

# Théorie des mécanismes

## 1- Isostatisme et Hyperstatisme

### 1.1- Définitions

La dynamique (ou statique) permet de déterminer des actions de liaisons ou des actions extérieures s'appliquant sur les pièces du système étudié. Elle permet également d'établir les équations différentielles régissant le fonctionnement d'un mécanisme.

Pour cela, le principe fondamental de la dynamique : PFD (ou PFS en statique) permet d'écrire des équations entre les inconnues cinématiques et sthéniques (inconnues des actions de liaisons ou actions extérieures). Ces équations sont appelées les équations sthéniques.

Les actions de liaisons ne pourront être déterminées que si il est possible d'écrire par le PFS autant d'équations indépendantes non triviales que d'inconnues d'actions de liaisons.

#### 1.1.1- Degré d'hyperstatisme

Le degré d'hyperstatisme  $H$  d'un mécanisme est la différence entre :

☞  $I_S$  le nombre d'inconnues des actions de liaisons : Inconnues sthéniques

et : ☞  $E_S$  : le nombre d'équations indépendantes issues du PFD ou PFS :  
Equations sthéniques indépendantes.

$$H = I_S - E_S$$

Quelque soit le mécanisme le degré d'hyperstatisme est toujours positif ou nul

#### 1.1.2- Isostatisme et hyperstatisme

**Un mécanisme est isostatique si son degré d'hyperstatisme est nul.  
Sinon il est hyperstatique de degré  $H$**

### 1.2- Intérêt de l'isostatisme

Les inconnues sthéniques ne peuvent être déterminées que lorsque le degré d'hyperstatisme est nul. Dans le cas contraire il est nécessaire de faire des hypothèses sur les inconnues sthéniques pour résoudre le système d'équations sthéniques. Ou de tenir compte de la déformation élastique des pièces pour déterminer ces actions.

D'autre part un mécanisme hyperstatique impose que les surfaces réelles de contact entre les pièces correspondent précisément à leur définition géométrique avant fabrication. Or du fait des imprécisions liées à la fabrication des pièces, ou à la déformation de ces pièces sous la contrainte et les variations dues aux variations de température, ces surfaces diffèrent du modèle réel.

Un mécanisme hyperstatique impose donc des processus de fabrication et de montage plus difficiles et donc plus coûteux pouvant également présenter des points durs voir un blocage du mécanisme.

### 1.3- Hypothèses et notations

On suppose les solides indéformables. Et on suppose que les liaisons sont permanents (Contact toujours effectifs). On pose alors :

☞  $N_P$  : le nombre de pièces (ou classes d'équivalence) du mécanisme (Bâti inclus)

☞  $I_S$  : le nombre total d'inconnues sthéniques des liaisons du mécanisme

☞  $I_C$  : le nombre total d'inconnues cinématiques des liaisons du mécanisme

☞  $N_L$  : le nombre de liaisons entre les pièces du mécanisme

### 1.4- Relation entre nombres d'inconnues sthéniques et cinématiques

Si le solide 1 est en liaison parfaite avec le solide 2 dont le torseur cinématique est :  $\{\mathcal{V}(1/2)\}$ , alors l'action mécanique du solide 1 sur le solide 2 peut se modéliser par un torseur  $\{T(1/2)\}$  tel que le comoment de ces deux torseurs est nul. :  $\{\mathcal{V}(1/2)\} \otimes \{T(1/2)\} = 0$

Exemple : Si on a  $\{\mathcal{V}(1/2)\} = \begin{Bmatrix} \omega_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \omega_z & V_z \end{Bmatrix}$  Alors :  $\{T_{1/2}\} = \begin{Bmatrix} X & 0 \\ Y & M \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$

Le nombre d'inconnues sthéniques d'une liaison parfaite  $n_s$  plus le nombre d'inconnues cinématiques  $n_c$  de cette même liaison est donc égal à 6. Donc pour un mécanisme :

$$I_S + I_C = 6.N_L$$

## 2- Chaines cinématiques

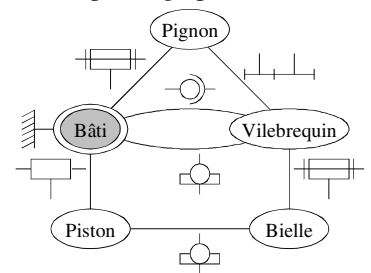
### 2.1- Graphe des liaisons d'un mécanisme

