FLUORESCIENCES

Physique

Phy

Albane Douillet

Catherine Even-Beaudoin

Nathalie Lebrun

Nathalie Lidgi-Guigui

Nicolas Vernier

DUNOD

Les + en ligne

Retrouvez sur la page dédiée à l'ouvrage sur le site dunod.com :

- Pour les enseignants : une sélection de figures de l'ouvrage pour projection en cours.
- Pour les étudiants :
  - ✓ Des compléments de cours pour aller plus loin.
  - ✓ Des liens commentés vers des vidéos et sites internet.

Conception graphique de la couverture : Hokus Pokus Créations
Création graphique de la maquette intérieure : Marse

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :

PAPIER CERTIFIÉ

Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.

Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.

Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.

Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-085985-6

Table des matières

PARTIE 2

PARTIE 3

Les selfies des auteurs

Albane Douillet

Je suis maîtresse de conférences à l'université Evry Val d'Essonne, au département de physique. Mon activité de recherche au sein du laboratoire Kastler Brossel (CNRS-UMR 8552) est consacrée à la physique atomique, l'optique des lasers et la métrologie ; je m'intéresse en particulier au piégeage d'ions et à leur manipulation par laser pour les refroidir.

Catherine Even-Beaudoin

Je suis maîtresse de conférences à l'université Paris-Saclay, où j'enseigne la physique, notamment l'optique. Je fais également de la recherche au Laboratoire de Physique des Solides (UMR CNRS 8502) à Orsay, dans le domaine de la biophysique, plus précisément sur la capture de CO_2 par des micro-organismes photosynthétiques comme les microalgues ou les cyanobactéries.

Nathalie Lebrun

Je suis maîtresse de conférences à l'université de Lille Sciences et Technologie. J'effectue mes activités de recherche au laboratoire de didactique André Revuz, à l'université Paris-Diderot (Paris 7), en didactique de la physique. Je m'intéresse en particulier aux conceptions des étudiants en mécanique du point et à l'identité professionnelle des enseignants-chercheurs.

Nathalie Lidgi-Guigui

Je suis maîtresse de conférences à l'université Sorbonne Paris Nord depuis 2011, j'effectue mes travaux de recherche au laboratoire de Sciences des Procédés et des Matériaux (CNRS-UPR 3407). Je m'intéresse aux propriétés optiques et électroniques des nanoparticules métalliques. J'étudie comment les plasmons localisés peuvent être exploités pour exalter la diffusion Raman pour en faire des capteurs de la pollution de l'eau. Je suis également très investie en pédagogie et en médiation scientifique.

Nicolas Vernier

Je suis maître de conférences à l'université Paris-Sud. J'aime tout spécialement la thermodynamique pour son challenge intellectuel très spécifique. Par ailleurs, je fais des recherches expérimentales en magnétisme (physique du solide et des couches minces) au centre de nanosciences et de nanotechnologie à Orsay.

Avant-propos

Le GPS, le DVD, le téléphone portable, l'imagerie médicale, le laser, l'ordinateur… sont devenus des objets technologiques courants dont l'usage facilite notre quotidien. Ils ont pu voir le jour grâce aux évolutions des connaissances de la science et de la physique en particulier. La physique, en constante évolution, contribue aujourd'hui au développement de notre société (nouveaux matériaux, technologie de l'information, etc.) et joue un rôle important dans les enjeux sociétaux comme la santé, l'environnement ou encore l'énergie. Comprendre le monde qui nous entoure nécessite une maîtrise des concepts et de leur usage pour expliquer et modéliser les phénomènes naturels (propagation de l'influx nerveux, arc-en-ciel, mouvement des planètes, effet de serre, etc.).

C'est dans cette optique d'explication du monde que nous nous appuyons, dans cet ouvrage, sur de nombreuses applications et exemples concrets afin de montrer que la physique étudiée à l'université est trop souvent une science désincarnée. Ainsi, par l'étude des pages qui suivent, vous comprendrez l'origine des distances de freinage que vous apprenez par cœur dans les auto-écoles, vous découvrirez ce qui se passe dans votre poste de radio lorsque vous cherchez à optimiser la réception d'une émission radio, vous saurez pourquoi certains ont besoin de lunettes pour voir net de loin, et vous verrez comment il est possible, dans de bonnes conditions, de disposer d'une puissance de chauffage de 10 kW pour une habitation en ne consommant que 2,5 kW grâce aux pompes à chaleur.

Ce livre présente les bases de la physique, correspondant à un niveau scientifique de première et de deuxième année de licence. Il a été divisé en quatre parties, correspondant aux principales branches de la physique : mécanique, électricité, optique et thermodynamique. La physique étant une science expérimentale, un premier chapitre est consacré à la notion d'incertitudes de mesure, permettant ainsi un lien avec vos séances de travaux pratiques.

Nous vivons dans un monde dont les ressources s'épuisent et il est important de les exploiter de manière optimale. Vous vous engagez dans des études qui vous permettront de participer à cette tâche cruciale et nous espérons que cet ouvrage vous aidera à bien débuter dans le monde de la physique.

Les auteurs remercient chaleureusement Abdelkader Anakkar, Christophe Balland, Hanna Enriquez, Edith Hantz, Wanda Kaminski, Sylvain Le Gall, Aude Plaszczynski, Geneviève Rollet, Yves Roussigné et Georges Wlodarczak pour leur relecture attentive et constructive de cet ouvrage.

Introduction à la mesure physique

Pour bien démarrer

1. 10^{-3} **signifie :**
   - ☐ **a.** 0,0001 ;
   - ☐ **b.** 0,001 ;
   - ☐ **c.** 1 000.
2. **Mesurer c'est :**
   - ☐ **a.** comparer à un étalon ;
   - ☐ **b.** utiliser un instrument ;
   - ☐ **c.** calculer.
3. **Le préfixe « kilo » (que l'on retrouve dans « kilogramme », « kilomètre », « kiloampère », etc.) signifie :**
   - ☐ **a.** multiplié par 10 ;
   - ☐ **b.** multiplié par 100 soit 10^2 ;
   - ☐ **c.** multiplié par 1 000 soit 10^3.
4. **La distance entre mon domicile et mon lieu de travail est de :**
   - ☐ **a.** $3 \pm 0,1$ km ;
   - ☐ **b.** $3 \pm 0,15367984089$ km ;
   - ☐ **c.** $3,0 \pm 0,1$ km.
5. **L'aiguille d'un compteur de vitesse analogique est située entre les graduations successives 45 km·h^{-1} et 50 km·h^{-1}. La vitesse de la voiture est de :**
   - ☐ **a.** 47,5 km·h^{-1} ;
   - ☐ **b.** $47,5 \pm 2,5$ km·h^{-1} ;
   - ☐ **c.** $47,5 \pm 1,44$ km·h^{-1}.

