Théorie des Mécanismes

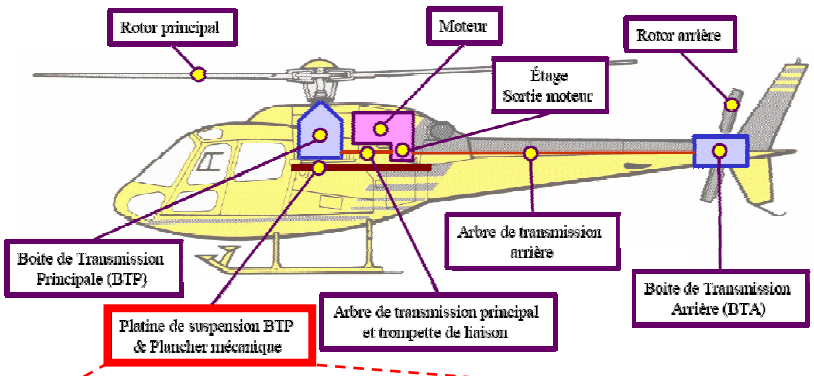
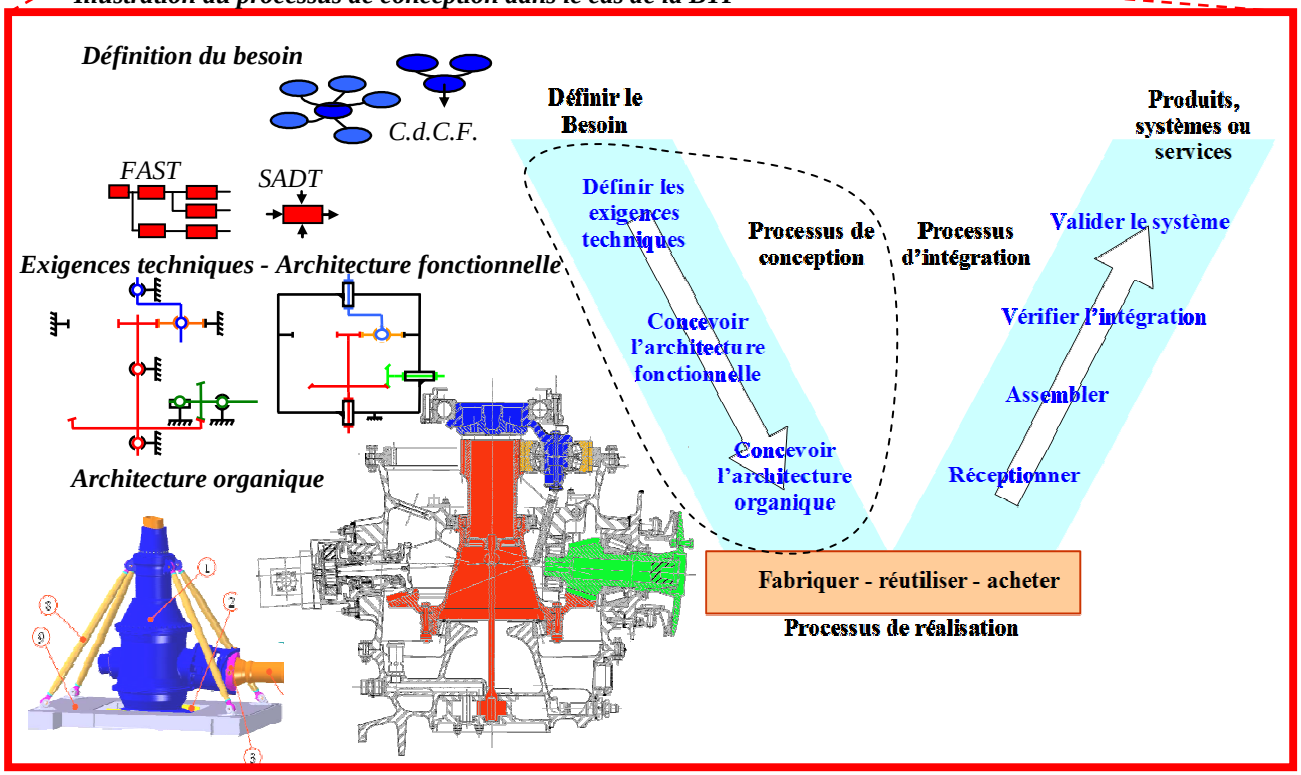


Illustration du processus de conception dans le cas de la BTP



Exemples de systèmes mécaniques

SYSTEMES EQUIPANT UN HELICOPTERE MODELE ECUREUIL

L'ingénieur doit constamment procéder à des choix lors des différentes étapes du processus de conception afin d'améliorer les performances des systèmes. Cette amélioration passe nécessairement par l'optimisation de l'architecture des constituants des systèmes et donc, dans ce cadre, un des problèmes essentiel de l'ingénieur est de choisir les meilleures solutions technologiques pour réaliser les liaisons. Pour l'aider dans ces choix technologiques, l'ingénieur s'appuie obligatoirement sur des modèles plus ou moins détaillés car seuls les modèles permettent de simuler le comportement du produit et d'appréhender le réel.

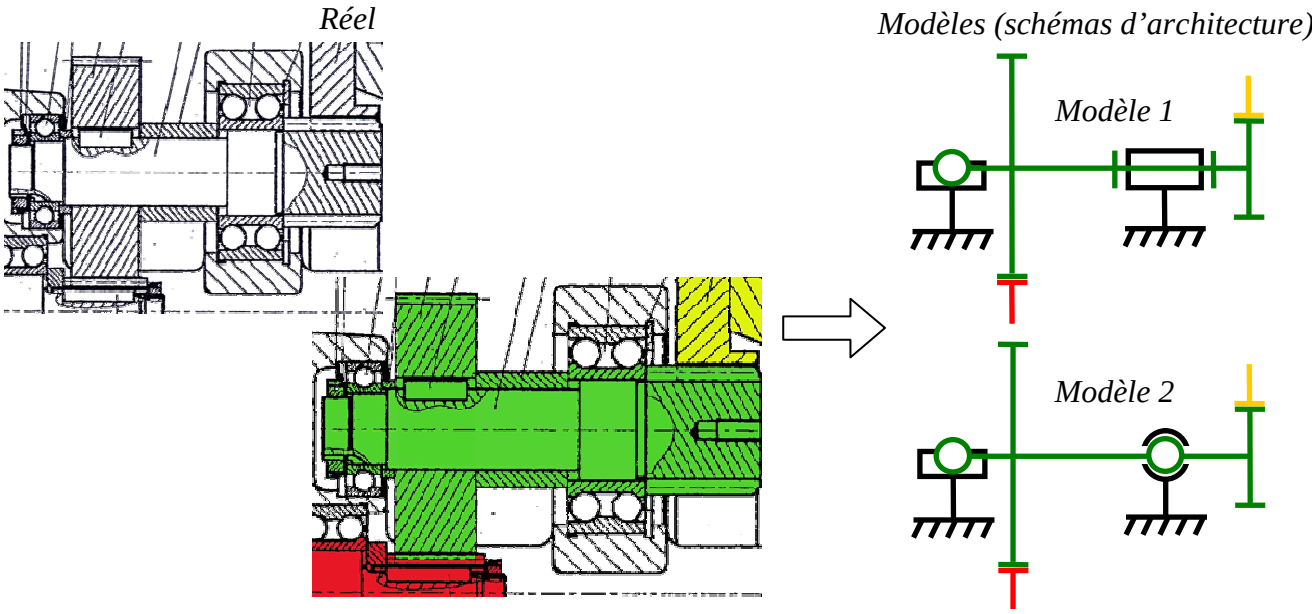
L'objectif de ce cours est d'**introduire la théorie des mécanismes**, outil préliminaire dans le processus de conception, qui a pour finalité de **maitriser la mobilité et l'hyperstaticité d'un mécanisme modélisé par des liaisons théoriques**.

