Dynamique

Quel est le lien entre le mouvement d'un système et les forces qui s'appliquent sur lui ?

Plan du cours

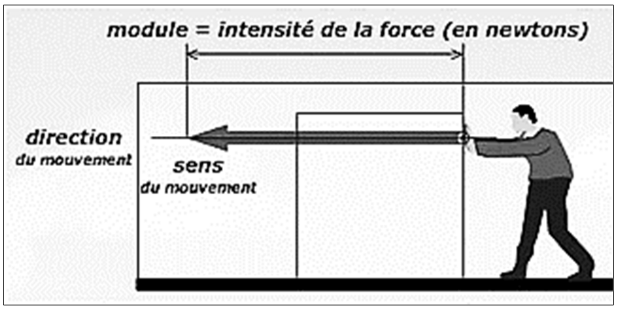
1. A propos du système

- On assimile le système à un point matériel : son ***centre de masse*** (ou centre d'inertie). La position de ce point dépend de la répartition des masses dans le système.
- Un système ***isolé*** ne subit aucune force.
- Un système est dit ***pseudo-isolé*** si la résultante (somme vectorielle) des forces qui lui sont appliquées est nulle.

2. Rappel sur les forces

Une force ***modélise*** une action mécanique exercée sur un système. Elle se représente par un vecteur. Elle possède donc :

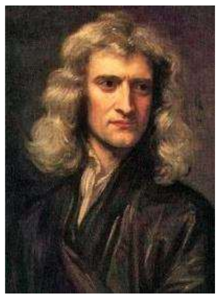
- une norme (qui s'exprime en Newton) ;
- une direction ;
- un sens ;
- un point d'application.



Remarque : les forces ne dépendent pas du référentiel.

Voir le tableau en fin de chapitre pour un listing des forces usuelles à connaitre.

3. Les lois de Newton (1642-1727)



Les 2 premières lois sont valables dans un **référentiel galiléen** (c'est-à-dire un référentiel dans lequel les 2 premières lois de Newton sont vérifiées…).

3.1. Principe d'inertie (1ère loi de Newton)

> *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.*

➔ Un système isolé ou pseudo-isolé ne change pas de vitesse ! (vecteur vitesse $\vec{v}$ constant).

➔ Un système isolé ou pseudo-isolé a une accélération nulle !

Remarque : D'après le principe d'inertie, deux référentiels galiléens sont en translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre.

3.2. Principe Fondamental de la Dynamique (2ème loi de Newton)

Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

- Version moderne simplifiée pour un système fermé (***masse constante***) :

L'accélération $\vec{a}$ d'un système de masse m dépend de la résultante des forces extérieures $\overrightarrow{\mathrm{F}_{\mathrm{ext}}}$ auxquelles il est soumis selon la relation :

$$\boxed{\boldsymbol{m}.\vec{\boldsymbol{a}} = \sum \overrightarrow{\mathrm{F}_{\mathrm{ext}}}}$$

Le principe d'inertie est un cas particulier du Principe Fondamental de la Dynamique ($\vec{a} = \vec{0}$).

3.3. Principe des actions réciproques (3ème loi de Newton)

L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales en norme, de même direction mais de sens contraires.

Soit 2 systèmes A et B en interaction. On a :

$$\overrightarrow{F_{A/B}} = -\overrightarrow{F_{B/A}}$$

4. Théorème de la résultante cinétique

4.1. Quantité de mouvement

Le vecteur ***quantité de mouvement*** $\overrightarrow{\boldsymbol{p}_M}$ d'un point matériel est défini comme étant le produit de la masse $\boldsymbol{m}$ associée à ce point et son vecteur vitesse $\overrightarrow{\boldsymbol{v}_M}$:

$$\boxed{\overrightarrow{\boldsymbol{p}_M} = \boldsymbol{m}\,.\overrightarrow{\boldsymbol{v}_M}}$$