Réponses page 541

Objectifs de ce chapitre

- Comprendre en quoi la définition d'une grandeur physique est à la base du raisonnement scientifique.
- Différencier les différents attributs d'une grandeur physique : unité, dimension, symbole.
- Savoir manipuler les équations aux dimensions.
- Savoir mener une analyse dimensionnelle pour analyser ou prédire un résultat.
- Comprendre quand et comment utiliser les incertitudes.
- Savoir utiliser les incertitudes dans la comparaison de deux grandeurs.

CHAPITRE 1

Comment choisir l'unité avec laquelle on mesure ?

De l'achat de fruits et légumes au respect des limitations de vitesse en voiture, en passant par la ponctualité, la mesure est omniprésente dans notre vie quotidienne. Elle permet de poser les bases des échanges sociaux et économique : par exemple, en France, lorsque l'on demande son chemin, on peut s'entendre répondre « dans 100 m » ; au Royaume-Uni, on entendra plutôt « in 100 yards » ! Dans un cadre scientifique, la mesure est une discipline à part entière apparentée à la physique, qui est la science de la nature. C'est donc les physiciens et les physiciennes qui réfléchissent, proposent et décident des grandeurs et unités internationales. La manière dont les constantes fondamentales sont mesurées, calculées ou fixées est définit par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), situé au pavillon de Breteuil du domaine national de Saint-Cloud depuis 1875. Le nombre de chiffres après la virgule, l'incertitude sur le résultat d'une mesure sont d'autres problématiques de la mesure physique qui sont abordées dans ce chapitre. Établir des règles claires permet aux scientifiques de pouvoir vérifier et critiquer les résultats de leurs collègues… ou des étudiants et étudiantes !

1 La mesure

L'athlétisme regroupe un ensemble de disciplines : la course, le saut, le lancer, les épreuves combinées et la marche. Intéressons-nous ici au saut : saut en longueur, saut en hauteur ou saut à la perche. L'idée est de mesurer la performance sportive, par exemple dans le cas du saut en longueur : quelle est la distance sur laquelle l'athlète est capable de sauter ?

Pour mesurer cette distance, il faut tout d'abord un repère pour savoir à partir d'où mesurer. Il faut également savoir jusqu'où mesurer, la pointe du pied ? Le talon ? Les fesses ? Le pied de devant ou le pied de derrière ?

Une fois que ces règles sont fixées, il faut mesurer. Pour cela, quel instrument utiliser ? Un mètre bien sûr (figure 1.1) ! Et pour utiliser ce mètre il faut comparer la distance à mesurer aux graduations inscrites sur le mètre.

Figure 1.1
Le saut en longueur.

La mesure d'un saut en longueur nécessite d'établir de nombreuses règles sans lesquelles il serait impossible de décider de la victoire !

Commençons donc par définir ce que signifie « mesurer », pour cela il faut distinguer la grandeur physique de l'action de mesurer.

Définitions

- Une **grandeur physique** est une propriété de la nature qui peut être quantifiée. Par exemple : la longueur, la masse, la vitesse, la force, la température ou l'énergie sont des grandeurs physiques.
- La **mesure** est l'attribution d'une valeur numérique à une grandeur physique.

De ces définitions découle la notion d'unité de mesure.

1.1 Unités de mesures

Définition

Mesurer c'est associer un facteur de proportionnalité entre la grandeur physique mesurée et une valeur de la même grandeur physique choisie comme étalon. Cet étalon est nommé **unité de mesure**.

Autrement dit, mesurer c'est résoudre l'équation suivante :

$$\text{mesure} = \text{valeur} \times \text{unité}$$

Exemple

Pour mesurer un être humain, on le place près d'une toise. C'est en comparant la hauteur de la personne à la toise que l'on donne une mesure de sa hauteur. On pourra obtenir par exemple :

$$\text{hauteur} = 1{,}70 \text{ m}$$

Dans cet exemple, la « hauteur » est la mesure, « 1,70 » est la valeur et « m » est l'unité.

Le mètre étalon

Avant la Révolution française, chaque région avait son propre système de mesure qui était souvent basé sur les attributs du corps humain. Cela était un réel problème notamment pour les échanges économiques. C'est pourquoi il a été décidé de définir des grandeurs physiques de référence qui ont rapidement été adoptées à plus grande échelle.
La définition d'un système de mesure unifié et simplifié a été décidée en 1790.
À partir de ces décisions, seize mètres étalons ont été disposés un peu partout dans la capitale de manière à faciliter les échanges. Cette définition du mètre est obsolète depuis 1960.

1.2 Les unités fondamentales

Les unités des grandeurs physiques fondamentales sont la base du **système international de mesure**. Il existe plusieurs systèmes cohérents d'unités de mesure. Aujourd'hui, les scientifiques du monde entier se sont accordés pour utiliser le système international (SI), qui prolonge le système dit MKSA (Mètre Kilogramme Seconde Ampère) par l'adjonction du kelvin, de la mole et du candela.

Le choix des grandeurs physiques fondamentales, est le fruit d'une longue histoire, résumée dans cette vidéo : https://youtu.be/bInHclEN6zQ

En 2018, une petite révolution a eu lieu puisque la convention internationale des poids et mesures a voté une redéfinition du système international d'unités (SI) qui sera désormais défini à partir des 7 grandeurs fondamentales dont les valeurs exactes sont fixées. À cette occasion, le kilogramme étalon est abandonné.[1] Le tableau 1.1 présentent les 7 unités fondamentales ainsi que leur définition.

1.3 Les unités dérivées

Les autres unités peuvent être obtenues à partir des sept unités fondamentales, c'est pourquoi on les appelle « unités dérivées ».

Exemples

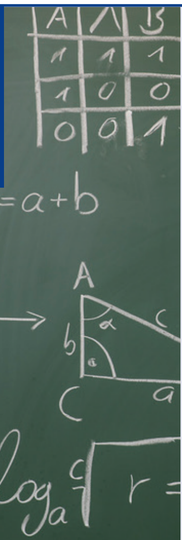
– La vitesse est une grandeur dérivée du mètre et de la seconde.
– L'accélération est une grandeur dérivée du mètre et de la seconde.
– La force est dérivée du kilogramme, du mètre et de la seconde.

1. Le site du BIPM regorge d'informations sur le système SI (histoire, définitions, valeurs, etc.) : https://www.bipm.org/fr/

Tableau 1.1 Les sept unités du systèmes internationales, leurs symboles, les dimensions associées et leurs définitions.