1. Introduction au concept de la théorie des mécanismes et définitions

1.1. Introduction

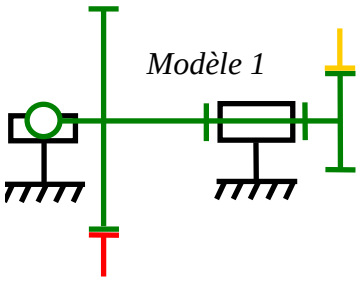
La théorie des mécanismes traite uniquement de modèles pour lesquels on considère qu'il n'y a que des liaisons avec des géométries parfaites sans jeux, ni frottement, ni déformations et qui sont définis chacune par un torseur cinématique (le torseur d'action mécanique transmissible en découlant automatiquement). La théorie des mécanismes s'appuie donc sur un **modèle architectural lié à un objectif d'étude** et a pour but de **maitriser la mobilité et l'hyperstaticité d'un mécanisme modélisé par des liaisons théoriques**.

Exemple dans le cas du montage d'un arbre de l'étage de sortie du moteur de l'hélicoptère écureuil.

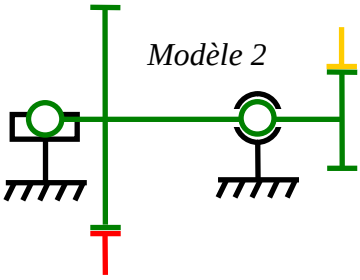


La liaison pivot du l'arbre du réducteur est réalisée par l'intermédiaire d'un roulement à deux rangées de billes à contact oblique et un roulement rigide à une rangée de billes. Cette liaison peut être modélisée par exemple par 2 modèles différents, modèles qui dépendent d'un objectif d'étude.

Pour définir les tolérances géométriques nécessaires à la définition fonctionnelle de l'arbre, on s'oriente vers une modélisation avec un degré d'hyperstaticité élevé.
Compte tenu des choix technologiques retenus, on peut donc modéliser le comportement de chacun des roulements par une liaison linéaire annuaire et une liaison pivot (modèle 1). Une étude rapide (liaisons parallèles) permettrait de voir que cette modélisation possède un degré d'hyperstaticité de 2, ce qui implique d'avoir une excellente coaxialité entre les différentes portées de roulement.



Dans le cadre d'un calcul de prédimensionnement des roulements ou bien d'un calcul de l'arbre en résistance des matériaux, on a besoin de connaitre rapidement les torseurs d'action mécaniques transmissibles sur chaque roulement à l'aide du principe fondamental de la statique, on s'oriente donc vers une modélisation isostatique qui permet l'utilisation du PFS (modèle 2).



1.2. Hyperstaticité (ou hyperstatisme) d'un modèle

L'hyperstaticité d'un modèle de système mécanique est donnée par le nombre d'inconnues de liaison qui n'ont pas pu être déterminées par les seules équations issues du principe fondamental de la statique. Dans ce cas, on peut dire qu'il y a un excès de liaisons mécaniques sur le modèle du système.
Un modèle de mécanisme est dit **isostatique** si l'on peut calculer, après modélisation des liaisons et par les seules équations de la statique, toutes les composantes des actions mécaniques intervenant dans les liaisons du système.

1.3. Pourquoi calculer un degré d'hyperstaticité ?

- Pour déterminer les actions mécaniques transmissibles des liaisons avec les seules équations issues des théorèmes généraux, il est préférable d'identifier si le modèle du système est isostatique (et donc de savoir si cette détermination est possible) avant de se lancer dans des calculs parfois longs et fastidieux.
- La mise en évidence des liaisons surabondantes conduisant au degré d'hyperstaticité aboutit à la mise en place de tolérances géométriques nécessaires à la définition fonctionnelle des pièces.

1.4. Quel est la validité d'un degré d'hyperstaticité ?

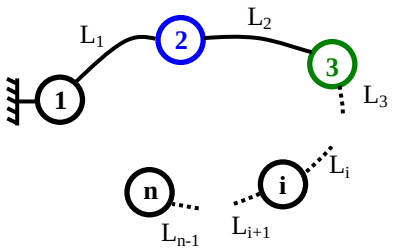
Le calcul du degré d'hyperstaticité dépend de la modélisation choisie pour les liaisons. Si l'objectif de l'ingénieur est de calculer les composantes d'actions mécaniques transmissibles des liaisons, il s'orientera vers une modélisation « minimale » conduisant à un degré d'hyperstaticité le plus faible possible.
Si son objectif est la mise en place de spécifications fonctionnelles, il s'orientera à l'inverse vers un degré d'hyperstatisme plus grand.

On ne calcule un degré d'hyperstaticité que pour un modèle !!!
Un même système pouvant être modélisé de différentes manières, il est donc nécessaire de calculer un degré d'hyperstaticité pour chacun des modèles du même système.

2. Architecture des systèmes mécaniques

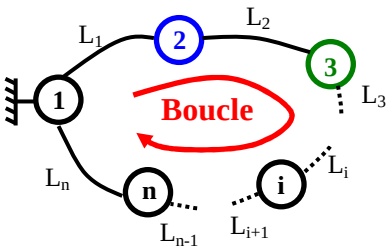
Un système mécanique est constitué d'un ensemble de pièces agencées entre elles par des liaisons. Après modélisation du mécanisme en graphe de structure, on peut retrouver d'après l'allure du graphe, trois types d'agencement des liaisons. La démarche d'étude de l'hyperstaticité d'un modèle de système mécanique dépendra de la nature de l'agencement de ces liaisons.

Les **chaines cinématiques ouvertes** (graphe de structure ouvert).

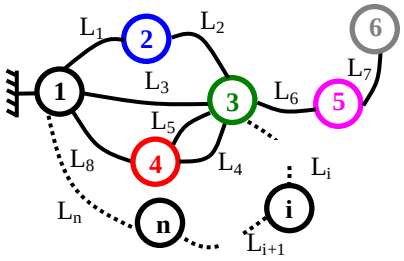


Les chaines ouvertes de solides ne posent pas de problème d'hyperstaticité.

les **chaines cinématiques fermées simples** (graphe de structure constitué d'une boucle).



les **chaines cinématiques complexes** (graphe de structure constitué de plusieurs boucles fermées et/ou chaines ouvertes).



Les chaines fermées peuvent posséder un degré d'hyperstatisme. Ce degré d'hyperstatisme est relativement simple à calculer pour une chaine simple mais beaucoup plus délicat pour une chaine complexe.

3. Degré de mobilité

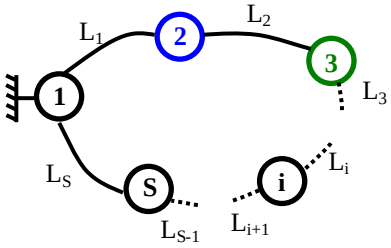
3.1. Définition du degré de mobilité

Le degré de mobilité (cinématique) d'un mécanisme, noté $\mathbf{m_c}$, correspond au **nombre de paramètres cinématiques indépendants** nécessaires pour définir **toutes les inconnues cinématiques**.