Pour un système de points matériels $\mathbb{S}$, la quantité de mouvement du système est simplement la somme des quantités de mouvements de chacun des points du système :

$$\overrightarrow{\boldsymbol{p}_{\mathbb{S}}} = \sum_i \overrightarrow{\boldsymbol{p}_{M_i}}$$

4.2. Théorème de la résultante cinétique

La forme générale de la seconde loi de Newton s'appelle aussi le théorème de la résultante cinétique. Pour un système $\mathbb{S}$ dans un référentiel galiléen, elle s'écrit :

$$\boxed{\frac{d\overrightarrow{\boldsymbol{p}_{\mathbb{S}}}}{dt} = \sum \overrightarrow{\mathrm{F}_{\mathrm{ext}}}}$$

4.3. Théorème de la résultante cinétique pour un système isolé

Le théorème de la résultante cinétique appliquée à un système isolé ou pseudo-isolé permet de dire que pour un tel système la quantité de mouvement se conserve *(= reste constante)* au cours du temps.

Si le système est constitué de 2 parties A et B de masse $\boldsymbol{m_A}$ et $\boldsymbol{m_B}$ respectivement, on a :

$$\overrightarrow{\boldsymbol{p}_A} + \overrightarrow{\boldsymbol{p}_B} = \boldsymbol{m_A}.\overrightarrow{\boldsymbol{v}_A} + \boldsymbol{m_B}.\overrightarrow{\boldsymbol{v}_B} = \overrightarrow{\boldsymbol{cste}}$$

Cette propriété permet d'étudier l'évolution des vitesses lors de l'éclatement d'un système ou lors du choc entre 2 sous-systèmes.

5. Méthode de résolution des exercices

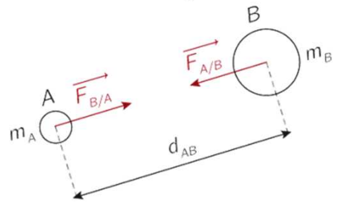
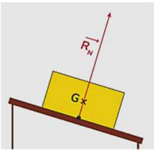
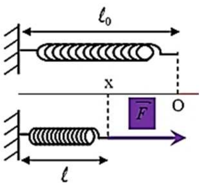
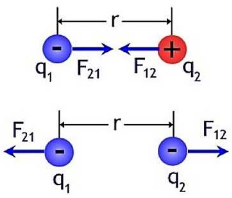
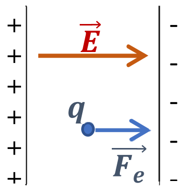
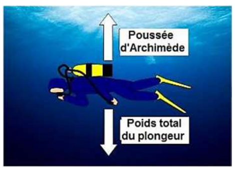
Afin d'obtenir les équations décrivant le mouvement, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'étapes :

1. **Schéma** que l'on complète au fur et à mesure.
2. Définition du **système étudié**.
3. Définition du **référentiel** d'étude (*on précise qu'il est galiléen pour utiliser les lois de Newton*).
4. Choix du ***système de coordonnées*** adapté à la symétrie du mouvement étudié, associé à une base (cartésienne, cylindrique, polaire, sphérique).
5. **Bilan des forces extérieures** s'exerçant sur le système (on peut utiliser un diagramme interactions/objets). On fait apparaitre ces forces sur le ***schéma*** de la situation. On donne leur décomposition dans la base choisie.
6. *Cinématique* : on exprime l'accélération du point matériel dans le système de coordonnées et la base choisie.
7. Si la masse du système est constante, on applique la 2ème loi de Newton (**principe fondamental de la dynamique**) afin d'obtenir l'expression *vectorielle* de l'accélération.
8. Projection sur les vecteurs de base : on en déduire les équations différentielles du mouvement.
9. Résolution des équations différentielles : « à la main » ou en utilisant la méthode d'Euler (résolution numérique) pour obtenir les équations horaires du mouvement.
10. *Si nécessaire*, en combinant les équations horaires du mouvement, on obtient l'***équation de la trajectoire***.
11. Utilisation des données du problème pour vérifier telle ou telle condition indiquée dans la question.