Unité	Symbole	Dimension	Définition
mètre	m	Longueur	Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde
kilogramme	kg	Masse	Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement 6,626 070 15.10^{-34} quand elle est exprimée en s^{-1} m^2 kg, ce qui correspond à des J s.
seconde	s	Temps	Durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondante à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133
ampère	A	Intensité de courant électrique	Sa valeur est définie en fixant la charge élémentaire e, égale à 1,602 176 634.10^{-19} lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à des A·s
kelvin	K (et non °K)	Température	Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement 1,380 649.10^{-23} quand elle est exprimée en s^{-2} m^2 kg K^{-1}, ce qui correspond à des J K^{-1}.
mole	mol	Quantité de matière	Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement 6,022 140 76.10^{23} quand elle est exprimée en mol^{-1}.
candela	cd	Intensité lumineuse	Intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540,1012 Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 W·sr^{-1} (watt par stéradian)

FOCUS



La notation scientifique

Les unités utilisées étant celles associées aux sept grandeurs fondamentales il devient parfois périlleux de donner des résultats plus grands ou plus petits que ces unités-étalons de plusieurs ordres de grandeurs[1].

Une possibilité serait d'utiliser les préfixes appropriés, par exemple le centimètre au lieu du mètre, etc. Cependant, ces unités sont des unités dérivées des unités de références, il n'est donc pas d'usage de les utiliser pour donner un résultat. De plus, l'utilisation de grandeurs physiques avec des unités autres que celles du système international est le meilleur moyen de faire des erreurs de calculs.

On utilisera donc la notation 10^x pour éviter les notations avec trop de zéros. Par exemple, la vitesse de la lumière est d'environ :

- 300 000 km·s^{-1} ;
- 300 000 000 m·s^{-1} ;
- $3 \cdot 10^8$ m·s^{-1}.

Ces trois notations représentent exactement la même valeur. Seules les deux dernières sont données dans le système international. La troisième utilise la notation scientifique qui est plus concise. Il faut donc prendre l'habitude de la manipuler.

1. Un ordre de grandeur est une puissance de dix dans l'unité de mesure de la grandeur physique. Par exemple, la taille d'une fourmi est de l'ordre de grandeur de celle d'un grain de riz, c'est-à-dire 10^{-3} m.

2 La dimension

2.1 Définition

Revenons un instant à l'athlétisme, le record du monde de saut en hauteur est de 2,45 m, un marathon est accompli en parcourant 42,195 km. Ce n'est pas la même unité qui est utilisée dans les deux cas mais intrinsèquement, c'est la même chose que l'on mesure : une distance. Il est donc possible de mesurer la même grandeur avec des unités différentes. C'est ce que l'on nomme « dimension », et qui est indépendant de tout système d'unité.

Pour représenter une dimension on peut soit écrire le nom de la grandeur entre crochets, soit utiliser la capitale d'imprimerie dédiée (tableau 1.2).

Tableau 1.2 Les dimensions associées aux sept grandeurs physiques du SI et leurs symboles.

Dimension	Symbole
Longueur	L
Masse	M
Temps	T
Intensité de courant électrique	I
Température	Q
Quantité de matière	N
Intensité lumineuse	J

Attention, il ne faut pas confondre unité et dimension ! Certaines grandeurs sont sans dimension comme les angles qui sont définis comme étant le rapport de deux longueurs. Cependant, ces grandeurs peuvent avoir une unité (les angles se mesurent en radian ou en degré).

2.2 L'analyse dimensionnelle

La définition de la dimension ouvre la voie à des méthodes très puissantes pour vérifier des calculs ou prédire le résultat d'une opération. Dans les exemples ci-dessous, les méthodes sont basées sur le principe d'homogénéité. Ce qui signifie que seules les grandeurs de même dimension peuvent être comparées. Par exemple, une longueur ne peut pas être égale à une surface (c'est-à-dire une longueur au carré).

Méthode **Contrôle des résultats**

Supposons qu'un calcul aboutisse à la formule :

$$v = \frac{4\pi E}{m}$$

où v est une vitesse, E une énergie et m une masse.

Le premier réflexe à avoir pour savoir si le résultat est juste, est de vérifier son homogénéité. Ainsi, le terme de gauche a les dimensions d'une vitesse :

$$[v] = \mathrm{L{\cdot}T^{-1}}$$

Le terme de droite a les dimensions d'une énergie divisées par les dimensions d'une masse :

$$[E] = \mathrm{M{\cdot}L^2{\cdot}T^{-2}}$$

$$[m] = \mathrm{M}$$

et donc :

$$\left[\frac{4\pi E}{m}\right] = \mathrm{L^2{\cdot}T^{-2}}$$

Les deux membres de l'égalité n'ont pas les mêmes dimensions, l'équation n'est donc pas homogène. Le calcul ne peut donc pas être correct.

Il est évident que les facteurs sans dimensions ne peuvent pas être pris en compte par l'analyse dimensionnelle. La seule analyse dimensionnelle n'est donc pas suffisante pour attester de la justesse d'un résultat… mais elle est nécessaire !

Méthode **Prévision de résultats**

Un pendule est constitué d'une masse m suspendue à un fil de longueur l. On constate que les oscillations de ce pendule sont périodiques et on souhaite explorer l'influence des paramètres mesurés sur la valeur T de la période d'oscillation. On suppose :

$$T = \mathrm{k}{\cdot}m^{\alpha}{\cdot}\mathrm{g}^{\beta}{\cdot}l^{\gamma}$$

où k est un coefficient numérique sans dimension et g l'accélération de la pesanteur. On cherche les exposants α, β, γ.

Il faut que les deux membres de l'équation soient homogènes. Le membre de gauche, T, a la dimension d'un temps.

Le membre de droite a les dimensions : $\mathrm{M^{\alpha}{\cdot}(L{\cdot}T^{-2})^{\beta}{\cdot}L^{\gamma} = M^{\alpha}{\cdot}L^{\beta+\gamma}\,T^{-2\beta}}$.

Les deux membres de l'équation devant nécessairement avoir la même dimension, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \alpha = 0 \text{ car est l'exposant d'une masse et ne pourra pas s'identifier à un temps} \\ \beta + \gamma = 0 \text{ car } \beta + \gamma \text{ est l'exposant d'une longueur, donc pas identifiable à un temps} \\ -2\beta = 1 \text{ car dans le membre de gauche, T est à la puissance 1} \end{cases}$$

Dont la résolution donne $\alpha = 0$, $\beta = -0,5$, $\gamma = 0,5$, c'est-à-dire :

$$T = \mathrm{k}\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Cette équation a été trouvée sans recourir à des raisonnements de physique, mais uniquement par un raisonnement sur les dimensions des grandeurs physiques en jeu. La mesure physique, c'est-à-dire l'expérimentation, montre que k = 2π.