Soit un système modélisé par une chaîne simple fermée constituée de S solides (bâti compris) et L liaisons. On associe à chaque liaison le torseur cinématique $\{C_{i/i+1}\}$.

La fermeture de chaîne cinématique permet d'écrire :

$$\{C_{0/1}\}+\{C_{1/2}\}+\ldots+\{C_{i/i+1}\}+\ldots+\{C_{S-1/S}\}+\{C_{S/0}\}=\{0\}$$



Ce qui conduit à deux équations vectorielles :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\Omega_{0/1}}+\overrightarrow{\Omega_{1/2}}+\ldots+\overrightarrow{\Omega_{i/i+1}}+\ldots+\overrightarrow{\Omega_{S-1/S}}+\overrightarrow{\Omega_{S/0}}=\vec{0} \\ \overrightarrow{V_{A\in 0/1}}+\overrightarrow{V_{A\in 1/2}}+\ldots+\overrightarrow{V_{A\in i/i-1}}+\ldots+\overrightarrow{V_{A\in S-1/S}}+\overrightarrow{V_{A\in S/0}}=\vec{0} \end{cases}$$

Le point A étant judicieusement choisi pour donner les différentes expressions des vecteurs vitesse les plus simples possibles. Ces deux équations vectorielles conduisent à 6 équations scalaires qui doivent permettre de déterminer les $\mathbf{N_C}$ **inconnues cinématiques**. On appelle usuellement E_C le nombre d'équations scalaires issues de fermeture(s) cinématique(s) (ici pour une seule fermeture cinématique $E_C = 6$). Soit $\mathbf{r_C}$ le **rang du système**, c'est-à-dire le nombre d'équations indépendantes, issues des E_C équations de cinématique.

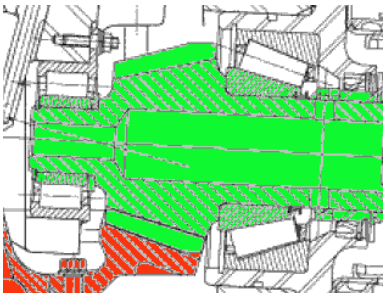
On définit le degré de mobilité cinématique du mécanisme par la différence entre le nombre d'inconnues cinématiques et le rang du système d'équations de cinématique :

$$\boxed{\mathbf{m_C = N_C - r_C}}$$

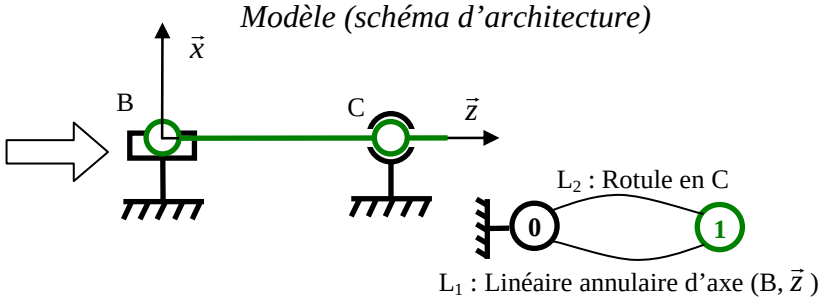
m_C correspond au nombre d'inconnues cinématiques indépendantes qu'il faut se fixer pour déterminer les autres.

Application : Recherche de m_C sur l'arbre moteur de la BTP

Réel



Modèle (schéma d'architecture)



La fermeture de chaine cinématique s'écrit : $\{C_{0/1}\}+\{C_{1/0}\}=\{0\}$ *avec :*

$$\{C_{0/1}\}=\begin{Bmatrix}\Omega_{x_1} & 0\\ \Omega_{y_1} & 0\\ \Omega_{z_1} & v_{z_1}\end{Bmatrix}_{B\,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{et } \{C_{1/0}\}=\begin{Bmatrix}\Omega_{x_2} & 0\\ \Omega_{y_2} & 0\\ \Omega_{z_2} & 0\end{Bmatrix}_{C\,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{soit 7 inconnues cinématiques} \rightarrow N_C = 7$$

$$\rightarrow \{C_{1/0}\}=\begin{Bmatrix}\Omega_{x_2} & 0\\ \Omega_{y_2} & 0\\ \Omega_{z_2} & 0\end{Bmatrix}_{C\,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} = \begin{Bmatrix}\Omega_{x_2} & -l.\Omega_{y_2}\\ \Omega_{y_2} & l.\Omega_{x_2}\\ \Omega_{z_2} & 0\end{Bmatrix}_{B\,(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{avec } \overrightarrow{BC}=l.\vec{z}$$

La fermeture cinématique donne un système de 6 équations →
$$\begin{cases} \Omega_{x_1} + \Omega_{x_2} = 0 \\ \Omega_{y_1} + \Omega_{y_2} = 0 \\ \Omega_{z_1} + \Omega_{z_2} = 0 \\ -l.\Omega_{y_2} = 0 \\ l.\Omega_{x_2} = 0 \\ v_{z_1} = 0 \end{cases}$$

→ *Ces 6 équations sont indépendantes* → $r_C = 6$

D'où $m_C = N_C - r_C = 7 - 6 = 1$ *(Ce qui se voit immédiatement sur le modèle en fait …)*

On constate donc que le calcul de m_C par ce biais va vite devenir long et fastidieux car on a en général bien plus de 2 solides dans la chaine cinématique fermée. Par conséquent, au concours, on n'utilisera cette technique que si elle est explicitement demandée. On préféra utiliser la méthode présentée paragraphe 3.2. pour déterminer m_C.

3.2. Calcul pratique du degré de mobilité

On distingue généralement dans le degré de mobilité m_C :

- La **mobilité utile** donnée par le nombre de paramètres cinématiques d'entrée-sortie indépendants sur le mécanisme (i.e. : nombre de paramètres cinématiques à imposer pour déterminer les lois entrées-sorties). On la note $\mathbf{m_u}$.
- La **mobilité interne** donnée par le nombre de paramètres cinématiques internes indépendants ne participant pas au mouvement du mécanisme. On la note $\mathbf{m_i}$.

