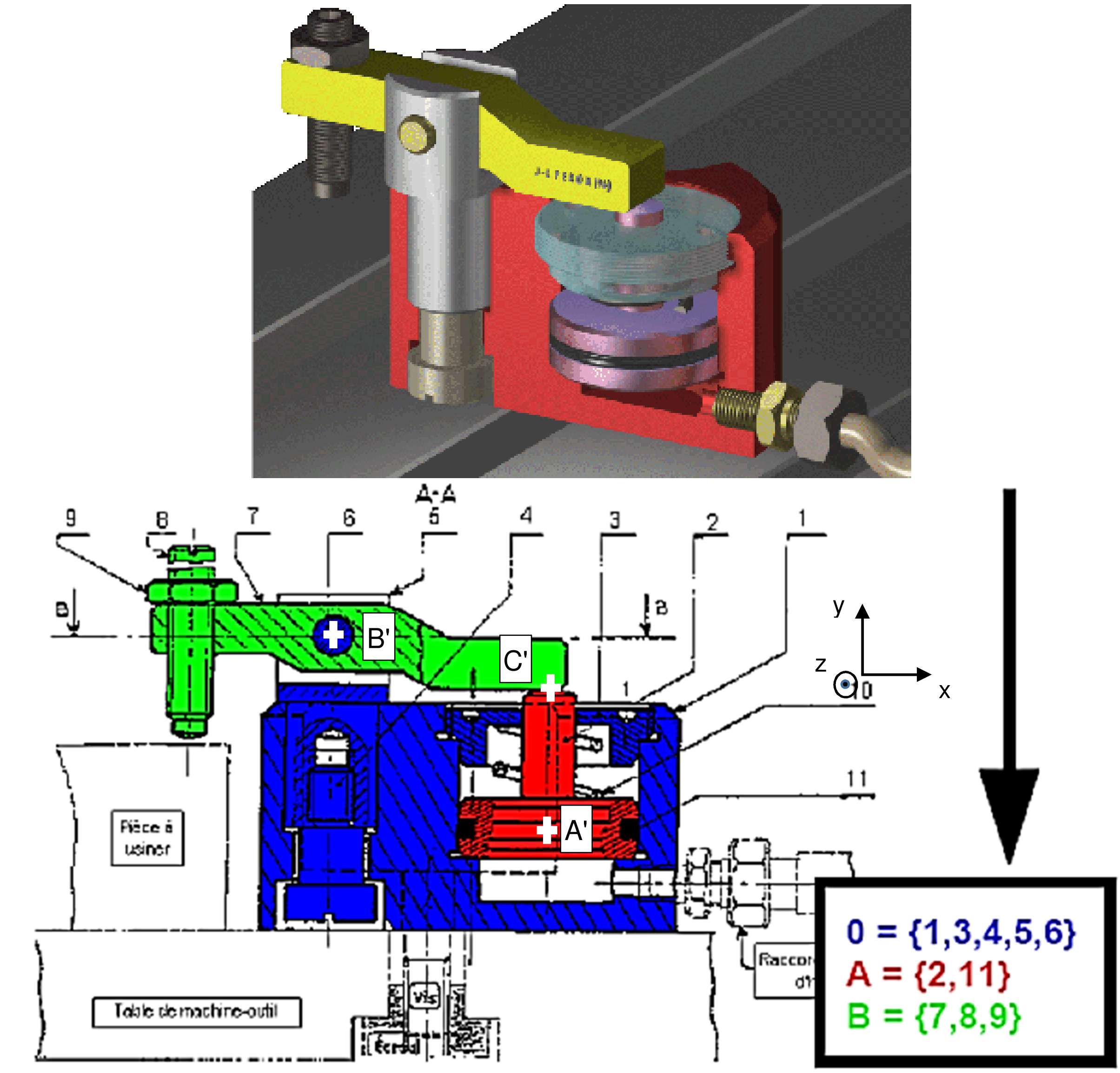


Figure.28. Dessin d'ensemble et classes d'équivalence, bride hydraulique.

2.5.2. **Etape 2 : identifier les liaisons mécaniques :**

Il s'agit d'identifier les modèles de liaisons représentant les mouvements entre les classes d'équivalence définies auparavant. Pour éviter toute erreur de modélisation de liaisons, quelques étapes intermédiaires sont nécessaires.

Pour **chaque couple de classes d'équivalence en contact** (les classes d'équivalence qui ne sont pas en contact sont à exclure) :

- Mettre en place un repère local **R.**
- Analyser les mouvements élémentaires de translation et de rotation possibles selon les axes du repère précédemment défini.
- Déduire la liaison correspondante parmi les 11 modèles de liaisons.
- Désigner cette liaison (centre, axe, normale).

2.5.3. **Etape 3 : mettre en place le graphe des liaisons :**

A partir des deux étapes précédentes, tracer le graphe des liaisons en incluant les classes d'équivalence, les liaisons identifiées ainsi que leurs désignations.