Le graphe des liaisons est un schéma sur lequel on indique :

- ☞ Chacune des classes d'équivalence par un cercle avec le numéro de la classe d'équivalence (ou le nom ou une lettre)
- ☞ Chacune des liaisons par un trait reliant les classes d'équivalence liées

Parfois le bâti de la machine est indiqué par un symbole de masse ou un double cercle ou un coloriage intérieur du cercle

Exemple de graphe des liaisons

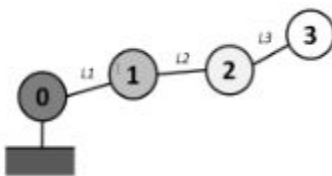


### 2.2- Chaines de solides

Suivant les mécanismes on a des chaines de solides ouvertes fermées ou complexes.

#### Chaîne ouverte

Les liaisons ne permettent pas de bouclage du graphe des liaisons

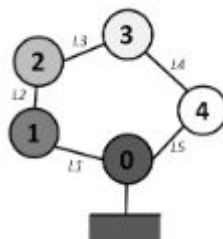


Exemple : Bras de robot



#### Chaîne fermée

Les liaisons permettent un unique bouclage du graphe des liaisons

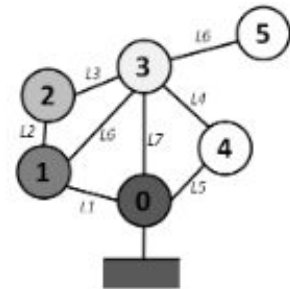


Exemple : Lève barrière



#### Chaîne complexe

Les liaisons permettent plusieurs bouclage du graphe des liaisons



Exemple : Plate forme élévatrice



**2.3- Nombre cyclomatique d'un mécanisme ou nombre de cycles indépendants**

Dans un mécanisme une succession de liaisons entre des pièces peut permettre de revenir à la pièce d'origine. Cette succession de liaisons et de pièces forment un cycle. Sur le graphe des liaisons, ce cycle se reconnaît par une boucle. On note le alors le nombre de cycles indépendants :

**C ou  $\gamma$  : Le nombre cyclomatique du mécanisme**

Ce nombre cyclomatique se calcule par la relation :  $\gamma = N_L - N_P + 1$

**2.4- Degré de mobilité d'un mécanisme**

**2.4.1- Définition**

Les mobilités d'un mécanisme sont les différents mouvements indépendants de ce mécanisme.

**Le degré de mobilité du mécanisme est le nombre de mouvements indépendants possibles de ce mécanisme.**

**2.4.2- Mobilités utiles et internes**

On distingue les mobilités utiles et les mobilités internes. Il n'y a mathématiquement pas de différences entre les mobilités utiles et les mobilités internes. Cette différence tient au fait que certaines mobilités permettent de répondre aux fonctions techniques que doit remplir le mécanisme ; Ce sont les mobilités utiles. Les autres mobilités sont appelées mobilités internes.

Si on note :

Alors :

☞  $M_U$  le nombre de mobilités utiles du mécanisme

☞  $M_I$  le nombre de mobilités internes du mécanisme

☞  $M$  le degré de mobilité du mécanisme

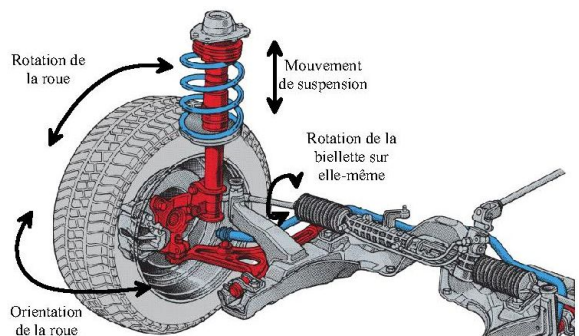
$M = M_U + M_I$

**2.4.3- Exemple d'un train avant de voiture automobile.**

Cette suspension doit permettre :

- ☞ La rotation de la roue autour de son axe pour faire avancer le véhicule
- ☞ La rotation de la roue autour d'un axe vertical pour diriger le véhicule
- ☞ L'enfoncement de la roue dans la caisse du véhicule pour le mouvement de suspension

D'autre part dans ce cas, la biellette de direction pouvant tourner sur elle-même on a une autre mobilité qui n'a pas de fonction technique.



