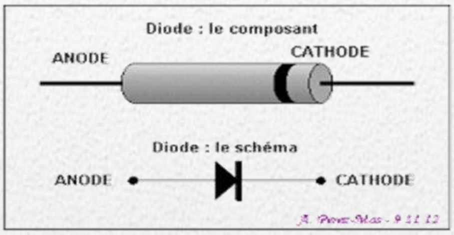
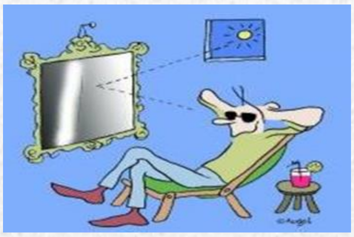
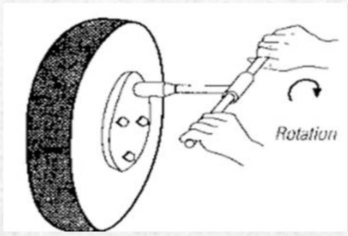






PHYSIQUE

SECONDE S.

NEWSCHOOL – APC
Approche Par les Compétences

05/01/2020

SOMMAIRE

BEKONGO BERTRAND

R : Ce nouveau programme, conformément au nouveau modèle des enseignements au Cameroun, est reparti en quatre modules. Nous précisons que ce manuel est destiné à toutes les classes de seconde scientifique.

AVANT - PROPOS

Cet ouvrage est conforme aux programmes des classes de Seconde S de l'Enseignement Secondaire Général et/ ou Technique du Cameroun.

Nous avons voulu proposer aux élèves ainsi que aux Enseignants (es) un outil de travail utile et agréable par la clarté du cours, la rigueur du contenu, l'authenticité de l'expérimentation, la variété des exercices,…

Afin de pouvoir traiter tout le programme avec facilité, ce manuel est divisé en ***15 leçons*** et découpé en ***4 modules***.

LE COURS Sa rédaction a été soignée et le contenu de chaque leçon a été volontairement limité. La présence d'exercices résolus dans le cours doit permettre à l'élève d'acquérir rapidement la maîtrise des concepts présentés.

LES TRAVAUX PRATIQUES L'activité expérimentale prend, dans cet ouvrage, une part très importante. Les manipulations proposées ont été testées et réalisées en Laboratoire.

LES EXERCICES Ils sont repartis en cinq (04) catégories :

1. Des **évaluations de ressources**, pour contrôler rapidement ses connaissances ;
2. Des **exercices d'application** ou **activités** ;
3. Des **exercices de synthèse** pour résumer un module
4. Des **évaluations de compétences**.

LE DOCUMENT Il est conçu pour ouvrir sur le monde extérieur et éveiller la curiosité. Pour laisser toute leur place à ces « Documents », qui font partie des activités support figurant au programme, leur exploitation fait l'objet d'exercices et aussi pour certaines parties des leçons.

Nous espérons que Professeurs et élèves auront autant de plaisir à utiliser cet ouvrage que nous en avons eu à le concevoir.

Nous remercions par avance tous ceux qui nous feraient parvenir critiques, suggestions et remarques.

Les Auteurs.

MODULE ⇒ **MESURES ET INCERTITUDES** I

Leçon 1

LES UNITÉS FONDAMENTALES DU SYSTÈME INTERNATIONAL (SI) ET LEURS DÉRIVÉES

ACTIVITÉ(S)

En 1960, la XIe Conférence Générale des Poids et Mesures a défini les sept unités de base du Système international d'unités (SI), fondé sur le système métrique (décimal).

On définit alors une liste de certaines unités connues de nos jours : kilogramme – Litre – mètre – Pascal – Volt – Newton – seconde – Kelvin – mole – Joule – Watt – Ohm – Ampère – Candela – Coulomb – radian.

Relève sur cette liste, les sept unités de base du système international.

Objectifs

- Identifier les unités fondamentales du système international d'unité (SI)
- Déterminer, par des opérations simples, certaines unités dérivées des unités du SI.
- Écrire les multiples et les sous multiples d'une grandeur physique.

Introduction

Comme nous le savons, la physique est une science expérimentale. Les expériences faites par cette dernière, porte sur les mesures des grandeurs physiques. Lorsqu'on mesure une grandeur, on lui attribue une unité. Si l'unité attribuée à la grandeur fait partir des 7-unités du tableau international des unités de base, cette unité est appelée unité fondamentale ou unité de base du système international (SI). Dans le cas contraire, elle est appelée unité dérivée. Notons qu'à l'origine, les unités dépendaient des pays et voir même des régions.

1. Unités fondamentales du SI

1.1. Définition

On appelle unité fondamentale ou unité de base du système international d'unité SI, l'une des 7-unités de base définies, en 1960 par la XIe Conférence Générale des poids et des mesures.

1.2. Les 7-unités du SI

Les 7-unités de base du SI sont définies sur le tableau 1 ci-dessous :

Grandeurs fondamentales	Unité du SI	Symbole	Définitions
Longueur	**Mètre**	**m**	Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant 1/299 792 458 de seconde (1983).
Temps	**Seconde**	**s**	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyper fins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (1967) précision : 10^{-12}

Masse	**Kilogramme**	**kg**	Le kilogramme est la masse du prototype en platine iridié, déposé au Bureau International des Poids et Mesures (1889).
Courant électrique	**Ampère**	**A**	L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance d'un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs, une force égale à 2.10^{-7} newton par mètre de longueur (1948).
Température	**Kelvin**	**K**	Le kelvin est égal à la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau (1967). Le degré Celsius est égal au kelvin.
Quantité de matière	**Mole**	**mol**	La mole est la quantité de matière contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12 (1971). La mole (mol) est l'abréviation de molécule par gramme.
Intensité lumineuse	**Candela**	**cd**	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet une radiation monochromatique de fréquence 540.10^{12} Hertz (**longueur d'onde 0,555 μm**) et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian (1979).

Tableau 1.1 : Les 7-unités fondamentales du SI

Remarque

Certaines unités ayant des premières lettres en majuscule, sont dues au fait qu'elles dérivent du nom du physicien ayant donné cette unité.

2. Unités dérivées du SI

Comme nous l'avons dit en introduction, toute unité ne faisant par partir du tableau 1.1, est appelée unité dérivée.

2.1. Définition

Une unité dérivée est celle obtenue à partir des unités fondamentale.
C'est donc dire que pour obtenir une unité dérivée, il faudrait exploiter une équation.

Par exemple, pour obtenir le mètre carré, il suffit de multiplier le mètre par lui-même. Soient a et b deux grandeurs exprimées en mètre chacune. Posons S, le résultat du produit de a par b ou de b par a. On a : $S = a \times b = b \times a = a\ (m) \times b\ (m) = (a \times b)\ m \times m = a \times b\ (m^2)$.

Remarque

En général, le mètre carré représente l'air ou la surface d'une figure géométrique.

2.2. Liste de quelques unités dérivées du SI

- Les unités dérivées s'expriment par des relations algébriques en fonction des unités de base (Ex : la vitesse en m/s).
- Ces unités peuvent avoir un nom spécial (Ex : la pression en pascal, $1\ Pa = 1\ N/m^2$)
- Ou encore peuvent être une combinaison d'unité de base et d'unités dérivées (Ex : l'éclairement en W/m^2).

Grandeurs	Unités			
	Noms	**Symboles**	**Expressions**	
Angle plan	Radian	**Rad**		**1 m/m**
Angle solide	Stéradian	**Sr**		**$1\ m^2 / m^2$**
Fréquence	Hertz	**Hz**		**$1\ s^{-1}$**
Force	Newton	**N**		**$1\ kg.m.s^{-2}$**
Pression, contrainte	Pascal	**Pa**	**$N.m^{-2}$**	**$1\ kg.m^{-1}.s^{-2}$**
Énergie, travail, quantité de chaleur	Joule	**J**	**N.m**	**$Kg.m^2.s^{-2}$**
Potentiel électrique, différence de potentiel, tension, force électromotrice	Volt	**V**	**1 W/A**	**$1\ kg.m^2.s^{-3}.A^{-1}$**
Capacité électrique	Farad	**F**	**1 C/V**	**$1\ kg^{-1}.m^{-2}.s^2.A^2$**
Résistance électrique	Ohm	**Ω**	**1 V/A**	**$1\ kg.m^2.s^{-3}.A$**
Conductance électrique	Siemens	**S**	**$1\ \Omega^{-1}$**	**$1\ kg^{-1}.m^{-2}.s^3.A^{-1}$**
Flux d'induction magnétique	Weber	**Wb**	**1 V.s**	**$1\ kg.m^2.s^{-2}.A^{-1}$**
Induction magnétique, champ magnétique	Tesla	**T**	**$1\ Wb/m^2$**	**$1\ kg.s^{-2}.A^{-1}$**
Inductance	Henry	**H**	**1 Wb/A**	**$1\ kg.m^2.s^{-2}.A^{-2}$**
Température Celsius	Degré Celsius	**°C**		**1 K**
Flux lumineux	Lumen	**Lm**	**1 cd/sr**	**1 cd.m/m**
Éclairement	Lux	**Lx**	**$1\ Lm/m^2$**	**$1\ cd.m^{-2}$**
Activité d'un radionucléide	Becquerel	**Bq**		**$1\ s^{-1}$**
Dose absorbée, énergie massique communiquée, kerma, indice de dose absorbée	Gray	**Gy**	**1 J/kg**	**$1\ m^2.s^{-2}$**
Équivalent de dose, indice d'équivalent de dose.	Sievert	**Sv**	**1 J/kg**	**$1\ m^2.s^{-2}$**
Charge électrique, quantité d'électricité	Coulomb	**C**		**1 A.s**
Puissance, flux énergétique	Watt	**W**	**1 J/s**	**$1\ kg.m^2.s^{-3}$**

Tableau 1.2 : Quelques unités dérivées du SI

Exemple

En exploitant la formule $F = m \times a$, déterminons l'unité de la force F si m (kg) et a ($m.s^{-2}$)

$F = m \times a = kg \times m \times s^{-2}$.

Donc dans cette relation, F s'exprime en kilogramme mètre par seconde carrée.

2.3. Les multiples et les sous-multiples

On regroupe les multiples et les sous-multiples des unités dans le tableau 3 ci-dessous :

	Préfixe	Symboles	Facteurs multiplicateurs
Multiple	Téra	T	10^{12} = 1 000 000 000 000
	Giga	G	10^{9} = 1 000 000 000
	Méga	M	10^{6} = 1 000 000
	Kilo	K	10^{3} = 1 000
	Hecto	H	10^{2} = 100
	Déca	Da	10^{1} = 10
Sous - multiples	Déci	D	10^{-1} = 0,1
	Centi	C	10^{-2} = 0,01
	Milli	M	10^{-3} = 0,001
	Micro	µ (mu)	10^{-6} = 0,000001
	Nano	N	10^{-9} = 0,000000001
	Pico	P	10^{-12} = 0,000000000001

Tableau 4.3 : Multiples et sous-multiples des grandeurs

Exemple

Calculer, en mètre, kilomètre et décimètre, le périmètre P d'un rectangle de surface 20 m × 15 m. Placer les différentes valeurs obtenus dans un tableau de multiples et sous-multiples du mètre

Solution

$S = 20 \times 15 = L \times \ell \Leftrightarrow L = 20$ m et $\ell = 15$ m

$P = (L + \ell) \times 2 = 70$ m. $P = 70$ m $= 70.10^{-3}$ km $= 700$ dm

Tableau

Km	hm	Dam	m	dm	Cm	Mm
		7	0			
0,	0	7	0			
		7	0	0		

Remarque

L'emploi de certaines unités hors système est légal en raison de leur importance et de leur domaine d'utilisation particulier. (Décision du Comité international de 1996)

Grandeurs	Unités		
	Noms	Symboles	Valeur en unité SI
Temps	Minute Heure Jour	min h d	1 min = 60 s 1 h = 60min = 3600 s 1 d = 24h = 86 400 s
Angle plan	Degré Minute Seconde	° ' ''	1° = (π/180) rad 1 ' = (1/60)° = (π/10800) rad 1'' = (1/60)' = (π/648000) rad
Volume	Litre	L	1 L = 1 dm^{3} = 10^{-3} m^{3}
Masse	Tonne	t	1 t = 10^{3} kg

Tableau 1.4 : Autres unités en usage avec le SI

3. Jeu bilingue

French words	English words
Mesure	Measure
Instrument de mesure	Measure instrument

EXERCICES DE LA LEÇON 1 : LES UNITÉS FONDAMENTALES DU SYSTÈME INTERNATIONAL ET LEURS DÉRIVÉES

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

1. Définir : unité fondamentale ; unité dérivée.

2. Vrai ou faux
2.1. Le kilogramme est une unité dérivée
2.2. 3 km = 300 m.
2.3. 0,301 m = 301 mm
2.4. 3 gigacoulomb se notent 3 GC
2.5. 1 microampère se note 1 μA
2.6. 40,103 mL = 40103 L.

3. QCM
3.1. L'opération permettant d'avoir le m.s^{-1} est :
(a) La multiplication
(b) La soustraction
(c) La division
3.2. L'opération permettant d'avoir le N.m est :
(a) La division
(b) La multiplication
(c) L'addition
3.3. Sur l'équation F = |q| × E où F est la force en Newton, q la charge en Coulomb et E l'intensité du champ électrique, E a pour unité :
(a) N.C
(b) N/C
(c) C/N.
3.4. Le volume V d'une sphère de rayon R (en mètre) est donné par la formule $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ Le volume a alors pour unité :
(a) Le mètre
(b) Le mètre carré
(c) Le mètre cube.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

1. Calculer le volume d'une sphère de rayon r = 30 mm. Prendre π ≈ 3,14.

2. Selon la deuxième loi de Newton sur le mouvement, la force F, la masse m du corps en mouvement et l'accélération a sont liées par la relation : F = ma.
À partir des unités du tableau 1.2 du cours, déterminer l'unité de la grandeur dérivée a.

3. Convertir
3.1. 30 m = ……….. cm
3.2. 30 m^2 = ………….. cm^2
3.3. 1,151 km = ………….. m
3.4. 30 m^3 = …………….. cm^3
3.5. 10^{10} pA = …………… A.
3.6. (3,21 + 107) L = …….. dL = ……….. μL.
3.7. (3,21 × 107) L = ……. dL = ………μL.

4. On dépose sur une surface de dimensions 273 mm × 171 mm, un objet de masse m = 20,33 kg.
4.1. Quelle est la forme de cette surface ?
4.2. Calculer, en m^2, l'aire S de cette surface.
4.3. Déterminer le poids F de cet objet. g = 9,8 N.kg^{-1}
4.4. En déduire la pression P. Déterminer son unité fondamentale, puis son unité dérivée.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Accélération normale

Dans les trajectoires courbes de rayon R, l'accélération normale a_n du centre d'inertie d'un mobile de vitesse linéaire V a pour unité le mètre par seconde carré. Après avoir donné les unités (et leur symbole) de chacune des grandeurs citées plus haut, déterminer la relation qui lie a_n, V et R.

Situation 2 : Champ électrique

Entre des plaques électrique de tension U distantes de d, règne un champ électrique E. Sachant que le champ électrique E s'exprime en Volts par mètre, déterminer la relation entre E, U et d. Préciser les unités de U et d.

Situation 3 : Le poids, une force ?

Après avoir rappelé la relation entre le poids P d'un corps d'un corps, sa masse m et l'intensité de la pesanteur g, justifier que le poids est une force.

Situation 4 : Force électrique – Constante électrique

On admet que deux charges q_A et q_B placées respectivement en A et en B et séparées d'une distance d, sont soumises à une force électrique $\vec{F}$ commune d'intensité : $F = k\frac{|q_A| \times |q_B|}{d^2}$
En exploitant cette formule, déterminer l'unité de la constante de proportionnalité k.

Situation 5 : Force gravitationnelle – Constante gravitationnelle

On admet que la Terre et la Lune, distantes de d et de masses respectives M et m , sont soumises à une force gravitationnelle $\vec{F}$ d'intensité : $F = \varepsilon\,\frac{M \times m}{d^2}$
En exploitant cette équation, déterminer l'unité de la constante de proportionnalité Ɛ. À quoi correspond-t-elle ?

Situation 6 : Densité d'un corps solide

La densité d'un corps solide ou liquide est le rapport de la masse d'un certain volume de ce corps à la masse d'un égal volume d'eau.
À partir de cette définition, déterminer l'unité de la densité d'un solide ou d'un liquide.

MODULE ⇒ **MESURES ET INCERTITUDES** I

Leçon 2

LES TECHNIQUE DE MESURES DES GRANDEURS

ACTIVITÉ(S)

Mesure une grandeur c'est déterminer une valeur numérique de cette grandeur à l'aide d'un appareil de mesure adéquat.
Associer à chaque grandeur du tableau 2.1 ci-dessous, son instrument de mesure :

Grandeurs	Instruments de mesure
pH d'une solution	Ohmmètre
Champ magnétique	Conductimètre
Tension électrique	pH-mètre
Résistance électrique	Wattmètre
Puissance.	Teslamètre

Objectifs

- Définir : grandeur physique ; appareil de mesure
- Énumérer quelques instruments de mesure
- Écrire le résultat d'une mesure

1. Exemples de mesures des grandeurs

1.1. Quelques définitions

- **Mesurer une grandeur physique**, revient à rechercher une valeur pour cette grandeur
- Une **grandeur physique** est toute propriété de la nature qui peut être quantifiée soit par mesure soit par calcul. Une grandeur est encore appelée la **mesurande**.
- La **mesure** est l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement l'intervalle de valeurs que l'on peut attribuer à une grandeur mesurée.
- La **valeur mesurée** est une grandeur attribuée à une grandeur suite à un mesurage.
- La **valeur vraie** est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait.
- Un **appareil de mesure** est tout instrument servant à mesurer une grandeur.

Remarque

La valeur vraie est toujours inconnue car la mesure n'est pas parfaite.

- Une **unité de mesure** est un étalon nécessaire à la mesure d'une grandeur physique.

1.2. Les techniques de mesure

1.2.1. Cas de la mesure de masse

(a) Les instruments de mesure

L'instrument de mesure utilisé ici est la **balance**. On distingue :

- La **balance électronique** : utilisée dans les laboratoires, les hôpitaux, les poissonneries,…
- La **balance de Roberval** : utilisée dans les boucheries.
- Le **pèse lettres** : utilisé à la poste
- Etc.

(b) L'unité de mesure de masse

En physique, l'unité de mesure de la masse est le **kilogramme** de symbole **kg**. Et en chimie, on utilise le **gramme** de symbole **g**.

1.2.2. Cas de la mesure de longueur

(a) Les instruments de mesure

On peut ici citer :

- La règle graduée, pour mesurer les petites dimensions
- Le mètre, utilisé par les menuisiers ou les bricoleurs ;
- Le mètre-ruban, utilisé par les couturiers(ères)
- Le décamètre, utilisé par les géomètres
- Le pied à coulisse, utilisé pour mesurer les tailles ou le diamètre de certains boutons.

(b) L'unité de mesure de longueur

En physique, l'unité utilisée est le **mètre** de symbole ***m***.

1.2.3. Cas de la mesure de la température

(a) Les instruments de mesure

L'instrument de mesure de la température le plus utilisé est le **thermomètre**.

(b) L'unité de mesure de température

L'unité de mesure de la température est le **Kelvin** (**K**). On utilise aussi le **degré Celsius** (**°C**).

Remarque

T (K) = 273,15 + T (°C).

1.2.4. Cas du volume

(a) Les instruments de mesure

On peut citer :

- La pipette, utilisée dans les laboratoires de Chimie
- L'éprouvette

(b) L'unité de mesure du volume

L'unité de mesure du volume est soit le **mètre cube** (**m^3**) ou le **litre** (**L**).

1.2.5. Cas du courant électrique

(a) Les instruments de mesure

On peut citer :

- L'ampèremètre
- Le multimètre réglé en mode ampèremètre

(b) L'unité de mesure du courant électrique

L'unité de mesure de l'intensité du courant électrique est l'**Ampère** de symbole **A**.

1.2.6. Cas de la tension électrique

(a) Les instruments de mesure

On peut citer :

- Le voltmètre
- Le multimètre réglé en mode Voltmètre
- L'oscilloscope

(b) L'unité de mesure de la tension électrique

L'unité de mesure de la tension électrique est le **Volt** de symbole **V**.

2. Présentation des résultats numériques

Mesure une grandeur est aussi définie par l'écriture de la valeur numérique obtenue. On distingue plusieurs manières d'écrire un résultat de la mesure parmi lesquelles :

- La notation scientifique (NS)

- Chiffres significatifs (CS) et arrondi
- Ordre de grandeur (OG)
- La méthode des sommes d'incertitudes
- La méthode des extrêmes
- La méthode du calcul différentiel.

2.1. La notation scientifique et les préfixes usuels

En exploitant la définition mathématique, la notation scientifique d'une valeur numérique est toute écriture de la forme $\alpha \times 10^n$ où $n \in \mathbb{Z}$ et α un réel supérieur ou égal à 1 et strictement inférieur à 10 ($1 \leqslant \alpha \prec 10 \setminus \{0\}$).

Exemple

La notation scientifique de 0,0158 est $1{,}58.10^{-2}$; $158 = 1{,}58.10^{2}$; $-7020{,}35 = -7{,}02035.10^{3}$.

On regroupe alors les préfixes usuellement utilisés dans le tableau ci-dessous et classés dans l'ordre décroissant :

Nom	Valeur	Symbole
Téramètre	10^{12}	Tm
Gigamètre	10^{9}	Gm
Mégamètre	10^{6}	Mm
Kilomètre	10^{3}	Km
Mètre	10	M
Millimètre	10^{-3}	Mm
Micromètre	10^{-6}	Mm
Nanomètre	10^{-9}	Nm
Picomètre	10^{-12}	Pm
Femtomètre	10^{-15}	Fm

Exemple

12 Tm $= 12.10^{12}$ m ; $0{,}233$ µm $= 2{,}33.10^{-1}$ µm $= 2{,}33.10^{-1-6}$ m $= 2{,}33.10^{-7}$ m.

2.2. Notion de chiffres significatifs et d'arrondi

2.2.1. Les chiffres significatifs

(a) Quelques règles

Les chiffres utiles, ceux qui tiennent compte de la précision et de l'incertitude d'une mesure, sont dits significatifs. Ce sont eux qui servent à traduire le degré de précision d'une mesure, et c'est la raison pour laquelle on doit connaître le nombre adéquat de chiffres significatifs qu'il faut conserver dans une mesure.

Remarque

- Une mesure expérimentale est toujours approximative, elle dépend de l'appareil de mesure et de l'expérimentateur.
- Une mesure est d'autant plus précise qu'elle s'exprime avec le plus grand nombre de chiffres significatifs.

Il existe quelques règles afin de déterminer le bon nombre de chiffres significatifs :

Règle 1 : Tout chiffre différent de zéro est significatif

Exemple : 1,3385 comprend 5-chiffres significatifs (1 3 3 8 5)

Règle 2 : Les zéros placés entre deux chiffres significatifs sont significatifs.

Exemple : le nombre 2,03052 comprend 6-CS (2 0 3 0 5 2)

Règle 3 : Les zéros placés à gauche du premier chiffre différent de zéro ne sont pas significatifs.

Exemple : 0,002 comprend 1-CS (2). Dans cet exemple, les zéros ne servent qu'à indiquer la position de la virgule.

Règle 4 : Les zéros placés à droite sont significatifs, s'ils sont placés après la virgule.

Exemple : 0,003100 comprend 4-CS (3 1 0 0) ; Le nombre 400 n'a qu'un seul CS (4).

Règle 5 : Les nombres exacts sont considérés comme ayant un nombre infini de CS.
Ils ne sont donc pas limitatifs. Ces nombres sont obtenus non pas en utilisant un appareil de mesure mais plutôt par comptage (**Ex** : 7-atomes), par l'utilisation d'une formule mathématique (**Ex.** : le 4 et le 3 de $4/3\ \pi\ r^3$) ou par définition. Par exemple, par convention, le pouce mesure exactement 2,54 cm. Donc dans l'expression 1" = 2,54 cm, ni le 1 ni le 2,54 n'influencent le nombre de chiffres significatifs dans les calculs.

