

Mouvement et chaleur (203-274-92)

2^{ème} partie : mécanique

Introduction : les forces

La véritable définition de ce qu'on entend par force en Physique est une définition mathématique que l'on pourrait résumer comme étant la dérivée de la quantité de mouvement « P » par rapport au temps « t ». Comme cette définition n'excite guère notre imagination, nous allons plutôt procéder en faisant la liste complète de toutes les forces existant dans la nature. Face à une situation où nous aurons à faire l'analyse de systèmes de forces, nous n'aurons alors qu'à consulter cette liste pour connaître chacune des forces en présence. On peut d'abord regrouper les forces en deux grandes catégories : les forces à distance et les forces de contact.

A) Forces à distance :

1. *gravitationnelle* : force d'attraction entre toute paire de masses. La grandeur de cette force est donnée par l'expression :

$$F = \frac{G M_1 M_2}{r^2}$$

$$\text{où } G = 6,6 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

2. *électrique* : force d'attraction ou de répulsion entre des particules chargées électriquement. La grandeur de cette force est donnée par l'expression :

$$F = \frac{k Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$\text{où } k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

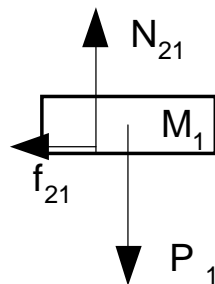
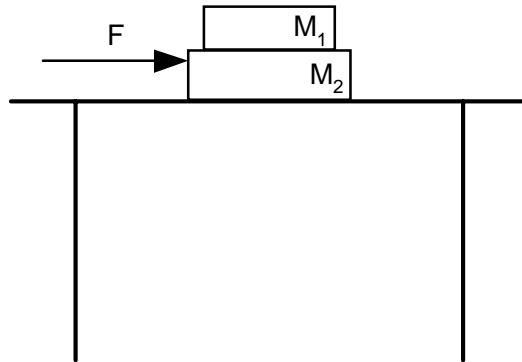
3. *magnétique* : force d'attraction ou de répulsion entre des pôles magnétiques naturels ou créés à l'aide de courants électriques.
4. *nucléaire* : force qui n'existe qu'à l'intérieur du noyau des atomes, donc sur de très courtes distances, et qui sert à expliquer comment des protons qui se repoussent avec de très grandes forces électriques peuvent tout de même demeurer à l'intérieur de ces noyaux.

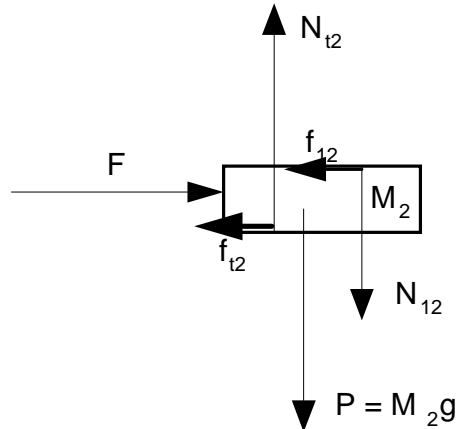
B) Forces de contact :

Les forces de contact entre deux objets peuvent exister aussitôt qu'une partie de la surface d'un objet est en contact avec celle d'un autre objet. Il n'est pas nécessaire que cette surface soit très grande, mais elle peut aussi être toute la surface de l'objet. Par exemple, une corde attachée à un traîneau n'est en contact qu'avec un point du traîneau, alors qu'un sous-marin voit toute sa surface soumise à des forces de contact avec l'eau qui l'entoure.

1. *Force parallèle de contact* : il s'agit presque toujours des forces de frottement qui peuvent exister au niveau de la surface de deux objets que l'on a mis en contact. Cette force s'oppose au mouvement relatif des surfaces en contact, ou tend à empêcher ce mouvement.
2. *Force perpendiculaire de contact* aussi appelée *normale* de contact : il s'agit de l'interaction entre les deux objets en contact. Cette force existe aussitôt que les surfaces des objets entrent en contact et elle est dirigée de façon perpendiculaire à la surface.