3 Erreur et incertitude

Pour bien comprendre ce que sont les erreurs et les incertitudes liées à un résultat, réalisons un exercice sportif. Rendez-vous sur internet pour trouver une vidéo d'Usain Bolt réalisant son record du monde du 100 m en 2009 à Berlin, et munissez-vous d'un chronomètre. Attention, c'est parti ! À vous de chronométrer. Ce record est établi à 9,58 s, vous ne trouvez pas la même chose ? Essayez encore… toujours pas ?

À vrai dire, il est très difficile d'arriver à mesurer le bon temps. Pourquoi ? Peut-être que le chronomètre est déclenché ou arrêté en retard ? Il faut, en effet, un certain temps de réaction entre ce que les sens perçoivent et l'action du doigt sur le chrono. Ou alors, est-ce parce que l'instrument de mesure (le chronomètre) n'est pas assez précis ? Peut-être pour toutes ces raisons à la fois ?

Ces quelques raisons pour lesquelles personne n'arrive à mesurer correctement le temps qu'Usain Bolt met pour parcourir 100 m sont ce que l'on appelle des sources d'erreurs ou d'incertitudes. Il n'est pas toujours possible de s'en affranchir, si bien qu'il est très important de pouvoir les évaluer et de les associer au résultat d'une mesure.

3.1 Erreur

Définitions

L'**erreur** est la différence entre la valeur mesurée et « la valeur vraie » de la grandeur.

Ainsi, si l'on désigne par G la valeur vraie de la grandeur physique mesurée et par m le résultat de la mesure de G, l'erreur absolue sera G – m. On peut également exprimer l'erreur relative comme étant : (G – m) / G.

Il peut exister différentes causes d'erreur : la méthode de mesure mal adaptée, l'instrument (mal étalonné, vieillissant…) ou tout simplement la personne qui opère l'instrument. Dans le cas de la mesure du temps d'Usain Bolt, la source d'erreur tient au fait qu'il est compliqué de déclencher et arrêter le chronomètre exactement au bon moment.

Dans tous les cas, une erreur peut être :

- Systématique : lorsque l'on répète la mesure dans les mêmes conditions et que la même erreur se produit. Mathématiquement, on la décrit par la différence entre la valeur vraie et la moyenne des valeurs mesurées :

$$\left(G - \frac{\sum_1^n m_n}{n} \right)$$

L'erreur systématique ne peut pas être réduite en répétant la mesure, en revanche on peut la soustraire au résultat final si on connaît la source.

- Aléatoire : la moyenne des différences entre la valeur vraie et les valeurs mesurées, lorsque l'on effectue un grand nombre de mesures dans les mêmes conditions :
$$\left(\frac{\sum_1^n (G - m_n)}{n}\right)$$

L'erreur aléatoire peut être corrigée en faisant un grand nombre de mesures n.

Pour décrire ce qu'est une erreur, on peut prendre l'exemple d'une cible sur laquelle des fléchettes sont plantées (figure 1.2). Lorsqu'elles sont toutes dans le mille, il n'y a pas d'erreur ; lorsqu'elles sont toutes au même endroit mais pas dans le mille, l'erreur est systématique ; enfin, si elles sont toutes autour du mille mais jamais dedans, l'erreur est aléatoire.

Pas d'erreur | Erreur systématique | Erreur aléatoire

Figure 1.2 *Illustration de l'erreur systématique et aléatoire lors d'une mesure.*

Attention ! Dans le langage courant on parle facilement de la « précision » d'une mesure. Le terme scientifique est « exactitude ». Une mesure est d'autant plus exacte que les erreurs systématiques ET aléatoires sont faibles.

3.2 Incertitude

Même en corrigeant toutes les erreurs, en ayant donc une mesure exacte, il reste une **incertitude de mesure**. Pour bien mettre en évidence la différence entre erreur et incertitude, mettons-nous en situation expérimentale.

Prenez votre double décimètre et réfléchissez à ce que vous faites lorsque vous mesurez une longueur qui « tombe » entre deux graduations… Sur la figure 1.3, un couteau est posé sur une feuille à petits carreaux, juste au-dessus d'une règle.

Figure 1.3 *Longueur d'un couteau.*

La lecture de la longueur du couteau avec la règle donne un résultat situé entre 22,7 cm et 22,8 cm. La valeur vraie de la longueur du couteau se situe donc entre ces deux valeurs. Il serait possible de répéter la mesure une infinité de fois dans des conditions similaires, nous ne pourrions pas améliorer l'exactitude de la mesure. Il existe donc une incertitude sur la valeur vraie de la longueur du couteau.

Attention ! Il ne faut pas confondre erreur et incertitude : **une erreur se corrige, une incertitude s'evalue**.

Définition

L'**incertitude** est l'ensemble des valeurs raisonnables pouvant être associées à une mesure.

Dans cette ouvrage, l'incertitude sur la grandeur G sera notée ΔG, et l'incertitude relative, dont nous parlerons à la fin de ce chapitre, δG.

3.2.1 Incertitude maximum

Une réponse à la question « quelle est la longueur l du couteau ? », pourrait être : $l = 22{,}75 \pm 0{,}05$ cm. Ce résultat correspond à la moyenne des deux graduations avec une incertitude égale à l'écart entre les deux graduations (g_1 et g_2) divisé par deux. Autrement dit :

$$\mathrm{G} = \frac{g_2 + g_1}{2} \pm \frac{g_2 - g_1}{2}$$

où G est le résultat de la mesure, g_1 et g_2 étant les valeurs des deux graduations les plus proches.

Cette incertitude est dite **incertitude maximum**. En réalité, il est possible d'améliorer ce résultat en considérant que le résultat d'une mesure est une variable aléatoire. Si l'on demande à un grand nombre de personnes quelle est la longueur du couteau, personne ne donnera les valeurs les plus extrêmes, et beaucoup donneront une réponse située autour de la moyenne. En réalité, si l'on répète N fois la même mesure, on obtiendra des résultats représentant une courbe en cloche centrée sur la moyenne des valeurs extrêmes. Le résultat d'une mesure se comporte donc comme un objet statistique et il faut se référer à cette théorie pour pouvoir évaluer une incertitude. Ainsi, le résultat de la mesure du couteau est donc égal à :

$$\mathrm{G} = \frac{g_2 + g_1}{2} \pm \frac{g_2 - g_1}{2\sqrt{3}}$$

L'application numérique donne : 22,75 ± 0,03 cm.

3.2.2 Incertitude intrinsèque

Nous avons choisi de mesurer le couteau avec la règle graduée. Nous aurions également pu utiliser le papier à petits carreaux. Les petits carreaux de la feuille mesurent 0,5 cm ; mesurée avec les petits carreaux, la taille de ce couteau est située entre 22,5 cm et 23 cm. Le résultat de la mesure utilisant le papier à petits carreaux est donc 22,75 ± 0,14 cm. Les valeurs mesurées avec la règle graduée et avec les petits carreaux ne diffèrent que par leur incertitude. L'incertitude dépend ici de l'instrument de mesure, c'est pourquoi elle est nommée **incertitude intrinsèque**.