**Ce mécanisme a donc 3 mobilités utiles et 1 mobilité interne soit un degré de mobilité de 4.**

**2.4.4- Cas des chaînes ouvertes**

Pour un mécanisme en chaîne ouverte, le degré de mobilités du mécanisme est égal au nombre d'inconnues cinématiques de l'ensemble des liaisons soit au nombre total de degrés de liberté restant dans toutes les liaisons.

**Pour une chaîne ouverte :  $M = I_C$**

### 3- Degré d'hyperstatisme d'un mécanisme

#### 3.1- Calcul de l'hyperstatisme par une approche sthénique

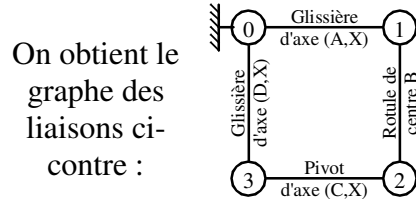
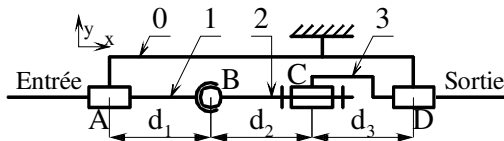
##### Analyse sthénique du mécanisme :

Le degré d'hyperstatisme est intrinsèque au mécanisme : Il ne dépend pas des actions mécaniques extérieures mais seulement des inconnues sthéniques. Analyser l'hyperstatisme d'un mécanisme revient donc à étudier le système d'équations obtenues sans les actions mécaniques extérieures du mécanisme.

Le nombre d'équations du mécanisme est le nombre total d'équations obtenues en isolant séparément chaque solide hors bâti du mécanisme. On obtient donc  $6.(N_P - 1)$  équations sthéniques.

##### Exemple :

Soit le mécanisme suivant :



On a alors :

$$N_P = 4 \quad N_L = 4 \quad \gamma = 1$$

$$I_S = 5 + 3 + 5 + 5 = 18$$

$$M = M_U + M_I = 1 + 1 = 2$$

L'isolement des solides 1, 2 et 3 donnent les trois équations torsesielles ci-dessous :

$$A \begin{Bmatrix} 0 & L_A \\ Y_A & M_A \\ Z_A & N_A \end{Bmatrix} + B \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ Y_B & 0 \\ Z_B & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad B \begin{Bmatrix} -X_B & 0 \\ -Y_B & 0 \\ -Z_B & 0 \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} -X_C & 0 \\ -Y_C & -M_C \\ -Z_C & -N_C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad D \begin{Bmatrix} 0 & L_D \\ Y_D & M_D \\ Z_D & N_D \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} X_C & 0 \\ Y_C & M_C \\ Z_C & N_C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Les  $6.(4 - 1) = 18$  équations issues de l'isolement des solides 1, 2 et 3 donnent donc :

$$1 \Rightarrow 0 + X_B = 0 \quad Y_A + Y_B = 0 \quad Z_A + Z_B = 0 \quad L_A + 0 = 0 \quad M_A - d_1 Z_B = 0 \quad N_A + d_1 Y_B = 0$$

$$2 \Rightarrow X_B + X_C = 0 \quad Y_B + Y_C = 0 \quad Z_B + Z_C = 0 \quad 0 + 0 = 0 \quad -M_C + d_2 Z_B = 0 \quad -N_C - d_2 Y_B = 0$$

$$3 \Rightarrow 0 + X_C = 0 \quad Y_D + Y_C = 0 \quad Z_D + Z_C = 0 \quad L_D + 0 = 0 \quad M_D + M_C + d_3 Z_C = 0 \quad N_D + N_C - d_3 Y_C = 0$$

La mobilité utile conduit a une combinaison linéaire des entre les trois équations de la résultante sur  $\vec{x}$

La mobilité interne fait que l'équation des moments en projection sur  $\vec{x}$  du solide 2 est triviale :  $0 = 0$

En notant  $r_s$  ( $r_s = E_s$ ) le rang de la matrice sthénique (issue du système d'équations)

On a donc 16 équations sthéniques indépendantes  $E_s = r_s = 18 - 2 = 16 = 6.(N_P - 1) - (M_U + M_I)$

##### Règle générale :

**Le nombre de mobilités d'un mécanisme est le nombre d'équations triviales et de combinaisons linéaires entre les  $6.(N_P - 1)$  équations sthéniques obtenues par  $(N_P - 1)$  isolements**

