

Modéliser le comportement des systèmes mécaniques dans le but d'établir une loi de comportement ou de déterminer des actions mécaniques en utilisant le PFD

Sciences
Industrielles de
l'Ingénieur

Cours

Chapitre 1

Introduction à la dynamique du solide indéformable

Savoirs et compétences :

- ☐ Res1.C2 : principe fondamental de la dynamique;
- ☐ Res1.C1.SF1 : proposer une démarche permettant la détermination de la loi de mouvement.

1	Introduction	2
1.1	Définitions	2
2	Principe Fondamental de la Dynamique : applications simplifiées	2
2.1	Cas particulier d'un solide en translation	2
2.2	Cas d'un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe	2
3	Principe Fondamental de la Dynamique : cas général	3
3.1	Principe Fondamental de la Dynamique	3
3.2	Équations de mouvement	3
3.3	Théorèmes généraux	3
4	Objectif et Méthodologie	4
4.1	Objectifs	4
4.2	Méthodologie	4

1 Introduction

Objectif

L'objectif de ce cycle est double. L'étude dynamique des systèmes de solide permet de

- déterminer les actions mécaniques dans les liaisons en tenant compte des masses (et des répartitions de masses) des pièces ou des classes d'équivalence cinématique;
- dimensionner les actionneurs permettant d'actionner un système (on parle aussi d'équations de mouvement).

Définition — Référentiel galiléen. Un **référentiel galiléen** se définit à partir d'une repère spatial (orthonormée direct $(O_g; \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g)$) et d'une base de temps (t) et est animé d'un mouvement de **translation rectiligne uniforme** (à vitesse constante) par rapport à un référentiel absolu fixe ou à un autre référentiel galiléen $(O; \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

On peut également le définir comme un référentiel « dans lequel le principe fondamental de la dynamique s'applique ».



Dans la pratique, on fera toujours la **supposition qu'un repère est galiléen**. Cela dépendra effectivement des mouvements mis en jeu et des **échelles temporelles et spatiales** considérées. Par exemple :

- pour étudier des mouvements de l'ordre de quelques minutes à l'échelle humaine, le **référentiel terrestre** (origine liée au centre de la terre et les trois axes liés au globe terrestre) est approprié;
- pour étudier les effets météorologiques (ouragans, courants marins), ou les mouvements des satellites, il convient alors de tenir compte de l'inertie de la terre et on pourra choisir le **référentiel géocentrique** (origine liée au centre de la terre et les trois axes dirigés vers trois étoiles très éloignées) comme référentiel galiléen;
- pour étudier le mouvement des planètes, il convient mieux d'utiliser le **référentiel héliocentrique** (origine liée au centre du soleil et les trois axes dirigés vers trois étoiles très éloignées).

Une chronologie galiléenne est obtenue par une horloge précise (Quartz, atomique, ou mouvement des astres). En mécanique classique (ou Newtonienne), les deux repères d'**espace et de temps** sont supposés **indépendants** ce qui n'est pas le cas de la mécanique relativiste.

2 Principe Fondamental de la Dynamique : applications simplifiées

2.1 Cas particulier d'un solide en translation

Définition — Solide en translation par rapport à un référentiel galiléen. Si un ensemble matériel E (de centre d'inertie G) est en mouvement de translation dans un référentiel galiléen (R_g) alors :

- **Théorème de la résultante dynamique :** la résultante des efforts extérieurs est égale au produit de la masse par l'accélération de G par rapport à R_g :

$$m \vec{a}(G/R_g) = \vec{R}(\vec{E} \rightarrow E) \quad (1)$$

- **Théorème du moment dynamique :** le moment des actions mécaniques extérieures s'appliquant sur E est égal au vecteur nul en tout point :

$$\vec{\mathcal{M}}(A, \vec{E} \rightarrow E) = \vec{0} \quad \forall A \quad (2)$$

2.2 Cas d'un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe

Définition — Solide en rotation autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Si un ensemble matériel E (de centre d'inertie G) est en mouvement de rotation autour d'un axe Δ (dirigé par \vec{u} unitaire) fixe dans un référentiel galiléen (R_g) alors :

- **Théorème du moment dynamique :** Le moment des actions mécaniques extérieures s'appliquant sur E est égal au vecteur nul en tout point de l'axe :

$$\vec{\mathcal{M}}(A, \vec{E} \rightarrow E) \cdot \vec{u} = J_{\Delta}(E) \cdot \ddot{\theta} \quad \forall A \in \Delta \quad (3)$$

- avec $J_{\Delta}(E)$ le moment d'inertie de E par rapport à l'axe Δ (en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$);
- avec $\ddot{\theta}$, l'accélération angulaire de E par rapport à R_g suivant Δ : $\vec{\Omega}(E/R_g) \cdot \vec{u}$.