Règle 6 : Tous les chiffres utilisés en notation scientifique sont significatifs.

Exemple : Le nombre 400 comprend 1-CS. Mais en notation scientifique, il contient 3-CS car $400 = 4{,}00\times10^2$.

(b) Chiffres significatifs et calculs

Il faut souvent effectuer des calculs à partir de valeurs mesurées pour obtenir le résultat final d'une expérience. Or, la précision des mesures doit se refléter dans le résultat obtenu. Il est logique de penser qu'un résultat ne peut pas être plus précis que les mesures qui ont servi à le calculer. Pour tenir compte de cette transmission de l'incertitude dans les résultats, on doit se fier à quelques règles de base pour déterminer le nombre de chiffres significatifs du résultat final. Cependant, ces règles ne constituent pas une méthode exacte. Il existe en effet d'autres méthodes de calcul plus précises mais parfois compliquées. Les règles ci-dessous mènent à une bonne approximation et permettent de sauver du temps tout en donnant des résultats très rapprochés de ceux qui seraient obtenus par des calculs plus complexes.

Règle 7 : Si l'opération est l'addition ou la soustraction, le résultat aura autant de décimales (chiffres après la virgule) que la mesure (utilisée dans le calcul) qui en a le moins.

Exemple : $\underbrace{120}_{0\ décimale} + \underbrace{2{,}01}_{2-décimales} = \underbrace{122}_{0\ décimale}\ ;\ \underbrace{0{,}4}_{1-décimale} + \underbrace{3{,}102}_{3-décimales} - \underbrace{50}_{0\ décimale} = -47$

Règle 8 : Le résultat d'une multiplication ou d'une division a le même nombre de chiffres significatifs que la mesure (utilisée dans le calcul) qui en a le moins.

Exemple : $\underbrace{1{,}201}_{3-décimales} \times \underbrace{3}_{0\ décimale} = 4\ ;$

Exemple : Le volume d'une sphère dont le rayon est de 5,3 cm est calculé de la façon suivante : $4/3\times\pi\times r^3 = 4/3 \times 3{,}1416 \times (5{,}3)^3 = 623{,}61598\ cm^3$. En tenant compte des chiffres significatifs, le résultat est $6{,}2 \times 10^2\ cm^3$ puisque la mesure ayant le moins de chiffres significatifs dans ce calcul est le rayon (5,3 cm) ; les chiffres 4 et 3 formant un nombre exact, ont une précision infinie.

2.2.2. Notion d'arrondi

Certaines décimales de certains nombres décimaux (ou pas) sont parfois assez longues. Il est alors nécessaire de leur donner un **arrondi** de leur valeur tout en respectant quelques règles :

Règle 9 : Si le chiffre à éliminer est inférieur à 5, le chiffre précédent demeure le même. On parle alors d'arrondi par défaut.

Exemple : 102,024 a pour arrondi d'ordre 2, le nombre 102,02 ; l'écriture du nombre 22/7 a une décimale est **3,1**.

Règle 10 : Si le chiffre à éliminer est supérieur ou égal à 5, le chiffre précédent est majoré (ajouté) de 1. On parle d'arrondi par excès.

Exemple

	Nombre de décimales	Arrondi par défaut	Arrondi par excès	CS
9,72361	2	9,72	---	3
	3	---	9,724	4
	4	9,7236	---	5

2.3. Notion d'ordre de grandeur

Définition

L'ordre de grandeur (ODG) d'un nombre est la puissance de dix la plus proche de ce nombre.

On applique les règles suivantes (le nombre doit être écrit en notation scientifique : $\alpha \times 10^n$) :

Règle 11 : Si $1 \leqslant \alpha < 5$ alors l'ODG du nombre est la puissance de dix de ce nombre soit 10^n ;

Exemple : l'ODG de $200 = 2.10^2$ est $10^2 = 100$

Règle 12 : si $5 \leqslant \alpha < 10$ alors l'ODG est la puissance de dix +1 de ce nombre soit 10^{n+1}.

Exemple : l'ODG de $6{,}23 = 6{,}23.10^0$ est $10^1 = 10$; l'ODG de $0{,}721 = 7{,}21.10^{-3}$ est $10^{-2} = 0{,}01$.

3. Jeu bilingue

French words	English words
Mesure	Measure
Instrument de mesure	Measure instrument
Métrologie	Metrology
Ordre de grandeur	Magnitude
Étendue de mesure	Measure extension; span
Justesse	Exactness, rightness
Fidélité	Loyalty

Sentence

A number representing a sum or a difference is rounded so that it has as many decimals as the number used in the calculation and which contains the least.

EXERCICES DE LA LEÇON 2 : LES TECHNIQUES DE MESURES DES GRANDEURS

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

1. Définir : ordre de grandeur ; grandeur physique ; chiffre significatif ; instrument de mesure.

2. Quelle est la règle d'or à respecter avant de donner l'ordre de grandeur d'un nombre ?

3. Vrai ou faux
3.1. On peut définir l'ordre de grandeur de tout nombre.
3.2. L'ordre de grandeur du nombre 2 est 1.
3.3. L'arrondi à 2-décimales par excès de 1,61 est 1,62.
3.4. Le poids d'un corps de masse 2 g dans un lieu dont l'intensité de la pesanteur vaut 9,8 $N.kg^{-1}$ a pour ordre de grandeur 10^4 N.
3.5. Le nombre (3 + 2,2) a pour CS = 2 et ODG = 10.

4. QCM
4.1. Le nombre 9,99 a :
   (a) CS = 3
   (b) ODG = 0,01
   (c) Arrondi 10,1
4.2. Le nombre 3,21 × 1,111 a pour résultat :
   (a) 3,56631
   (b) 3,56
   (c) 3,57
4.3. Le nombre 3,21 : 1,111 a pour résultat :
   (a) 2,889288928892889288928892…
   (b) 2,89
   (c) 2,9
4.4. Le nombre 3,21 × 3,14 a pour ODG et CS respectifs :
   (a) 0,1 et 6
   (b) 10 et 5
   (c) 1 et 6.
4.5. Le nombre 10^{-3} : 10^{-4} a pour ODG et CS respectifs :
   (a) 10 et 2 ;
   (b) 100 et 2
   (c) 1000 et 2.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

1. Calculer le volume d'une sphère 3,14 cm de rayon.

2. Déterminer les ordres de grandeur et les chiffres significatifs des valeurs ci-dessous :
2.1. Distance Terre – Lune : D = 384000 km.
2.2. Taille d'un acarien : d = 0,65 mm.
2.3. Masse d'une feuille de goyave : m = 500 µg.
2.4. L'âge d'un fossile : T = 92050 ans.

3. Recopier et compléter le tableau suivant :

Écriture décimale	Écriture scientifique	Ordre de grandeur
521		
	8,51×10…	**10^{-4}**
0,000000325		
9852163		
	$5,87.10^{-1}$	

4. On donne plusieurs longueurs :
L_1 = 0,508 Mm ; L_2 = 227,9 Gm ; L_3 = 1,3 mm ; L_4 = 12 µm.
4.1. Convertir ces grandeurs en mètres.
4.2. Écrire les valeurs obtenues en écriture scientifique.
4.3. Donner leurs ordres de grandeur tout en précisant leurs chiffres significatifs.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Moyenne d'une série de mesures

On a effectué plusieurs mesures d'une grandeur s'exprimant en Kelvin et les résultats ont été portés dans le tableau ci-dessous :

Mesures	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Valeurs	**-30**	**-25**	**0**	**52**	**58,3**

Après avoir indiqué l'appareil de mesure ayant servi à déterminer ces valeurs, montrer alors que la moyenne M de ces mesures est : M = 11,06.

Situation 2 : Comparaison 1

On a mesuré à l'aide de deux instruments de mesure de même type, la masse m d'un objet. Les valeurs sont alors :
Instrument 1 : m = 30 kg.

Instrument 2 : m = 30 000,01 g

1. Indiquer le type commun des instruments 1 et 2.
2. Comment les différencier ?
3. Selon vous, lequel des deux instruments est plus sensible ? Pourquoi ?
4. Les valeurs obtenues ont-elles le même ordre de grandeur ? Les mêmes chiffres significatifs ? Justifiez vos réponses.

Situation 3 : Comparaison 2

La distance Terre – Lune est estimée à 384 000 km et la taille d'un microbe est estimée à 652,21 nm.
- Ces deux grandeurs ont-elles le même ordre de grandeur ? Le même chiffre significatif ?
- Calculer le rapport de leur ordre de grandeur.

Situation 3 : English translation

Traduire en anglais : « Un nombre représentant une somme ou une différence, est arrondi de sorte qu'il ait autant de décimales (chiffres après la virgule) que le nombre utilisé dans le calcul et qui en contient le moins ».

MODULE ⇒ MESURES ET INCERTITUDES I

Leçon 3 LES TYPES D'ERREURS ET MANIÈRES DE LES CORRIGER

ACTIVITÉ(S)

La mesure des grandeurs s'effectue à l'aide d'appareils. Cela implique alors l'action de deux acteurs : l'expérimentateur et l'instrument de mesure. Des fois, l'erreur peut venir de l'expérimentateur ou de l'instrument utilisé. Ces appareils peuvent avoir un défaut de fabrication, être mal réglés, etc. Ils sont utilisés par un expérimentateur plus ou moins adroit.

Cet expérimentateur a-t-il choisi la meilleure méthode de mesure ?

Dans le cas d'un appareil à plusieurs calibres, t-il choisi le meilleur ?

Objectifs
➲ Définir et déterminer l'incertitude faite sur une grandeur
➲ Définir et déterminer l'erreur faite sur une grandeur
➲ Effectuer des calculs sur les incertitudes et les erreurs.

Introduction

Toute mesure est entachée d'**erreur**. Il est impossible d'effectuer des mesures rigoureusement exactes. Pour rendre compte du degré d'approximation auquel nous travaillons, nous devons estimer les erreurs commises dans les diverses mesures et nous devons calculer leurs conséquences dans les résultats obtenus. C'est le but du **calcul d'erreur** ou **calcul d'incertitude**. Raison pour laquelle en science, l' « **erreur** » signifie « **incertitude** ».

1. Notion d'incertitudes de mesure

1.1. Incertitude absolue, incertitude relative, précision

(a) La précision

- Une mesure n'a pas de signification par elle-même, elle doit toujours être **précisée** dans le contexte de l'expérience réalisée.
- On imagine facilement que la précision obtenue sur le résultat dépend de la méthode employée pour faire la mesure. Dans tous les cas, l'expérimentateur doit s'assurer de la validité de sa mesure. La première démarche consiste à vérifier l'ordre de grandeur obtenu.
- Toute mesure effectuée à l'aide d'un appareil donne un résultat qui n'est jamais rigoureusement la valeur vraie de la grandeur à mesurer. Même en l'absence de **précision** donnée explicitement sur un résultat, la simple valeur numérique sous-entend une précision par le seul nombre de chiffres significatifs indiqués. Les chiffres donnés sont ceux qui ont du sens, ce qui signifie que le chiffre suivant n'aurait pas de sens dans le contexte de la mesure effectuée.

Par exemple, $f = 15$ cm signifie $14{,}5 \text{ cm} \leqslant f \leqslant 15{,}5$ cm, on ne connaît pas le résultat au mm près.
$f = 15{,}0$ cm signifie $14{,}95 \text{ cm} \leqslant f \leqslant 15{,}05$ cm.
Ou encore,

Une mesure qui est un rapport 5/2 donnera 2,5 ; si le rapport est 5/3 on obtiendra 1,66666667. La seconde mesure est-elle pour autant plus précise ? Si les deux mesures ont la même précision, on doit écrire le même nombre de chiffres significatifs.

Par exemple, si la précision est de 0,1, on écrira 2,5 et 1,7. Si elle est de 0,01, on écrira 2,50 et 1,67.

Nota Bene

La machine à calculer donnant des résultats avec beaucoup de décimales, il est important de toujours se poser la question de savoir si ces chiffres ont un sens.

Constat 1

On distingue dans un laboratoire, deux types de grandeurs physiques :

(i) Les **grandeurs mesurées** : elles sont le résultat d'une mesure effectuée par l'expérimentateur à l'aide d'un instrument.

Exemple : mesure de la température ambiante à l'aide d'un thermomètre.

(ii) Les **grandeurs calculées** : elles sont le résultat d'un calcul découlant d'une loi, ou d'une formule et font intervenir des grandeurs mesurées.

Exemple : calcul du volume d'un cylindre en fer, dont les dimensions ont été préalablement mesurées.

Constat 2

Sources d'incertitudes :

L'incertitude qui affecte toute mesure est essentiellement due à deux facteurs :

(i) Les **incertitudes d'appareils** : l'instrument utilisé pour la mesure a une sensibilité limitée.

Exemples : - graduation d'une règle (1 mm)
- saut de l'aiguille d'un chronomètre (0,1 s).

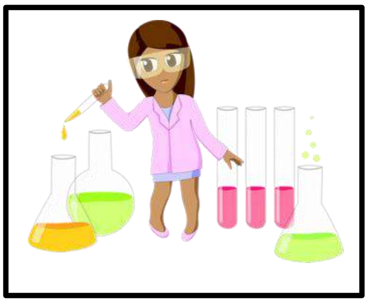
(ii) Les **incertitudes humaines** : l'expérimentateur introduit une incertitude de manipulation.

Exemples : - mesure d'une longueur (erreur de lecture)
- mesure d'un temps (erreur d'appréciation des instants d'enclenchement et de déclenchement du chronomètre).

(b) L'incertitude absolue

En guise d'introduction, exploitons la situation suivante.

On réalise le dosage d'une solution d'ion fer II (Fe^{2+}) avec les ions permanganate MnO_4^-. Pour cela, on introduit 10,73 mL d'ion Fe^{2+} dans un bécher. On constate alors que l'équivalence est atteinte lorsque le volume total du mélange (Fe^{2+} + MnO_4^-) dans le bécher est de 10,87 mL.



Déterminons la variation de volume dans le bécher.

Notons, $V_1 = 10,73$ mL, le volume des ions Fe^{2+} présents dans le bécher $V_2 = ?$, la variation de volume dans le bécher et $V = 10,87$ mL le volume total du mélange dans le bécher. Mathématiquement parlant, $V = V_1 + V_2 \Rightarrow V_2 = V - V_1 = 0,14$ mL.

Ce résultat montre que le volume $V_2 = 0,14$ mL correspondant à la variation de volume dans le bécher est aussi le volume des ions permanganates ajoutés dans le bécher. Cela montre aussi que V_2 correspond à la variation de volume des ions Fe^{2+} que l'on note $\Delta V = V - V_1 = V_{final} - V_{initial}$.
La quantité ΔV est appelée **incertitude absolue**.

Définition

On appelle **incertitude absolue** notée Δx d'une mesure x, la moitié de l'intervalle à l'intérieur duquel on est certain que se trouve la valeur exacte de cette mesure :

$$\Delta x = x_{final} - x_{initial} \qquad (3.1)$$

Remarque

L'unité de l'incertitude absolue est celle de la grandeur x mesurée.

(c) L'incertitude relative

La qualité d'une mesure s'exprime par le rapport entre son incertitude absolue (Δx) et la mesure elle-même (x_{mes}). Ce rapport s'appelle l'**incertitude relative** ou **précision** de la mesure.

Définition

On appelle **incertitude relative** (ou **précision**) notée I_R d'une mesure, le quotient de l'incertitude absolue de cette mesure par la mesure elle-même. Elle s'obtient par l'équation :

$$I_R = \frac{\Delta x}{x_{mes}} \qquad (3.2)$$

et s'exprime en pourcentage (%)

Remarque

L'écriture de mesure d'une grandeur x généralisée est alors : $x = x_{mes} \pm \Delta x$ (3.3)

Exemple

Un corps de masse 15,21 kg est transporté d'un lieu (1) où l'intensité de la pesanteur est $g_1 = 9,83$ $N.kg^{-1}$ vers un lieu (2) où $g_2 = 9,81$ $N.kg^{-1}$. Donner un encadrement du poids de ce corps puis en déduire l'écriture du poids de ce corps en fonction de son incertitude absolue. Évaluer son incertitude relative.

Solution

<u>**Données**</u> : m = 15,21 kg ; $g_1 = 9,83$ $N.kg^{-1}$; $g_2 = 9,81$ $N.kg^{-1}$. Et P = mg.

- Encadrons P
- Sur (1), $P_1 = m \times g_1 = 149,51$ N
- Sur la Lune, $P_2 = m \times g_2 = 149,21$ N
- Variation de P : $\Delta P = P_2 - P_1 = 0,3$ N ou $\Delta P = -0,3$ N (selon que le corps var de (2) pour (1)) on écrit alors, $\Delta P = \pm 0,3$ N
- Encadrement : $149,21 \leqslant P \leqslant 149,51$ (N)
- Écriture de P sous la forme $P = P_{mes} \pm \Delta P$

  On a : $P = 149,4 \pm 0,3$ (N)
- Évaluons l'incertitude relative I_R.

  Par définition, $I_R = \frac{\Delta P}{P_{mes}} = 2.10^{-3} = 0,2\%$

Remarque

L'écriture de l'incertitude absolue doit respecter le nombre de décimales de la grandeur mesurée et vice-versa.

1.2. <u>Calcul des incertitudes (sur une somme, un produit, ou un rapport)</u>

En physique, les grandeurs que nous mesurons sont généralement utilisées pour déduire des résultats par des calculs. Nous devons donc savoir comment les incertitudes des grandeurs mesurées se répercutent sur les incertitudes des grandeurs calculées.

(a) Cas de la multiplication

Notons Δx l'incertitude absolue d'une grandeur x telle que : $x = x_{mes} \pm \Delta x$ et $y = y_{mes} \pm \Delta y$.
Appelons P le produit de x par y (ou réciproquement) : $P = x \times y = P_{mes} \pm \Delta P$.

Étape 1 : Écrire x et y sous la forme :

$$x_{min} \leqslant x \leqslant x_{max}$$
$$y_{min} \leqslant y \leqslant y_{max}$$

$$\text{Avec } \begin{cases} x_{\min} = x_{mes} - \Delta x \\ x_{\max} = x_{mes} + \Delta x \\ y_{\min} = y_{mes} - \Delta y \\ y_{\max} = y_{mes} + \Delta y \end{cases} \quad (3.4)$$

Étape 2 : Écrire P_{mes} sous la forme : $P_{min} \leqslant P_{mes} \leqslant P_{max}$ i.e. $x_{min} \times y_{min} \leqslant P_{mes} \leqslant x_{max} \times y_{max}$ (3.5)

Étape 3 : Calculer P_{mes} en effectuant l'opération,

$$P_{mes} = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} \quad (3.6)$$

Étape 4 : Calculer la largeur A de l'intervalle (3.5) à l'aide de la relation,

$$A = P_{max} - P_{min} \quad (3.7)$$

Étape 5 : En déduire alors ΔP par la relation,

$$\Delta P = \frac{A}{2} \quad (3.8)$$

Exemple

Calculer l'aire S d'un format A4 de dimensions $L = 27{,}7 \pm 0{,}1$ cm et $\ell = 21{,}1 \pm 0{,}1$ cm.

Solution

Données : longueur $L = 27{,}7 \pm 0{,}1$ cm ; largeur $\ell = 21{,}1 \pm 0{,}1$ cm ; et surface S = ?
Le format A4 ayant la forme d'un rectangle, alors, $\mathbf{S = L \times \ell}$.
On a alors $S = S_{mes} \pm \Delta S$.

- Calculons S_{min} et S_{max} : $\begin{cases} S_{\min} = L_{\min} \times \ell_{\min} = (27{,}7 - 0{,}1) \times (21{,}1 - 0{,}1) = 579{,}6 cm^2 \\ S_{\max} = L_{\max} \times \ell_{\max} = (27{,}7 + 0{,}1) \times (21{,}1 + 0{,}1) = 589{,}4 cm^2 \end{cases}$
- Calculons S_{mes} : $S_{mes} = \dfrac{S_{\min} + S_{\max}}{2} = \dfrac{579{,}6 + 589{,}4}{2} = 584{,}5 cm^2$
- Calculons ΔS : $\Delta S = \dfrac{S_{\max} - S_{\min}}{2} = 4{,}9 cm^2$
- On a : $S = 584{,}5 \pm 4{,}9$ cm².

(b) Cas de la division

Notons Δx l'incertitude absolue d'une grandeur x telle que : $x = x_{mes} \pm \Delta x$ et $y = y_{mes} \pm \Delta y$.
Appelons R le rapport de x par y : $R = x / y = R_{mes} \pm \Delta R$.

Étape 1 : Écrire x et y sous la forme :

$$x_{min} \leqslant x \leqslant x_{max}$$
$$y_{min} \leqslant y \leqslant y_{max}$$

$$\text{Avec}\begin{cases} x_{\min} = x_{mes} - \Delta x \\ x_{\max} = x_{mes} + \Delta x \\ y_{\min} = y_{mes} - \Delta y \\ y_{\max} = y_{mes} + \Delta y \end{cases} \qquad (3.9)$$

Étape 2 : Écrire R_{mes} sous la forme : $R_{min} \leqslant R_{mes} \leqslant R_{max}$ i.e. $x_{min} \times y_{min} \leqslant R_{mes} \leqslant x_{max} \times y_{max}$ (3.10)

Étape 3 : Calculer R_{mes} en effectuant l'opération,

$$R_{mes} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2} \qquad (3.11)$$

Étape 4 : Calculer la largeur A de l'intervalle (3.10) à l'aide de la relation,

$$A = R_{max} - R_{min} \qquad (3.12)$$

Étape 5 : En déduire alors ΔR par la relation,

$$\Delta R = \frac{A}{2} \qquad (3.13)$$

Exemple

Calculer le rapport a/b des longueurs a et b définis tels que : a = 5,2 ± 0,2 m ; b = 4,42 ± 0,05 m.

Solution

Il s'agit d'écrire a/b sous la forme R = R_{mes} ± ΔR.

- Calculons R_{mes} : $R_{mes} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2} = \frac{\frac{a_{\min}}{b_{\min}} + \frac{a_{\max}}{b_{\max}}}{2} = \frac{1{,}1 + 1{,}2}{2} = 1{,}2m$
- Calculons ΔR : $\Delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} = 0{,}05m$
- On a alors : R = a/b = 1,2 ± 0,1 m ou R = a/b = 1,20 ± 0,05 m.

(c) Cas de l'addition ou de la soustraction

Notons Δx l'incertitude absolue d'une grandeur x telle que : $x = x_{mes} \pm \Delta x$ et $y = y_{mes} \pm \Delta y$.
Appelons d la différence (ou la somme) de x et y (ou de y et x) : d = $x \pm y$ = R_{mes} ± ΔR.

Étape 1 : Écrire x et y sous la forme :

$$x_{min} \leqslant x \leqslant x_{max}$$
$$y_{min} \leqslant y \leqslant y_{max}$$

$$\text{Avec}\begin{cases} x_{\min} = x_{mes} - \Delta x \\ x_{\max} = x_{mes} + \Delta x \\ y_{\min} = y_{mes} - \Delta y \\ y_{\max} = y_{mes} + \Delta y \end{cases} \qquad (3.14)$$

Étape 2 : Écrire d_{mes} sous la forme : $d_{min} \leqslant d_{mes} \leqslant d_{max}$ i.e. $x_{min} \times y_{min} \leqslant d_{mes} \leqslant x_{max} \times y_{max}$ (3.15)

Étape 3 : Calculer d_{mes} en effectuant l'opération,

$$d_{mes} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \qquad (3.16)$$

Étape 4 : Calculer la largeur A de l'intervalle (3.10) à l'aide de la relation,

$$A = d_{max} - d_{min} \qquad (3.17)$$

Étape 5 : En déduire alors **Δd** par la relation,

$$\Delta d = \frac{A}{2} \qquad (3.18)$$

Exemple

Donner le résultat de l'opération D = (100, 0 ± 0,1) + (5,00 ± 0,02)

- Calculons D_{mes} :

$$D_{mes} = \frac{[(100{,}0+0{,}1)+(5{,}00+0{,}02)]_{max} + [(100{,}0-01)+(5{,}00-0{,}02)]_{min}}{2} = \frac{105{,}1+104{,}9}{2} = 105$$

- Calculons ΔD : $\Delta D = \frac{105{,}1-104{,}9}{2} = 0{,}1$
- On a alors : D = 105 ± 0,1

1.3. Estimation des incertitudes expérimentales et présentation du résultat

- Lorsque l'on indiquera la valeur finale x obtenue dans une expérience, elle sera présentée avec son incertitude Δx, le tout avec le nombre de chiffres significatifs correspondants à l'incertitude.

