Chapitre 2 : Dynamique du point en référentiel galiléen

1. Étude dynamique du mouvement d'un point matériel

1.1. Nécessité d'une étude dynamique

L'objet de la cinématique vu au chapitre précédent était la description du mouvement d'un point matériel à l'aide des vecteurs position, vitesse et accélération. Nous ne nous sommes ainsi jamais intéressés aux causes pouvant être à l'origine de ce mouvement. Pour cela, nous devons effectuer une étude dynamique du mouvement qui reposera principalement sur l'utilisation des trois lois de Newton.

1.2. Masse

Tout corps possède une certaine capacité à résister au mouvement. Toutefois, celle-ci diffère d'un corps à un autre bien que ceux-ci peuvent être géométriquement très proches.
Exemple : une balle de tennis et une boule de pétanque
Cette capacité à résister au mouvement est appelée inertie. Afin de quantifier cette propriété d'un système matériel, on introduit une nouvelle grandeur : la masse inerte ou inertielle exprimé en kg.

La masse est une grandeur :
- intrinsèque : elle ne dépend que du corps concerné
- extensive (additive) : la masse de la réunion de deux corps distincts est la somme des masses de chacun d'entre eux
- La masse d'un système peut être constante au cours du temps (système fermé) ou variable (système ouvert ; exemple : fusée et ses réservoirs)

1.3. Quantité de mouvement

Dans un référentiel $\mathcal{R}$, la quantité de mouvement a été introduite par Isaac Newton afin de formuler les trois lois qui portent son nom. Il s'agit d'une grandeur vectorielle définie par :

$$\overrightarrow{p_{M/R}} = m\overrightarrow{v_{M/R}}$$

où m et $\overrightarrow{v_{M/R}}$ sont respectivement la masse et la vitesse du système considéré dans le référentiel $\mathcal{R}$.

2. Forces et interactions

2.1. Notion de forces

L'expérience montre qu'il est possible de mettre en mouvement un système ponctuel ou de modifier son mouvement. On parle d'actions extérieures au système pouvant influer sur son mouvement. Ces actions sont indépendantes du référentiel d'étude $\mathcal{R}$.

Afin de décrire une action capable de modifier/produire un mouvement d'un système ponctuel, on introduit un vecteur force $\vec{f}$. On appelle résultante des forces la grandeur vectorielle $\vec{F}$ issue de l'addition des forces agissant sur le système.

$$\vec{F} = \sum_i \vec{f_i}$$

On dit d'un point qu'il est isolé si et seulement s'il n'est soumis à aucune interaction avec l'extérieur. Il sera dit pseudo-isolé si la résultante des forces qui lui sont appliquées est nulle.

Dans les deux cas, nous pourrons écrire :

$$\vec{F} = \vec{0}$$

2.2. Interactions fondamentales

Si nous distinguerons par la suite les forces à distance et les forces de contact, celles-ci correspondent à la traduction, au niveau macroscopique, des effets de quatre interactions fondamentales :

- l'interaction gravitationnelle (portée infinie) : elle met en jeu des particules dotées d'une masse ; elle permet entre autres d'expliquer la nature des trajectoires des astres et planètes.

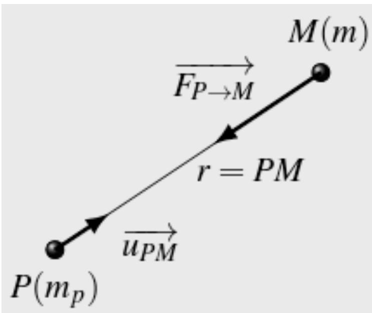
- l'interaction électromagnétique (portée infinie) : elle met en jeu des particules dotées d'une charge électrique ; elle permet d'interpréter la nature des atomes et les réactions chimiques.

- l'interaction forte (portée voisine de $10^{-15} m$) : elle intervient entre les particules de la famille des hadrons (protons, neutrons mais pas les électrons) ; elle est introduite pour expliquer la cohésion des noyaux atomiques puisqu'elle s'oppose à la répulsion électromagnétique des protons.

- l'interaction faible (portée voisine de $10^{-17} m$) : elle intervient entre toutes les particules mais avec une intensité peu élevée (d'où son nom) ; elle permet d'expliquer les réactions de radioactivité β.

2.3. Forces à distance

✓ Force gravitationnelle : soient deux particules massiques situées en P et M de masses respectives m_P et m. La force gravitationnelle exercée par la particule située en P sur celle située en M est par définition :
  - attractive
  - de norme proportionnelle au produit mm_P et inversement proportionnelle au carré de la distance entre P et M.



Cette force a pour expression :

$$\overrightarrow{F_{P\to M}} = -\overrightarrow{F_{M\to P}} = -\mathcal{G} mm_p \frac{\overrightarrow{PM}}{PM^3} = -\frac{\mathcal{G} mm_p}{PM^2}\overrightarrow{u_{PM}}$$

avec $\mathcal{G} = 6{,}67\times10^{-11} N.m^2.kg^{-2}$ est la constante gravitationnelle.