Par exemple, si on essaye de déterminer toutes les forces en présence sur les deux livres de masse M_1 et M_2 que l'on a placé sur une table, alors que l'on pousse de la main sur le livre du dessous avec une force horizontale F :





Remarque : pour plus de clarté et sauf pour les forces à distance (les poids), l'origine des vecteurs-force n'a pas été placé au centre de masse.

La première loi de Newton

La première loi de Newton, qui est aussi appelée loi de l'équilibre, affirme que tout corps ayant une vitesse nulle ou ayant une vitesse constante (zéro .tant aussi une constante) ne subit aucune force résultante. Sous une forme mathématique, cette loi s'exprime ainsi :

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

c'est à dire que la somme des vecteurs-force doit valoir zéro pour pouvoir conclure que le corps est en équilibre. La plus grande partie de la physique appliquée en génie civil ou en génie mécanique n'utilise que cette loi et on parlera alors de physique ou de mécanique statique.

Deuxième loi de Newton

Lorsque cette première loi n'est pas vérifiée, la vitesse du corps varie. Il y a donc accélération et Newton nous apprend que la somme des forces est proportionnelle à cette accélération. La masse devient alors la constante de proportionnalité :

$$\sum \vec{F} = m \times \vec{a}$$

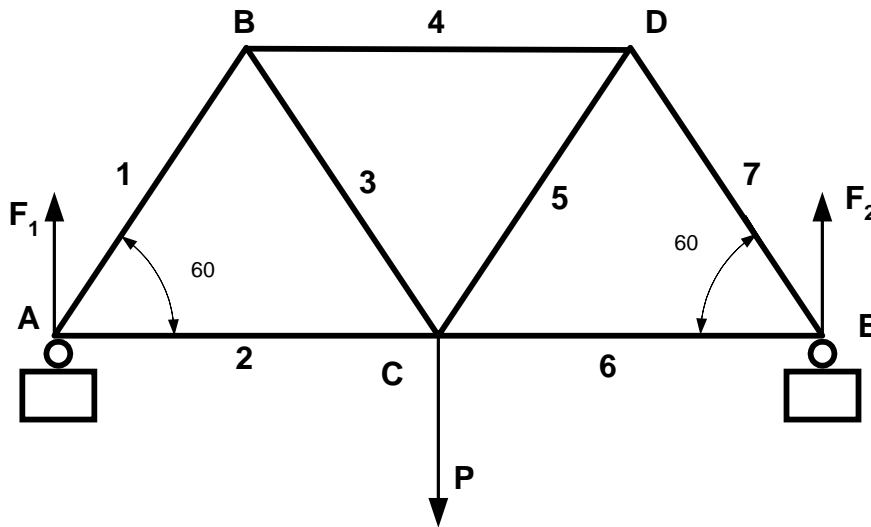
La troisième loi de Newton

La dernière loi de Newton affirme qu'une force n'existe jamais seule. À chaque fois qu'une force est exercée sur un objet, cet objet exerce à son tour une force égale en grandeur, mais en sens opposé. Donc, toute action génère une réaction.

Remarque : toutes les forces dont il a été question jusqu'à maintenant sont classées comme étant des forces concourantes. C'est à dire que les forces s'exerçant sur un objet trouvent un seul point d'application, habituellement le centre de masse de l'objet. On considère donc que les objets n'ont pas de dimensions et que toutes les forces n'ont qu'un effet de translation dans le plan ou dans l'espace.