Par exemple : pour x = 5 cm et Δx = 1 mm on écrira : x = 5,0 ± 0,1 cm (Il faut absolument indiquer 5,0 et non pas 5).

- Pour des mesures comme celles effectuées dans le cadre des Travaux Pratiques, il n'est en général pas possible de déterminer l'incertitude avec plus d'un chiffre significatif. Après application numérique avec la calculatrice, on arrondira l'incertitude au chiffre le plus proche.
- Comme on le sait, la répétition d'une même mesure permet de faire des statistiques et d'estimer l'incertitude. Cette façon de faire est très efficace mais n'est pas toujours utilisable en Travaux Pratiques à cause du temps qu'elle nécessite, elle sera développée plus en détail en classes supérieures. Une autre méthode consiste à analyser les causes de l'incertitude et à estimer l'incertitude à partir de ces causes.

2. Notion d'erreur

Les résultats de mesures sont toujours entachés d'**erreurs**. Ces erreurs sont classées en trois grandes catégories :

- Les **erreurs aléatoires**
- Les **erreurs systématiques**
- Les **erreurs accidentelles** : Elles sont dues essentiellement à l'expérimentateur. Elles sont, en général, difficiles à apprécier. [Mode de correction] On peut les réduire en expérimentant avec soin et en faisant un grand nombre de mesure.

2.1. L'erreur aléatoire

- C'est l'erreur inévitable liée à l'ajustement de l'objet devant la règle, à la vision de l'expérimentateur et à la précision de l'instrument. Si on effectue plusieurs fois la même mesure, on trouve des valeurs proches mais pas nécessairement identiques.
- L'erreur aléatoire $\boldsymbol{\varepsilon_a}$ provient des variations temporelles et spatiales **non prévisibles** de grandeurs d'influence (soin des mesures, température de la pièce, fidélité de l'appareil de mesure, etc.). Elle est définie par :

$$\varepsilon_a = x_i - \bar{x} \qquad \textbf{(3.19)}$$

où

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{N} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{N} \qquad \textbf{(3.20)}$$

est la moyenne des mesures obtenue en répétant N-fois la même expérience (N = nombre total des mesures) et x_i la valeur mesurée.

- Mode de correction : Le calcul de la moyenne des mesures effectuées permet d'obtenir une estimation de la valeur vraie (programme de 1ère S).

Exemple

Pour une règle dont les graduations sont tous les mm, cette erreur est en principe de l'ordre du mm. Si on utilisait une règle graduée tous les demi-cm, elle serait de l'ordre du demi-cm.

2.2. L'erreur systématique

- L'erreur systématique ε_S (ou **biais**) est un **décalage constant** dont l'origine peut être d'ordre théorique ou expérimentale (influence du mode opératoire, problème de calibrage d'un appareil, modélisation incomplète, etc.). Par définition,

$$\varepsilon_S = \bar{x} - x_{vraie} \qquad (3.21)$$

- Ainsi, l'erreur ε sur une mesure est la somme d'un biais et d'une quantité aléatoire :

$$\varepsilon = \varepsilon_S + \varepsilon_a \qquad (3.22)$$

- Le résultat final est exprimé sous la forme d'un **intervalle de valeurs probables** :

$$x = x_{mes} \pm \Delta x \qquad (3.23)$$

où x_{mes} est la mesure, c'est-à-dire la meilleure estimation de la valeur vraie et Δx l'**incertitude sur la mesure** que l'on cherche à évaluer.

- Plus précisément l'intervalle $[x_{mes} - \Delta x\ ;\ x_{mes} + \Delta x]$ est défini comme un intervalle de confiance associé à une probabilité de contenir la valeur vraie x_{vraie}. Cette probabilité est appelée **niveau de confiance** (**programme de 1ère S**).
-

Remarque

- Bien qu'il ne soit pas possible de compenser l'erreur aléatoire faite sur une mesure, elle peut être réduite en augmentant le nombre d'observations.
- En revanche, l'erreur systématique d'un résultat de mesure ne peut être réduite en augmentant le nombre d'observations, mais par l'application d'une **correction**.
- Insistons sur le fait que sans incertitude il nous est impossible de comparer deux résultats ou de réfuter une loi.
- Pour qu'un résultat ait une valeur scientifique il faut pouvoir prouver que les éventuels écarts entre la théorie et l'expérience sont non significatifs c'est-à-dire liés aux erreurs de mesure ce qui rend nécessaire l'estimation des incertitudes

2.3. Règles de calculs pour la propagation des erreurs dans l'expression des résultats de l'estimation d'une grandeur

Supposons que l'on mesure n-grandeurs différentes x_1, x_2, …, x_n et que l'on calcule à partir d'une loi physique ou d'une définition, une nouvelle grandeur $G = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Connaissant les incertitudes $\Delta x_{i=1\ldots n}$ associées aux n-mesures, il est alors légitime de se demander quelle est l'incertitude de G suite à la propagation des erreurs dans le calcul de G.

(a) Cas d'une loi affine

Considérons le cas d'une relation affine à une seule variable :

$$\begin{cases} G = ax + b \\ x = x_m \pm \Delta x \end{cases}$$

Dans ce cas, il est facile de voir sur un graphique qu'une incertitude Δx produit une incertitude $\Delta G = |a| \times \Delta x$. De sorte que le calcul donne :

$$G = G_{mes} \pm \Delta G \text{ avec } \begin{cases} G_m = ax_m + b \\ \Delta G = |a| \Delta x \end{cases} \qquad (3.24)$$

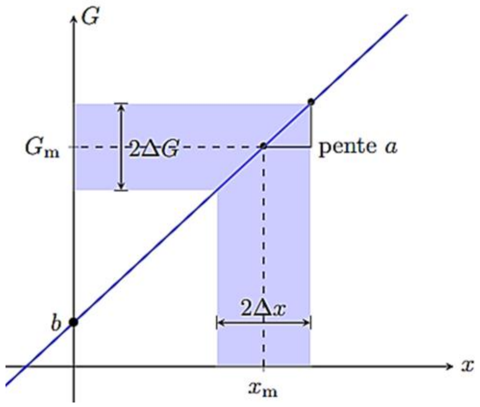


Figure 3.1 : Propagation des incertitudes dans le cas d'une loi affine

(b) Cas d'une loi puissance

Supposons maintenant que la grandeur G dépend d'une variable x via une loi de puissance de la forme :

$$G = G_0 \times x^n \quad (3.25)$$

et cherchons à estimer l'incertitude de G liée à la propagation de l'incertitude de x. Pour cela nous allons supposer que les incertitudes sont petites en valeur relative. Cela signifie qu'entre x et $x + \Delta x$, G varie si peu qu'on peut approcher la courbe par un segment de coefficient directeur

$$a = \frac{dG}{dx} = n \times G_0 \times x^{n-1} \quad (3.26)$$

Si l'on applique le résultat du paragraphe précédent, on trouve donc,

$$G = |a|\Delta x = \left|n \times G_0 \times x^{n-1}\right|\Delta x \quad (3.27)$$

en divisant (3.27) par G_{mes}, on trouve :

$$\left|\frac{\Delta G}{G_{mes}}\right| = \left|n \times \frac{\Delta x}{x}\right| \quad (3.28)$$

Remarque

Dans le cas d'une loi de puissance, l'incertitude relative est multipliée par la puissance.

Exemple

On cherche à déterminer le volume d'une bille d'acier de rayon r = (2,778 ± 0,005) mm. Sachant que le volume V d'une sphère s'écrit : $V = (4/3) \times \pi \times r^3$.

Solution

Par calcul, $V_m = 89{,}76\ mm^3$ et $\frac{\Delta V}{V} = 3 \times \frac{\Delta r}{r} = 0{,}54\% \Rightarrow \Delta V = 0{,}5\ mm^3$.

On écrira donc, $V = (89{,}8 \pm 0{,}5)\ mm^3$.

(c) Méthode générale pour G dépendant d'une seule variable

En physique, il arrive souvent que le calcul d'une grandeur G implique plusieurs variables. Cependant, il est également assez courant qu'une des variables soit moins précise que les autres de sorte que l'on puisse considérer les autres variables comme des paramètres constants. On peut alors considérer que : $G = f(x)$ et $x = x_{mes} \pm \Delta x$

Dans ce cas et à condition que G varie peu entre x_m et $x_m \pm \Delta x$, on retiendra les relations suivantes :

$$G = G_m \pm \Delta G \text{ avec } \begin{cases} G_m = f(x_m) \\ \Delta G = |f'(x_m)|\Delta x \end{cases} \quad (3.29)$$

Remarque

Fonction	Erreur absolue	Erreur relative
$G = x - y$	$\Delta G = \Delta x + \Delta y$	
$G = x + y$	$\Delta G = \Delta x + \Delta y$	
$G = xy$	$\Delta G = \|y\Delta x\| + \|x\Delta y\|$	$\frac{\Delta G}{G_m} = \frac{\Delta x}{x_m} + \frac{\Delta y}{y_m}$
$G = \frac{x}{y}$	$\Delta G = \frac{\|\Delta x\|}{y} + \frac{\|-x\Delta y\|}{y^2}$	$\frac{\Delta G}{G_m} = \frac{\Delta x}{x_m} + \frac{\Delta y}{y_m}$
$G = x^n$ (n ∈ ℤ-{0})	$\Delta G = \|n\Delta x\|$	$\frac{\Delta G}{G_m} = \frac{\|n\Delta x\|}{x_m}$

3. Jeu bilingue

Expressions françaises	English expression
Erreur-Erreur de calcul-Incertitude-Précision	Error-Miscalculation-Uncertainty-Preciseness

EXERCICES DE LA LEÇON 3 : TYPES D'ERREURS ET LES MESURES DE LES CORRIGER

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

1. Définir : erreur systématique ; incertitude relative ; incertitude absolue ; erreur.

2. Énumérer les types d'erreurs et d'incertitudes.

3. Vrai ou faux

3.1. L'incertitude est toujours donnée par la moitié de la plus petite division.
3.2. Les incertitudes absolue et relative sont une indication de la précision de la mesure.
3.3. L'incertitude absolue et l'incertitude relative ont toujours la même valeur numérique.
3.4. L'incertitude relative de la valeur $(3{,}0 \pm 0{,}1)$ est 3%.
3.5. Les erreurs et les incertitudes ne sont qu'une et une seule même notion.
3.6. Une mesure est d'autant plus précise si l'on effectue plusieurs mesures.
3.7. Pour évaluer l'erreur systématique, il me faut obligatoirement connaître la moyenne des mesures effectuées.
3.8. Lors d'une expérience, l'incertitude est indiquée par l'expérimentateur.

4. QCM

4.1. Quelle est la meilleure définition d'incertitude absolue ?
(a) C'est l'expression de la marge d'incertitude associée à une mesure.
(b) C'est l'écart maximal entre la valeur obtenue et la valeur exacte de la grandeur.
(c) C'est l'évaluation de l'imprécision de la mesure.

4.2. Une mesure expérimentale est :
(a) Toujours juste.
(b) Toujours correcte.
(c) Toujours tachée d'erreurs

4.3. Dans la relation $\Delta G = |a|\Delta x$, la quantité $|a|$ est appelée :
(a) Coefficient de proportionnalité
(b) Coefficient directeur
(c) Valeur numérique.

4.4. La vraie écriture du nombre $32{,}105 \pm 0{,}01$ est :
(a) $32{,}105 \pm 0{,}01$
(b) $32{,}11 \pm 0{,}01$
(c) $32{,}11 \pm 0{,}1$

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

1. Calculer l'erreur relative à partir de l'erreur absolue et encercler la bonne réponse dans chacun des cas suivants :

(a) $100{,}01 \pm 0{,}1$	1%	0,1%	0,0001%
(b) $0{,}050 \pm 0{,}001$	2%	1%	0,02%
(c) 200 ± 10	10%	5%	0,05%

2. Calculer les incertitudes absolues et donner le résultat arrondi des mesures suivantes :
(a) $\ell = 4{,}2$ m à 5%
(b) $t = 17{,}82$ m à 3%
(c) $m = 15{,}27$ kg $(\pm 1{,}5\%)$

3. Un cycliste pédale pendant 6 h $\pm$ 5 min à une vitesse moyenne V = 20,0 $\pm$ 0,2) km.h^{-1}. Quelle distance a-t-il parcouru ?

4. Déterminer la vitesse d'une voiture qui a parcouru la distance d = $(50{,}0 \pm 0{,}5)$ m dans le temps t = $(2{,}86 \pm 0{,}02)$ s.

5. Une grandeur calculée vaut x = 257,13. L'incertitude Δx calculée vaut 1,536. Écrire la valeur de cette grandeur sous la forme $x \pm \Delta x$.

6. On mesure les dimensions d'une feuille de papier avec une règle graduée au millimètre. On trouve une largeur $\ell = 21{,}0$ cm et une longueur $L = 29{,}7$ cm.

6.1. Exprimer la largeur et la longueur sous la forme $\ell \pm \Delta\ell$ et $L \pm \Delta L$ en ne tenant compte que de l'incertitude de lecture.
6.2. Donner l'incertitude relative associée à ces deux mesures.
6.3. En déduire un encadrement de la surface S de la feuille, puis exprimer cette surface sous la forme $S \pm \Delta S$ (incertitude absolue).
6.4. En déduire l'incertitude relative sur cette surface.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Allongement du ressort

Un ressort a une longueur L = $(10{,}00 \pm 0{,}05)$ cm. On suspend un poids pour allonger le ressort ; la longueur est alors L' = $(12{,}53 \pm 0{,}05)$ cm.
Calculer l'allongement du ressort.

Situation 2 : Exploitation graphique

On place une maquette de voiture dans une soufflerie pour déterminer son coefficient de frottement turbulent C. On mesure la force de frottement F_{frot} en fonction de la vitesse V de l'air :

$F_{frot} = 0{,}5 \times S \times C \times \rho \times V^2$. Avec

F_{frot} = force de frottement turbulent (N)
C = coefficient de frottement turbulent (sans unité)
S = surface apparente = $(3{,}55 \pm 0{,}01).10^{-4}$ (m^2).
$\rho = 1{,}25 \pm 0{,}01$ (kg.m^{-3}) = masse volumique
V = vitesse de l'air (m.s^{-1}) ; $\Delta V = \pm 0{,}2$ (m/s).

1. Tracer l'allure de la courbe $F_{frot} = f(V)$.
2. Placer les fourchettes des incertitudes (sur F_{frot} et sur V)
3. Ajuster une courbe de type $y = ax^2 + c$ (régression automatique) où $y = F_{frot}$ et $x = V$.
4. Calculer C à partir du coefficient a de la courbe obtenue en (3), avec son erreur relative ainsi que son erreur absolue.
5. Effectuer un changement de variable pour faire apparaître une application linéaire dont la pente donne directement C.

EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 1 : MESURES ET INCERTITUDES

EXERCICE 1 : MASSE TOTALE

Deux corps de masses $m_1 = (3{,}00 \pm 0{,}02)$ kg et $m_2 = (0{,}275 \text{ kg } \pm 5\%)$ sont liés par un ressort.
Calculer la masse totale.

Exercice 2 : Incertitude absolue → Incertitude relative

Transformer les incertitudes absolues en incertitudes relatives pour les mesures suivantes :
(a) $\ell = 5{,}2 \text{ m} \pm 0{,}2 \text{ m}$
(b) $t = (3{,}0 \pm 0{,}2)$ s
(c) $m = (4{,}42 \pm 0{,}05).10^{-3}$ kg

EXERCICE 3 : QUESTIONS DE COURS

En se servant du cours et de vos propres connaissances, répondez aux questions ci-dessous :

1. Quelle est la meilleure définition des chiffres significatifs ?
1.1. Les chiffres certains plus le chiffre incertain.
1.2. Le nombre de chiffres publiés.
1.3. Le nombre de chiffres calculés.
1.4. Le nombre de chiffres mesurés.
1.5. Le nombre de chiffres estimés.

2. Quel est l'énoncé qui décrit le mieux la méthode des chiffres significatifs ?
2.1. La méthode des chiffres significatifs est plus précise que la méthode du calcul d'incertitude.
2.2. L'utilisation des chiffres significatifs ne présente que des inconvénients.
2.3. La méthode des chiffres significatifs est une façon simple de signaler la précision d'une mesure.
2.4. La méthode des chiffres significatifs ne peut être utilisée qu'en chimie.

3. Combien y a-t-il de chiffres significatifs dans la réponse ? (Encercler la réponse)
3.1. 1,25 + 4,5*(4,5 – 3,2) – 36,56/4,302 ; 2 3 4
3.2. 3,45*1,01 + 2,1000*(1,00 + 2,01) ; 2 3 4
3.3. 123,45*0,000123*456,32/6,3 ; 1 2 3 5 6

4. Quel est le libellé de la règle qui s'applique lorsqu'on arrondit une somme de mesures en utilisant les chiffres significatifs ?
4.1. La somme doit contenir le même nombre de chiffres significatifs que le chiffre qui en a le moins.
4.2. La somme doit contenir le même nombre de décimales que le chiffre qui en a le moins.
4.3. La somme doit contenir tous les chiffres donnés par la calculatrice.

5. Quelle est la réponse du calcul suivant :
$$\frac{(0{,}0786 - 0{,}034)/1{,}02}{1{,}03 * (1{,}01 + 2{,}1)}$$
5.1. **0,0137**
5.2. **0,014**
5.3. **0,0138**
5.4. **0,0140**

6. Quel est le libellé de la règle qui s'applique lorsqu'on arrondit un quotient de mesures en utilisant les chiffres significatifs ?
6.1. Le quotient doit contenir tous les chiffres donnés par la calculatrice.
6.2. Le quotient doit contenir le même nombre de décimales que le chiffre qui en a le moins.
6.3. Le quotient doit contenir le même nombre de chiffres significatifs que le chiffre qui en a le moins.

7. Quel est le libellé de la règle qui s'applique lorsqu'on arrondit en utilisant les chiffres significatifs ?
7.1. Il faut arrondir au bon nombre de chiffres significatifs tout en tenant compte de la règle pour le 5 le plus à droite.
7.2. Il faut arrondir en ignorant le dernier chiffre de la réponse.
7.3. Il faut arrondir au bon nombre de chiffres significatifs.

Exercice 4 : Calcul avec incertitudes 1 (Compétence)

On mesure le diamètre d et la masse m d'une bille en or : $d = (10{,}00 \pm 0{,}01)$ mm ; $m = (9{,}9 \pm 0{,}1)$ g

1. En utilisant la formule donnée en exercice dans le cours, calculer le volume de la bille avec ses incertitudes relative et absolue.
2. Calculer la masse volumique ρ (densité) de la bille avec ses incertitudes absolue et relatives. Donner la réponse finale en g/cm^3.

Exercice 5 : Calcul avec incertitudes 2 (Compétence)

Pour déterminer la hauteur h d'un immeuble, on mesure la distance d à laquelle on se trouve ainsi que l'angle α sous lequel on voit le sommet de l'immeuble.
$d = 25{,}00 \pm 0{,}01$ [m] et $\alpha = 54° \pm 1°$.
Calculer la hauteur h de l'immeuble ainsi que son incertitude absolue.

Exercice 6 : Calcul avec incertitudes 3 (Compétence)

Pour calculer l'accélération terrestre g avec un pendule, on mesure la longueur ℓ du pendule ainsi que la période T des oscillations, et on utilise la loi :
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$
Avec $\ell = (1{,}552 \pm 0{,}002)$ m et $T = 2{,}50 \pm 0{,}02$ [s]

Calculer g avec son incertitude absolue ainsi que son incertitude relative.

EXERCICE 7 : EXPLOITATION DES UNITÉS DE MESURE

1. Extrait de « Amérique du Nord 2013 – Ex.2 »

On donne :
- Le débit d'éjection des gaz au décollage : $D = 2,9.10^3$ kg.s^{-1}.
- La vitesse d'éjection des gaz au décollage : $V_g = 4,0$ km.s^{-1}.

Montrer que le produit $D \times V_g$ est équivalent à une force.

(Homogénéité d'une grandeur physique)

2. Extrait de « Amérique du Sud 2013 – Ex.2 »

La résistance thermique R_{th} (K.W^{-1}) d'une paroi plane est inversement proportionnelle à la conductivité thermique λ (en W.m^{-1}.K^{-1}) du matériau qui la constitue et à la surface traversée, et proportionnelle à l'épaisseur ***e***.

À partir des informations ci-dessus, donner l'expression de la résistance thermique d'une paroi plane. Vérifier l'unité K.W^{-1} de R_{th}.

(Détermination d'une formule à partir des unités)

EXERCICE 8 : COMPARAISON DES ODG

1. Les deux longueurs ci-dessous sont-elles du même ordre de grandeur ?

Diamètre d'un atome d'aluminium : $L_1 = 0,00000024$ mm.

Diamètre d'un virus : $L_2 = 20$ nm.

Sinon, indiquer le facteur entre les deux longueurs.

2. On donne plusieurs longueurs :
- Distance Nantes – Lille : $d_1 = 0,508$ Mm
- Distance Soleil – Mars : $d_2 = 227,9$ Gm
- Taille d'une fourmi : $d_3 = 1,3$ mm
- Taille d'un œil de moche : $d_4 = 12$ µm.

2.1. Convertir ces grandeurs en mètre.

2.2. Écrire les grandeurs obtenues en écriture scientifique.

2.3. Donner leurs ordres de grandeurs puis placer les sur une échelle de comparaison.

2.4. Quel objet a le même ordre de grandeur qu'un objet dont la longueur est 5100 nm ?

EXERCICE 9 : PROPAGATION DES INCERTITUDES

1. Pour tracer un parcours de course à pied autour d'un terrain de sports, un maître d'éducation physique ne dispose que d'un ruban déroulant de 20 m de long.

Il mesure 5 unités plus 12,4 m pour la longueur du terrain et 2 unités plus 18,3 m pour la largeur. Toutes les distances mesurées sont entachées d'une incertitude de 5 cm.

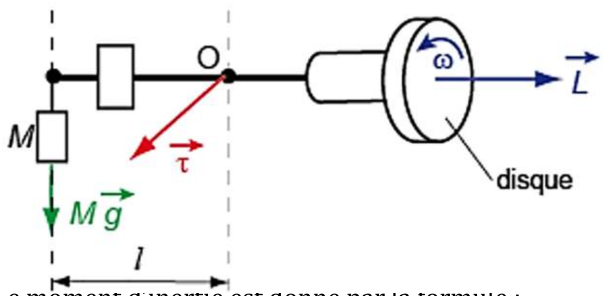
Quel est le périmètre du terrain et avec quelle précision est-il obtenu ?

2. Pour déterminer la dose d'un traitement à appliquer à son patient, un médecin doit déterminer le volume d'une tumeur. Pour cela, il fait passer une IRM à son patient et observe sur l'image une tache de 12 mm de long, 6 mm de large et 3 mm d'épaisseur.

Chaque distance est déterminée avec une incertitude de 10%.

En estimant que la tumeur occupe 60% du volume du parallélépipède ayant les dimensions indiquées ci-dessus, quelle est le volume de la tumeur avec son incertitude ?

3. Un gyroscope est un corps solide qui n'a qu'un seul point fixe O et dont le disque tourne rapidement autour de son axe à la vitesse angulaire ω (voir figure ci-dessous. Sous l'effet du moment d'une force extérieure $\vec{\tau}$ (ici, la force extérieure est le poids Mg d'une masse M ajoutée à l'autre extrémité du gyroscope), le gyroscope effectue un moment de précision. On étudie ce mouvement afin de déterminer le moment d'inertie I du gyroscope.



Le moment d'inertie est donné par la formule :

$$I = \frac{g \times l \times M}{\omega \times \Omega} \quad \text{Avec}$$

- I, moment d'inertie à déterminer
- g, attraction terrestre ($g = 9,81$ m/s^2)
- ℓ, bras de levier, mesuré à une précision relative de 0,1%
- M, masse additionnelle, mesurée à ± 2 g
- ω, vitesse angulaire de rotation du disque, mesurée à 1% (relatif).
- Ω, vitesse angulaire de précision du gyroscope, mesurée à ± 0,01 rad/s.