FOCUS

Mesure avec un instrument à affichage numérique

Pour les instruments de mesure à affichage numérique, les constructeurs donnent souvent l'incertitude de leur instrument et il suffit d'appliquer la formule proposée pour obtenir l'incertitude. Par exemple, on mesure une tension de 6,20 V avec un multimètre numérique. La notice du multimètre explique que l'incertitude sur cette valeur est de 0,2 % de la lecture + 1 UL (unité de lecture, ou digit). L'incertitude est donc :

$$\frac{0{,}2 \times 6{,}20}{100} = 0{,}0124 \text{ V pour la lecture.}$$

Pour le calibre utilisé, l'unité de lecture ou le digit a une valeur de 0,01 V.
Finalement, la tension mesurée U est de : $U = 6{,}20 \pm 0{,}03$ V.

3.2.3 Incertitude de type A

Pour évaluer une incertitude, l'une des méthodes consiste à répéter un grand nombre de fois la mesure et à faire une étude statistique des résultats. Le résultat de la mesure est donné par la moyenne statistique calculée sur les N résultats g_i de la mesure. L'incertitude est l'**écart-type** de cette moyenne. Ainsi, le résultat G de la mesure est :

$$\mathrm{G} = \frac{\sum_{i=1}^{N} g_i}{N} \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(\overline{g_i} - g_i\right)^2}{(N-1)}}$$

où $\overline{g_i}$ est la moyenne des résultats de la mesure.
Cette incertitude est appelée **incertitude de type A**.

3.2.4 Incertitude de type B

Lorsque l'incertitude est évaluée autrement que de manière statistique, on la nomme **incertitude de type B**. Les incertitudes maximum ou intrinsèques entrent dans le cadre de ce type d'incertitude.

3.2.5 Incertitude relative

Définition

On appelle **incertitude relative** la grandeur G : $\delta \mathrm{G} = \dfrac{\Delta \mathrm{G}}{\mathrm{G}}$. Cette incertitude relative est sans dimension et permet d'apprécier la précision d'un instrument de mesure.

Exemple : Déterminer quel est l'instrument le plus précis

Le résultat d'une pesée donne 2 t ± 1 kg pour une voiture et 4 kg ± 10 g pour un sac de pommes de terre. Bien entendu, on n'utilise pas le même type de balance dans les deux cas. Quelle est la balance la plus précise ?

Solution :

L'incertitude relative pour la voiture est $5 \cdot 10^{-4}$, alors qu'elle est de $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ pour les pommes de terre. La balance de la voiture a donc une meilleure précision que la balance utilisée pour les pommes de terre.

3.3 Chiffres significatifs

Lorsque l'on discute de la distance entre deux villes, on la donne en kilomètres, il ne viendrait pas à l'idée de donner la distance au micromètre près. Cela n'aurait pas de sens car les outils de mesures, et surtout les points entre lesquels la mesure est effectuée ne sont pas définit au micromètre. Peut-on cependant donner un résultat au mètre près ? Comment décider du nombre de chiffres significatifs, c'est-à-dire qui donnent du sens à la mesure ?

Définition

On appelle **chiffres significatifs**, le nombre de chiffres utilisés pour décrire un résultat.

- Dans 459 135 il y a 6 chiffres significatifs
- Dans 123,845 il y a 6 chiffres significatifs

Le chiffre 0 n'est significatif que s'il est placé après des chiffres significatifs.

- Dans 400 il y a 3 chiffres significatifs
- Dans 1,230 il y a 4 chiffres significatifs
- Dans 0,053, il y a 2 chiffres significatifs
- Dans 0,9, il y a 1 chiffre significatif

Il est d'usage de ne pas donner plus de chiffres significatifs sur l'incertitude que sur la valeur du résultat (une incertitude ne peut être plus précise que la valeur mesurée).

La règle à suivre pour **arrondir un résultat** est : si le chiffre suivant le dernier chiffre significatif est compris entre 0 et 4 inclus, alors il suffit d'enlever les chiffres « en trop ». Si le chiffre suivant le dernier chiffre significatif est compris entre 5 et 9, alors le dernier chiffre significatif est incrémenté d'une unité. **L'incertitude absolue** est toujours arrondie **vers le haut**, afin d'être sûr qu'elle représente bien la limite supérieure de l'erreur commise.[2]

Le BIPM explique en détail comment calculer les incertitudes dans son guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Voir : www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications

C'est pourquoi dans le focus sur la mesure avec un instrument à affichage numérique, le résultat ne s'écrit pas : $U = 6{,}20 \pm 0{,}0224$ V mais $U = 6{,}20 \pm 0{,}03$ V

3.4 Propagation des incertitudes

Lorsqu'on fait un calcul sur des valeurs mesurées, il faut tenir compte des incertitudes. Par exemple, quand on cherche à mesurer une vitesse, on mesure en réalité une distance et un temps, puis on fait le rapport des deux résultats. Faut-il également faire le rapport des incertitudes ? Nous proposons ici la démonstration mathématique, qui permet d'obtenir une formule générale sur la propagation des incertitudes pour une seule grandeurs mesurées. À la fin du paragraphe deux tableaux présentent les formules pour deux grandeurs mesurées.

2. Dans le focus sur la mesure avec un instrument à affichage numérique, si le résultat du calcul d'incertitude est arrondi à $U = 6{,}2 \pm 0{,}02$ V, alors les valeurs possibles de la mesure telles que $U = 6{,}2 + 0{,}0224$ V $= 6{,}2224$ V ne sont pas comprise dans l'intervalle $U = 6{,}2 \pm 0{,}02$ V). On risque donc d'exclure des résultats possibles de la mesure en sous estimant l'intervalle des résultats.

Soit $x_0 \pm \Delta x$ la grandeur mesurée et y la valeur que l'on cherche par le calcul, c'est-à-dire par une fonction mathématique f. On a donc $y = f(x_0)$

et $\Delta y = \dfrac{|(f(x_0+\Delta x) - f(x_0-\Delta x)|}{2}$.