✓ Poids : cette force intervient lorsqu'on étudie le mouvement d'un système en se plaçant dans le référentiel terrestre. Pour un système de masse m, le poids est par définition :
- une force verticale, dirigée vers le bas
- proportionnel à la masse m du système
- appliqué au centre de gravité G du système

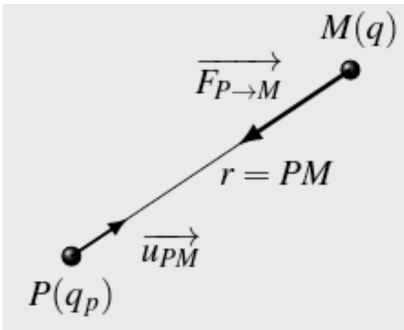
Le poids a pour expression :

$$\vec{p} = m\vec{g}$$

avec $\vec{g} = -g\overrightarrow{u_z}$ et $g = 9{,}81\, m.s^{-2}$

Remarque : il sera vu en deuxième année que le poids correspond à la prise en compte de la force gravitationnelle exercée par la Terre et d'une autre force liée au caractère non galiléen du référentiel terrestre. La verticale en un point de la Terre est ainsi définie comme la direction du poids.

✓ Force de Coulomb : soient deux particules chargées situées en P et M de charges électriques respectives q_P et q. La force coulombienne exercée par la particule située en P sur celle située en M est par définition :
- attractive si les deux particules sont de charges opposées, répulsive dans le cas contraire
- de norme proportionnelle au produit qq_P et inversement proportionnelle au carré de la distance entre P et M.



Cette force a pour expression :

$$\overrightarrow{F_{P\to M}} = -\overrightarrow{F_{M\to P}} = \frac{qq_P\overrightarrow{PM}}{4\pi\varepsilon_0 PM^3} = \frac{qq_p}{4\pi\varepsilon_0 PM^2}\overrightarrow{u_{PM}}$$

avec $\varepsilon_0 = 8{,}85\times 10^{-12} F.m^{-1}$ est la permittivité du vide.

✓ Force électrostatique : soit une particule en un point M de charge q soumise à l'action d'un champ électrique extérieur $\vec{E}$. La force appliquée au point M a pour expression :

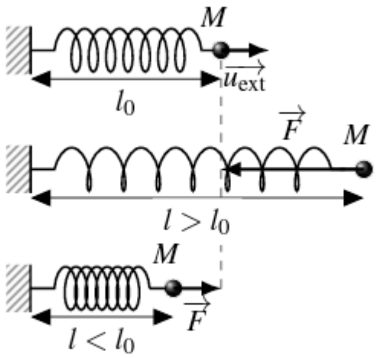
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

✓ Force électromagnétique (de Lorentz) : soit une particule en un point M, de charge q, soumise à l'action d'un champ électromagnétique $\left(\vec{E}\,;\vec{B}\right)$. La force appliquée au point M a pour expression :

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \overrightarrow{v_{M/R}} \wedge \vec{B}\right)$$

2.4. Forces de contact

✓ Force de rappel élastique : soit un ressort de constante de raideur k (en $N.m^{-1}$), de longueur à vide l_0 et de longueur l.

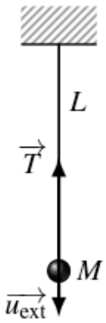


La force de rappel élastique a pour expression :

$$\vec{F} = -k\overrightarrow{\Delta l} = -k\left(l - l_0\right)\overrightarrow{u_{ext}}$$

On note $\Delta l = l - l_0$ l'allongement et $\overrightarrow{u_{ext}}$ un vecteur unitaire parallèle au ressort.

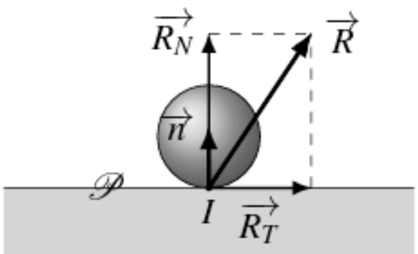
✓ Tension d'un fil : soit un fil auquel on a accroché un objet à l'une des extrémités.



$\overrightarrow{u_{ext}}$ étant un vecteur unitaire parallèle au fil, la force de tension exercée par celui-ci a pour expression :

$$\vec{T} = -T\overrightarrow{u_{ext}} \text{ avec } T > 0$$

✓ Actions exercées par un support solide : soit un système matériel en contact avec un support solide. On considère que le contact entre l'objet et le support permet de définir un point de contact I et un plan de contact $\mathscr{P}$



La force de contact, aussi appelée réaction du support et notée $\vec{R}$, possède deux composantes :

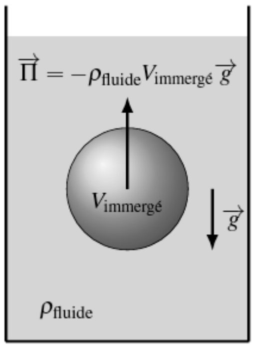
$$\vec{R} = \overrightarrow{R_T} + \overrightarrow{R_N}$$

- la composante normale $\overrightarrow{R_N}$, perpendiculaire au support, s'oppose à la pénétration de l'objet dans le support. Sa norme dépend des autres forces (poids…).
- la composante tangentielle $\overrightarrow{R_T}$, appartenant au plan $\mathscr{P}$, traduit les frottements solides entre le système et la surface de contact.