On donne : ℓ = 25 cm ; M = 384 g ; Ω = 0,116 rad/s ; ω = 481,3 rad/s.

3.1. Déterminer le moment d'inertie I, puis son incertitude ΔI. Indiquer le résultat complet sous une forme correcte.

3.2. Quelle mesure faut-il particulièrement soigner pour améliorer la précision sur la détermination de I ?

EXERCICE 10 : ESTIMATION D'UNE MESURE.

1. Un voltmètre affiche une tension U = 6,1234 V. Sachant que l'incertitude relative de l'appareil est de 3%, exprimer le résultat de la mesure sous la forme standard U ± ΔU. Combien de chiffres significatifs doit avoir la réponse ?
2. En un nœud d'un circuit électrique, arrivent deux courants d'intensité $I_1 = 23,1 \pm 0,1$ [A] et $I_2 = 10,20 \pm 0,01$ [A].

En appliquant la loi des nœuds, déterminer l'intensité du courant I qui sort du nœud.

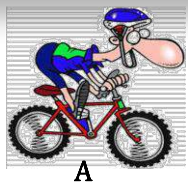
(Donner l'écriture complète)

MODULE ⇒ MOUVEMENTS ET INTERACTIONS 2

Leçon 4 LE CARACTÈRE RELATIF DU MOUVEMENT

ACTIVITÉ(S)

Un imminent physicien du nom d'Albert Einstein a pu démontrer que le mouvement est relatif car celui-ci dépend de l'observateur : le référentiel.
Donner, l'état de repos ou de mouvement de chaque individu du trio ci-contre lorsque l'observateur est en A, en B et en C.
Définir alors référentiel.



A

B

C

Objectifs
➲ Définir : repère ; référentiel ; trajectoire ; etc.
➲ Décrire le mouvement d'un mobile.
➲ Définir et déterminer la vitesse (moyenne et instantanée) d'un mobile.
➲ Définir et déterminer l'accélération (moyenne et instantanée) d'un mobile.
➲ Utiliser le diagramme des espaces et des vitesses pour décrire la nature d'un mouvement.

1. Repérage d'un point

Considérons un point mobile M. Pour connaître parfaitement son mouvement, il faut savoir où il se trouve à chaque instant. Raison pour laquelle il faut définir un repère. On parle alors de **repérage**.

1.1. Repérage d'espace

Pour étudier le mouvement d'un mobile dans l'espace, il faut définir les notions telles que :

1.1.1. Notion de référentiel

- Un **référentiel** est l'objet de référence à partir duquel est étudié le mouvement d'un mobile.
- Un référentiel est constitué d'un repère d'espace et d'un repère de temps.
- On distingue :

- Le **référentiel terrestre** ou de **laboratoire** qui est construit à partir de n'importe quel solide de référence lié à la Terre (le solide doit être fixé par rapport à la Terre) et est utilisé pour tout mouvement à la surface de la Terre.
- Le **référentiel géocentrique** ou de **Coriolis** qui étudie le mouvement des satellites, de tout objet en mouvement autour de la Terre.
- Le **référentiel héliocentrique** ou de **Copernic** dont le centre du repère qui lui est associé est presque confondu avec le centre du Soleil ; il utilisé pour étudier les mouvements des planètes, des comètes, des étoiles, bref de tout ce qui est en mouvement par rapport au Soleil.

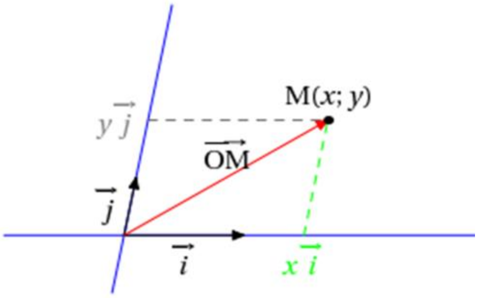
1.1.2. Notion de repère

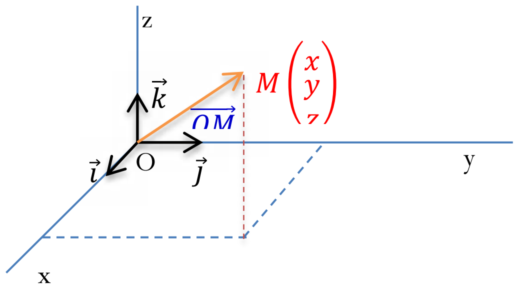
- Un repère d'espace, lié à un solide de référence, permet de déterminer la position d'un objet.

- Un **repère d'espace** est un repère lié au référentiel considéré. On peut associer au référentiel un **repère orthonormé**. On définit alors la position d'un point mobile M par ses coordonnées x et y ou x, y et z dans le repère.

Définition

Un repère est dit orthonormé, si ces axes sont perpendiculaires deux à deux, et si la norme des vecteurs de base est égale à 1 : $\|\vec{i}\| = \|\vec{j}\| = \|\vec{k}\| = 1$.





1.1.3. Le vecteur position

- Le vecteur position d'un mobile, permet de déterminer la position d'un mobile dans l'espace. Soit M (x ; y) le mobile et O l'origine du repère d'espace. Le vecteur position dans le repère (O ; $\vec{i}$; $\vec{j}$) s'écrit alors, $\overrightarrow{OM} = x\vec{i} + y\vec{j}$
- Si cette position dépend du temps, on écrit : $\overrightarrow{OM}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$
- Généralement, on repèrera un mobile par son centre d'inertie noté G. On écrit alors :

$$\overrightarrow{OG} = x(t)\,\vec{i} + y(t)\,\vec{j}$$

1.2. Repérage de temps

- Le repère de temps permet de définir à quel instant le mouvement d'un mobile est déterminé. Pour cela, il faut définir un instant dit **instant origine**.
- Il permet aussi de situer un évènement par rapport à un autre.
- En choisissant une origine, un évènement est caractérisé par l'**instant t** ou **date** où il se trouve.
- Si deux évènements ont lieu à des instants t_1 et t_2 différents, la durée Δt, ou intervalle (espace) de temps, qui les sépare est : $\Delta t = t_2 - t_1$ **(4.1)**

Définition :

On appelle **date**, l'intervalle de temps qui sépare l'instant considéré d'un instant pris arbitrairement comme origine.

1.3. Vocabulaire cinématique

✍ **Cinématique** : C'est la partie de la physique qui étudie le mouvement des corps sans tenir compte des causes (forces) qui les produisent.

✍ **Système** : C'est tout objet sur lequel porte une étude. On distingue :

- **Les systèmes déformables** : Un système est dit déformable lorsque la distance entre deux points quelconques le constituant peut varier.

Exemple : Les liquide ; les gaz ; les corps élastiques.

- Les systèmes indéformables : Un système est dit indéformable lorsque la distance entre deux points quelconques le constituant reste constante (ne varie pas).

Exemple : Tous les corps solides.

- Durée : C'est l'espace de temps pendant lequel se produit un mouvement. Elle est généralement notée Δt.
- Instant initial : C'est le point de départ d'un mouvement.
- Vitesse linéaire : C'est la vitesse d'un mobile dont la trajectoire est rectiligne.
- Abscisse initiale : C'est l'abscisse correspondante à l'instant initial.
- Trajectoire : C'est l'ensemble des positions successives occupées par un mobile au cours de son mouvement.
- Mobile : C'est tout objet en mouvement.
- Mouvement : C'est le déplacement au cours du temps d'un objet (animé ou non) dans l'espace.

2. Le vecteur vitesse

Si l'on considère la situation ci-haut, l'observateur B voit que les corps A et C sont en mouvement par contre, le corps A est immobile par rapport à lui-même. On constate alors que le mouvement dépend de l'**observateur**. On dit qu'il est **relatif**.

Remarque

- La description du mouvement ne peut s'effectuer que par rapport à un observateur. Cet observateur est appelé **référence**.
- La vitesse est une grandeur qui caractérise la rapidité avec laquelle un mobile change ses positions dans l'espace.

2.1. La vitesse moyenne

La vitesse moyenne V_m est le quotient de la distance d parcourue, par la durée t du temps mis pour parcourir cette distance :

$$V_m = \frac{d}{t} \qquad \text{Avec} \begin{cases} d(m) \\ t(s) \\ V_m(m.s^{-1}) \end{cases} \tag{4.2}$$

Si M_1 et M_2 sont les positions respectives d'un mobile M dans le repère $(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ aux instants t_1 et t_2 respectivement ($t_1 < t_2$), le vecteur vitesse moyenne est donné par :

$$\vec{V}_m = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{t_2 - t_1} = \frac{\overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\overrightarrow{OM}}{\Delta t} \tag{4.3}$$

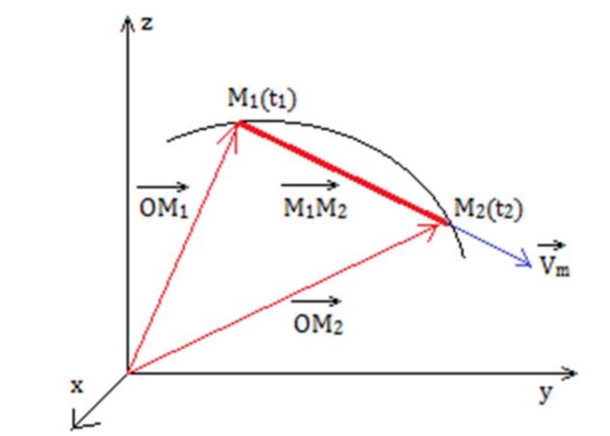


Figure 4.1 : Représentation de la vitesse moyenne

Exemple

Un mobile, quitte d'un point O repéré par son abscisse $x_0 = 1$ m à un temps $t_0 = 2$ s et arrive en point A d'abscisse $x_A = 13m$ à $t_2 = 2$ min. Calculer sa vitesse moyenne V_m.

Solution

Par définition, on a : $V_m = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \dfrac{13-1}{120-2} = 0{,}10 m.s^{-1}$

2.2. La vitesse instantanée

- La vitesse instantanée est la vitesse V_i que possède un mobile à un instant de date t donné.
- Lorsqu'il y a mouvement, la vitesse varie en fonction du temps. On écrit alors :

$$V_i = V(t) \qquad (4.4)$$

- Si dans un intervalle de temps Δt la vitesse ne varie pas, la vitesse moyenne est alors égale à la vitesse instantanée ($V_i = V_m$). on dit dans ce cas que le mouvement du mobile est **uniforme**.
- Le vecteur vistesse instantanée est donnée par la relation :

$$\vec{V}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} + V_z\vec{k} \qquad (4.5)$$

dans le repère $(O,\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ et son module est :

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \qquad (4.6)$$

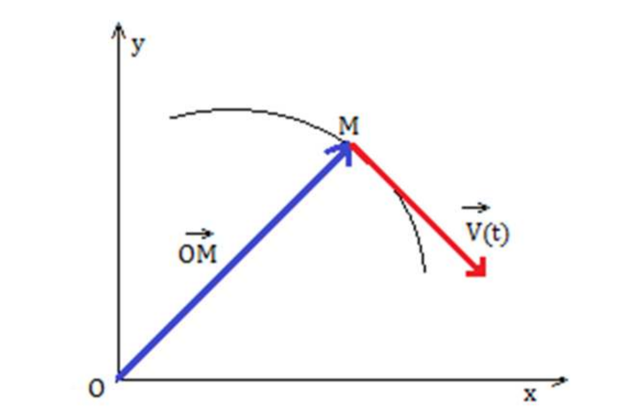


Figure 4.2 : Représentation de la vitesse instantanée

Exemple

La vitesse d'un mobile est donnée par :
$V(t) = 2t - 3 \quad (m.s^{-1})$

(a) Calculer la vitesse de ce mobile à t = 0 s et à t = 1s.
(b) Comment varie cette vitesse dans le temps ?

Solution

(a) À t = 0 s, $V(0) = -3\ m.s^{-1}$ et à t = 1 s, $V(1) = -1\ m.s^{-1}$.
(b) La vitesse augmente dans le temps.

2.3. Évolution de la vitesse

Considérons le mouvement ci-dessous d'une automobile enregistré par un dispositif approprié, présentant ses positions à des intervalles de **temps égaux** relativement à la terre : c'est une **chronophotographie**.

Au cours de ce mouvement, plusieurs phases sont observées :

2.3.1. De la position 0 à la position 4

Le point mobile parcourt les distances **de plus en plus grandes** pendant des intervalles de temps égaux. Le mobile va donc de plus en plus vite : sa **vitesse augmente**.
Sa trajectoire est une droite et sa vitesse augment au cours du temps. On dit alors que le **mouvement est rectiligne accéléré**.

2.3.2. De la position 4 à la position 10

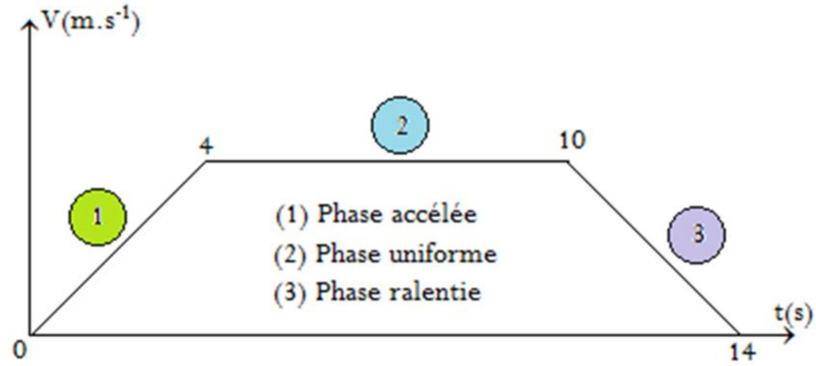
Le point mobile parcourt des distances **égales** pendant des intervalles de temps égaux. Sa vitesse ne change pas. Elle est **constante**.

Sa trajectoire est une **droite** et sa vitesse reste **constante** au cours du temps. On dit alors que le **mouvement est rectiligne uniforme**.

2.3.3. De la position 10 à la position 14

Le point mobile parcourt de distances de plus en plus **petites** pendant des intervalles de temps égaux. Le mobile va donc de moins en moins vite. Sa **vitesse diminue**.
Sa trajectoire est une droite et sa vitesse **diminue** au cours du temps. On dit alors que le mouvement est **ralenti** ou **décéléré**.

- Diagramme des vitesses et des phases.



3. Le vecteur accélération

- L'accélération $\vec{a}$ d'un mobile est une grandeur physique qui caractérise la rapidité avec laquelle varie la vitesse $\vec{V}$ dudit mobile. L'accélération s'exprime en **m.s^{-2}**.
- Comme la vitesse, on distingue aussi :
  - L'accélération moyenne définie par : $\overrightarrow{a_m} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t} = \frac{\vec{V_f} - \vec{V_i}}{t_f - t_i}$ **(4.7)**
  - L'accélération instantanée définie par : $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{V}(t)}{dt}$ **(4.8)**

Remarque

- Lors d'une représentation graphique, les vecteurs vitesse moyenne et accélération moyenne représentent la pente de la droite obtenue.
- Lorsque le mouvement d'un véhicule se fait à vitesse constante (mouvement uniforme), l'accélération est nulle.
- Lorsque **a < 0**, le mouvement est dit ralenti ou retardé ou décéléré et lorsque **a > 0**, le mouvement est dit accéléré.
- **1 m.s^{-1} = 3,6 km.h^{-1}** ou $1 km.h^{-1} = \frac{1}{3{,}6} m.s^{-1}$

Exemple

Un mobile parcourt un trajet rectiligne avec une vitesse V = 2,3 km/h en 2 s. Calculer son accélération.

Solution

Par définition, $a = \frac{V}{t} = \frac{2{,}3}{3{,}6} \times \frac{1}{2} = 0{,}32.m.s^{-2}$

4. Les différents types de mouvements

- La **trajectoire** d'un point est l'ensemble des positions successives occupées par ce point dans un référentiel donné, au cours de son mouvement.
- En reliant les positions occupées par un point mobile, au cours du temps, on reconstitue la trajectoire.

4.1. Le mouvement rectiligne

Un mouvement rectiligne uniforme (MRU) est un mouvement pour lequel la trajectoire est une droite.

4.1.1. Le mouvement rectiligne uniforme

(a) Définition

Si la valeur de la vitesse est constante (V = cste), alors, le mouvement est dit rectiligne uniforme et son accélération est nulle.

(b) Équation horaire

L'équation horaire est la fonction linéaire du temps x(t) définie telle que :

$$x(t) = Vt + x_0 \qquad (4.9)$$

Où x_0 est la position qu'occupe le mobile à la date t = 0 s. On l'appelle **abscisse initiale** du mobile.

Remarque

Le mouvement rectiligne uniforme d'un mobile dans un référentiel galiléen indique que le système est pseudo-isolé (voir leçon 7) car les forces qui s'y exercent se compensent.

(c) Diagramme des espaces

Le diagramme des espaces et la représentation graphique de la position d'un mobile en fonction du temps.

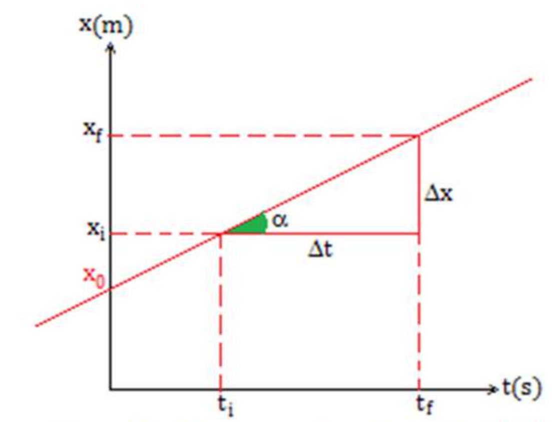


Figure 4.1 : Diagramme des phases d'un MRU

Selon cette représentation graphique :

$$tg\alpha = V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \qquad (4.10)$$

C'est la pente de la droite obtenue.

(d) Diagrammes des vitesses et accélérations

Le diagramme des vitesses est la représentation graphique de la vitesse d'un mobile en fonction du temps.

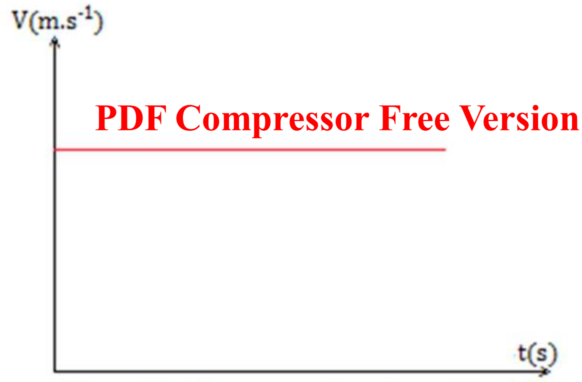


Figure 4.2 : Diagramme des vitesse d'un MRU

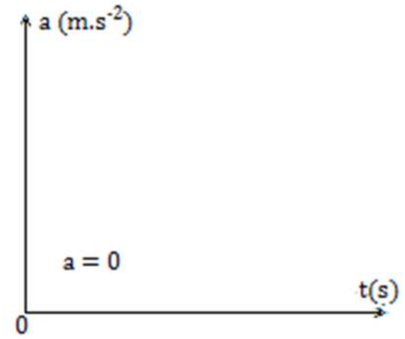


Figure 4.3 : Diagramme des accélérations d'un MRU

4.1.2. Le mouvement rectiligne uniformément varié

(a) Définition

Un mouvement rectiligne uniformément varié (MRUV) est mouvement pour lequel la trajectoire est une trajectoire et la vitesse varie de manière uniforme avec le temps.

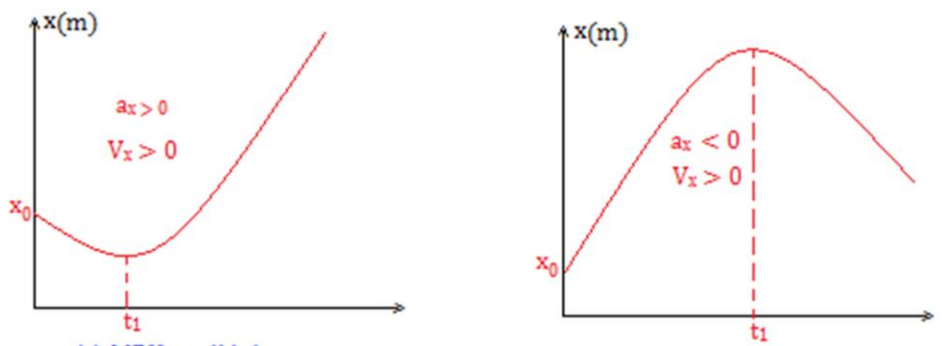
(b) Équations horaires

Les équations horaires traduisant ce type de mouvement sont les suivantes :

$$\begin{cases} \vec{a} = \overrightarrow{cste} \\ V = at + V_0 \\ x(t) = \frac{1}{2}at^2 + V_0 t + x_0 \\ V^2 - V_0^2 = 2a(x - x_0) \end{cases} \qquad (4.11)$$

Avec a ($m.s^{-2}$) l'accélération ; V_0 ($m.s^{-1}$) la vitesse initiale et x_0 (m) la position initiale.

(c) Diagramme des espaces, des vitesses et accélérations



(a) MRU accéléré (b) MRU décéléré

Figure 4.4 : Diagrammes des phases d'un MRUV

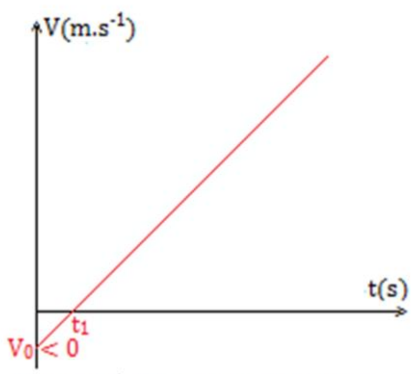


Figure 4.5 : Diagramme des vitesses d'un MRUA

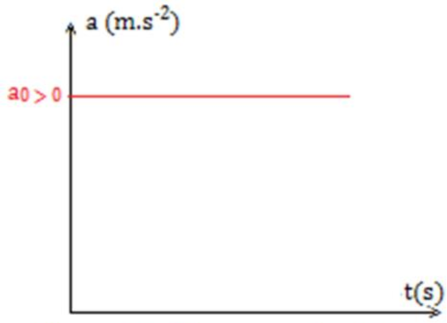


Figure 4.6 : Diagramme des vitesses d'un MRUA

Exemple

Un mobile arrive en un point M (x_M = 10 m) de sa trajectoire avec une vitesse V = 3 m.s^{-1} en 20 s pour une accélération de 2 m.s^{-2}. Déterminer sa vitesse et sa position initiales.

Solution

Données : x_M = 10 m ; V_M = V = 3 m.s^{-1} ; a = 2 m.s^{-2} ; V_0 = ? x_0 = ?