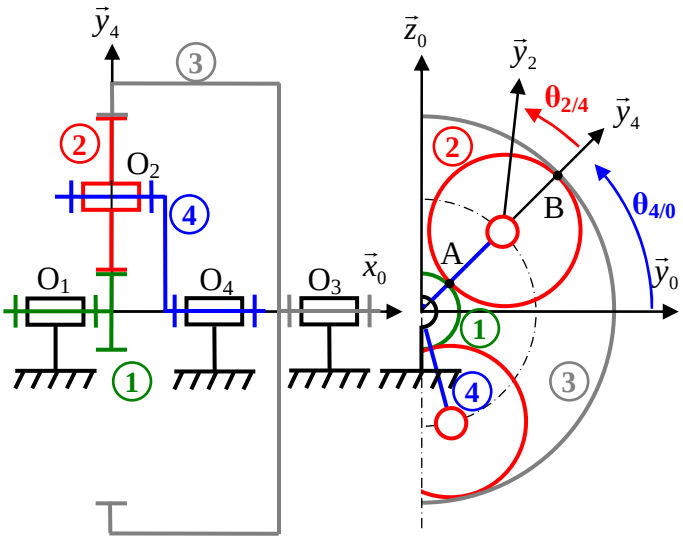
$$\boxed{\mathbf{m_C = m_u + m_i}}$$

3.1. Détermination de la mobilité utile m_u

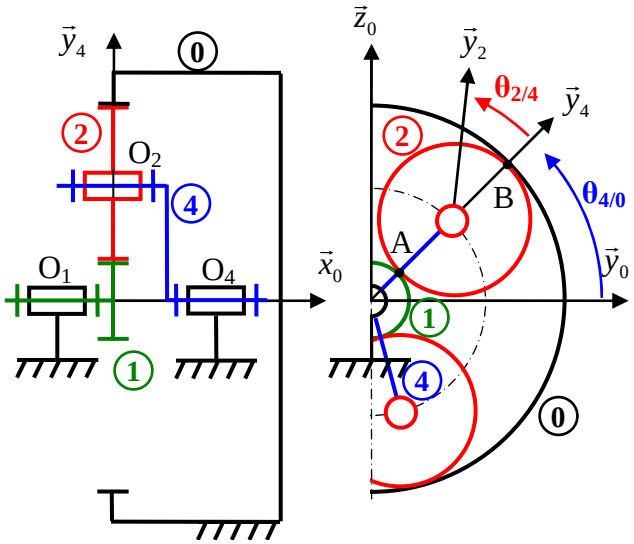
Il faut identifier le nombre de paramètres cinématiques d'entrée-sortie indépendants sur le mécanisme.

Application : Recherche de la mobilité utile sur 2 cas de trains épicycloïdaux de l'hélicoptère.

Modèle (a) :



Modèle (b) :



Sur ce modèle on a 4 paramètres cinématiques $\theta_{1/0}$, $\theta_{3/0}$, $\theta_{4/0}$, $\theta_{2/4}$ et 2 relations scalaires liant ces paramètres (2 relations obtenues par écriture des conditions de roulement sans glissement en A et B), soit au final 4–2=2 paramètres cinématiques indépendants : $m_u = 2$.

On peut retrouver la mobilité utile en remarquant que le modèle possède 3 entrées/sorties indépendantes ($\theta_{1/0}$, $\theta_{3/0}$, $\theta_{4/0}$) et une relation liant ces 3 paramètres (formule de Willis), soit au final 3–1=2 paramètres cinématiques indépendants : $m_u = 2$.

Sur ce modèle on a 3 paramètres cinématiques $\theta_{1/0}$, $\theta_{4/0}$, $\theta_{2/4}$ et 2 relations scalaires liant ces paramètres (2 relations obtenues par écriture des conditions de roulement sans glissement en A et B), soit au final 3–2=1 paramètre cinématique indépendant : $m_u = 1$.

On peut retrouver la mobilité utile en remarquant que le modèle possède 2 entrées/sorties indépendantes ($\theta_{1/0}$, $\theta_{4/0}$) et une relation liant ces 2 paramètres (formule de Willis), soit au final 1 paramètre cinématique indépendant : $m_u = 1$.

Pour retrouver les mobilités utiles, on peut aussi « bloquer » physiquement les pièces qui correspondent aux entrées/sorties du système. La mobilité utile du système correspond alors au nombre de pièces d'entrée/sortie du système qu'il a fallu « bloquer » pour figer complètement le système.

Application : Recherche de la mobilité utile sur 2 cas de trains épicycloïdaux présents sur l'hélicoptère.

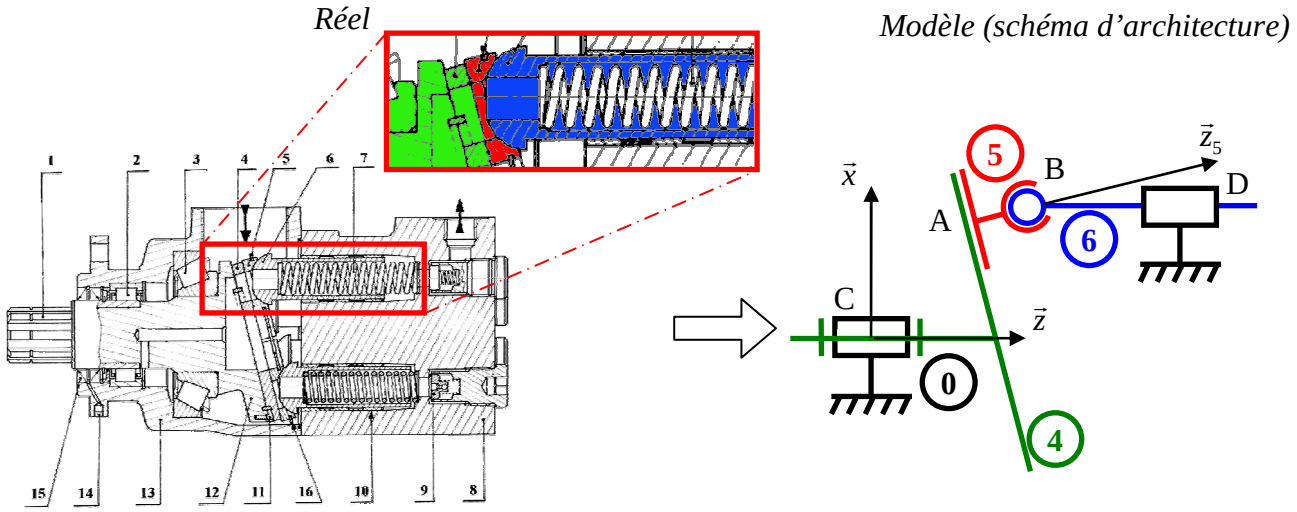
- *Modèle (a) : Physiquement il faut « bloquer » les pièces 1 et 3 pour « bloquer » complètement le système (en ne « bloquant » que la pièce 1, il resterait encore une transmission de mouvement possible 3→2→4). Il faut « bloquer » 2 pièces → La mobilité utile $m_u = 2$.*
- *Modèle (b) : Physiquement il faut « bloquer » la pièce 1 pour « bloquer » complètement le système. Il faut « bloquer » 1 pièce → La mobilité utile $m_u = 1$.*

Sur certains modèles de systèmes, la mobilité utile peut correspondre au nombre d'actionneurs mettant en mouvement le système.

3.2 Détermination de la mobilité interne m_i

Il faut identifier le nombre de paramètres cinématiques internes indépendants ne participant pas au mouvement du mécanisme.

Application : Recherche de la mobilité interne sur une pompe hydraulique équipant l'hélicoptère.



La pièce 5 peut tourner autour de l'axe $(A, \vec{z}_5)$ sans altérer le mouvement de la pièce 6 par rapport à la pièce 4. Il y a donc un mouvement qui correspond à une mobilité interne → $m_i = 1$.

Pour retrouver les mobilités internes, on peut « bloquer » les pièces qui correspondent aux entrées/sorties du système et compter ensuite les mouvements internes possibles et non contrôlés de pièces du mécanisme qui ne participent pas au mouvement d'entrée-sortie.

Application : Recherche de la mobilité interne sur une pompe hydraulique équipant l'hélicoptère.

Physiquement en bloquant les pièces 6 et 4 (entrée et sortie du système), la pièce 5 peut toujours tourner autour de l'axe $(A, \vec{z}_5)$. Il y a donc un mouvement supplémentaire qui correspond à une mobilité interne → $m_i = 1$.

