

## Fiche N°2 : Forces et Interactions fondamentales

### Définition. Représentation d'une force.

La notion de force a son origine dans l'effort musculaire que l'on exerce sur un corps pour le déformer, le mettre en mouvement ou modifier son mouvement. Plus généralement, la notion de force permet au physicien de décrire avec précision toute action d'un système ou du monde extérieur sur un système donné, macroscopique ou microscopique.

Une force est caractérisée par : son point d'application, sa direction, son sens, son intensité.

On voit immédiatement que cette grandeur physique sera naturellement représentée par un vecteur "lié", c'est-à-dire dont l'origine est fixée par le point d'application de la force. Sa représentation dans l'espace physique nécessitera une convention explicitant la relation entre l'intensité de la force et la longueur du vecteur représentatif.

Nous postulons l'additivité des forces. Si  $\vec{F}_1$  décrit l'action du système  $S_1$  sur le point matériel  $M$  et  $\vec{F}_2$  l'action du système  $S_2$  sur  $M$ , l'action simultanée des systèmes  $S_1 + S_2$  sur  $M$  sera décrite par  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ .

### Transformation d'une force lors d'un changement de référentiel.

La mécanique classique postule l'invariance des forces lors de tout changement de référentiel.

Remarque. La notion de force est l'une des façons d'interpréter les interactions entre deux systèmes. Ce n'est pas la seule. La mécanique quantique privilégie la notion d'énergie, c'est une autre façon d'envisager les choses.

### Les quatre interactions fondamentales.

L'ensemble des phénomènes physiques actuellement connus peut être interprété en faisant intervenir, au plus, quatre interactions fondamentales :

- L'interaction électromagnétique.
- l'interaction gravitationnelle,
- l'interaction forte,
- et l'interaction faible

### L'interaction électromagnétique

On appelle électromagnétisme l'étude des interactions entre particules chargées électriquement. Dans le cas général, une distribution de charges électriques en mouvement par rapport à un référentiel  $\mathbf{R}$ , crée un champ électromagnétique  $(\mathbf{E}(\mathbf{M},\mathbf{t}),\mathbf{B}(\mathbf{M},\mathbf{t}))$  et la force de Lorentz correspond à la force subie par une particule ponctuelle de charge  $q$  animée d'une vitesse  $\mathbf{v}(\mathbf{M}/\mathbf{R})$  (expression non donnée).

L'interaction électromagnétique est responsable de la grande majorité des phénomènes courants à notre échelle humaine (hormis la pesanteur). En effet, en plus des phénomènes considérés comme directement électriques ou magnétiques, c'est elle qui est responsable :

- des liaisons chimiques entre atomes d'une molécule et par là de tous les phénomènes chimiques,

- des interactions entre constituants (atomes, molécules, ions) qui assurent la cohésion de la matière. C'est donc elle qui est à l'origine des propriétés de rigidité, d'élasticité des solides, des forces de contact (ou de frottement), de la viscosité des liquides, de la compressibilité des gaz, etc.
- des ondes électromagnétiques donc de l'optique, des rayons X et  $\gamma$ , des ondes hertziennes.....

Vous étudierez ces notions dans le cours d'électricité. Nous allons seulement rappeler l'expression de la force de Coulomb qui s'exerce entre deux charges électriques ponctuelles immobiles par rapport à  $\mathbf{R}$  et la force de Laplace relative à la force magnétique subie par un élément de courant filiforme  $\mathbf{Idl}$  placé dans un champ magnétique  $\mathbf{B}(\mathbf{M})$  indépendant du temps.

$$\text{Force de Coulomb : } \vec{F}(\mathbf{M}_1 \rightarrow \mathbf{M}_2) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{M_1 M_2}$$

La force de Coulomb vérifie le principe de l'action et de la réaction.

### L'interaction gravitationnelle.

C'est la plus anciennement connue et étudiée. Ses propriétés essentielles ont été établies dès 1687 par Isaac NEWTON. C'est une interaction universelle qui affecte toutes les particules. A l'échelle atomique elle est négligeable devant l'interaction électromagnétique. Au contraire à l'échelle du Cosmos elle est prépondérante : c'est elle qui explique le mouvement des planètes. Sa portée va de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

La force d'attraction gravitationnelle de la masse  $\mathbf{m}_1$  agissant sur la masse  $\mathbf{m}_2$  s'écrit :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{U}_{1 \rightarrow 2},$$

$\mathbf{m}_1$  et  $\mathbf{m}_2$  sont les masses **gravitationnelles** des corps 1 et 2.  $\vec{U}_{1 \rightarrow 2}$  est un vecteur unitaire dirigé de 1 vers 2,  $G$  est la constante de gravitation  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ .

La force de gravitation est toujours attractive.

### Notion de champ gravitationnel – Cas d'une masse ponctuelle

La masse  $\mathbf{m}_0$  située en  $\mathbf{O}$  produit dans l'espace un champ gravitationnel, en particulier au point  $\mathbf{M}$  de masse  $\mathbf{m}$  :

$$\vec{G}(\mathbf{M}) = \frac{\vec{F}_{O \rightarrow M}}{m} = -G \frac{m_0}{r_{OM}^2} \vec{U}_{OM}$$

Exemple, le champ gravitationnel terrestre à la surface de la terre a pour valeur :

$$g = G \frac{m_{\text{terre}}}{r_{\text{terre}}^2} = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \times 5.97 \cdot 10^{24}}{(6.37 \cdot 10^6)^2} \approx 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

### Notion de champ gravitationnel – Cas de plusieurs masses ponctuelles

Les forces étant additives on en déduit l'additivité vectorielle des champs créés par chaque masse.