On sait par définition que :

$$\begin{cases} V = at + V_0 \\ V^2 - V_0^2 = 2a(x - x_0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_0 = V - at \\ x_0 = x - \dfrac{V^2 - V_0^2}{2a} \end{cases} \xrightarrow{AN} \begin{cases} V_0 = -37 m.s^{-1} \\ x_0 = -330 m \end{cases}$$

(d) Utilisation du diagramme des vitesses de la forme : $V^2 - V_0^2 = 2a(x - x_0)$

On relevé la vitesse en m.s^{-1} d'un mobile sur dix positions, le long d'une portion rectiligne. Les valeurs obtenues sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Vitesse V (m/ s)	**3,77**	**4,31**	**6,02**	**7,34**	**7,63**	**8,45**	**8,96**	**9,43**	**9,89**	**10,32**
Position x_i (m)	**3,0**	**4,0**	**8,0**	**12,0**	**13,0**	**16,0**	**18,0**	**20,0**	**22,0**	**24,0**

La représentation graphique de la courbe $V^2 = f(x)$ donne le graphe suivant :

Échelle : 1 cm ← 1 m ; 1 cm ← 10 m^2/s^2

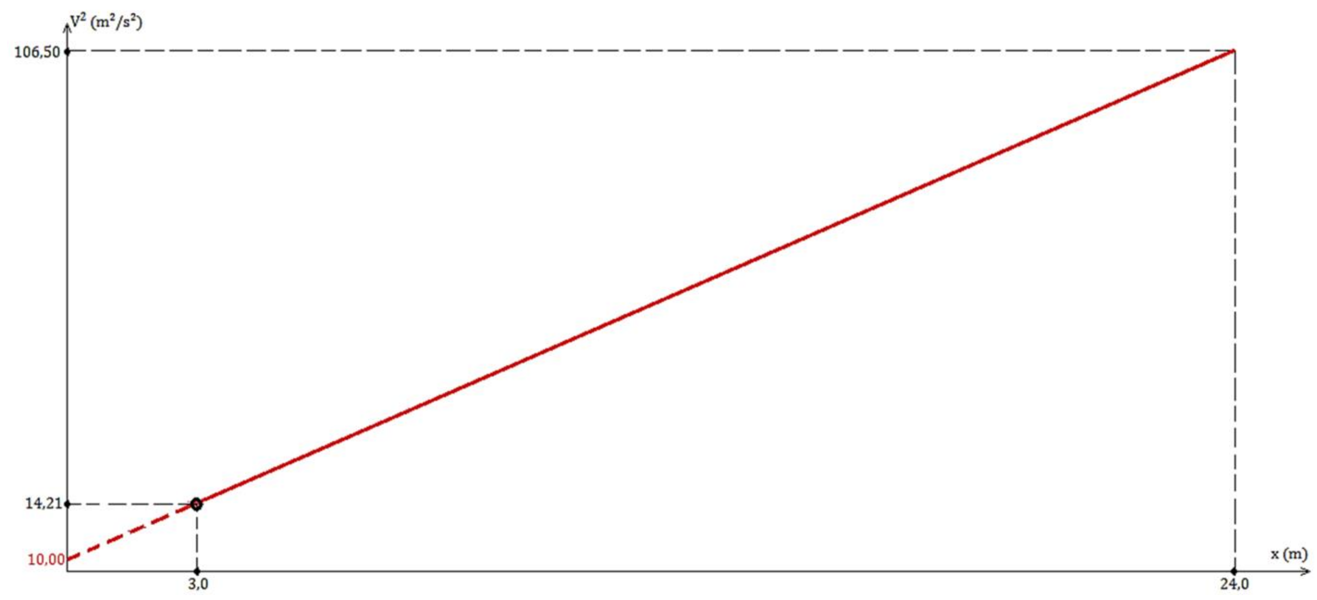


Figure 4.7 : Représentation graphique de l'équation $V^2 - V_0^2 = 2a (x - x_0)$

La courbe ainsi obtenue est celle d'une droite d'équation réduite : $V^2 = \alpha x + b$ où α est le coefficient directeur et b l'ordonnée à l'origine et correspond à la vitesse initiale V_0.

Graphiquement, b = V_0 = 1 m.s^{-1} ; et $\alpha = \dfrac{\Delta V^2}{\Delta x} = \dfrac{106{,}5 - 14{,}21}{24 - 3} = 4{,}39 \approx 4{,}4 m.s^{-2}$

Or, 2a = α ⇒ a = 2,2 m.s^{-2} = accélération du mobile.

4.2. Le mouvement circulaire uniforme (MCU)

4.2.1. Définition

Un mouvement circulaire est dit uniforme, lorsqu'au cours de la rotation, la vitesse reste constante en module : V = cste.

4.2.2. Les différentes vitesses (linéaire, de rotation et angulaire)

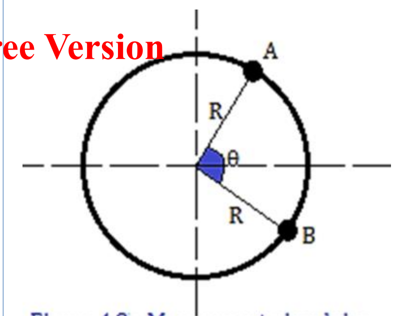


Figure 4.8 : Mouvement circulaire

Lorsque la trajectoire est circulaire, le système décrit un cercle de centre O et de rayon R (en m) et :

- La vitesse linéaire est définie par : $V = R\omega = R\dot{\theta}$ (4.12)

  Avec V (m.s^{-1}) ; ω (rad.s^{-1}) ; $\dot{\theta}$ (rad.s^{-1})
- La vitesse de angulaire est définie par : $\omega = \dot{\theta} = 2\pi N$ Avec N (tr.s^{-1}) (4.13)
- La vitesse de rotation est définie par : $N = \frac{n}{t}$ (4.14)

  Avec n (tr) = nombre de tours ; t (s)= temps mis pour effectuer n-tours
- L'angle de rotation est défini par : $\theta = 2\pi n$ avec θ (rad) (4.15)

4.2.3. L'accélération $a_n = \frac{V^2}{R}$

Lorsque le mouvement est circulaire uniforme, l'accélération du mobile est dirigée vers le centre du mouvement et est dite normale ou radiale : c'est une accélération centripète.
On la note a_n (m.s^{-2}) et est obtenue par la relation :

$$a_n = \frac{V^2}{R} \quad (4.16)$$

En introduisant (4.12) dans (4.16), on trouve :

$$a_n = R\omega^2 \quad (4.17)$$

Exemple

Dans un référentiel lié à la roue d'un vélo, la valve de cette dernière effectue un mouvement de rotation et effectue 30 tours toutes les 30 secondes. La distance qui sépare le centre de la roue à la valve est d = 20 cm. En supposant le mouvement uniforme, déterminer l'accélération normale de la valve. Prendre $\pi^2 \approx 10$

Solution

Données : n = 30 tr ; t = 3 s ; d = R = 20 cm = 0,2 m
Question : a_n = ?

On sait que : $a_n = \frac{V^2}{R} = R\omega^2 = 4\pi^2 RN^2 = 4\pi^2 R\left(\frac{n}{t}\right)^2$ AN : $a_n = 800$ m.s^{-2}.

4.3. Étude d'une trajectoire

Considérons une roue de vélo, comme l'indique la figure 4.9 ci-dessous :

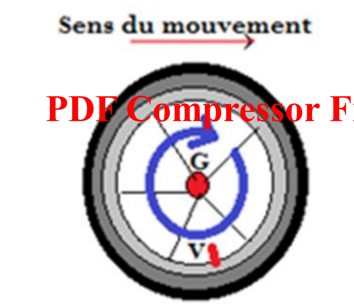


Figure 4.9 : Mvt de la valve d'une roue

- La trajectoire du centre **G** de la roue dans le référentiel **roue**, est une droite. Son mouvement est donc **rectiligne**.

- La trajectoire de la valve V dans le référentiel **centre de la roue** est un **cercle**. Le mouvement est donc **circulaire**. (*Voir figure 4.10*)

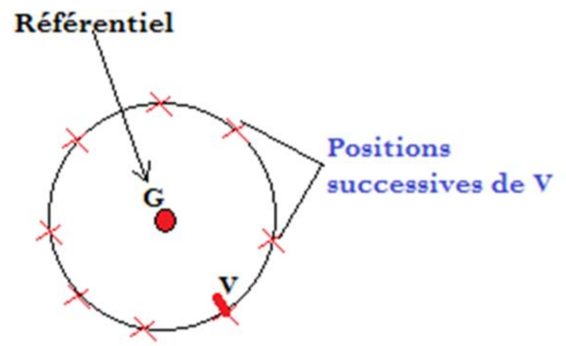


Figure 4.10 : Trajectoire de la valve V

- La trajectoire de la valve dans le référentiel **roue** est une **courbe**. Le mouvement est donc **curviligne**. Si la vitesse du mouvement reste **constante**, la **trajectoire se répétera**. On parle alors de **cycloïde**. (*Voir figure 4.11*)

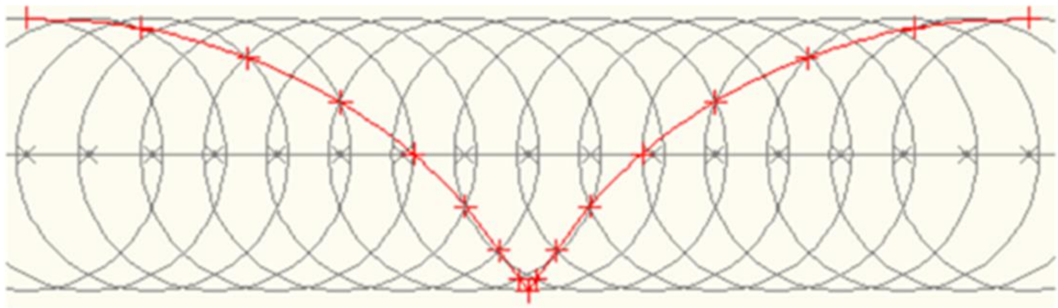


Figure 4.11 : Mouvement cycloïdal de la valve V

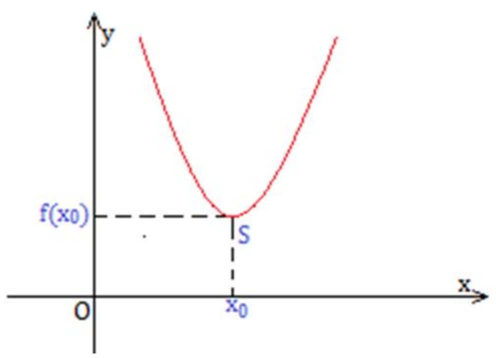
4.4. Le mouvement parabolique

La figure 4.4 est la représentation d'un mouvement parabolique. Ce mouvement est obtenu à partir d'une fonction de la forme $f(x) = ax^2 + bx + c$. La courbe obtenue est caractérisé par un sommet S de coordonnées :

$$\begin{cases} S = \left(x_0 ; f(x_0)\right) \\ x_0 = -\dfrac{b}{2a} \end{cases} \quad (4.18)$$

En outre du sommet S, la parabole est aussi caractérisée par :

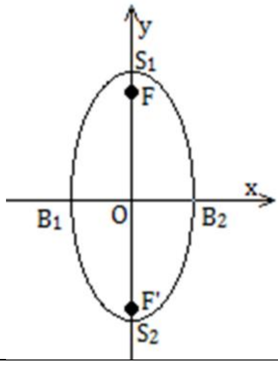
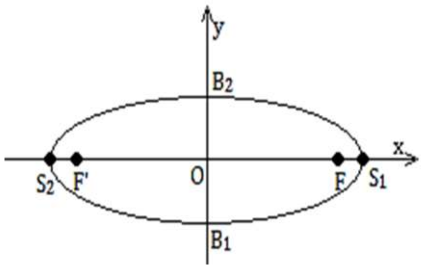
- Une directrice $x = -\dfrac{a}{2}$
- Une excentricité e = 1
- Un foyer $F\left(S; \dfrac{a}{2}\right)$



4.5. Le mouvement elliptique

- En physique, le mouvement elliptique est beaucoup plus observé dans le mouvement des satellites autour de la Terre ou des planètes autour du Soleil.
- L'équation d'une ellipse dans le repère $(O; \vec{\imath}; \vec{\jmath})$ est : $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$

Les caractéristiques d'une ellipse sont les suivantes :

Caractéristiques	a < b		a > b	
Sommet	$C=\sqrt{b^2-a^2}$		$C=\sqrt{a^2-b^2}$	
Foyers	F (0 ; C)	F' (0 ; −C)	F (C ; 0)	F' (−C ; 0)
Directrices	$X=\frac{b^2}{C}$	$X'=-\frac{b^2}{C}$	$X=\frac{a^2}{C}$	$X'=-\frac{a^2}{C}$
Excentricité	$e=\frac{C}{b}$		$e=\frac{C}{a}$	
Figure				

Exemple

Le mouvement d'un mobile dans le repère (O ; I ; J) est défini par l'équation (E) : $4x^2 + 9y^2 - 36 = 0$. Déterminer l'équation réduite, puis les éléments caractéristiques.

Solution

(E) : $4x^2 + 9y^2 - 36 = 0 \Rightarrow 4x^2 + 9y^2 = 36$.

$$\Rightarrow \frac{4x^2}{36}+\frac{9y^2}{36}=1$$

$$\Rightarrow \frac{x^2}{9}+\frac{y^2}{4}=1$$

$$\Rightarrow \frac{x^2}{(3)^2}+\frac{y^2}{(2)^2}=1$$

Éléments caractéristiques :

- Centre : $C=\sqrt{9-4}=\sqrt{5}$
- Directrice : $X=\frac{9}{\sqrt{5}}$ et $X=-\frac{9}{\sqrt{5}}$
- Foyer : $F(\sqrt{5};0)$; $F'(-\sqrt{5};0)$
- Excentricité : $e=\frac{\sqrt{5}}{9}$

5. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Accélération	Acceleration
Vitesse	Speed ; Velocity ; pate ; rate
Vitesse moyenne	Average speed
Vitesse instantanée	Instantaneous speed

EXERCICE DE LA LEÇON 4 : LE CARACTÈRE RELATIF DU MOUVEMENT

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : vitesse moyenne ; système ; force ; plan incliné ; parallélogramme ; segment.
2. Comment appelle-t-on, en physique, la différence de deux grandeurs ?
3. Vrai ou faux

3.1. La position d'un objet dépend du référentiel.
3.2. Le mouvement de tout objet à la surface solaire, a pour référentiel le référentiel de Copernic.
3.3. Pour une grandeur G définie telle que $G = x/y$, son incertitude est donnée par : $\Delta G = \Delta x/\Delta y$.
3.4. Un mouvement rectiligne est dit uniforme, lorsque l'accélération est constante.
3.5. La vitesse et l'accélération ont même unité.
3.6. En physique, un mobile est un point dynamique.
3.7. Une pièce de monnaie abandonnée sur une table horizontale et pouvant rouler, effectue un mouvement circulaire par rapport à son centre.
3.8. Un mouvement rectiligne uniforme signifie que la vitesse est nulle.

4. En considérant les figures 2, 3 et 4 ci-dessous, répondre aux questions suivantes :

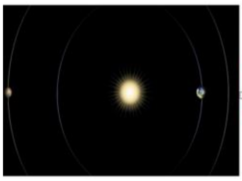


Figure 2

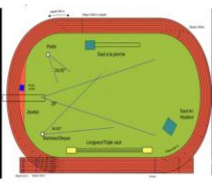


Figure 3

Figure 4

4.1. Quelle est la forme de la trajectoire de Mars autour du Soleil ? (Fig. 2)
4.2. Quelle est la forme de la trajectoire d'un sprinter sur une piste de 100m ? (Fig. 3)
4.3. Quelle est la forme de la trajectoire d'une nacelle sur une grande roue ? (Fig. 4)

5. QCM

5.1. Soient G une grandeur physique, x et y des variables dont dépend G et α une constante. On pose : $G = \alpha \times (x - y)$. On a alors :
(a) $\Delta G = \alpha \times (\Delta x - \Delta y)$
(b) $\Delta G = \Delta x + \Delta y$
(c) $\Delta G = \Delta\alpha + \Delta x - \Delta y$.

5.2. Dans un MCU,
(a) L'accélération est normale
(b) L'accélération est tangentielle
(c) L'accélération et la vitesse sont constantes.

5.3. Pour un MRU,
(a) La vitesse est normale
(b) La vitesse est tangentielle
(c) La vitesse et l'accélération sont constantes.

Exercice 2 : Application des savoirs

1. Pour déterminer la hauteur h d'un immeuble, on mesure la distance d à laquelle on se trouve ainsi que l'angle α sous lequel on voit le sommet de l'immeuble. On donne : $d = 25{,}00 \pm 0{,}01[m]$ et $\alpha = 54° \pm 1°$.
   Calculer la hauteur h de l'immeuble, ainsi que son incertitude absolue ($h = d \times tg\alpha$)
2. Une voiture a une vitesse initiale de 10 m/s. Elle est en train de rouler sur une route rectiligne avec une accélération constante de 0,8 m/s². Calculer sa vitesse au bout de 10 s.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1

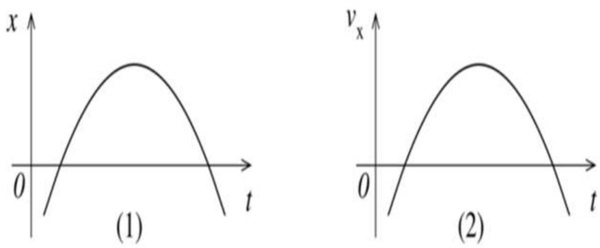
Une voiture roule sur une autoroute rectiligne à la vitesse constante de 100 km/h. Lorsqu'on déclenche le chronomètre, elle se trouve à 88 km du lieu d'arrivée. Déterminer la position à partir du lieu d'arrivée de la voiture quand le chrono indiquera un temps de 15 min.

Situation 2

On considère le système pignon–crémaillère vu en troisième sur lequel le pignon (petite roue) effectue une rotation et la crémaillère un mouvement de translation. Les deux (pignon et crémaillère) sont en mouvement mais en sens contraires grâce à un système d'engrènement de dents. Le diamètre du cercle primitif D, le nombre de dents Z et le module m sont liés par la relation $D = Z \times m$. Unités D(mm) ; m (mm). On montre aisément que la vitesse **V** linéaire est liée au diamètre primitif D et à la vitesse de rotation N (tr/s) par la relation : $\mathbf{V = \pi DN}$.
Après avoir montré que la distance d parcourue par la crémaillère est de la forme $d = \pi Dn$ ($\pi \approx 3{,}14$), où n est le nombre de tours effectué par le pignon et $a_n = 4\pi^2 RN^2$ (R = rayon de la crémaillère) , déterminer la valeur de l'accélération centripète a_n d'un point mobile situé à égal distance du rayon de la crémaillère.
On donne : $R = 2{,}01 \pm 0{,}01$ (mm) ; $N = 40{,}00 \pm 5\%$ (tr/min) ; $\pi^2 \approx 10$.

Situation 3 : Lecture et interprétation graphiques

Voici les représentations graphiques de deux mouvements différents (1) et (2).



- Indiquer sur les représentations (1) et (2), les points pour lesquels la vitesse V_x est nulle.
- Décrire l'évolution de la vitesse V_x lors du mouvement (1), et de l'accélération a_x lors du mouvement (2).

MODULE ⇒ MOUVEMENTS ET INTERACTIONS 2

Leçon 5 NOTION D'ÉQUILIBRE

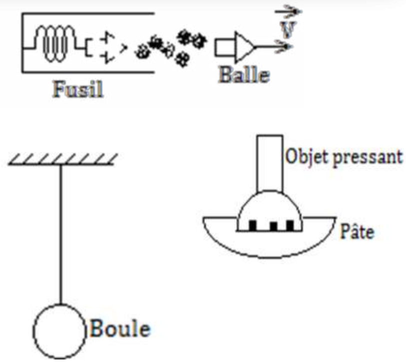
ACTIVITÉ(S)

Observe les trois figures ci-contre puis réponds aux questions suivantes :

(1) Qu'est-ce qui est à l'origine de l'éjection de la balle de fusil, de la déformation de la pâte de pain ou de l'équilibre du caillou ?

(2) Quels sont les effets de la force ?

(3) Proposer une définition de la force.



Objectifs

- Définir : physique ; force ; etc.
- Donner les conditions d'équilibre d'un solide
- Utiliser les conditions d'équilibre pour déterminer l'intensité d'une force
- Projeter une force dans un repère (O ; I ; Y)

1. Quelques définitions

Physique : C'est une science expérimentale qui étudie les propriétés générales de la matière, les phénomènes naturels, et qui établit les lois qui expliquent ces phénomènes naturels ainsi que leurs modifications.

Force : C'est une action mécanique définit par un effet dynamique et un effet statique.

Effet statique : C'est un effet caractérisé par l'immobilité d'un objet.

Effet dynamique : C'est un effet caractérisé par la mobilité d'un objet.

Remarque

L'effet statique et l'effet dynamique peuvent s'accompagner d'une déformation du système.

Solide : Est dit solide, tout corps dont les dimensions ne changent pas au cours du temps.

Force intérieure : Une force $\vec{F}$ est dite **intérieure** à un système, lorsqu'elle est exercée par une particule du système sur une autre particule appartenant au même système.

Force extérieure : Une force $\vec{F}$ est dite **extérieure** à un système lorsqu'elle est exercée par une particule extérieure au système sur le système.

2. Équilibre d'un solide soumis à deux forces

2.1. Conditions d'équilibre d'un solide soumis à deux forces

2.1.1. Expérience

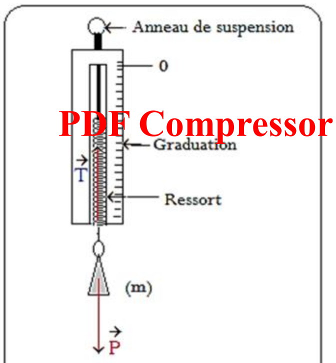


Figure 5 : Dynamomètre

Considérons une masse marquée m, accrochée sur le crochet d'un dynamomètre. Le système {dynamomètre – masse} est en équilibre grâce à l'action de deux forces :

- La force de rappel du ressort du dynamomètre notée $\vec{T}$. Cette force s'oppose au poids $\vec{P}$
- Le poids de la masse noté $\vec{P}$

2.1.2. Généralité : 3ème loi de Newton

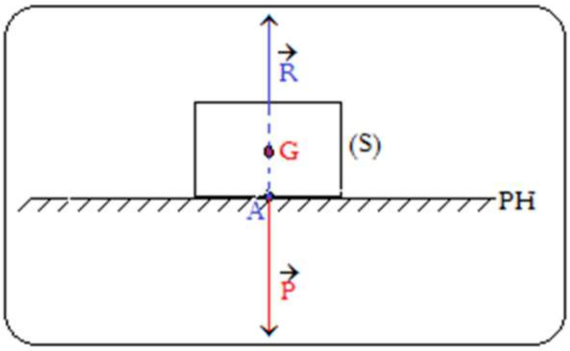
Cette loi est aussi appelée **principe des actions réciproques** ou **principe de l'action et de la réaction**.
Énoncé : « Lorsque deux corps A et B sont en interaction, le corps A, exerce sur le corps B, une force $\overrightarrow{\mathbf{F}_{A/B}}$ simultanément et au même moment, le corps B exerce sur le corps A, une force $\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ telles que :

- $\overrightarrow{\mathbf{F}_{A/B}}$ et $\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ aient la même direction ou droite d'action
- $\overrightarrow{\mathbf{F}_{A/B}}$ et $\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ aient même intensité ou module i.e. $F_{A/B} = F_{B/A}$
- $\overrightarrow{\mathbf{F}_{A/B}}$ et $\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ soeint de sens contraires i.e. $\overrightarrow{\mathbf{F}_{A/B}} = -\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ »

Remarque
Cette loi est valable que les corps soient en mouvement ou pas.

2.2. Application à l'étude de quelques cas particuliers

2.2.1. Cas d'un solide sur un plan horizontal (PH)



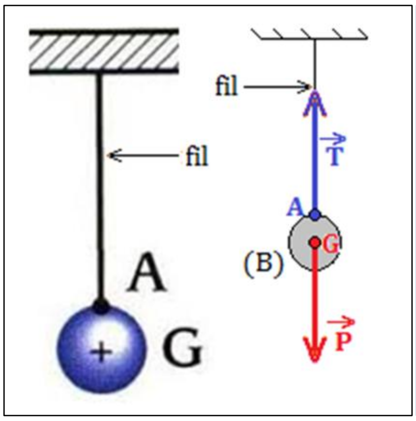
Bilan des forces appliquées sur (S) :
- $\vec{\mathbf{P}}$ poids de (S) en G.
- $\vec{\mathbf{R}}$ réaction du PH, en A.

Conditions d'équilibre de (S) :

$$\begin{cases} \vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \\ \vec{P} \text{ et } \vec{R} \text{ ont même droit d'action} \end{cases}$$

2.2.2. Cas d'un solide suspendu à un fil : notion de tension

Considérons une boule (B) de masse m suspendue à un fil inextensible et de masse négligeable.