Au programme

Notions et contenus	Capacités exigibles	Dans les exercices
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur un schéma.	Tout le chapitre !
Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.	Section 3.1
Deuxième loi de Newton.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre de masse d'un système fermé dans un référentiel galiléen. ***Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force par exemple à l'aide d'un microcontrôleur.***	TP4 Exercices 2, 3, 4, 7. TP3
Force de gravitation. Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Etudier le mouvement d'un système modélisé par un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.	TP4 Exercices 3, 4 et 7.
Modèles d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique. Écrire une équation adimensionnée. ***Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.***	TP4 Exercice 6. DM2 TP4
Quantité de mouvement Masse d'un système. Conservation de la masse pour système fermé. Quantité de mouvement d'un point et d'un système de points. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.	Établir l'expression de la quantité de mouvement pour un système de deux points sous la forme : p=m,v(G).	Exercices 5.

6. Inventaire non exhaustif des forces

Force	Point d'application	Direction	Sens	Norme
Attraction gravitationnelle force exercée par B sur A 	Centre de gravité	Droite AB	De A vers B	$F_{B/A} = G\dfrac{m_A.m_B}{{d_{AB}}^2}$ m_A : masse de A (en kg) m_B : masse de B (en kg) d_{AB} : distance entre A et B (en m). G : constante gravitationnelle (= 6,67 x 10^{-11} N.m².kg^{-2}).
Poids **(force gravitationnelle à la surface d'un astre + pseudo force centrifuge)**	Centre de gravité	Verticale	Vers le bas	$P = m.g$ m : masse (en kg). g : intensité du champ de pesanteur (en N.kg^{-1}).
 **Réaction du support**	Centre de la surface de contact	Perpendiculaire au support	Du support vers le système	
Frottements — solide	Centre de la surface de contact	Même direction que la vitesse	Opposé au mouvement	**Loi de Coulomb** : Norme proportionnelle à la réaction du support (Coefficient de frottement f)
Frottements — fluide				Dépend de la vitesse
Tension d'un fil	Point de fixation du fil	Axe du fil	Du système vers le fil	
 **Force de rappel d'un ressort** (loi de Hooke)	Point de fixation du ressort	Axe du ressort	Si le ressort est comprimé : vers le système Si le ressort est allongé : vers le ressort	$F_r = k.\|l - l_0\|$ l : longueur du ressort (en m) l_0 : longueur au repos (en m) k : constante de raideur (en N.m^{-1}).
Force électrique entre 2 espèces chargées 	Centre de gravité (si répartition homogène de la charge)	Droite passant par le centre des deux charges	Si charges de signes opposés : Vers l'autre charge Si charges de même signe : A l'opposé de l'autre charge	$F_{2/1} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\|q_1.q_2\|}{r^2}$ q_1 : charge de 1 (en C) q_2 : charge de 2 (en C) r : distance entre les 2 charges (en m). $1/4\pi\varepsilon_0$: constante de Coulomb (= 8,99 x 10^9 N.m².C^{-2}).
Force électrique associée à un champ électrique 	Centre de gravité (si répartition homogène de la charge)	Même direction que le champ électrique	Si la charge q est positive, même sens que le champ électrique Si la charge q est négative, sens opposé à celui du champ électrique	$F_e = \|q\|.E$ q : charge de la particule (en C) E : intensité du champ électrique (en V.m^{-1})
Poussée d'Archimède 	Centre de poussée (Centre du volume de fluide déplacé)	Verticale	Vers le haut	$P_{\text{Archi}} = \rho.V.g$ ρ : masse volumique du fluide en (kg.m^{-3}). V : volume de fluide déplacé (en m^3). g : intensité du champ de pesanteur (en N.kg^{-1}).