Pour le cas de la bride hydraulique, le graphe des liaisons est le suivant :

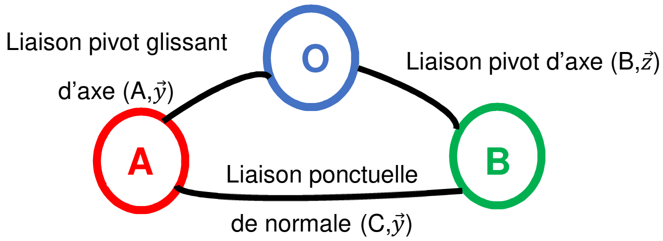


Figure.29. Graphe des liaisons, bride hydraulique.

2.5.4. **Etape 4 : élaborer le schéma cinématique :**

Pour ce faire, il faut :

- Positionner les centres et les axes des liaisons.
- Placer les schématisations normalisées de ces liaisons au niveau de ces centres et orientées suivant ces axes (pour les liaisons à axe) ou normales (pour les liaisons à normale : ponctuelles et appui plan). Respecter les couleurs des classes d'équivalence.
- Relier les parties tracées qui appartiennent à la même classe d'équivalence, donc qui ont la même couleur.

Le schéma cinématique plan ou spatial obtenu doit respecter la géométrie du mécanisme :

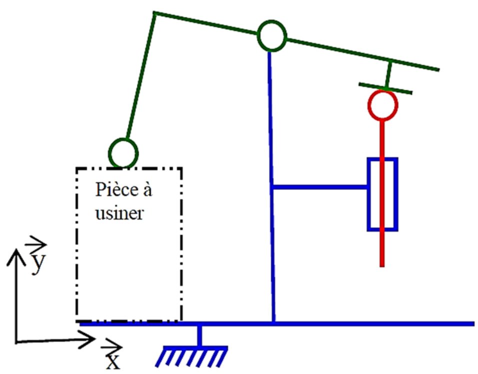


Figure.30. Schéma cinématique plan, bride hydraulique.

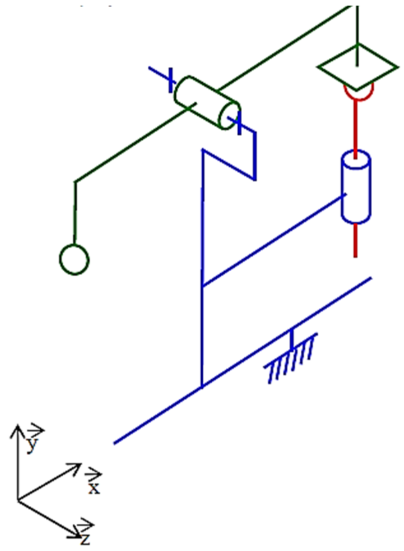


Figure.31. Schéma cinématique spatial, bride hydraulique.

Remarque :

- **On distingue le schéma cinématique minimal (fonctionnel)**, qui permet la description des mouvements relatifs entre les sous-ensembles fonctionnels, **du schéma cinématique ''classique''**, qui, en plus du contenu du schéma cinématique minimal, il comporte une description structurelle fidèle des liaisons du mécanisme (voir figure 32).