Exemple : cas de deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$  créant un champ gravitationnel au point M ( $m_3$ ) :

$$\vec{G}(M) = \frac{\vec{F}_{M_1 \rightarrow M}}{m_3} + \frac{\vec{F}_{M_2 \rightarrow M}}{m_3} = -G \left( \frac{m_1}{r_{M_1 M}^2} \vec{U}_{M_1 M} + \frac{m_2}{r_{M_2 M}^2} \vec{U}_{M_2 M} \right)$$

On déduit la force résultante de ce champ subie par la masse  $m$  située en  $M$  :

$$\vec{F} = m\vec{G}(M)$$

### L'interaction forte.

Elle a été introduite pour expliquer la cohésion et la stabilité des noyaux atomiques, malgré l'existence des répulsions électriques entre protons. L'interaction forte s'exerce de manière attractive entre constituants du noyau. Elle est extrêmement intense mais de très faible portée. Au-delà de quelques fermis ( $10^{-15}$  m) elle est négligeable et ne joue donc un rôle qu'au niveau de la physique atomique.

### L'interaction faible.

Cette interaction a été identifiée en 1934 pour expliquer la désintégration du neutron. Elle intervient dans tous les phénomènes de radioactivité bêta. Son intensité est nettement inférieure à celle de l'interaction forte. De plus sa portée est encore plus faible que celle de l'interaction forte.

### Exemples de forces appliquées.

Les champs gravitationnels, électriques ou magnétiques sont à l'origine de forces qui s'appliquent simultanément à l'ensemble des constituants d'un système. On parle de force d'action à distance ou forces de volume. D'autres forces résultent de l'action de contact entre différents solides, on parle alors de forces appliquées.

### La tension d'un fil

Soit un point matériel  $M$  de masse  $m$ , accroché à l'extrémité d'un fil souple, de masse négligeable et de longueur  $l$  constante. L'action du fil sur le point matériel est une force de **tension** dirigée selon le fil dont la norme dépend des autres forces appliquées au point matériel.

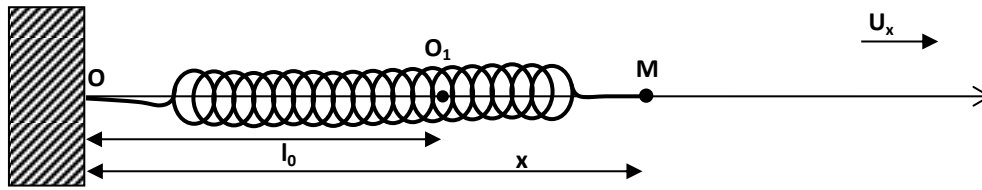
### Les forces de tension de poulies

**Poulie fixe** : Les tensions sur les deux brins du câble sont identiques. La poulie fixe permet simplement de modifier la direction d'application de la force.

### Force de rappel élastique

Soit un ressort horizontal, de masse négligeable, de longueur à vide  $l_0$ , et de raideur  $k$ .

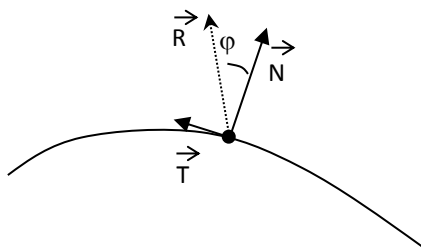
Quelle que soit la position du point  $M$ , l'action du ressort est orientée de façon à ce que le point  $M$  revienne vers sa position d'équilibre  $O_1$ . L'intensité de cette force est proportionnelle à la raideur du ressort et à l'étirement ou la compression de celui-ci.



$$\vec{F} = -k(x - l_0)\vec{U}_x$$

### Force de frottement solide et réaction du support

Lorsqu'un point M est en contact avec un solide S. Ce solide transmet une force de réaction sur le point matériel. Cette force de réaction peut être décomposée en deux forces : la composante normale et la composante tangentielle à la surface du solide S.



- S'il y a glissement de M sur S, alors T est non nul et est opposé au déplacement de M tel que  $\|\vec{T}\| = f\|\vec{N}\|$  où f est le coefficient de frottement.
- S'il n'y a pas glissement, le frottement peut exister mais son intensité est alors inférieure au cas précédent :  $\|\vec{T}\| < f\|\vec{N}\|$ .

- En l'absence de frottement, qu'il y ait déplacement (glissement) ou non, la réaction est purement normale au support.

### Forces de frottement fluide

Lorsque qu'un solide se déplace dans un fluide (gaz ou liquide), celui-ci est soumis à une force de frottement fluide due à l'action des molécules du fluide qui s'oppose au mouvement du solide. La nature complexe de ces forces nous amène à considérer deux cas distincts :

- Si la vitesse relative du solide par rapport au fluide est faible, on considère une force en relation linéaire avec la vitesse :  $\vec{F} = -\lambda\vec{V}$  avec  $\lambda$  caractérisant le fluide et la taille de l'objet.
- Pour des vitesses supérieures on considère que la force est en relation quadratique avec la vitesse :  $\vec{F} = -kV\vec{V}$

### Poussée d'Archimède

Un objet de volume V immergé dans fluide (air, eau) de densité  $\rho$  perçoit de la part de ce fluide une force opposée à la force de pesanteur dont la norme est égale au poids du fluide déplacé :

$$\vec{\Pi} = \rho g V \vec{U}_z$$

Cette force s'applique au centre de masse de l'objet si la densité de l'objet est homogène dans l'espace.