Chapitre 1 : les poutres triangulées

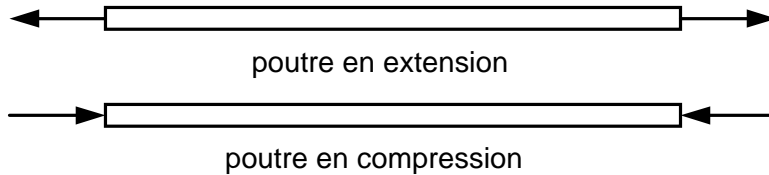
L'une des situations où on utilise la première loi de Newton concerne les structures formées de poutres assemblées en forme de triangles. On voit régulièrement ce genre de structure dans des ponts ou pour former des toits en pente. En voici un exemple :



Le système illustré est fait de 7 poutres numérotées de 1 à 7, jointes en cinq points identifiés de A à E. On y voit aussi trois forces que nous dirons externes (il s'agit de forces que le monde extérieur exerce sur la structure) : P, le poids de la structure ou de toute autre charge qui pourrait exister (véhicules sur le pont ou neige sur un toit, etc.). Pour simplifier cet exemple, on a présumé que la charge était symétrique, donc qu'elle s'appliquait au centre de masse de la structure. Les forces F₁ et F₂ sont les forces de réaction des supports de la structure. Ces supports sont illustrés ici comme étant sur bille ou rouleau, ce qui signifie qu'il n'existera aucune force horizontale dans le système. Il existe aussi d'autres types de support que nous verrons un peu plus tard.

Vous remarquerez que les points de jonctions lient un nombre différent de poutres : le point A li les poutres 1 et 2; le point B, les poutres 1, 3 et 4; le point C, les poutres 2, 3, 5 et 6. Enfin, nous avons choisi une structure formée de triangles isocèles : tous les angles sont égaux à 60 degrés, et toutes les poutres ont exactement la même longueur.

Le travail du physicien (ou de l'ingénieur) consiste maintenant à calculer les forces internes au système : celles qui s'exerceront le long des poutres. Chacune des poutres sera alors en extension ou en compression, et on choisira la grosseur, la forme et le matériau de la poutre selon ces données.



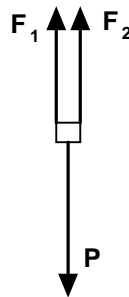
Le dessin ci-dessus vous montre que l'extension d'une poutre se définit comme étant une situation où il existe une paire de forces, une à chaque extrémité, qui « étire » la poutre. Alors que la compression se traduit par une paire de forces « comprimant » la poutre.

L'analyse doit se faire par étapes : on doit commencer par solutionner les conditions d'équilibre des forces externes au système. Puis, commence l'analyse des forces internes en commençant par l'un des points du système. Ensuite, on procède à l'analyse d'un deuxième point et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on connaisse toutes les forces internes au système.

Par exemple, dans le cas illustré plus haut, on commencerait par solutionner l'équation des forces P , F_1 et F_2 . Puis, connaissant F_1 , on pose l'équation d'équilibre du point A, puis du point B, du point C, etc.

Voici ce que donnerait cette analyse :

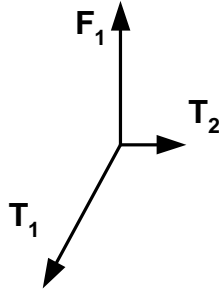
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{P} = \vec{0}$$



Donc que $F_1 = F_2 = P/2$ par symétrie. Ceci pourrait être différent dans d'autres cas.

Si l'on considère maintenant le point A, on y retrouve les forces suivantes :