##### Relation entre hyperstatisme, mobilité et inconnues sthéniques :

Des résultats précédentes on en déduit que le degré d'hyperstatisme se calcule par la relation :

$$H = I_S + M_U + M_I - 6.(N_P - 1)$$

#### 3.2- Calcul degré d'hyperstatisme par une approche cinématique

##### Relation entre hyperstatisme, mobilité et inconnues cinématiques :

Sachant que :  $\gamma = N_L - N_P + 1$  On en déduit :  $H = I_S + M_U + M_I - 6.(N_L - \gamma)$

et que :  $6.N_L = I_S + I_C$  On obtient :  $H = I_S + M_U + M_I + 6.\gamma - I_S - I_C$

$$H = 6.\gamma + M_U + M_I - I_C$$

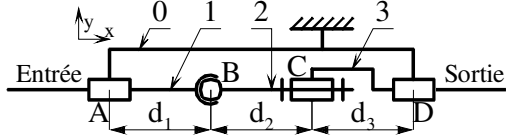
**Analyse cinématique du mécanisme :**

Si on note  $\{V_{i/j}\}$  les torseurs cinématiques associées aux liaisons entre les solides i et j (de 1 à n) d'un cycle de ce mécanisme, la fermeture cinématique de ce cycle (Composition des mouvements) s'écrit :

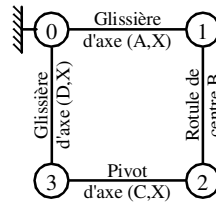
$$\{V_{1/2}\} + \{V_{2/3}\} + \dots + \{V_{n-1/n}\} + \{V_{n/1}\} = \{0\} \quad \text{(on a } \gamma \text{ fermetures cinématiques)}$$

**Exemple :**

Soit le mécanisme suivant :



On obtient le graphe des liaisons ci-contre :



On a alors :

$$N_P = 4 \quad N_L = 4 \quad \gamma = 1$$

$$I_C = 1 + 3 + 1 + 1 = 6$$

$$M = M_U + M_I = 1 + 1 = 2$$

Pour ce mécanisme :  $H = 6 \times 1 + 2 - 6 = 2$

L'équation de fermeture cinématique du cycle donne :  $\{V_{0/1}\} + \{V_{1/2}\} + \{V_{2/3}\} + \{V_{3/0}\} = \{0\}$

$$A \begin{Bmatrix} 0 & V_{XA0/1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} + B \begin{Bmatrix} \omega_{X1/2} & 0 \\ \omega_{Y1/2} & 0 \\ \omega_{Z1/2} & 0 \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \omega_{X2/3} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} + D \begin{Bmatrix} 0 & V_{XD3/0} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

En transportant les torseurs en B, on obtient donc le système d'équations :

$$\omega_{X1/2} + \omega_{X2/3} = 0$$

$$\omega_{Y1/2} = 0$$

$$\omega_{Z1/2} = 0$$

$$V_{XA0/1} + V_{XD3/0} = 0$$

$$0 = 0$$

$$0 = 0$$

Ce système a deux équations triviales et aucune combinaison linéaire entre ses équations. Cela traduit le fait que le système est hyperstatique de degré 2 ( $H = 2$ ).

Si on ajoute une inconnue sthénique, on retire une inconnue cinématique. On ajoute alors une mobilité ou une combinaison linéaire entre les équations (ou une équation triviale)

**Règle générale :**

**Le degré d'hyperstatisme d'un mécanisme est le nombre d'équations triviales et de combinaisons linéaires entre les 6.γ équations obtenues par les γ fermetures cinématiques**

En notant  $r_C$  le rang de la matrice cinématique (issue du système d'équations) le degré d'hyperstatisme est obtenu en faisant :  $H = 6.\gamma - r_C$

**3.3- Degré d'hyperstatisme d'une chaîne ouverte**

Pour une chaîne ouverte on a :  $M = M_I + M_U = I_C$  et:  $\gamma = 0$  Donc :  $H = 0$

**Un mécanisme à chaîne ouverte est isostatique**

**3.4 Réduction du degré d'hyperstatisme**

Pour rendre le système isostatique sans modifier son fonctionnement, il faut :

**Changer les liaisons en ajoutant un nombre H d'inconnues cinématiques et ne plus avoir d'équations triviales (0 = 0) ou combinaisons linéaires des autres équations.**

**On peut ajouter davantage d'inconnues cinématiques ce qui augmente les mobilités du mécanisme. Mais il ne faut pas augmenter le nombre de mobilités utiles.**