✓ Actions exercées par un fluide : les actions d'un fluide sur un système matériel se traduisent par l'existence de trois forces :

- la poussée d'Archimède : tout corps partiellement ou totalement immergé dans un fluide subit la poussée d'Archimède qui peut s'interpréter comme la résultante des forces de pressions qui agissent sur le corps immergé. Son expression correspond à l'opposé du poids du fluide déplacé.

$$\vec{\Pi} = -\rho_{fluide} V_{immergé} \times \vec{g}$$



- la force de trainée : elle est opposée au mouvement du système et traduit les frottements visqueux liés au fluide. Son expression dépend de la vitesse du système :
  - à faible vitesse : $\vec{f} = -k_1 \vec{v}$ avec $k_1 > 0$
  - à haute vitesse : $\vec{f} = -k_2 \|\vec{v}\| \vec{v}$ avec $k_2 > 0$
- la force de portance : c'est la force qui explique que les avions peuvent voler. Elle est perpendiculaire à la direction du mouvement.

3. Les trois lois de Newton

3.1. Première loi de Newton - Principe d'inertie

Le principe d'inertie implique l'introduction de référentiel d'étude galiléen.

Énoncé : il existe une classe de référentiels dits galiléens tels que tout point isolé est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme dans ces référentiels.

Remarques :
- il s'ensuit que deux référentiels galiléens sont forcément en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre (démonstration réalisée en deuxième année).
- dans un référentiel galiléen, un point animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme est un point isolé (et vice versa)

3.2. Deuxième loi de Newton - Principe fondamental de la dynamique

Soit un système ponctuel M soumis à un ensemble de force extérieures $\overrightarrow{f_i}$. Soit $\mathfrak{R}$ un référentiel galiléen dans lequel M a une quantité de mouvement $\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}}$.

Énoncé : la dérivée de la quantité de mouvement du système dans le référentiel d'étude galiléen est égale à la résultante de forces extérieures appliquées au système.

$$\frac{d\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}}}{dt} = \sum_i \overrightarrow{f_i} = \vec{F}$$

Remarques :
- l'application de la deuxième loi de Newton permet d'obtenir une description cinématique du mouvement connaissant les forces subies par le système
- l'application de la deuxième loi de Newton permet de déterminer la somme des forces subies par le système à partir de la connaissance de la description cinématique du mouvement ; on parle ainsi de nature déterministe de la mécanique classique

Plusieurs conséquences à la deuxième loi de Newton :

✓ Si le système garde une masse constante au cours du temps, on peut écrire :

$$\frac{d\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}}}{dt} = m\frac{d\overrightarrow{v_{M/\mathfrak{R}}}}{dt} = \sum_i \overrightarrow{f_i}$$

Il faut cependant faire attention au fait que tous les systèmes n'ont pas une masse qui se conserve au cours du temps (exemple : cas d'une fusée qui consomme du carburant et voit sa masse diminuer).

✓ si le système est pseudo-isolé, on a :

$$\frac{d\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}}}{dt} = \sum_i \overrightarrow{f_i} = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}} = \overrightarrow{Cte}$$

Ceci caractérise un mouvement de translation rectiligne et uniforme. Il y a donc similitude entre système isolé et pseudo-isolé.

✓ La deuxième loi de Newton implique la notion d'équilibre. On parle de système à l'équilibre si sa position n'évolue pas au cours du temps. Il s'ensuit que :

$$\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}} = \vec{0} \Leftrightarrow \frac{d\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}}}{dt} = \vec{0} = \sum_i \overrightarrow{f_i}$$

Pour un système à l'équilibre, on a ainsi :

$$\overrightarrow{p_{M/\mathfrak{R}}} = \vec{0} \text{ et } \sum_i \overrightarrow{f_i} = \vec{0}$$

3.3. Troisième loi de Newton - Principe des actions réciproques

Soient deux points M_1 et M_2 en interaction. On note $\overrightarrow{F_{M_1\to M_2}}$ et $\overrightarrow{F_{M_2\to M_1}}$ les forces exercées respectivement par M_1 sur M_2 et par M_2 sur M_1.

Énoncé : Pour deux points M_1 et M_2 en interaction, on a

$$\overrightarrow{F_{M_1\to M_2}} = -\overrightarrow{F_{M_2\to M_1}} \text{ et } \overrightarrow{F_{M_1\to M_2}} \parallel \overrightarrow{M_1M_2}$$