4. Indice de mobilité m

4.1. Nombre cyclomatique d'un graphe de structure

On appelle nombre cyclomatique d'un graphe de structure, le nombre γ de cycles indépendants qui constitue le graphe. On montre par la théorie des graphes que :

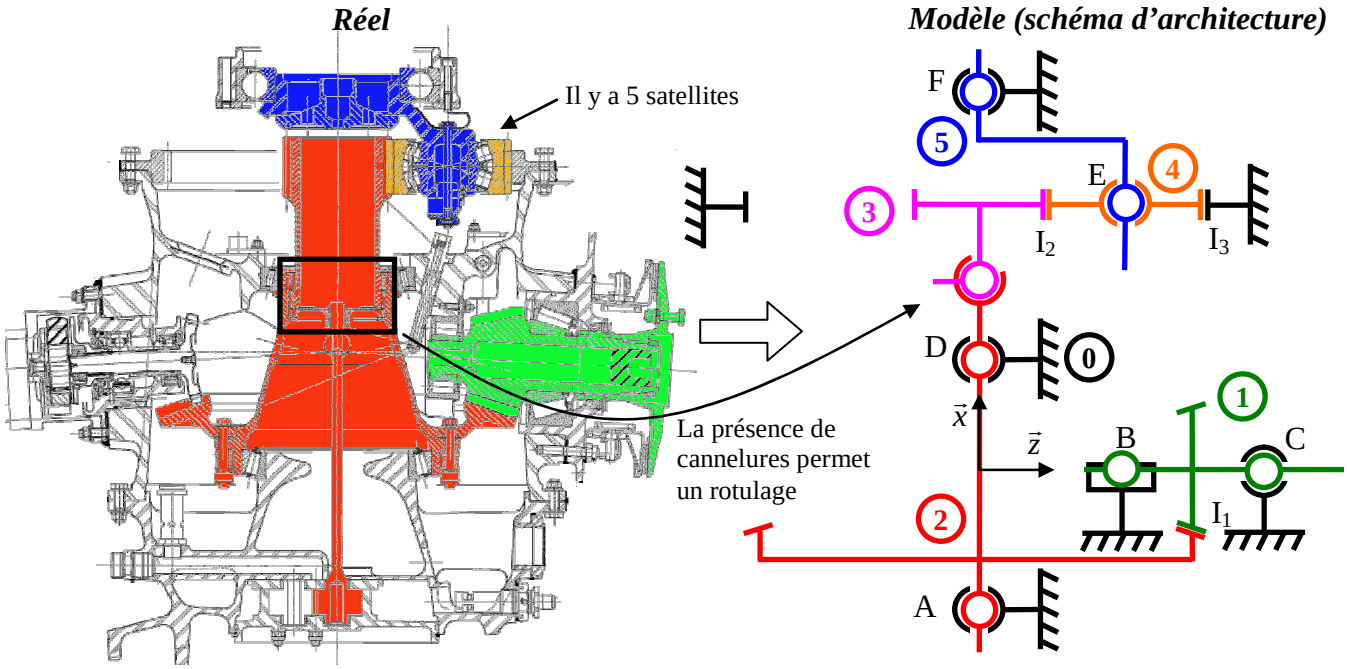
$$\boxed{\gamma = L - S + 1}$$

Avec :

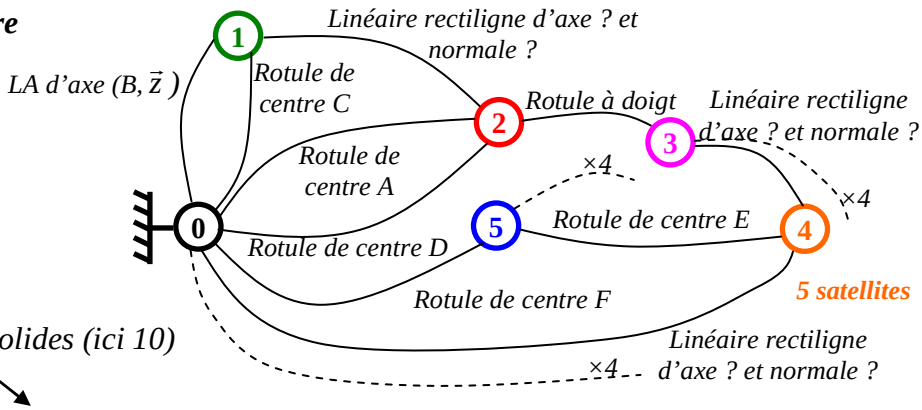
- L : nombre de liaisons sur le graphe de structure
- S : nombre de solides

Dans le cas d'une chaine **cinématique ouverte γ est nul**. Dans le cas d'une **chaine cinématique fermée simple γ vaut 1**. En fait on ne calcule γ avec la formule que dans le cas de chaines cinématiques complexes…

Application : Calcul de γ pour un modèle de la BTP



Graphe de structure



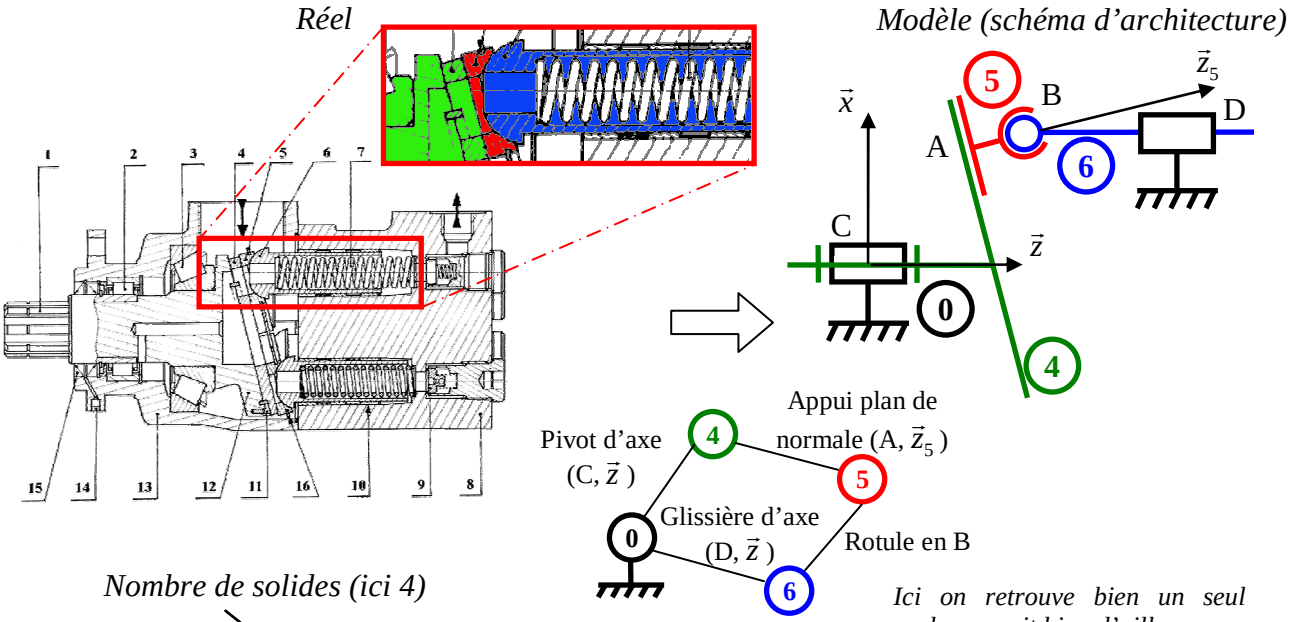
Nombre de solides (ici 10)

Calcul de γ : *$\gamma = L - S + 1 = 22 - 10 + 1 = 13$ cycles indépendants*

Nombre de liaisons (ici 22)

Application : Calcul de γ pour un modèle de la pompe hydraulique équipant l'hélicoptère.