Si Δx n'est pas trop grand, on a :

$f'(x_0) \approx \dfrac{f(x_0-\Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$ et $f'(x_0) \approx \dfrac{f(x_0+\Delta x) - f(x_0)}{-\Delta x}$

Par conséquent : $f(x_0+\Delta x) \approx f(x_0) + \Delta x f'(x_0)$

et $f(x_0-\Delta x) \approx f(x_0) - \Delta x f'(x_0)$

En faisant la différence entre les deux équations précédentes, on retrouve l'expression de Δy, et le résultat est :

$$\Delta y = |f'(x_0)|\Delta x$$

Le même type de raisonnement mathématique permet de généraliser cette expression à des fonctions dépendant de plusieurs grandeurs mesurées. Ces raisonnements ne seront pas développés ici. Un formulaire est disponible dans les tableaux 1.3 et 1.4.

Tableau 1.3 Propagation des incertitudes de type A : y est la grandeur calculée que l'on recherche, A et B les grandeurs mesurées.

Opération	y	Δy
Somme	$A+B$	$\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}$
Différence	$A-B$	$\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}$
Produit	$A\times B$	$A.B\sqrt{(\delta A)^2+(\delta B)^2}$
Quotient	A/B	$A.B\sqrt{(\delta A)^2-(\delta B)^2}$
Puissance	A^n	$nA^n\lvert\delta A\rvert$

Tableau 1.4 Propagation des incertitudes de type B : y est la grandeur calculée que l'on recherche, A et B les grandeurs mesurées.

Opération	y	Δy
Somme	$A+B$	$\Delta A+\Delta B$
Différence	$A-B$	$\Delta A+\Delta B$
Produit	$A\times B$	$A\Delta B+B\Delta A$
Quotient	A/B	$(A\Delta B+B\Delta A)/B^2$
Puissance	A^n	$nA^{n-1}\Delta A$

Exemple : Calcul de la vitesse sur 100 m

Après avoir vu et revu Usain Bolt courir le 100 m, une coureuse décide de s'évaluer lors d'une course improvisée. Elle n'est pas sur un stade et doit elle-même choisir des repères situés à environ 100 m l'un de l'autre. Disons 100 ± 0,05 m. Son temps de course est de 12,5 ± 0,1 s. À quelle vitesse a-t-elle couru le 100 m ?

Solution

La vitesse moyenne de sa course (on entend ici moyenne par opposition à instantanée) est de $v = \frac{100}{12,5} = 8,0\,\mathrm{m.s^{-1}}$. Ce résultat est entaché d'une incertitude : pour la calculer, faut-il utiliser le tableau 1.3 ou 1.4 ? La coureuse n'a réalisé qu'une seule course, si bien que nous sommes dans le cas où l'incertitude est maximum (et non statistique). C'est donc parmi les formules du tableau 1.4, incertitudes de type B, qu'il faut choisir.

La vitesse étant le rapport d'une distance sur un temps, c'est la quatrième ligne du tableau 1.4 qui donne l'expression à utiliser.

Dans cette expression, x est la vitesse v, A est la distance d ; B est le temps t.

L'incertitude sur la vitesse est :

$$\Delta v = \frac{d\Delta t + t\Delta d}{t^2}$$

L'application numérique donne :

$$\Delta v = \frac{100 \times 0,1 + 12,5 \times 0,05}{12,5^2} = 0,07\ \mathrm{m.s^{-1}}$$

Pour écrire le résultat final, il faut tenir compte du nombre de chiffres significatifs dans le résultat et arrondir si besoin.

Finalement, la coureuse a couru à une vitesse $v = 8,0 \pm 0,1\ \mathrm{m.s^{-1}}$

Ce qu'il faut retenir

- Le système international d'unités est celui que les scientifiques utilisent, il est basé sur sept grandeurs fondamentales.
- Une unité est un paramètre extrinsèque d'une grandeur physique alors qu'une dimension a un caractère intrinsèque.
- L'analyse dimensionnelle permet une première vérification du résultat d'un calcul.
- Ne pas confondre erreur et incertitude : une erreur se corrige, une incertitude s'évalue.
- Savoir utiliser l'incertitude intrinsèque d'un instrument de mesure.

Testez-vous

1. Une grandeur physique est :

☐ **a.** une unité de mesure ;
☐ **b.** une propriété qui peut être quantifiée ;
☐ **c.** une dimension ;
☐ **d.** une mesure.

2. Parmi les choix ci-dessous, quelles unités font parties du système international ?

☐ **a.** le kilomètre, le gramme, la seconde, l'ampère ;
☐ **b.** le mètre, le gramme, la seconde, l'ampère ;
☐ **c.** le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère ;
☐ **d.** le mètre, le kilogramme, la seconde, le volt.

3. $F = k \cdot v$ est la formule donnant la force de frottement en fonction de la vitesse. Quelle est la dimension de la constante k ?

☐ **a.** $[k] = MT^{-1}$;
☐ **b.** $[k] = MLT^{-2}$;
☐ **c.** $[k] = MLT^{-1}$;
☐ **d.** $[k] = MT$.

4. Une incertitude :

☐ **a.** est une erreur ;
☐ **b.** est toujours intrinsèque ;
☐ **c.** est un ensemble de valeurs ;
☐ **d.** peut se corriger.

5. L'incertitude relative :

☐ **a.** a la même dimension que la grandeur sur laquelle elle porte ;
☐ **b.** peut se corriger ;
☐ **c.** est le rapport de l'incertitude absolue sur le résultat de la mesure ;
☐ **d.** est d'autant plus grande que la grandeur physique mesurée est grande.

Voir corrections p. 541

Exercices

1 Exprimez les unités dérivées suivantes grâce aux unités du système international (SI)

a. Le newton (N), unité de force.

b. Le joule (J), unité d'énergie.

c. Le watt (W), unité de puissance.

d. Le pascal (Pa), unité de pression.

e. L'ohm (Ω), unité de résistance électrique.

Pour résoudre cet exercice, il faut :

1. trouver une loi physique faisant intervenir une grandeur physique qui se mesure à l'aide de cette unité ;
2. poser et résoudre l'équation aux dimensions ;
3. conclure en énonçant l'unité exprimée avec les unités du système international.

2 Déterminez la dimension des deux paramètres a et k qui apparaissent dans la loi :

$$\vec{f} = a\vec{g} - \mathrm{k}\vec{l}$$

où f est une force qui s'exprime en newton (N), g est l'accélération de la gravité exprimée en mètres par seconde au carré ($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$) et l est une distance exprimée en mètre.

3 L'énergie d'un photon s'écrit $E = \mathrm{h}\nu$, où E est une énergie et s'exprime en joule, ν est la fréquence exprimée en hertz. Déterminez dans le système international l'unité de la constante de Planck h.

4 L'énergie cinétique est définie à partir de l'équation :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \text{(a)}$$

avec m la masse et v la vitesse.

L'énergie potentielle gravitationnelle est définie à partir de l'équation :

$$E_P = mgh \qquad \text{(b)}$$

avec g l'accélération de la gravité et h la hauteur.