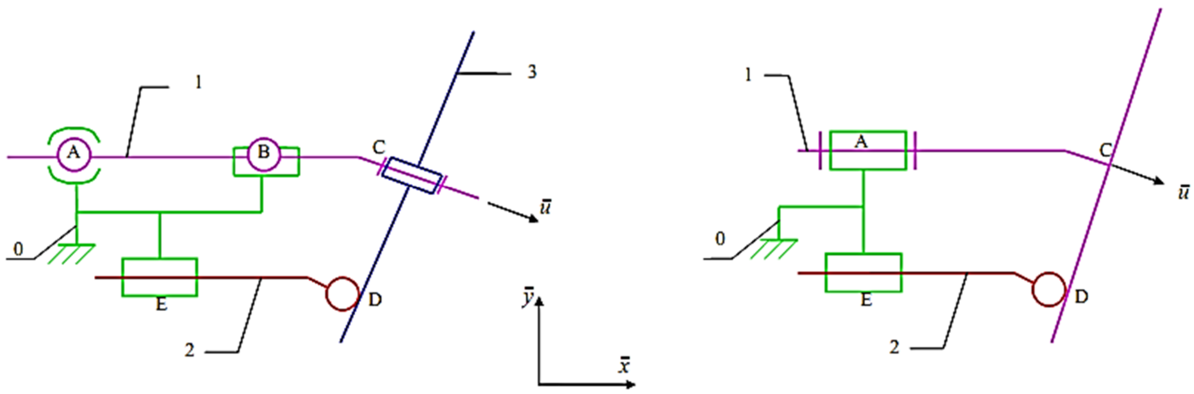
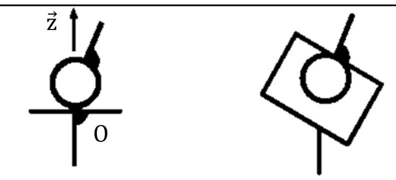
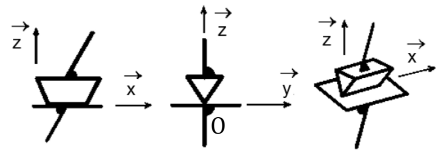
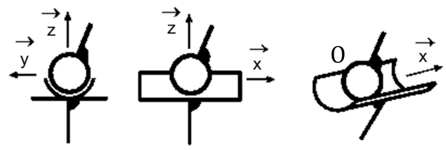
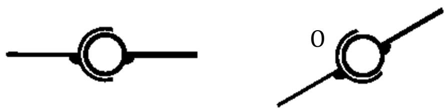
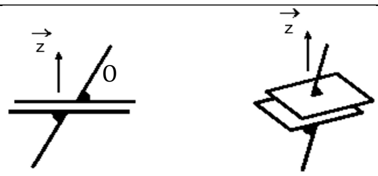
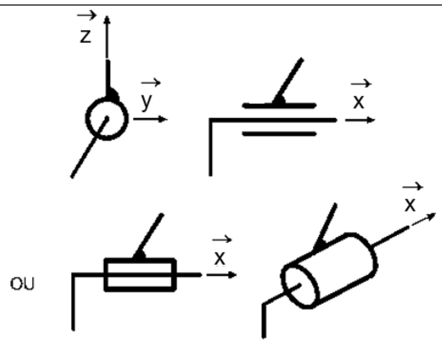
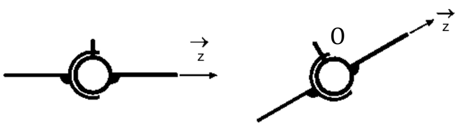
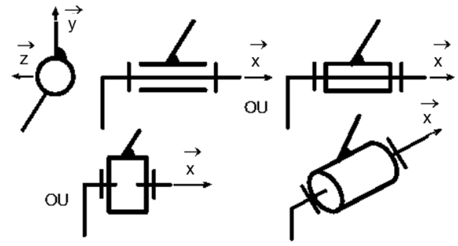
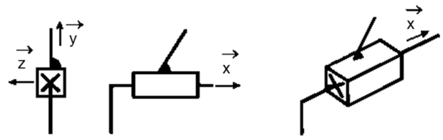
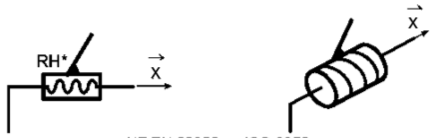


Figure.32. A droite : schéma cinématique minimal plan d'un mécanisme de pompe, à gauche schéma cinématique du même mécanisme.

3. Caractérisation des liaisons mécaniques usuelles :

Désignation de la liaison	Schématisations plane et spatiale	Mouvements élémentaires	d.d.l.
Liaison ponctuelle de normale (o, $\vec{z}$)		$\left\{\begin{matrix} Rx & Tx \\ Ry & Ty \\ Rz & - \end{matrix}\right\}$	**5**
Liaison linéaire rectiligne d'axe (o, $\vec{x}$) et de normale (o, $\vec{z}$)		$\left\{\begin{matrix} Rx & Tx \\ - & Ty \\ Rz & - \end{matrix}\right\}$	**4**
Liaison linéaire annulaire d'axe (O,$\vec{x}$)		$\left\{\begin{matrix} Rx & Tx \\ Ry & - \\ Rz & - \end{matrix}\right\}$	**4**
Liaison rotule de centre 0		$\left\{\begin{matrix} Rx & - \\ Ry & - \\ Rz & - \end{matrix}\right\}$	**3**
Liaison appui plan de normale (O,$\vec{z}$)		$\left\{\begin{matrix} - & Tx \\ - & Ty \\ Rz & - \end{matrix}\right\}$	**3**
liaison pivot glissant d'axe (O,$\vec{x}$)		$\left\{\begin{matrix} Rx & Tx \\ - & - \\ - & - \end{matrix}\right\}$	**2**
liaison sphérique à doigt d'axes (O,$\vec{x}$) et (O,$\vec{y}$)		$\left\{\begin{matrix} Rx & - \\ Ry & - \\ - & - \end{matrix}\right\}$	**2**

liaison pivot d'axe (O,$\vec{x}$)		$\begin{Bmatrix} Rx & - \\ - & - \\ - & - \end{Bmatrix}$	**1**
liaison glissière d'axe (O,$\vec{x}$)		$\begin{Bmatrix} - & Tx \\ - & - \\ - & - \end{Bmatrix}$	**1**
liaison hélicoïdale d'axe (O,$\vec{x}$)	 NF EN 23952 ou ISO 3952 * RH ou sans indication : hélice à droite. LH : hélice à gauche	$\begin{Bmatrix} Rx & Tx \\ - & - \\ - & - \end{Bmatrix}$	**1**
liaison encastrement		$\begin{Bmatrix} - & - \\ - & - \\ - & - \end{Bmatrix}$	**0**