Réel *Modèle (schéma d'architecture)*



Nombre de solides (ici 4)

Calcul de γ : *$\gamma = L - S + 1 = 4 - 4 + 1 = 1$ cycle indépendant*

Ici on retrouve bien un seul cycle, on voit bien d'ailleurs que l'on peut s'abstenir du calcul simplement à la vue du graphe de structure…

Nombre de liaisons (ici 4)

4.2. Indice de mobilité m

On définit l'**indice de mobilité m** d'un modèle par la relation :

$$\underbrace{\mathbf{m = N_C - E_C}}_{\text{Calcul de m par la méthode cinématique}} \mathbf{= E_S - N_S}$$

Calcul de m par la méthode statique

Avec :

- N_C : somme des inconnues cinématiques de toutes les liaisons du modèle.
- $E_C = 6.\gamma$: nombre d'équations scalaires obtenues par fermeture(s) cinématique(s) d'un modèle constitué de γ cycles indépendants.
- $E_S = 6.(S - 1)$: nombre d'équations scalaires obtenues par le principe fondamental de la statique sur un modèle constitué de S solides.
- N_S : somme des inconnues statiques de chaque liaison sur le modèle.

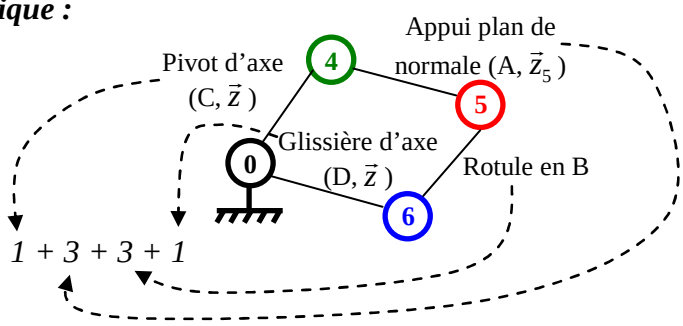
Application : Calcul de m pour un modèle de la pompe hydraulique équipant l'hélicoptère.

Calcul de m par la méthode cinématique :

$6.\gamma$ *avec* $\gamma = 1$ *ici*

$m = N_C - E_C = 8 - 6 = 2$

Nombre d'inconnues cinématiques $= 1 + 3 + 3 + 1$

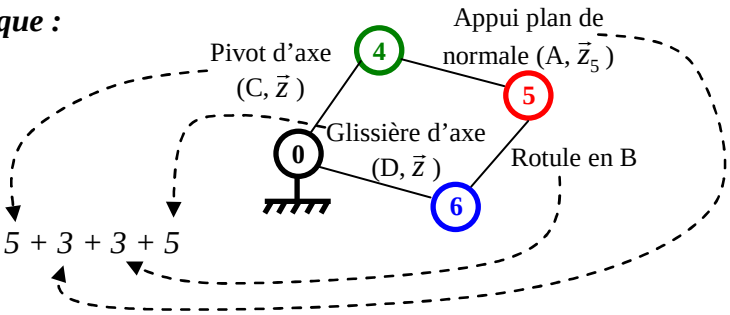


Calcul de m par la méthode statique :

$6.(S - 1)$ *avec* $S = 4$ *ici*

$m = E_S - I_S = 18 - 16 = 2$

Nombre d'inconnues statiques $= 5 + 3 + 3 + 5$



Application : Calcul de m pour un modèle de la BTP

Calcul de m par la méthode cinématique :

$6.\gamma$ *avec* $\gamma = 13$ *ici*

$m = N_C - E_C = 77 - 78 = -1$

9 rotules

$11 \times 4 + 4 + 9 \times 3 + 2$

1 linéaire annulaire

11 linéaires rectilignes

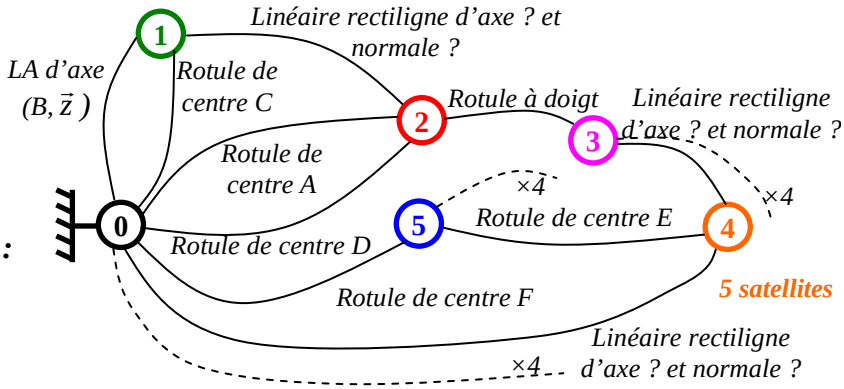
1 rotule à doigt

Calcul de m par la méthode statique :

$6.(S - 1)$ *avec* $S = 10$ *ici*

$m = E_S - N_S = 54 - 55 = -1$

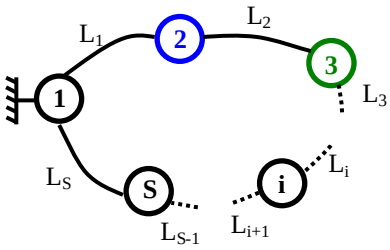
$11 \times 2 + 2 + 9 \times 3 + 4$



5. Calcul pratique de l'hyperstaticité (ou hyperstatisme) d'un modèle

5.1. Calcul du degré d'hyperstatisme pour une chaine fermée simple

L'application du Principe Fondamental de la Statique aux S – 1 solides constituant la chaîne simple fermée (on n'isole jamais le bâti), permet d'obtenir $E_S = 6(S - 1)$ équations entre les N_S inconnues de liaison.



Soit $\mathbf{r_S}$ le **rang du système**, c'est à dire le nombre d'équations linéairement indépendantes par rapport aux $\mathbf{N_S}$ **inconnues statiques de liaisons.**

Pour chaque mobilité du système, on obtient dans les E_S équations du système :

- une équation de type 0 = 0 (ou $F_{ext} = 0$),
- une équation linéairement dépendante des autres (c'est-à-dire une relation d'entrée-sortie entre les actions mécaniques extérieures).

On obtient donc $m_C = m_i + m_u$ équations linéairement dépendantes des autres et on a alors le rang du système qui vaut :

$$r_S = E_S - m_C \quad (1)$$

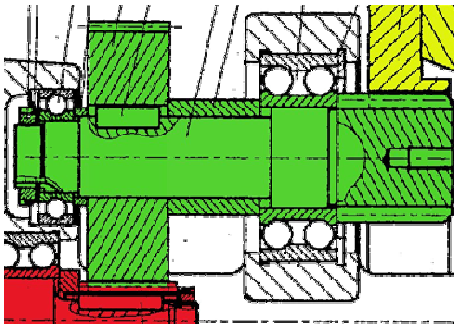
On définit le degré d'hyperstatisme h du modèle par la différence entre le nombre d'inconnues statiques des liaisons N_S et le nombre d'équations linéairement indépendantes r_S soit :

$$h = N_S - r_S \qquad (2)$$

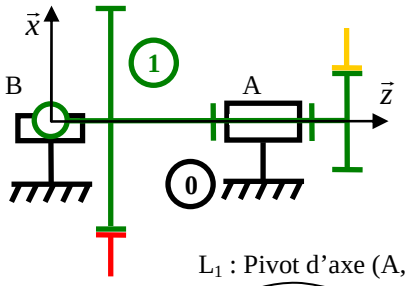
Ce qui veut dire que pour résoudre le système des E_S équations de statique, il est nécessaire de se fixer la valeur de h inconnues appelées inconnues hyperstatiques.