L'énergie E_m utilisée pour déplacer d'une distance l un corps en appliquant une force F est :

$$E_m = \vec{F} \cdot \vec{l} \qquad \text{(c)}$$

L'énergie ΔU transférée à un gaz à pression P pour changer son volume ΔV est :

$$\Delta U = -P\Delta V \qquad \text{(d)}$$

Vérifiez l'homogénéité des équations a, b, c et d.

5 Montrez qu'une pression P est une énergie par unité de volume.

6 Les côtés d'un triangle équilatéral ont une longueur $a = 4{,}10 \pm 0{,}05$ cm.

a. Calculez le périmètre du triangle.

b. Calculez l'aire du triangle $\left(\dfrac{\text{base} \times \text{hauteur}}{2}\right)$.

7 La mesure d'une tension électrique a donné (en volt) les résultats suivants :

12,6	12,1	12,8	12,6	13,0	12,5	12,0	12,3	12,5	12,8
12,4	12,5	12,4	12,5	12,7	12,9	12,9	12,4	12,6	12,5
12,1	12,5	12,6	12,7	12,4	12,3	12,6	12,4	12,3	12,8

Déduisez-en la valeur à associer à cette mesure sachant que l'incertitude intrinsèque du voltmètre vaut 0,1 V pour chaque mesure.

8 Les côtés adjacents à l'angle droit d'un triangle rectangle sont respectivement $a = 12{,}1 \pm 0{,}1$ cm et $b = 23{,}3 \pm 0{,}2$ cm. Calculez la longueur de l'hypoténuse.

PARTIE

1

Le snowboard illustre des principes de mécanique classique : gravité, vitesse, accélération, déplacement, énergie, frottements, etc. Par exemple, lors de la descente, l'énergie potentielle du surfeur est transformée en partie en énergie cinétique.

Depuis le début du xx^{e} siècle, la mécanique classique a été mise en défaut par la mécanique quantique pour expliquer des phénomènes à l'échelle de l'atome, et par la relativité pour expliquer le mouvement des objets à des vitesses proches de celle de la lumière ou dans des champs gravitationnels intenses (relativité générale). Cependant, elle reste d'actualité pour expliquer des situations de la vie courante. C'est aussi grâce à ses lois que l'on a récemment pu (12 novembre 2014) poser une petite sonde sur la surface d'une comète, à plus de 600 millions de kilomètres de la Terre. La mécanique classique (ou mécanique newtonienne) est la branche de la physique qui étudie forces, mouvements et déformations des objets soumis à des forces. Nous aborderons ici trois de ces domaines : la statique (étude des objets à l'équilibre), la cinématique (description des mouvements des objets), la dynamique (relation entre les causes du mouvement et leurs effets).

Mécanique

Équilibre statique

Pour bien démarrer

À chaque question, il peut y avoir une ou plusieurs bonnes réponses. Retrouvez des QCM supplémentaires sur le site dunod.com.

1. **L'action mécanique :**
   - ☐ **a.** se produit nécessairement entre deux objets ;
   - ☐ **b.** se produit en présence d'un seul objet ;
   - ☐ **c.** est une action interne à l'objet ;
   - ☐ **d.** est une action externe à l'objet.
2. **Les actions mécaniques sont :**
   - ☐ **a.** des actions à distance uniquement ;
   - ☐ **b.** des actions de contact uniquement ;
   - ☐ **c.** des actions à distance et des actions de contact.
3. **Lorsqu'un objet tombe, il est soumis à une action mécanique :**
   - ☐ **a.** de contact ;
   - ☐ **b.** à distance ;
   - ☐ **c.** localisée.
4. **La pression qu'exerce l'eau sur un barrage est une action mécanique :**
   - ☐ **a.** de contact ;
   - ☐ **b.** à distance ;
   - ☐ **c.** localisée.
5. **L'unité de force est le :**
   - ☐ **a.** N (newton) ;
   - ☐ **b.** $kg \cdot m \cdot s^{-2}$;
   - ☐ **c.** J (joule).

Réponses page 542

Objectifs de ce chapitre

- Modéliser les actions mécaniques par des forces.
- Établir le diagramme système-interactions (DSI), y associer le schéma éclaté (SE) et en déduire le diagramme système-forces (DSF).
- Déterminer les caractéristiques des forces extérieures qui agissent sur un système et leurs moments associés.
- Énoncer et comprendre les conditions d'équilibre (translation, rotation) d'un système soumis à plusieurs forces extérieures, et les utiliser pour résoudre un problème d'équilibre statique.

CHAPITRE 2

Le bloc qui surplombe ce rocher semble défier la gravité. Sculpté par le vent et la pluie depuis des millions d'années, il est dans un état d'équilibre précaire mais stable dans le temps. Certes il peut se détacher à tout moment mais aussi rester encore en équilibre pendant des millénaires.
En mécanique, la statique a pour objectif d'étudier les conditions d'équilibre d'un objet en utilisant la connaissance des forces s'exerçant sur celui-ci. Elle permet d'expliquer de nombreuses situations comme le fonctionnement mécanique du corps humain ou la pose d'une échelle sur un mur. Mais c'est dans le domaine du génie civil et du génie mécanique pour la construction de barrages, de ponts, de bâtiments, etc. que la statique est essentielle.
Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps aborder les notions fondamentales nécessaires pour résoudre un problème de statique. Nous décrirons ensuite quelques forces usuelles rencontrées dans des situations de statique. Enfin, nous nous intéresserons au principe fondamental de la statique de translation et de rotation. Les concepts et outils mathématiques (vecteurs, projections, produit vectoriel, etc.) utilisés dans ce chapitre seront réinvestis tout au long des chapitres de mécanique.

1 Les notions fondamentales

1.1 Le corps matériel

En physique, un corps matériel peut désigner une portion de notre univers de taille quelconque. On peut considérer une galaxie ou un grain de sable. Ce corps matériel peut changer de forme au cours du temps. Il peut être dans un état solide (métaux, pierre, bois, béton, etc.), liquide (eau, huile, etc.) ou gazeux (vapeur d'eau, air, etc.).

Un corps matériel est une portion limitée de matière (ensemble d'atomes ou molécules).

Tout corps matériel possède une forme quelconque et occupe un certain volume dans l'espace, qui peut changer au cours du temps. Il est caractérisé par sa masse. Il peut être rigide ou déformable (changement de forme), incompressible ou compressible (changement de volume). Nous limiterons notre étude aux corps matériels dans un état solide et non déformables.