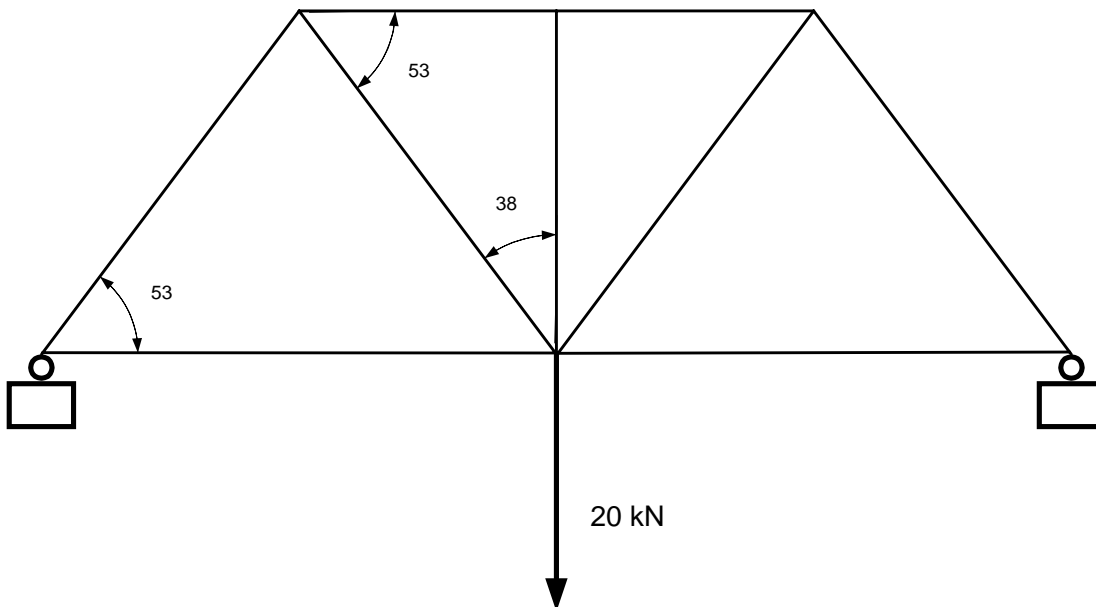
$$\vec{F}_1 + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 = \vec{0}$$



Il est possible de solutionner cette équation de forces, soit par la méthode graphique, soit par une méthode analytique utilisant les composantes des forces selon les axes X et Y.

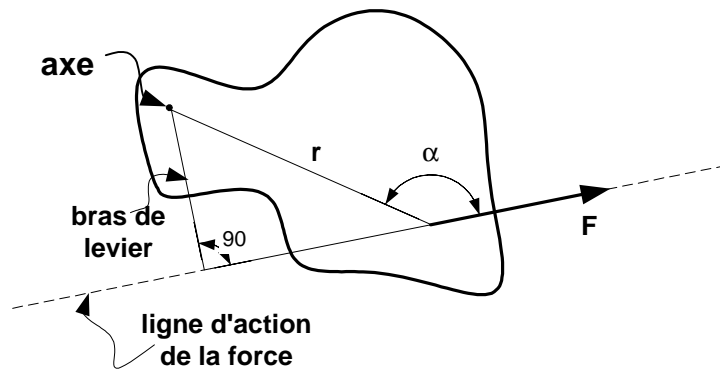
Connaissant maintenant les forces T_1 et T_2 , nous pourrons continuer au point B, puis C, etc.

Voici un autre exemple d'un tel système :



Les moments de force

Dans la réalité, les objets ont des dimensions et les forces ne s'appliquent pas toujours de manière concourante sur le centre de masse. Il peut donc arriver qu'un objet soit en équilibre de translation sans être complètement en équilibre. Des forces peuvent s'appliquer de manière à provoquer la rotation de l'objet. Pour tenir compte de cet effet, il faut introduire la notion de moment de force (*torque* en anglais). Deux éléments sont nécessaires à cette fin : l'axe de rotation, c'est à dire le point ou la droite autour de laquelle l'objet tournera, et le bras de levier, qui est défini comme étant la distance perpendiculaire entre l'axe de rotation et la ligne d'action de la force.



Comme vous pouvez le constater, avec un peu de géométrie et de trigonométrie, le bras de levier vaut $(r \cdot \sin \alpha)$. Puisque le moment de force est le produit (vectoriel) de la force F par le bras de levier, on peut écrire :

$$M = F \times r \times \sin \alpha$$

Nous définirons les moments de force qui ont un effet de rotation dans le sens anti-horaire comme étant positifs, et négatifs dans le sens horaire.

Enfin, un équilibre complet nécessiterait aussi l'absence de rotation, en plus de l'absence de force de translation. Nous devons donc réécrire la loi de l'équilibre pour y ajouter cette absence de rotation :

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \text{et} \quad \sum \vec{M} = 0$$

Ce nouvel outil d'analyse nous permettra de solutionner des systèmes plus complexes où nous ne bénéficions pas nécessairement des règles de la symétrie.