La boule (B) est en équilibre, cela signifie que :
- (B) est soumise au moins à deux forces dont la somme vectorielle est nulle ;
- Ces forces ont même droite d'action ;

Soit $\vec{P}$ le vecteur poids de (B) et $\vec{T}$ la force liée à la **déformation** du fil. C'est la force que le fil exerce sur la boule. Elle est appelée **tension du fil**.
Les conditions d'équilibre de (B) sont alors :

$$\begin{cases} \vec{P} + \vec{T} = \vec{0} \\ \vec{P} \text{ et } \vec{T} \text{ ont même droite d'action} \end{cases}$$

2.2.3. Cas d'un solide suspendu à ressort

Considérons un solide (S) de masse m suspendu à un ressort (R) de constante de raideur k.

- Système {(a) ; (b)} : raccourcissement
- Bilan des forces

$$\begin{cases} \vec{F}, \text{force de compression} \\ \vec{T}, \text{tension du ressort ou force de rappel} \end{cases}$$

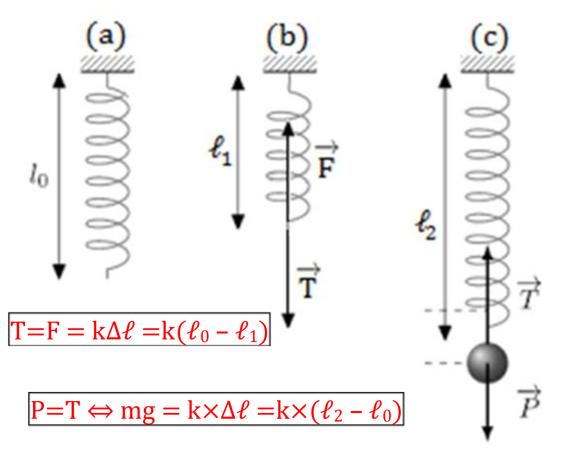
- Conditions d'équilibre

$$\begin{cases} \vec{F} + \vec{T} = \vec{0} \\ \vec{F}, \vec{T}, \text{même droite d'action} \end{cases}$$

- Système {(a) ; (c)} : allongement

Conditions d'équilibre

$$\begin{cases} \vec{T} + \vec{P} = \vec{0} \\ \vec{T}.\vec{P}. \text{même droite d'action} \end{cases}$$



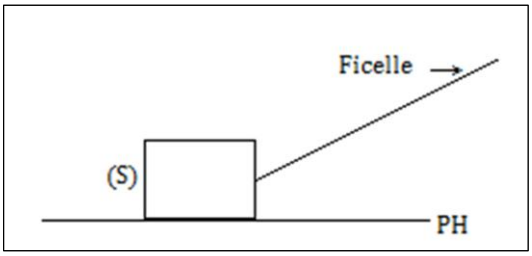
3. Équilibre d'un solide soumis à trois forces

- Des forces sont dites **concourantes** lorsque leurs droites d'action se coupent en seul point appelé point de concours.
- Des forces sont dites **coplanaires** lorsqu'elles appartiennent toutes au même plan.

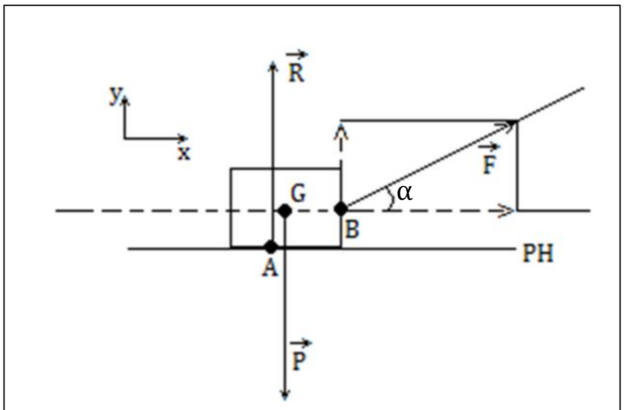
3.1. Conditions d'équilibre d'un solide soumis à trois forces non parallèles

3.1.1. Étude expérimentale

Soit un solide (S) de masse m sur un plan horizontal. Un enfant tire à l'aide d'une ficelle ce solide comme le présente la figure suivante :



(S) est soumis à trois forces dont le bilan est le suivant :



- Bilan des forces

$$\begin{cases} \vec{F}, \textit{force de traction ou motrice; en B} \\ \vec{P}, \textit{poids du solide ; en G} \\ \vec{R}, \textit{réaction du plan horizontal (PH); en A} \end{cases}$$

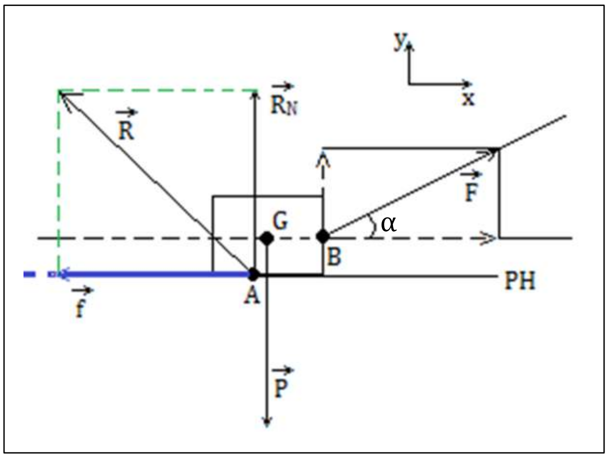
- Conditions d'équilibre

$$\begin{cases} \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0} & (1) \\ \vec{P}, \vec{R} \textit{ et } \vec{T}, \textit{sont concourantes} & (2) \end{cases}$$

La condition (2) ci-dessus n'est vraie que suivant l'axe des x. En projetant (1) suivant les axes, on a :

$$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} \overrightarrow{P_x} + \overrightarrow{R_x} + \overrightarrow{F_x} = \vec{0} \\ \overrightarrow{P_y} + \overrightarrow{R_y} + \overrightarrow{F_y} = \vec{0} \end{cases} \xrightarrow{Alg\acute{e}brisation} \begin{cases} F\cos\alpha = 0 \\ R + F\sin\alpha = mg \end{cases}$$

Ces résultats montrent alors qu'il est important de prendre en considération, la présence d'une force qui s'oppose au déplacement du solide : la **force de frottement $\vec{f}$**.



Le bilan précédent reste valable à la seule différence qu'il faudrait remarquer que :

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

$$\text{Avec} \begin{cases} \vec{f}, force\ de\ frottement;\ en\ A \\ \vec{R}_N, réaction\ normale\ du\ (PH);\ en\ A \end{cases}$$

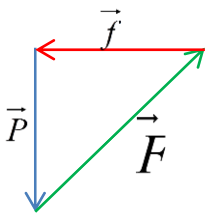
Remarque

En présence des forces de frottement, la force de frottement n'intervient pas dans le bilan principal.

On a alors :

$$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} \overrightarrow{P_x} + \overrightarrow{R_x} + \overrightarrow{F_x} = \vec{0} \\ \overrightarrow{P_y} + \overrightarrow{R_y} + \overrightarrow{F_y} = \vec{0} \end{cases} \xrightarrow{Alg\acute{e}brisation} \begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} 0 - f + F_x = 0 \\ -P + R_N + F_y = 0 \end{cases} \xrightarrow{Intenist\acute{e}} \begin{cases} F\cos\alpha = f \\ F\sin\alpha = mg - R_N \end{cases}$$

Aussi a-t-on, $\begin{cases} R_x = f \\ R_y = R_N \\ tg\alpha = \dfrac{mg - R_N}{f} \end{cases}$ et la dynamique des forces est :



3.1.2. Généralisation

Pour généraliser, nous allons considérer que notre solide est soumis à plus de trois forces. Les conditions d'équilibre sont alors les suivantes :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \vec{F_i} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \cdots + \vec{F_n} = \vec{0} \\ Les\ forces\ \vec{F_i}\ doivent\ être\ concourantes. \end{cases}$$

3.2. Application : équilibre d'un solide sur un plan incliné

Pour ce paragraphe, nous allons résoudre l'exercice ci-dessous.
Considérons un solide (S) de masse m = 100 kg en équilibre sur un plan incliné de 30° par rapport à l'horizontal, avec un ressort (R) de raideur k et de longueur $\ell = 27$ cm.

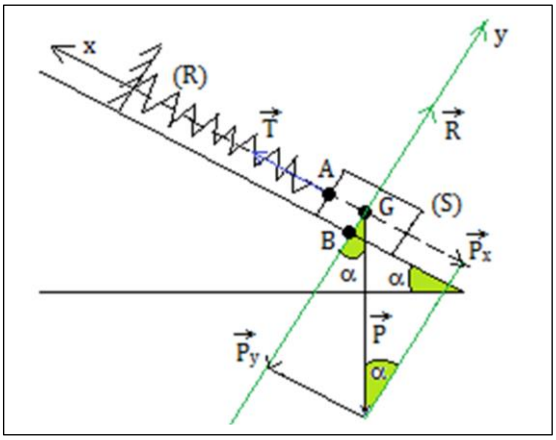
a. Réaliser une figure et y représenter les forces qui s'appliquent à (S).
b. Faire le bilan des forces qui s'appliquent à (S).
c. À partir de la condition d'équilibre de (S), déterminer l'intensité de la tension du ressort et celle de la réaction du plan incliné. En déduire la valeur de k.
d. Ressortir la dynamique des forces et justifier que le système (solide) est en équilibre.

Prendre g = 9,8 N/kg.

Solution

- Système : {ressort ; solide ; plan incliné}
- Référentiel : terrestre.
- Données : m = 100 kg ; α = 30° ; g = 9,8 N.kg ; ℓ = 27 cm = 0,27 m.

a. Réalisons la figure, en y représentant les forces qui agissent sur (S)



b. Bilan des forces appliquées sur (S)

- $\vec{P}$, poids de (S) ; en G
- $\vec{R}$, réaction du plan incliné ; en B
- $\vec{T}$, tension du ressort ; en A.

c. Déterminons l'intensité de la tension du ressort.

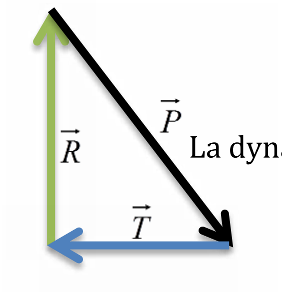
Condition d'équilibre : $\vec{R}+\vec{T}+\vec{P}=\vec{0}$ (*)

En projetant (*), on a :

$$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} \vec{R_x}+\vec{T_x}+\vec{P_x}=\vec{0_x} \\ \vec{R_y}+\vec{T_y}+\vec{P_y}=\vec{0_y} \end{cases} \xrightarrow{Algébrisation} \begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} 0+T_x-P_x=0 \\ R_y+0-P_y=0 \end{cases} \xrightarrow{intensité} \begin{cases} T=P_x=mg\sin\alpha=490N \\ R=P_y=mg\cos\alpha=848{,}71N \end{cases}$$

On sait que T = kℓ ⇒ $k=\dfrac{T}{\ell}$ = 1814,81 N/m.

d. Dynamique des forces



La dynamique étant fermée, on en déduit alors que le système est en équilibre.

4. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Plan incliné	Inclined plane
Dynamique des forces	Force dynamics

Sentence

"We say that a dynamic system is in equilibrium, when the forces define a closed system".

EXERCICES DE LA LEÇON 5 : NOTION D'ÉQUILIBRE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : forces coplanaires ; vecteur ; forces concourantes ; force de frottement ; force motrice.
2. Rappeler les conditions d'équilibre d'un solide soumis à deux forces, à trois forces.
3. Qu'est-ce que la dynamique des forces d'un système ? Pour un système soumis à deux forces, comment se présente-t-elle ? De même, comment se présente la dynamique des forces pour un système soumis à trois forces concourantes ? Quelle condition doit respecter cette dynamique, pour le système soit en équilibre ?
4. Répondre par vrai ou faux

4.1. Tout système de masse connue est au moins soumis à l'action de son poids.
4.2. La gifle est une action de contact.
4.3. La force du vent sur un caillou en mouvement, est une action repartie.
4.4. Lorsque l'on vise un caillou dans l'air, si à un moment le poids du caillou est égale à toutes les éventuelles résistances, alors, le caillou peut caler dans l'air sans bouger.
4.5. P = mg est la relation découverte par Newton.
4.6. La force motrice et la force de frottement, sont une et une même chose.
4.7. En absence de frottement, la réaction d'un support est différente de la réaction normale au plan.
4.8. Un solide initialement au repos et soumis à deux forces directement opposées, est en équilibre.
4.9. Une seule condition est suffisante et nécessaire pour qu'un solide soumis à deux ou trois forces soit en équilibre.

5. Choisir la bonne réponse.

5.1. On définit une grandeur G par : $G = x^n$ ($n \in \mathbb{Z}$), alors :
(a) $\Delta G = \Delta x^n$
(b) $\Delta G = |n\Delta x|$
(c) $\Delta G = |n| : |\Delta x|$

5.2. Un solide de masse m = 1kg, dans un lieu où g = 10 N/kg, est en équilibre sur une table horizontale. La réaction de la table a pour intensité :
(a) 10 kg
(b) 10 N
(c) 10 kg^2

5.3. Pour un solide soumis à trois forces non parallèles, laquelle des conditions ci-dessous est nécessaire et suffisante :
(a) La dynamique doit être fermée
(b) Les forces doivent être concourantes
(c) Les forces doivent avoir la même intensité.

5.4. Pour un ressort vertical ayant à une de ses extrémités un solide de masse connue, sa tension,
(a) Est égale au poids du solide
(b) Est opposée au poids du solide
(c) Est de même sens que le poids du solide.

5.5. Pour un solide soumis à plus de deux forces, pour évaluer les différentes intensités, il est nécessaire,
(a) D'effectuer des projections suivant les axes d'un repère bien défini, afin d'éliminer certaines forces suivant cette projection.
(b) De toujours négliger arbitrairement certaines forces.
(c) D'avoir une connaissance sur la nature du solide.

5.6. Les deux conditions d'équilibre d'un solide soumis à deux forces directement opposées sont :
(a) Nécessaires mais pas suffisantes,
(b) Nécessaires et suffisantes,
(c) Nécessaires, suffisantes et uniques,
pour son équilibre.

Conseil pour résoudre un exercice de dynamique

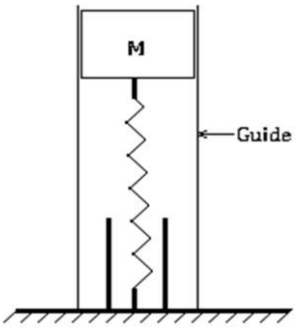
Avant de se mettre dans un éventuel raisonnement (graphique ou numérique) pour arriver au résultat, il est vital :

- De définir son système
- De définir le référentiel d'étude
- De faire un bilan graphique et littéral des différentes forces appliquées au système
- De bien prendre des données avec des notations compréhensives
- D'énoncer les lois ou théorèmes à utiliser
- De faire un raisonnement numérique et/ou graphique pour des éventuels calculs.

Pour simplifier, prendre **$g = 9{,}8$ N.kg^{-1}**

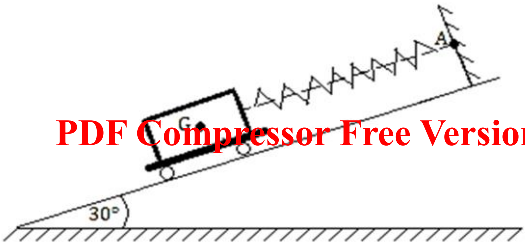
Exercice 2 : Applications des savoirs

1. Un ressort a une longueur à vide **$\ell_0 = 30$ cm**, sa masse est négligeable, sa raideur k est **80 N.m^{-1}**. On charge le ressort comme l'indique la figure ci-dessous (**M = 800 g**). Prendre **$g = 10$ N.kg^{-1}**.



1.1. Déterminer et représenter les actions qui s'exercent sur le ressort.
1.2. Quel serait le raccourcissement du ressort ainsi chargé ?

2. Un chariot de masse **m = 1000 g** est placé sur un plan incliné faisant un angle **$\alpha = 30°$** avec l'horizontale. (Figure ci-dessous).
Le chariot est retenu par un ressort de raideur **k = 80 N.m^{-1}**. Toute forme de frottement est négligée.



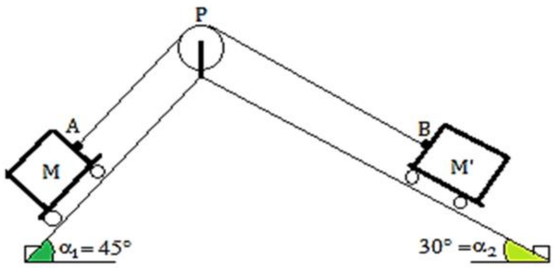
Déterminer :

2.1. La force exercée par le chariot sur le ressort.

2.2. L'action du plan sur le chariot.

2.3. L'allongement du ressort.

3. Deux chariots de masse M = 1,5 kg et M' sont disposés sur deux plans inclinés comme l'indique la figure ci-dessous.



Ils sont reliés par un fil inextensible de masse négligeable, passant sur une poulie P. On néglige tous les frottements.

L'ensemble étant en équilibre, déterminer :

3.1. La tension du fil AB.

3.2. La valeur de la masse M'.

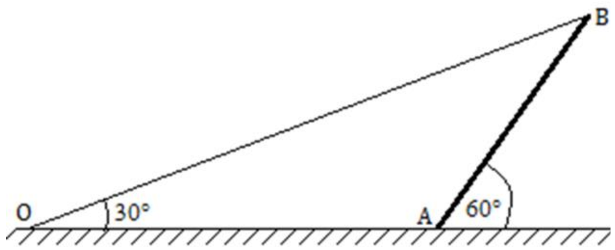
3.3. L'action du plan incliné sur les masses M et M'.

3.4. La dynamique des forces de chaque solide.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Forces et représentations

Le mât de charge d'un navire peut être assimilé à un segment AB de longueur 10 m. Il est homogène et a pour masse M = 100 kg. Il est en contact avec le pont du navire par son extrémité A, et fait un angle de 60° avec le pont horizontal.

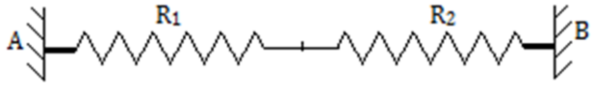


Un câble souple et de masse négligeable devant celle du mât, est fixé en un point O et en B au mât, tel que AB et OB forment un angle de 30° avec le pont. On étudie l'équilibre du mât alors qu'il ne soulève aucune charge.

Déterminer la réaction du pont sur le mât et la tension du câble.

Situation 2 : Équations et forces

Deux ressorts R_1 et R_2, tendus, de masse négligeable, sont placés horizontalement. On donne **AB = 45 cm.**



1. Quelle relation existe-t-il entre les tensions T_1 et T_2 des deux ressorts ? En déduire une relation entre les allongements a_1 et a_2 des ressorts. On donne $\mathbf{k_1 = 12\ N.m^{-1}}$, $\mathbf{k_2 = 18\ N.m^{-1}}$.

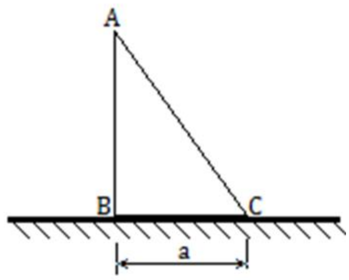
2. Les longueurs à vide des ressorts sont $\ell_{01} = 15$ cm et $\ell_{02} = 20$ cm. Trouver une autre relation entre a_1 et a_2.

3. Calculer a_1 et a_2. En déduire l'intensité des tensions

4. Déterminer les réactions des supports A et B et les représenter sur le schéma. Préciser l'échelle.

Situation 3 : Qu'est-ce que cela signifie ?

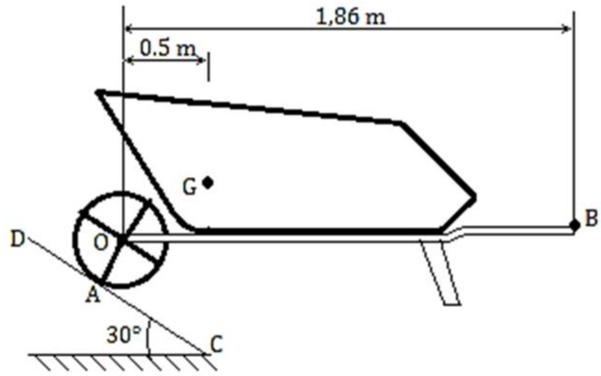
Une plaque homogène ABC de faible épaisseur est posée sur un plan horizontal par sa base BC.
Le poids de la plaque est P.



Déterminer l'action du plan sur la plaque.

Situation 4 : Manœuvre et brouette

La brouette ci-dessous a un poids total de 900 N (charge comprise). Ses caractéristiques sont définies sur la figure.
On néglige tous les frottements.



Étudier graphiquement l'équilibre de la brouette CD, sachant que le manœuvre qui soutient la brouette exerce sur celle-ci un effort localisé en B.

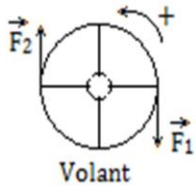
MODULE ⇒ MOUVEMENTS ET INTERACTIONS 2

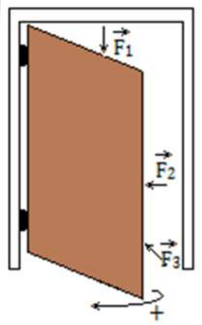
Leçon 6 ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE MOBILE AUTOUR D'UN AXE FIXE

ACTIVITÉ(S)

Observe les trois figures ci-contre puis réponds aux questions suivantes :

(1) Quelles sont les forces à l'origine de la rotation du volant et de l'ouverture de la porte ?
(2) Autour de quoi, tournent le volant et la porte ?
(3) Quelles sont les conditions pour qu'une force ait un effet de rotation ?





Objectifs

- ➲ Définir : moment d'une force ; axe de rotation ; force orthogonale à un axe ; couple de forces.
- ➲ Donner les conditions d'équilibre d'un solide en rotation
- ➲ Énoncer et appliquer le théorème des moments.
- ➲ Projeter une force dans un repère (O ; I ; Y) pour déterminer son moment.
- ➲ Utiliser la double condition d'équilibre, pour déterminer les intensités des forces.

1. Moment d'une force par rapport à un axe

1.1. Définition, symbole et unité

1.1.1. Définitions

- Axe de rotation : C'est toute droite (Δ) imaginaire formée de tous les points qui restent immobiles (fixes) pendant la rotation.
- Un solide mobile autour d'un axe fixe, est un solide capable d'effectuer un **mouvement de rotation** autour de cet axe. La trajectoire décrite par les points de ce solide est un **arc de cercle** ou simplement un **cercle**.
- Le **moment d'une force** par rapport à un axe (Δ) qui lui est orthogonal, est le produit de l'intensité de la force par la distance de l'axe à la droite d'action de la force. Il définit la capacité d'une force à faire tourner un système autour d'un axe.

1.1.2. Symbole et unités

- Le moment d'une force $\vec{F}$ par rapport à un axe (Δ) fixe est noté : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$ ou simplement $\mathcal{M}$.
- Unité : le moment s'exprime en Newton-mètre = **N.m**

1.2. Expression du moment d'une force

Notons F l'intensité de la force entrainant la rotation d'un système autour d'un axe fixe (Δ); d la distance de l'axe à la droite d'action de la force $\vec{F}$.
D'après la définition du moment d'une force, on a :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \times d \qquad (6.1)$$

<u>Unités</u> : F(N) ; d (m) ; $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$ (N.m)

Conséquences liées à (6.1)

- Si le système rote dans le sens arbitrairement choisi, alors, **$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) \succ 0$** (I₁)
  La force est alors dite **motrice**.

- Si le système rote dans le sens contraire du sens arbitrairement choisi, alors, **$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) \prec 0$** (I₂)
  La force est alors dite **résistante**.
- Si $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = 0 \Rightarrow \mathrm{d} = 0$ m. cela signifie que lorsque l'axe de rotation passe par le centre d'inertie d'un solide, celui-ci soit en **équilibre indifférent**. Le moment du poids est par conséquent nul.