3 Principe Fondamental de la Dynamique : cas général

3.1 Principe Fondamental de la Dynamique

Définition — Énoncé du Principe Fondamental de la Dynamique. Dans le cas général, soit un ensemble matériel E en mouvement par rapport à un référentiel galiléen (R_0), alors la somme des actions mécaniques extérieures (Torseur des actions mécaniques extérieures s'appliquant sur E est égale au **torseur dynamique** du mouvement de E par rapport à R_0 :

$$\{\mathcal{T}(\bar{E} \rightarrow E)\} = \{\mathcal{D}(E/R_0)\} \quad (4)$$

De plus le **Principe Fondamental de la Dynamique** postule que pour tout mouvement, il existe au moins un référentiel dans lequel la relation 4 est vérifiée. Ce sera donc un **référentiel galiléen**.



- Les démarches pour le calcul du torseur dynamique seront vues dans le cours C3-2.
- La démarche de calcul du torseur des actions mécaniques extérieures appliquées sur E est la même que celle vu lors de l'utilisation du PFS (ce sont les mêmes torseurs).

3.2 Équations de mouvement

Définition — Équations de mouvement. Une **équation de mouvement** est une équation différentielle du second ordre traduisant les théorèmes généraux, dans laquelle ne figure **aucune composante inconnue d'action mécanique**.

Il est parfois nécessaire d'écrire plusieurs équations pour trouver par substitution une équation de mouvement.

On nomme « **Intégrale première du mouvement** » une équation différentielle du premier ordre avec un second membre constant, obtenue par intégration d'une équation de mouvement.

3.3 Théorèmes généraux

Du Principe Fondamental de la dynamique découle plusieurs théorèmes généraux.

3.3.1 Théorème de la résultante dynamique

Théorème — de la résultante dynamique. Pour tout ensemble matériel (E) de masse m et de centre de gravité G en mouvement par rapport à un référentiel galiléen (R_0), la somme des résultantes des efforts extérieurs s'appliquant sur E est égale à la résultante dynamique du mouvement de E par rapport à R_0 :

$$\overrightarrow{R}(\bar{E} \rightarrow E) = \overrightarrow{R_d}(E/R_0) = m \overrightarrow{a}(G/R_0). \quad (5)$$



On peut alors définir un Newton comme l'effort à mettre en œuvre pour mettre en mouvement 1 kg avec une accélération de $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ en son centre de gravité G .

3.3.2 Théorème du moment dynamique

Théorème — du moment dynamique. Pour tout ensemble matériel (E) de masse m en mouvement par rapport à un référentiel galiléen (R_0), la somme des moments des efforts extérieurs s'appliquant sur E en un point quelconque A est égale au moment dynamique du mouvement de E par rapport à R_0 en A :

$$\overrightarrow{\mathcal{M}}(A, \bar{E} \rightarrow E) = \overrightarrow{\delta}(A, E \rightarrow R_0). \quad (6)$$

3.3.3 Théorème des actions mutuelles

Théorème — des actions mutuelles. Soient (E_1) et (E_2) deux sous-ensembles matériels de (E), en mouvement par

rapport à un référentiel galiléen, et exerçant une action mécanique l'un sur l'autre. Alors :

$$\{\mathcal{T}(E_1 \rightarrow E_2)\} = -\{\mathcal{T}(E_2 \rightarrow E_1)\}$$

(7)

4 Objectif et Méthodologie

4.1 Objectifs

On distingue deux principaux types de problèmes en dynamique :

- **Type 1 :**
 - on connaît : les actionneurs et les inerties ;
 - on détermine : les lois de mouvement et les actions mécaniques dans les liaisons.
- **Type 2 :**
 - on connaît : les lois de mouvement et inerties ;
 - on détermine : les caractéristiques des actionneurs et les actions mécaniques de liaison.

4.2 Méthodologie

La méthodologie de résolution d'un problème de dynamique est très similaire à celle utilisée lors de la détermination des performances statiques des systèmes.

1. On choisit un repère galiléen et on effectue le bilan complet des données d'entrée du problème.
2. On construit un graphe de structure.
3. On isole le solide ou le système de solides considéré.
4. On effectue le Bilan des Actions Mécaniques Extérieures agissant sur le système isolé.
5. On écrit le PFD.
6. On projette les relations vectorielles sur les axes choisis.
7. On injecte les lois de comportement (ressort, lois de Coulomb, ...).
8. On effectue la résolution.

Références

- [1] Emilien Durif, *Introduction à la dynamique des solides*, Lycée La Martinière Monplaisir, Lyon.
- [2] Florestan Mathurin, *Correction des SLCI*, Lycée Bellevue, Toulouse, <http://florestan.mathurin.free.fr/>.