1.2 Le référentiel

L'état de mouvement ou de repos d'un corps matériel ne peut pas être défini sans préciser un référentiel, c'est-à-dire un système d'observation défini à la fois par une mesure d'espace et une mesure de temps. Par exemple, si l'on considère un voyageur assis dans un train qui quitte une gare, le voyageur est au repos (vitesse nulle) dans le référentiel lié au train. Pourtant, ce même voyageur est en mouvement (vitesse non nulle) par rapport au référentiel lié au quai de la gare.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons uniquement aux référentiels dans lesquels les corps matériels étudiés sont au repos, c'est-à-dire qu'ils ont une vitesse nulle. Nous reverrons ultérieurement plus en détails les référentiels (chapitre 4) et la notion de vitesse (chapitre 3).

En mécanique classique, quel que soit le référentiel, le temps est le même. On dit qu'il est absolu. En revanche, ce n'est pas le cas pour l'espace. On associe alors un repère au référentiel.

RAPPEL MATHÉMATIQUE : REPÈRE CARTÉSIEN ET VECTEUR

Pour repérer n'importe quel point de l'espace, on peut par exemple utiliser un repère cartésien orthonormé muni d'une origine O et de vecteurs de base $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$. Un point M de l'espace peut alors être repéré par rapport au point O par le vecteur : $\overrightarrow{OM} = x_M\vec{i} + y_M\vec{j} + z_M\vec{k}$ où x_M, y_M, z_M sont appelées **coordonnées cartésiennes** du point M dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Dans un repère cartésien, les composantes du vecteur position sont confondues avec les coordonnées du point M qu'il repère, ce qui n'est pas le cas dans d'autres systèmes de coordonnées comme les coordonnées polaires (voir chapitre 4), par exemple.

Les vecteurs $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ sont unitaires, c'est-à-dire que leurs normes sont égales à 1. Dans le cas d'un repère direct, ils sont perpendiculaires entre eux et sont placés les uns par rapport aux autres dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (voir figure 2.1, partie de gauche). C'est pourquoi le repère est dit **orthonormé** (vecteurs perpendiculaires entre eux et de norme 1).

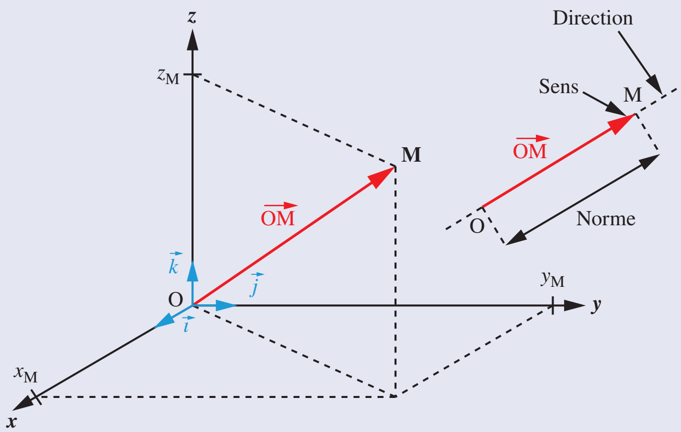


Figure 2.1

Rappelons qu'un vecteur peut être représenté par un segment (portion de droite) orienté. Il est représenté sous forme d'une flèche ayant pour extrémités un point de départ et un point d'arrivée (aussi appelé pointe)[1]. Soient O et M deux points de l'espace, le vecteur $\overrightarrow{OM}$ (figure 2.1, partie de droite) est caractérisé par :

– sa direction : droite (OM) appelée **droite d'action** ;
– son sens : de O vers M ;
– sa norme : longueur du segment [OM].

La flèche permet de distinguer le vecteur de sa norme qui est un scalaire.

En physique, le vecteur n'est souvent pas suffisant pour modéliser la grandeur intéressante (vitesse, force, etc.). Il faut y ajouter une caractéristique supplémentaire : le point d'application.

1.3 L'action mécanique

Définition

Une **action mécanique** est une cause physique qui peut déformer un corps matériel ou modifier son mouvement (voir figure 2.2).

Figure 2.2 *Exemples d'effet d'action mécanique. **A.** La perchiste exerce une action mécanique qui déforme la perche. **B.** L'action mécanique exercée par la raquette de ping-pong met en mouvement la balle, peut changer sa trajectoire ainsi que sa vitesse (voir chapitre 3).*

1. On peut changer ces points de départ et d'arrivée sans changer de vecteur, à condition que la flèche garde la même longueur (appelée norme du vecteur) et la même direction. Quand l'origine O a été choisie comme point de départ, le point d'arrivée est alors unique.

Une action mécanique peut s'appliquer à l'ensemble ou seulement à une partie du corps matériel soumis à cette action. Elle peut être répartie ou localisée. Dans ce dernier cas, elle s'exerce sur une portion du corps matériel de dimensions négligeables par rapport à celles du corps matériel.

Une action mécanique se produit en présence de deux corps matériels. Il existe deux types d'actions mécaniques :

– à distance, les corps matériels ne sont pas en contact ;
– de contact, les corps matériels se touchent.

Ces notions sont valables au niveau macroscopique, c'est-à-dire pour des dimensions du corps matériel supérieures au micron (10^{-6} m).

1.4 La force

Une **action mécanique** peut être modélisée par une force dont le vecteur associé indique la direction, le sens et l'intensité (norme). Une action mécanique de contact (répartie ou localisée) est modélisée par une force dont le point d'application est situé sur la surface de contact des deux corps matériels, sauf pour la poussée d'Archimède où le point d'application se situe au centre de la partie immergée du corps matériel. Dans le cas d'une action à distance, ce point d'application se situe au centre de gravité du corps matériel.

Définition

L'ensemble des forces de gravité ou de pesanteur sur un corps matériel sont équivalentes à une force unique appliquée en un point appelé **centre de gravité**. Lorsque la gravité est la même en tout point du corps matériel (uniforme), le centre de gravité est confondu avec le centre de masse, ou centre d'inertie. Si le corps matériel a une forme régulière et une répartition de masse homogène (la même en toute partie du corps matériel), le centre de masse est confondu avec le centre géométrique du corps matériel.

Soit $\overrightarrow{F_{1\to 2}}$ la force associée à l'action mécanique exercée par le corps matériel 1 sur le corps matériel 2. Soit $\overrightarrow{F_{2\to 1}}$ la force associée à l'action mécanique exercée par le corps matériel 2 sur le corps matériel 1. Le principe des actions mécaniques réciproques implique les égalités suivantes :

$$\overrightarrow{F_{1\to 2}} = -\overrightarrow{F_{2\to 1}} \text{ donc } \left\|\overrightarrow{F_{1\to 2}}\right\| = \left\|\overrightarrow{F_{2\to 1}}\right\|$$

C'est la **troisième loi de Newton** que nous aborderons également dans le chapitre 4.

Pour répertorier les actions mécaniques, on utilise le **diagramme système-interactions**. Pour les modéliser sous forme de forces, on utilise le **schéma éclaté**.