Remarque

- Toutes les forces de résistance ont un moment résistant **$\mathcal{M} \prec 0$**.
- Toutes les forces motrices ont un moment moteur i.e. **$\mathcal{M} \succ 0$**.
- Le moment est donc une grandeur scalaire algébrique i.e. possède un signe.
- Le sens de rotation du système est général arbitraire.
- Le sens de rotation trigonométrique est le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre.

1.3. Force orthogonale à un axe

- On dit qu'une force est **orthogonale** à un axe (Δ), si elle est située dans un plan **perpendiculaire** à cet axe.

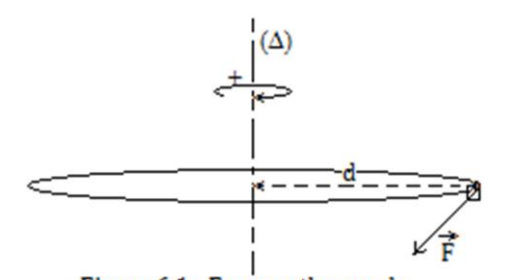


Figure 6.1 : Force orthogonale

- On constate alors que pour qu'il y ait moment, il faudrait que la force soit perpendiculaire à la distance séparant l'axe de symétrie et la droite d'action de ladite.
- Considérons la figure 6.2 ci-dessous.

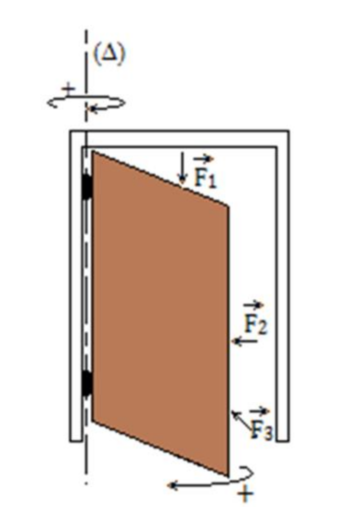


Figure 6.2 : Effet de rotation

Selon cette figure :
- La force $\vec{F}_1$, **parallèle** à (Δ), se contente d'appuyer vers le bas, la porte ; elle ne favorise par conséquent pas sa rotation (porte).
- La force $\vec{F}_2$, **perpendiculaire** à (Δ), favorise la rotation de la porte.
- La force $\vec{F}_3$, dont la droite d'action **rencontre** (Δ), appuie contre le mur, la porte. Elle ne favorise dont pas sa rotation.

Conclusion

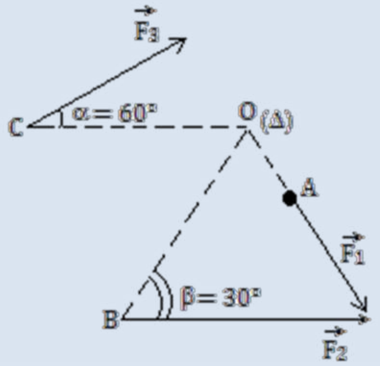
Soit (S) un solide en rotation autour d'un axe (Δ) fixe :
- Toute force parallèle à (Δ) n'a pas d'effet de rotation sur (S), son moment est par conséquent nul.
- Toute force dont la droite d'action rencontre (Δ) n'a pas d'effet de rotation sur (S) ; son moment est donc nul.
- Toute force dite orthogonale à (Δ) a un effet de rotation sur (S).

Remarque

- Lorsqu'une force un angle ≠ π/2, il est alors nécessaire de faire des projections de cette force sur des axes afin de déterminer la composante favorisant la rotation.
- Le moment est distributif par rapport à l'addition i.e. $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) = \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2)$ **(6.2)**

Exemple

(Δ) est un axe perpendiculaire au plan de la figure dans lequel se trouvent les forces $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ et $\vec{F}_3$. Calculer les moments de ces trois forces par rapport à (Δ), sachant que : $F_1 = 3$ N, $F_2 = 6$ N, $F_3 = 4$ N, OA = 5 cm, OB = 10 cm, OC = 30 cm.



Solution

En observant les projections ci-contre, on aura :

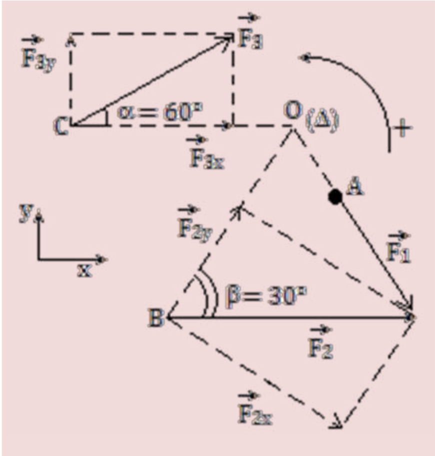
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = 0$ N.m, car sa droite d'action rencontre l'axe (Δ).
- $\vec{F}_2 = \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{2y} \Rightarrow M_\Delta(\vec{F}_2) = M_\Delta(\vec{F}_{2x}) + \underbrace{M_\Delta(\vec{F}_{2y})}_{0} = F_{2x} \times OB$

  avec $F_{2x} = F_2 \times \sin\beta \Rightarrow$ $\boxed{\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = F_2 \times OB \times \sin\beta}$

  <u>AN</u> : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = 0{,}3$ N.m
- $\vec{F}_3 = \vec{F}_{3x} + \vec{F}_{3y} \Rightarrow M_\Delta(\vec{F}_3) = \underbrace{M_\Delta(\vec{F}_{3x})}_{0} + M_\Delta(\vec{F}_{3y}) = -F_{3y} \times OC$

  avec $F_{3y} = F_3 \times \sin\alpha \Rightarrow$ $M_\Delta(\vec{F}_3) = -F_3 \times OC \times \sin\alpha$.

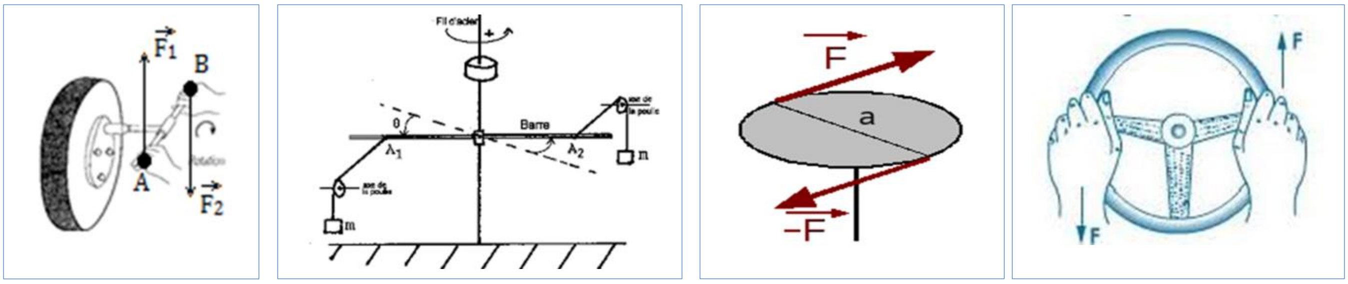
  <u>AN</u> : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_3) = -1{,}04$ N.m



2. Couple de forces

2.1. Définition

- Un couple de forces est un système de deux forces situées dans le même plan, étant parallèles, ayant de sens contraires, de droites d'action différentes mais de même intensité.
- Le plan contenant les deux forces est appelé plan de couple.
- En pratique, un couple de forces tend à mettre en rotation un système.
- Exemples de système de couple de forces : volant de voiture, le tire-bouchon, le guidon de moto ou de vélo, le tournevis, la clé à roues, etc.



<u>Figure 6.3</u> : Exemples de mécanismes utilisant un système de couple de forces

Remarque

Contrairement au moment d'une force, le couple ne dépend pas du point par rapport auquel il est évalué.

- Moment du couple de forces
  Considérons pour cela, la figure 6.4 ci-contre.

Sachant que le moment est distributif, on a :

- $M_{\Delta}\left(\vec{F_1},\vec{F_2}\right)=M_{\Delta}\left(\vec{F_1}\right)+M_{\Delta}\left(\vec{F_2}\right)$ **(6.3)**

  $M_{\Delta}\left(\vec{F_1},\vec{F_2}\right)=F_1\cdot r_1+F_2\cdot r_2$

  Or $F_1 = F_2 = F$ et $r_1 = r_2 = r$, (6.3) devient,

- $M_{\Delta}\left(\vec{F_1},\vec{F_2}\right)=2F\cdot r$ **(6.4)**

  Posons $D = 2r$, le diamètre du cercle décrit par le couple de forces ; (6.4) devient alors,

- $M_{\Delta}\left(\vec{F_1},\vec{F_2}\right)=F\cdot D$ **(6.5)**

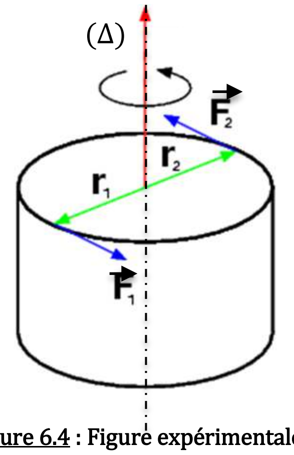


Figure 6.4 : Figure expérimentale

2.2. Le couple de torsion

Considérons le schéma simplifié d'une balance de torsion de la figure 6.5 ci-dessous.

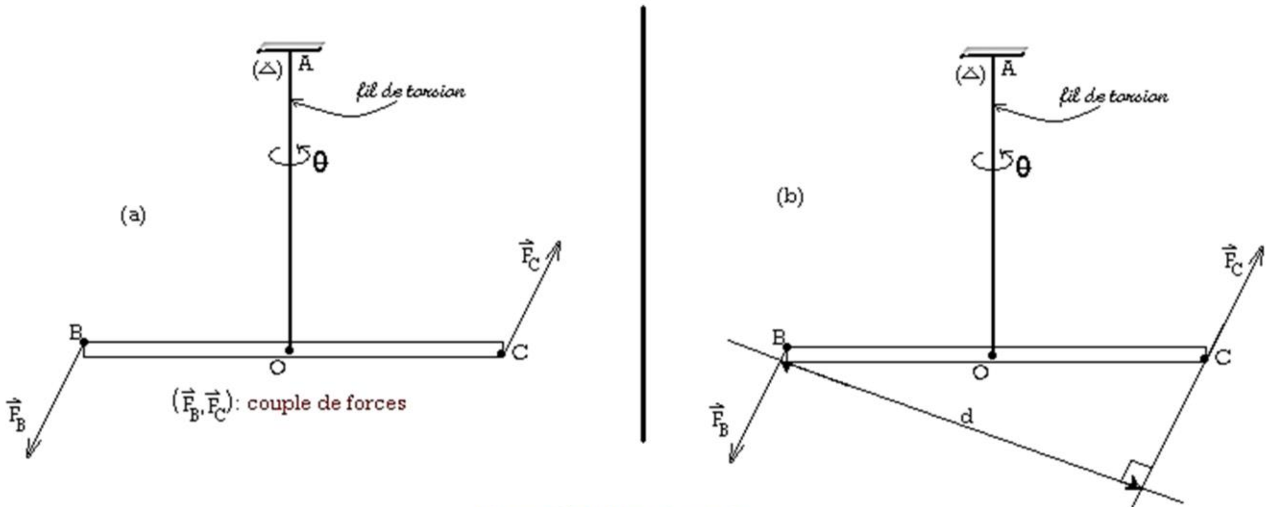


Figure 6.5 : Balance de torsion

- **Observation**
  - Effet de **rotation** de la tige BC
  - Effet de **torsion** du fil OA d'un angle **θ**.

Conclusion

Un couple de torsion noté C_T, est l'équivalent d'un couple de forces C_F.

- **Résultats**

  L'intensité des forces étant donnée, l'effet du couple ne dépend pas de la position des droites d'action des forces pourvue que leur distance reste constante.
  - Moment du couple de forces $\mathcal{M}(C_F)$

  $\mathcal{M}(C_F) = F_B \times d = F_C \times d = F \times d$ (car $F = F_B = F_C$) **(6.6)**

  - Moment du couple de torsion $\mathcal{M}(C_T)$

  $\mathcal{M}(C_T) = C \times \theta$ **(6.7)**

Unités : C (N.m.rad^{-1}) = constante de torsion du fil ; θ (rad) = angle de torsion ; $\mathcal{M}(C_T)$ (N.m).

Remarque

À l'équilibre, $\begin{cases} M(C_F) = M(C_T) \\ F \cdot d = C \cdot \theta \end{cases}$ (6.8)

Exemple

Pour tordre le fil d'une balance de torsion d'un angle de torsion égal à π/3 radian, on exerce aux extrémités de la barre horizontale, un couple de forces d'égale intensité valant 10 N et distantes de 25cm. Déterminer la constante de torsion du fil à l'équilibre.

Solution

Données : F = 10 N ; θ = π/3 = 1,05 rad ; d = 25cm = 0,25 m ; C = ?

D'après (6.8), on a : F×d = C×θ $\Rightarrow C = \dfrac{F \cdot d}{\theta}$

AN : C = 2,38 N.m.rad^{-1}.

3. Condition d'équilibre d'un solide mobile d'un solide

3.1. Étude expérimentale

3.1.1. Dispositif expérimental

Considérons le système ci-dessous comme une sorte de grue.

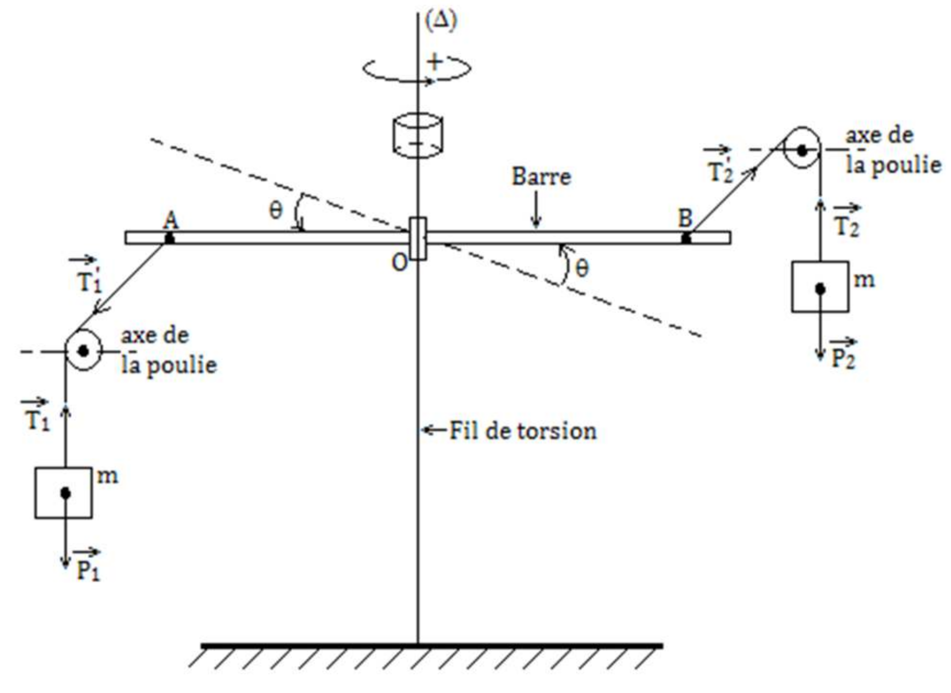


Figure 6.6 : Mise en évidence des conditions d'équilibre.

3.1.2. Interprétation

- Les systèmes formé des solides de masse m sont en équilibre si à chaque instant on a :

$$\begin{cases} \vec{T_1} + \vec{P_1} = \vec{0} \\ \vec{T_2} + \vec{P_2} = \vec{0} \end{cases} \quad (S)$$

- Les fils étant inextensibles, on a alors :

$$\begin{cases} \overrightarrow{T_1'} = -\overrightarrow{T_1} = \overrightarrow{P_1} = m\vec{g} \\ \overrightarrow{T_2'} = -\overrightarrow{T_2} = m\vec{g} \end{cases} \qquad (S')$$

- Dans le système de la figure 6.6, seules les tensions $\overrightarrow{T_1'}$ et $\overrightarrow{T_2'}$ sont situées dans un plan orthogonal à (Δ), elles sont donc susceptibles de produire la rotation de la barre provoquant ainsi la torsion du fil : on a alors un couple de force et un couple de torsion.

$$\begin{cases} M_\Delta(C_F) = T_1' \cdot AB = T_2' \cdot AB \\ M_\Delta(C_T) = C \cdot \theta \end{cases} \qquad (6.9)$$

3.1.3. Résultat

Le résultat obtenu dans cette expérience, est tout simplement la conséquence du système (S). Nous avons montré plus-haut que le moment est distributif, en multipliant alors (S) par le moment, on aura :

$$\begin{cases} M_\Delta\left(\overrightarrow{T_1}\right) + M_\Delta\left(\overrightarrow{P_1}\right) = 0 \\ M_\Delta\left(\overrightarrow{T_2}\right) + M_\Delta\left(\overrightarrow{P_2}\right) = 0 \end{cases} \qquad (S'')$$

3.1.4. Conclusion

Pour un système susceptible d'effectuer un mouvement de rotation, la somme algébrique des moments est nulle : c'est le **théorème des moments**.

3.2. Théorème des moments

Énoncé

« Lorsqu'un solide mobile autour d'un axe fixe est en équilibre sous l'action des forces orthogonales, la somme algébrique des moments des forces par rapport à cet axe est nulle : équilibre ⇒ $\sum_{i=1}^{n} M_\Delta\left(\overrightarrow{F_i}\right) = M_\Delta\left(\overrightarrow{F_1}\right) + M_\Delta\left(\overrightarrow{F_2}\right) + \cdots + M_\Delta\left(\overrightarrow{F_n}\right) = 0$ ».

3.3. Généralisation : conditions d'équilibre d'un solide

À partir des observations faites depuis la leçon 5 et celles présentes dans cette leçon, on est en droit de généraliser les conditions d'équilibre d'un système de la manière suivante :
Pour qu'un solide soumis à l'action de plusieurs forces soit en équilibre par rapport à un repère lié à la Terre, il est nécessaire que les deux conditions ci-dessous soient à tout instant satisfaites :

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n} \overrightarrow{F_i} = \vec{0} \\ \sum_{i=1}^{n} M_\Delta\left(\overrightarrow{F_i}\right) = 0 \end{cases} \qquad (6.10)$$

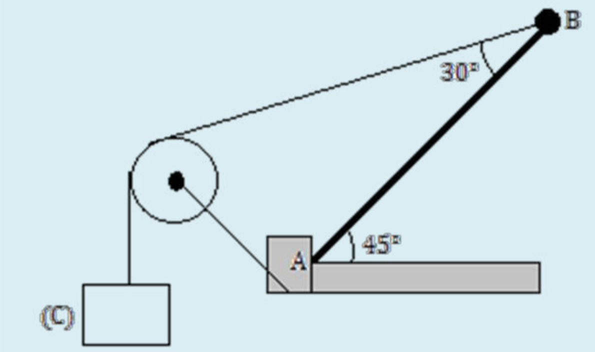
Remarque

- La formule (6.10) est appelée double condition d'équilibre.
- L'une des conditions de (6.10) sans l'autre n'est pas suffisante pour justifier de l'équilibre d'un système.
- La condition (6.10.1) peut signifier que soit le système est au repos soit en mouvement de translation rectiligne uniforme et (6.10.2) que le système est en rotation uniforme ou est au repos.

- Si les deux conditions de (6.10) sont réunies, ont dit alors qu'elles sont **nécessaires** et **suffisantes**.

Exemple : Exercice 4p101 (Collection Excellence, physique 2nde C)

On maintient une poutre AB en équilibre statique à l'aide d'une charge (C) de masse négligeable, passant par une poulie comme l'indique la figure ci-dessous.



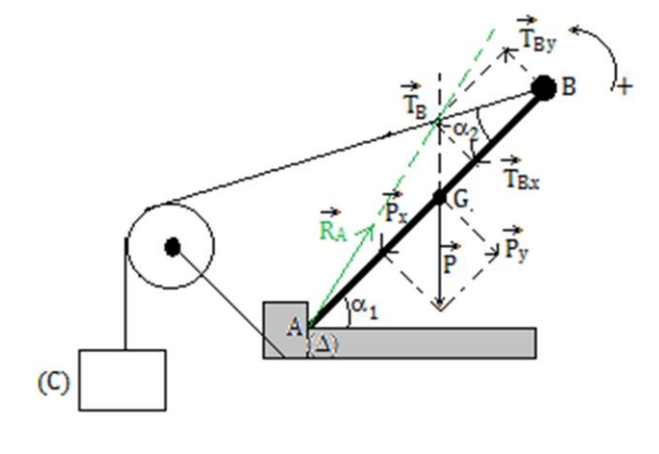
La poutre a une longueur de 8 m et une masse de 50kg et fait un angle de $\alpha_1 = 45°$ avec l'horizontal et $\alpha_2 = 30°$ avec le câble.

1. Faire l'inventaire des forces appliquées à la poutre et les représenter.
2. Déterminer l'intensité de la tension du câble en B.
3. Déterminer l'intensité de la réaction en A ainsi que sa direction par rapport à l'horizontal.

Solution

Données : poutre (L = AB = 8m ; m = 50 kg ; $\alpha_1 = 45°$; $\alpha_2 = 30°$) ; g = 9,8 N.kg^{-1}.

1. Inventaire des forces (représentation, voir figure ci-contre)
   - $\vec{T}_B$, tension du fil ; en B
   - $\vec{P}$, poids de la poutre ; en G. (AG = GB)
   - $\vec{R}_A$, réaction du PH ; en A.
2. Déterminons l'intensité de la tension en B.
   En utilisant le théorème des moments et en s'accordant sur le fait que le moment du poids est résistant, on a :
   $$M_\Delta\left(\vec{T}_A\right) + M_\Delta\left(\vec{P}\right) + \underbrace{M_\Delta\left(\vec{R}_A\right)}_{0} = 0$$



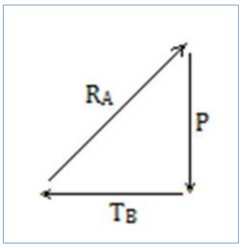
$$\Rightarrow T_{Bx}\cdot AB - P_y \cdot AG = 0 \quad \text{Or} \begin{cases} T_{Bx} = T_B \sin\alpha_1 \\ P_y = mg\cos\alpha_2 \\ AG = \dfrac{1}{2}AB \end{cases} \Rightarrow \boxed{T_B = \frac{mg}{2}\times\frac{\cos\alpha_1}{\sin\alpha_2}}$$

AN : $T_B = 346{,}48$ N.

3. Voir figure pour la direction et le sens de la réaction en A.

   Déterminons l'intensité de la réaction en A.
   En utilisant la dynamique des forces ci-contre, et la propriété de Pythagore,
   On a : $R_A = \sqrt{P^2 + T_B^2} = \sqrt{(mg)^2 + T_B^2}$

   AN : $R_A = 600{,}12$ N ≈ 600 N.



4. Applications du théorème des moments

4.1. La poulie fixe

- La poulie est un solide de rayon r, mobile en rotation autour d'un axe passant par son centre.