Application : Calcul de h pour un modèle de montage d'un arbre de l'étage de sortie du moteur de l'hélicoptère écureuil.

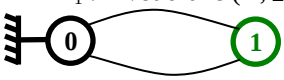
Réel



Modèle (schéma d'architecture)



L_1 : Pivot d'axe (A, $\vec{z}$)



L_2 : Linéaire annulaire d'axe (B, $\vec{z}$)

On isole 1, on effectue le bilan des actions mécaniques extérieures.

$$\left\{F_{0\to1}^{L_1}\right\} = {}_A\begin{Bmatrix} X_{01}^{L_1} & L_{01}^{L_1} \\ Y_{01}^{L_1} & M_{01}^{L_1} \\ Z_{01}^{L_1} & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{et} \quad \left\{F_{0\to1}^{L_2}\right\} = {}_B\begin{Bmatrix} X_{01}^{L_2} & 0 \\ Y_{01}^{L_2} & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \quad \text{Soit } N_S = 5 + 2 = 7 \text{ inconnues statiques}$$

On applique le PFS sur 1 au point A : $\rightarrow \overrightarrow{AB} = -l.\vec{z} \rightarrow \left\{F_{0\to1}^{L_2}\right\} = {}_A\begin{Bmatrix} X_{01}^{L_2} & l.Y_{01}^{L_2} \\ Y_{01}^{L_2} & -l.X_{01}^{L_2} \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$

$$\text{Soit :} \begin{cases} X_{01}^{L_1} + X_{01}^{L_2} = 0 \\ Y_{01}^{L_1} + Y_{01}^{L_2} = 0 \\ Z_{01}^{L_1} = 0 \\ L_{01}^{L_1} + l.Y_{01}^{L_2} = 0 \\ M_{01}^{L_1} - l.X_{01}^{L_2} = 0 \\ 0 = 0 \end{cases}$$

soit 5 relations indépendantes $\rightarrow r_S = 5$

$0 = 0 \longleftarrow$ *1 mobilité*

Le degré d'hyperstatisme h du modèle vaut donc $h = N_S - r_S = 7 - 5 = 2$

5.2. Formule de mobilité

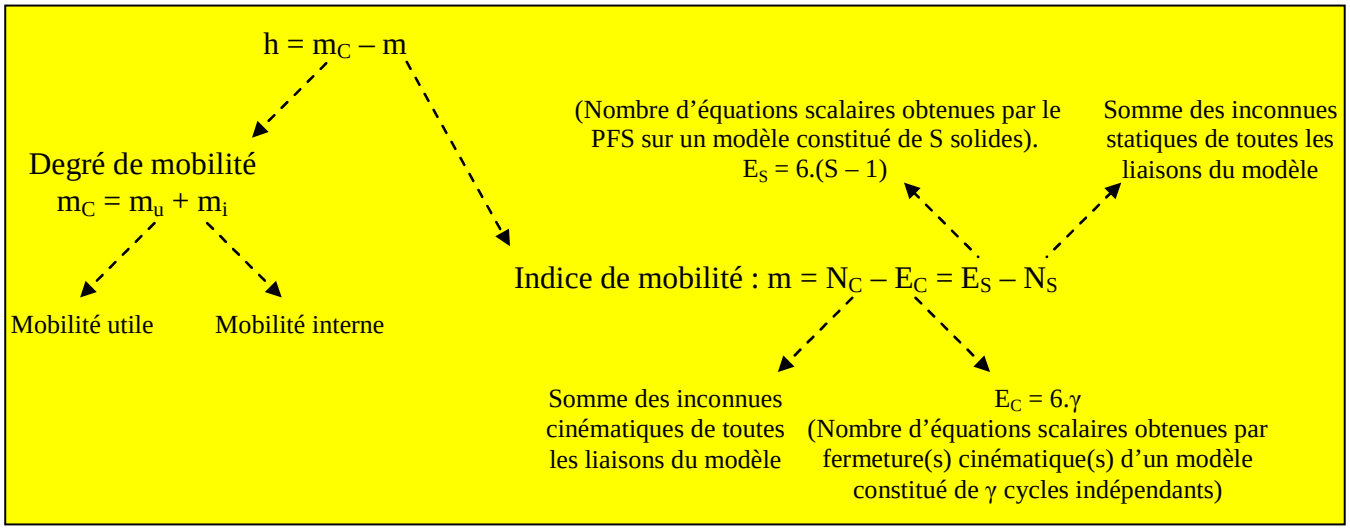
En remplaçant r_S dans (2) par son expression (1) on obtient au final :

$$h = N_S - E_S + m_C \qquad (3)$$

Enfin en remarquant dans l'expression (3) que $N_S - E_S = -m$, on obtient au final la **formule de mobilité** qui permet de calculer le **degré d'hyperstatisme h d'un modèle** en fonction du degré de mobilité m_C et de l'indice de mobilité m :

$$\boxed{\mathbf{h = m_C - m}}$$

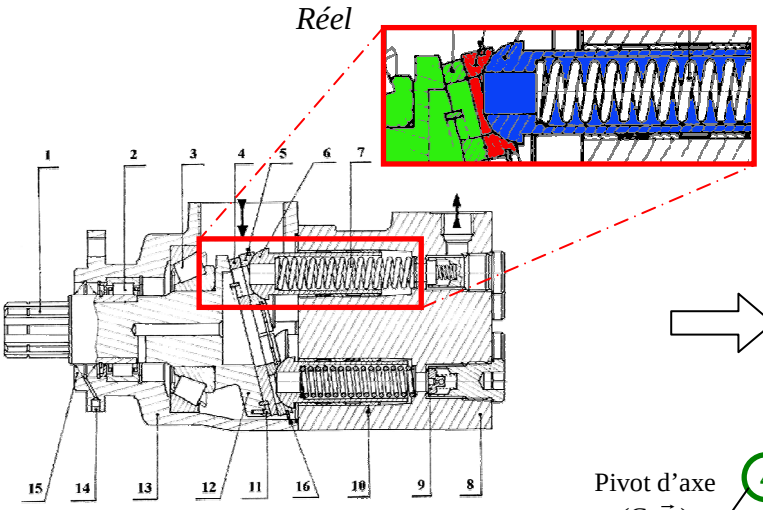
Avec :



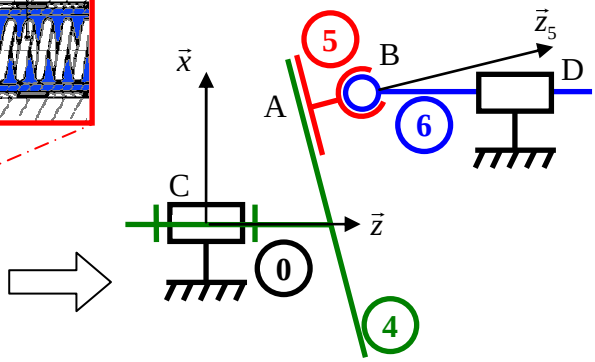
C'est LA technique à utiliser au concours pour calculer le degré d'hyperstatisme h d'un modèle.

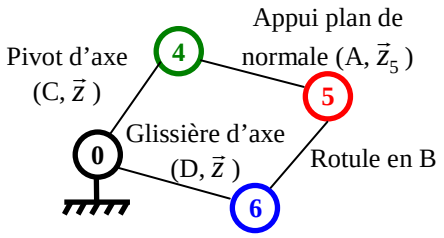
Application : Calcul de h pour un modèle de la pompe hydraulique équipant l'hélicoptère.

Réel



Modèle (schéma d'architecture)

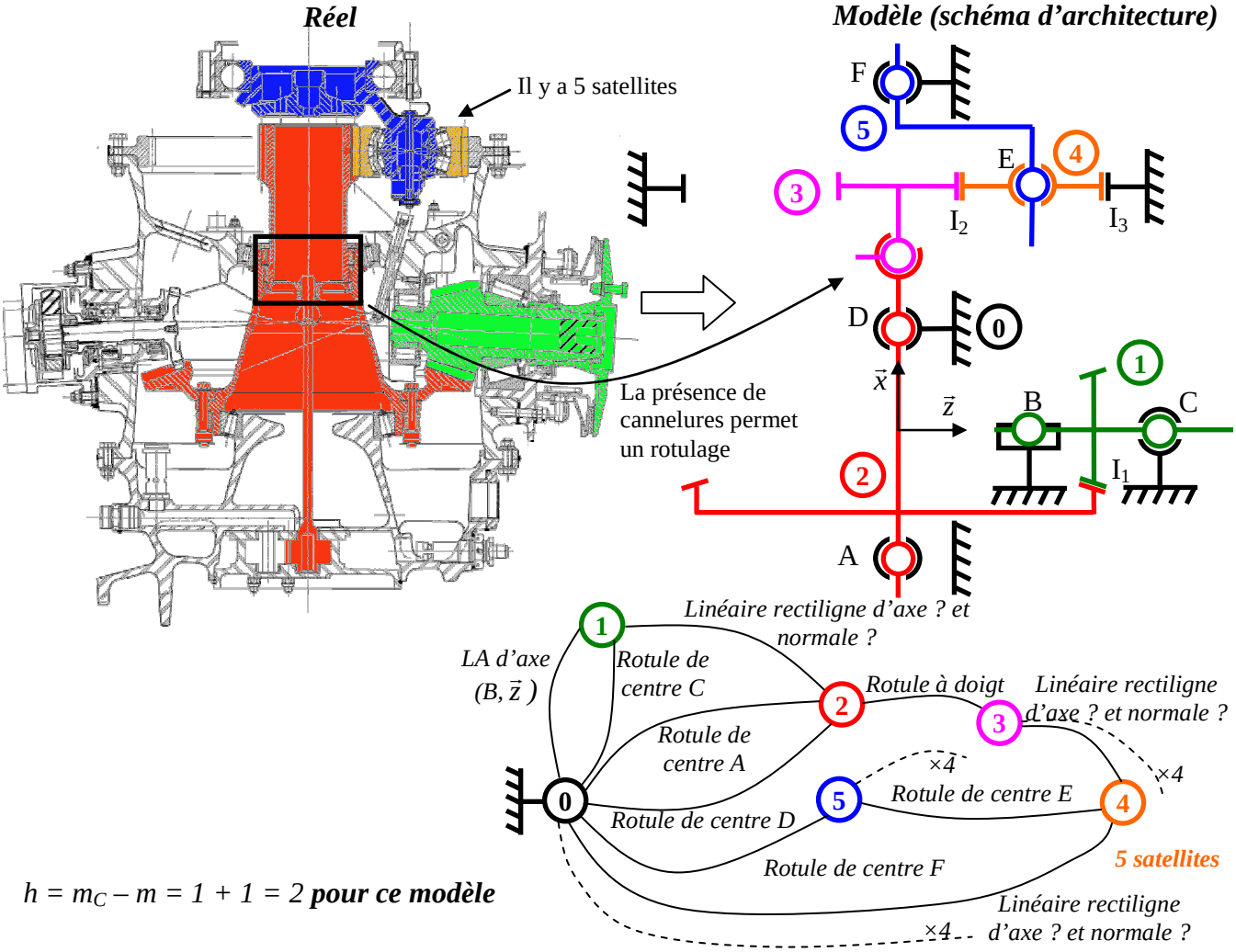




$h = m_C - m = 2 - 2 = 0$ ***pour ce modèle***

Application : Calcul de h pour un modèle de la BTP

Réel ***Modèle (schéma d'architecture)***



$h = m_C - m = 1 + 1 = 2$ ***pour ce modèle***

6. Interprétation du degré d'hyperstatisme

L'interprétation du degré d'hyperstatisme (surtout sur les chaines cinématiques complexes) est toujours délicat et il convient d'avoir systématiquement un œil critique sur les modèles étudiés (voir exemple précédent).

Si **h = 0**, la liaison est dite « **isostatique** », les équations déduites du principe fondamental de la statique suffisent à la détermination de toutes les inconnues de liaison. Il n'y a pas d'efforts parasites dans les liaisons lorsque les torseurs d'efforts extérieurs sont nuls. De plus la mise en position de l'un des solides par rapport à l'autre est unique (ce qui est utile par exemple pour les appareils de précision).

Si **h > 0** : la liaison est dite « **hyperstatique d'ordre h** ». Dans ce cas :

- soit les surfaces ne sont pas toutes en contact simultanément,
- soit des efforts parasites sont présents entre les surfaces et les pièces ont subi des déformations lors du montage. Ces effets néfastes sont provoqués par les inévitables imperfections dans le positionnement des surfaces, qui proviennent principalement des défauts de fabrication.

6.1. Intérêt de concevoir une liaison ou une chaine fermée hyperstatique

Une liaison hyperstatique ou une chaine fermée hyperstatique peuvent présenter l'avantage d'être plus résistante lorsque les efforts à transmettre sont importants.

6.2. Comment faire pour limiter les effets néfastes de l'hyperstatisme d'une liaison ou d'une chaine fermée de solides ?

Pour éviter les effets néfastes de l'hyperstaticité, il faut prévoir d'effectuer des usinages de très grande précision sur les pièces, pour que les surfaces soient le plus près possible de leur position théorique. Ceci demande la mise en place de contraintes de positionnement très restrictives entre les différentes surfaces concernées d'une même pièce (on appelle cela les tolérances géométriques). Ces contraintes entrainent par contre une augmentation importante des coûts.

6.3. Modification d'une modélisation dans le but de la rendre isostatique

Il faut diminuer le nombre des inconnues statiques N_S en ajoutant des degrés de liberté dans les liaisons élémentaires qui contiennent les inconnues hyperstatiques de façon à supprimer ces inconnues surabondantes.

On peut selon la nature des surfaces :

- soit supprimer certaines zones de contact mais la liaison risque de moins bien remplir son rôle,
- soit réduire la dimension des zones de contact mais la liaison est plus fragile,
- soit ajouter des jeux (petits espaces) donnant des mobilités entre les pièces mais la liaison est moins précise,
- soit ajouter des pièces et des liaisons pour donner localement plus de mobilités.