- Lorsqu'on isole la poulie, le bilan des forces qui lui sont appliquées est le suivant :

$$\begin{cases} \vec{p}, \text{poids de la poulie en } O \\ \vec{R}, \text{réaction du point d'appuide la poulie} \\ \vec{T}, \text{tension du fil du à la charge de masse } m \\ \vec{F} = \vec{T'}, \text{force motrice} \end{cases}$$

- Conditions d'équilibre :

$$\begin{cases} \vec{p} + \vec{R} + \vec{T} + \vec{T'} = \vec{0} \\ \underbrace{M_\Delta(\vec{p})}_{0} + \underbrace{M_\Delta(\vec{R})}_{0} + M_\Delta(\vec{T'}) + M_\Delta(\vec{T}) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \vec{p} + \vec{R} + \vec{T} + \vec{T'} = \vec{0} \\ -T \cdot r + T' \cdot r = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \vec{p} + \vec{R} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0} \\ T = P = T' = F = mg \end{cases} \qquad (6.11)$$

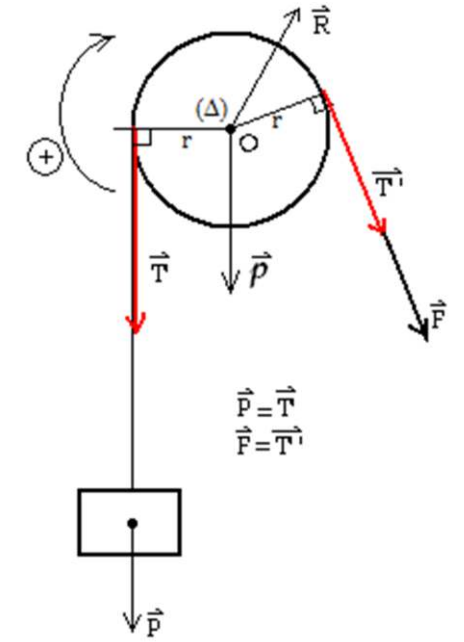


Figure 6.7 : Poulie Simple

4.2. Le treuil

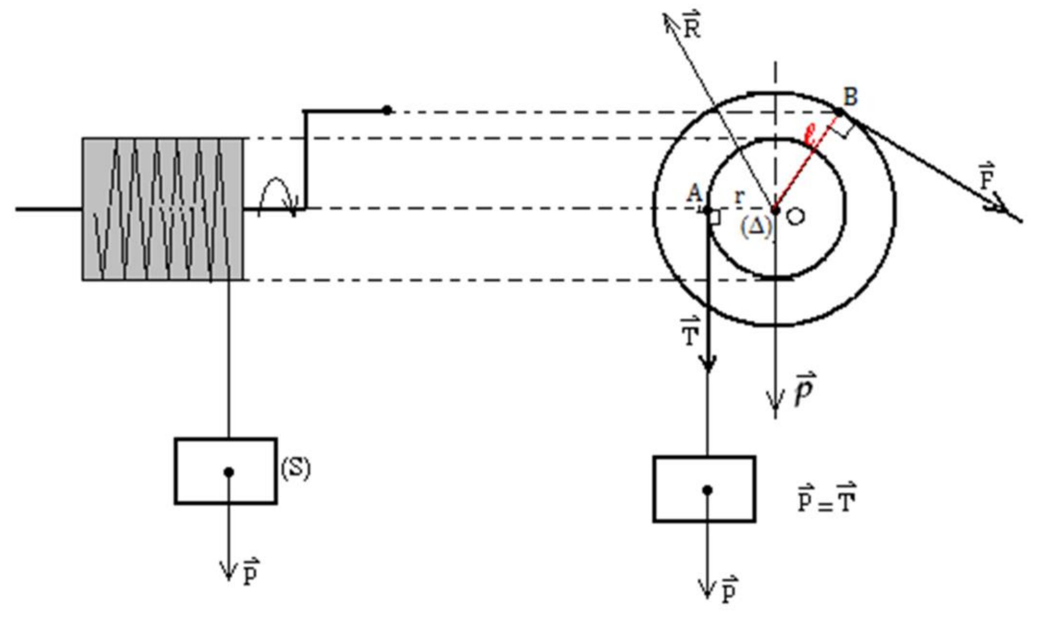


Figure 6.8 : Treuil

- Isolons le treuil (le mouvement du solide (S) de masse m est rectiligne uniforme)

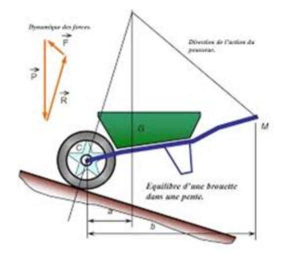
- Bilan des forces : $\begin{cases} \vec{p}, \text{poids du treuil, en } O \\ \vec{F}, \text{force motrice ou de traction, en } B \\ \vec{R}, \text{réaction de l'axe } (\Delta), \text{en } O \\ \vec{T}, \text{tension de la corde, en } A \end{cases}$

- Conditions d'équilibre : $\begin{cases} \vec{p} + \vec{F} + \vec{R} + \vec{T} = \vec{0} & (*) \\ \underbrace{M_\Delta(\vec{p})}_{0} + M_\Delta(\vec{F}) + \underbrace{M_\Delta(\vec{R})}_{0} + M_\Delta(\vec{T} = \vec{P}) = 0 & (**) \end{cases}$

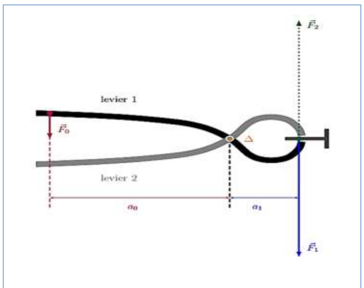
- Dans (**), $F = \frac{r}{\ell}T = \frac{r}{\ell}P = \frac{r}{\ell}\times mg$ (6.12)

4.3. Le levier

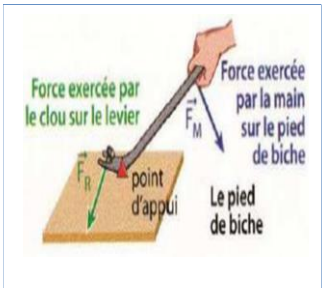
- Un **levier** est solide très rigide, mobile autour d'un point appelé **point d'appui**.
- Le **bras de levier** est la distance d'une force à son point d'appui, mesurée perpendiculairement à la direction de cette force.
- Le levier est utilisé pour soulever des charges lourdes. On distingue :


Brouette


Balance de type romaine



Pince



Pied de biche

- Étude d'un cas : arrache clou

- Bilan des forces

$$\begin{cases} \vec{F}, force\ motrice, en\ A \\ \vec{R}, réaction\ du\ PH, en\ O \\ \vec{T}, force\ exercée\ sur\ le\ mateau \end{cases}$$

- Conditions d'équilibre

$$\begin{cases} \vec{F} + \vec{R} + \vec{T} = \vec{0} \\ M_\Delta(\vec{F}) + \underbrace{M_\Delta(\vec{R})}_{0} + M_\Delta(\vec{T}) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad F = \frac{d_2}{d_1}T \qquad (6.13)$$

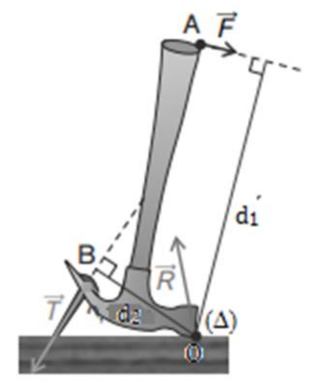


Figure 6.9 : Levier

5. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Treuil	Winch, windlass
Levier	Lever
Poulie	Pulley
Clou	Nail

Sentences

- When a solid mobile around a fixed axis is in equilibrium under the action of orthogonal forces, the algebraic sum of the moments of the forces relative to this axis is zero.
- The lever arm is the distance of a force from its point of support, measured perpendicular to the direction of that force.

EXERCICES DE LA LEÇON 6 : ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE MOBILE AUTOUR D'UN AXE FIXE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : axe de rotation ; levier ; couple de forces ; moment d'une force orthogonale.
2. Énoncer le théorème des moments.
3. Rappeler la double condition d'équilibre.

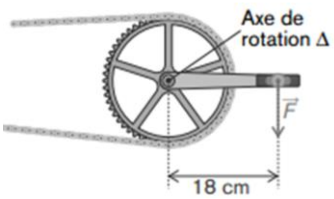
4. QCM (vous pouvez choisir plus d'une réponse)

4.1. Un solide est mobile autour de l'axe (Δ), une force appliquée au solide est parallèle à (Δ). Alors, la force :
- (a) S'oppose à la rotation du solide autour de son axe.
- (b) Favorise la rotation du solide autour de son axe.
- (c) N'a aucun effet de rotation sur le solide.

4.2. Un couple de forces est un ensemble de deux forces
- (a) De même direction, de même sens et de même intensité.
- (b) De même direction, de sens contraire et de même intensité.
- (c) De même direction, de même sens mais d'intensités différentes.

4.3. Une poignée de porte n'est jamais placée au voisinage de l'axe de rotation formé par les gonds pour :
- (a) Raccourcir le bras de levier
- (b) Allonger le bras de levier
- (c) Des raisons d'esthétique.

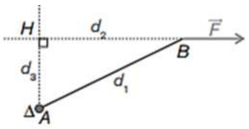
4.4. Un cycliste exerce sur la pédale de son vélo une force de 360 N. La longueur de la manivelle du pédalier est 18 cm.



Le moment de la force par rapport à l'axe de rotation Δ est :
- (a) 6480 Nm
- (b) 20 Nm
- (c) 64,8 Nm
- (d) 2000 Nm

4.5. Le moment d'une force par rapport à un axe est nul si :
- (a) La droite d'action de la force coupe l'axe de rotation.
- (b) La distance entre la droite d'action de la force et l'axe de rotation est très grande.
- (c) L'intensité de la force est très importante.

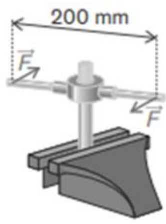
4.6. La barre AB pivote autour de l'axe de rotation Δ.



Le moment de la force $\vec{F}$ par rapport à l'axe Δ s'écrit :
- (a) $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \times d_1$
- (b) $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \times d_2$
- (c) $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \times d_3$.

4.7. Une filière est utilisée pour fileter une tige métallique. On applique des forces de même intensité aux extrémités de la tige comme indiqué sur le schéma (F = 50 N).

La distance entre les droites d'action des forces est 200 mm. Le moment du couple de forces est égal à :



- (a) 10 Nm
- (b) 10000 Nm
- (c) 250 Nm
- (d) 0,25 Nm

5. Vrai ou faux

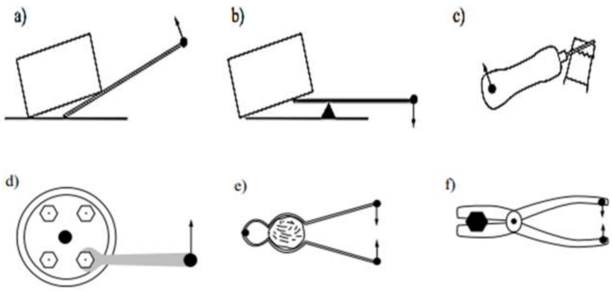
5.1. Le moment d'une force est une grandeur physique algébrique.

5.2. Dans un couple, les forces ont même droite d'action.

5.3. Le moment d'une force est distributif par rapport à la multiplication.

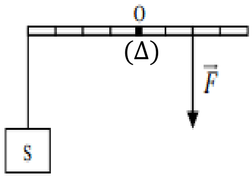
5.4. La condition $\sum \vec{F} = \vec{0}$ est suffisante pour justifier l'équilibre d'un système.

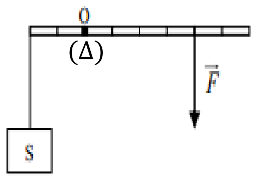
6. Indiquer sur les figures ci-dessous les vecteurs forces qui agissent sur le levier. Préciser s'il s'agit d'un levier à un bras ou a deux bras.



Exercice 2 : Application des savoirs

1. Une barre homogène AB, est mobile autour d'un axe (Δ). Un solide (S) de poids d'intensité 3N est accroché en A sur cette barre comme l'indique la figure ci-dessous.





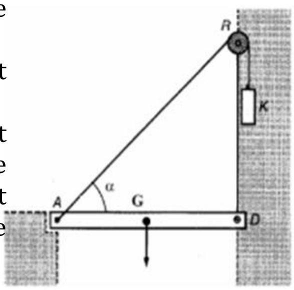
Déterminer dans chacun des cas, l'intensité de la force $\vec{F}$ à appliquer pour maintenir la barre horizontale.

2. La barre homogène de longueur ℓ = AB = 8 cm, de poids P = 40 N, est en équilibre en position horizontale, comme le montre la figure ci-dessous, avec OA = 20 cm.

Quelle doit être la charge F pour que l'équilibre soit réalisé ?

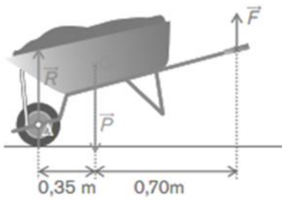
3. On veut soulever le pont-levis à l'aide du corps K qui exerce une force de traction $\vec{T}$ sur le pont. La longueur du pont est ℓ = DA = 6 m, sa masse 800 kg et l'angle α = 60°.

3.1. Déterminer les bras de levier de P de T.
3.2. Déterminer l'intensité T et la masse du corps K.
3.3. Déterminer graphiquement la force exercée par l'axe de rotation en D contre le pont ainsi que l'angle que cette force forme avec l'horizontale.



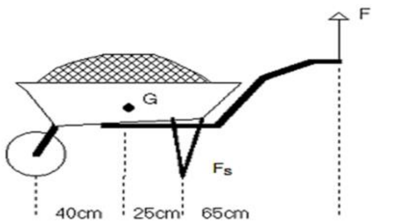
4. Un jardinier exerce une force de 500 N pour transporter une charge totale de 1500 N.

4.1. Définir, l'objet d'étude.
4.2. Faire l'inventaire des forces qui s'exercent sur l'objet d'étude.
4.3. Identifier l'axe de rotation.
4.4. Déterminer le bras de levier de chacune des forces.



4.5. Calculer le moment de chaque force par rapport à l'axe de rotation.

5. La brouette de masse 20 kg, contient 60 kg de sable. G est le centre de gravité du système (brouette + sable).



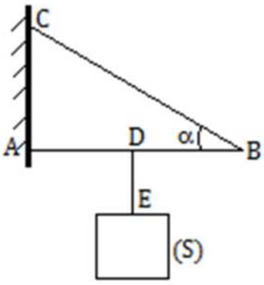
5.1. De quel type de levier s'agit-il ? Justifier.
5.2. Déterminer la force F verticale qu'on doit appliquer sur les poignées pour la soulever.
5.3. Déterminer la force F_S avec laquelle le sol doit supporter les pieds de la brouette (sol horizontal)

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Équilibre d'une barre

AB est une barre scellée au mur en A. Elle est maintenue horizontale grâce à un fil BC. Un solide (S), de masse m, est accroché à la barre AB par l'intermédiaire d'un fil DE. La barre et les fils sont de masse négligeable. AD = DB

Déterminer et représenter, la réaction du mur en A et la tension du fil BC.
Application numérique :
α = 30° ; m = 3kg ; g = 10 N.kg⁻¹.



Situation 2

Un homme maintient en équilibre un panneau de poids P = 800N, de longueur OA = 3m, dans une position inclinée d'un angle α = 60° avec le sol horizontal. Il exerce en H, à la distance OH = 2m, une force perpendiculaire au panneau, dont le sens est indiqué sur la figure.

- Calculer l'intensité de la force $\vec{F}$ sachant que le poids de la tige s'applique en G tel que OG = 1,20 m.
- Calculer la force exercée en O par le sol sur le panneau et l'angle β qu'elle fait avec le sol puis la représenter. Préciser l'échelle.

(Rép. F = 235 N ; R = 698 N ; β = 73°)

Situation 3 : Exploitation de document

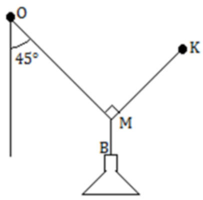
Une personne désirant desserrer un boulon de roue utilise une clé à manche télescopique. Elle exerce une force sur la manche de la clé afin d'entraîner le boulon dans un mouvement de rotation autour de son axe.

Schéma 1 | Schéma 2 | Schéma 3

En exploitant ce document, répondez aux questions suivantes :
- Quels sont les facteurs dont dépend l'effet de rotation d'une force ?
- Quel nom donne-t-on à l'effet de rotation d'une force ?

Situation 5 : Le lampadaire

Un lampadaire est constitué d'un chapeau maintenu par un fil inextensible et sans masse OB. Grâce à un crochet placé en un point M du fil, on peut donner au chapeau une autre position permettant d'éclairer un autre point de la salle. À ce moment, les fils OM et MK sont perpendiculaires,OM fait un angle de 45° avec la verticale. La masse du chapeau est m = 800 g. Déterminer les tensions des fils OM, MB et MK.



MODULE ⇒ **MOUVEMENTS ET INTERACTIONS** 2

Leçon 7

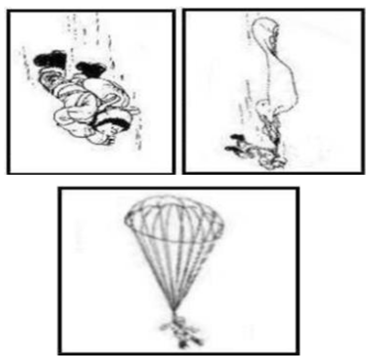
LA PREMIÈRE LOI DE NEWTON SUR LE MOUVEMENT : LE PRINCIPE DE L'INERTIE

ACTIVITÉ(S)

On étudie la chute d'un parachutiste dans le référentiel terrestre.

(a) Quelles sont les forces agissant sur le système {parachutiste + parachute} ? Ces forces se compensent-elles ?

(b) Au bout d'un certain temps, le mouvement du système est rectiligne uniforme. Comment peux-tu interpréter ce mouvement à l'aide des lois de la mécanique ?



Objectifs

- Définir : système isolé ; centre d'inertie ; système pseudo-isolé ; référentiel galiléen ; etc.
- Énoncer le principe de l'inertie.
- Connaître le centre de masse ou d'inertie de certains solides
- Savoir déterminer le centre d'inertie d'un corps par calcul.

1. Système isolé – système pseudo-isolé

On considère le système ci-contre présentant une pierre sur un sol horizontal.
Nous allons scinder ce système en sous-systèmes, permettant ainsi de mettre en lumière les notions de forces intérieures et de forces extérieures.

- **Système 1 (S_1)** : {pierre}
- **Système 2 (S_2)** : {sol}
- **Système 3 (S_3)** : {pierre + sol + Terre}

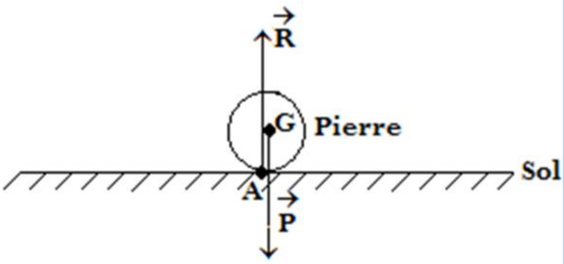


Figure 7.1 : Illustration

Systèmes	Force(s) intérieure(s)	Force(s) extérieure(s)
(S_1)	Rien	$\vec{P}$ et $\vec{R}$
(S_2)	Rien	$\vec{P}$ et $\vec{R}$
(S_3)	Toutes les forces	Rien

1.1. Définitions

- **Force extérieure** : C'est toute force qu'exerce une particule sur un système, elle-même n'appartenant pas au système.
- **Force intérieure** : C'est toute force qu'exerce une particule sur un système, elle-même appartenant au système.
- **Système** : C'est un objet (ou un ensemble d'objets) dont on étudie le mouvement et les forces qu'il subit.

- **Système isolé** : C'est tout système qui n'est soumis à aucune force extérieure.
- **Système pseudo-isolé** : C'est tout système pour lequel, la somme vectorielle des forces extérieures qui s'exercent sur ce système est nulle.

Remarque

Il est pratiquement impossible de réaliser un système isolé car tout corps possédant une masse non nulle, est au moins soumis à l'attraction de la Terre.

1.2. Exemples de système isolé

En réalité, il n'existe aucun système physique isolé. Mais par des considérations et des approximations, on peut citer comme système isolé :
- L'univers tout entier (cependant cela est encore à vérifier)
- Les systèmes adiabatiques car ceux-ci ne permettent aucun échange avec l'extérieur par conséquent conservent leur masse et leur énergie.
- Etc.

2. Énoncé de la première loi de Newton sur le mouvement

Énoncé

Le centre d'un système isolé ou pseudo-isolé est :
- Au **repos** si le système est initialement au repos ;
- Animé d'un **mouvement rectiligne uniforme**, si le système est initialement en mouvement

Il découle de ce principe que : si $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0}$ alors $\vec{V} = \overrightarrow{constante}$ **(7.1)**

3. Référentiels galiléens

3.1. Définition

- Un **référentiel galiléen** ou **inertiel** est un référentiel dans lequel le principe d'inertie est valable. C'est aussi un référentiel dans lequel le centre d'inertie d'un solide soumis à des forces de somme nulle, a un mouvement uniforme ou est au repos.
- En physique, l'**inertie** d'un corps (dans un référentiel inertiel), est sa tendance à conserver sa vitesse i.e. son mouvement.

3.2. Exemples de référentiels galiléens

- Le **référentiel héliocentrique** ou de Copernic dont l'origine est considérée comme étant au centre du soleil ;
- Le **référentiel géocentrique** ou de **Coriolis** dont l'origine est au centre de la Terre
- Le **référentiel terrestre** ou de **laboratoire** est considéré comme galiléen lorsque l'expérience est de courte durée (**< 1 h 50min**).

4. Exemples d'utilisation du principe de l'inertie

4.1. Solide en translation rectiligne uniforme

Considérons un solide de masse m en mouvement rectiligne uniforme sur un plan horizontal comme l'illustre la figure 7.2 ci-dessous.

- Les forces extérieures exercées au solide sont :
  - Son poids $\vec{P}$ qui s'applique au centre de gravité G appelé centre d'inertie du solide
  - La force motrice $\vec{F}$ qui s'applique en B.
  - La réaction $\vec{R}$ du sol en A.
- On constate, étant donné que le solide soit en mouvement rectiligne uniforme, que :

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0} \qquad (7.2)$$

- De cette relation, il en découle que la vitesse V_G du centre d'inertie G du mobile est constante et est telle que $\overrightarrow{V_G} = \overrightarrow{cste}$

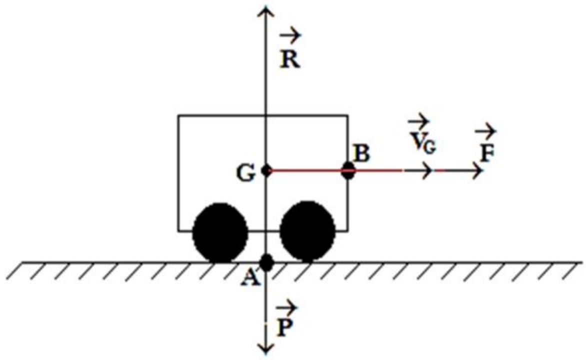


Figure 7.2 : Mouvement rectiligne d'un solide

4.2. Solide en équilibre

Considérons la figure ci-contre présentant une planche fixée à l'extrémité inférieure d'un fil inextensible et de masse négligeable dont l'extrémité supérieure est fixée en O sur un support.

- La planche est soumise à deux forces à savoir :
  - La tension $\vec{T}$ du fil en A
  - Son poids $\vec{P}$ en G.
- La condition d'équilibre de la planche montre que $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$

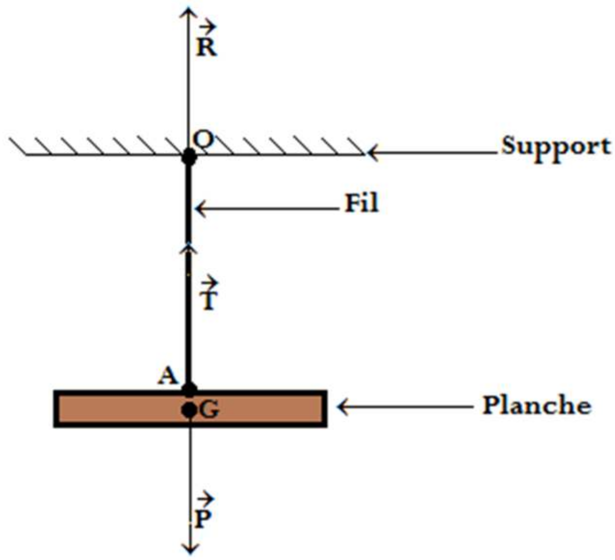


Figure 7.3 : Barra horizontale suspendue à un fil inextensible

D'après le principe des actions réciproques (3e loi de Newton), on constate que la planche est en équilibre, par conséquent, le système est au repos.

4.3. Centre d'inertie de certaines figures

- Pour un solide indéformable, le centre d'inertie est aussi appelé centre de masse ou centre de gravité. Il est noté G.
- Pour un solide déformable, le centre de masse est différent du centre de gravité ou d'inertie.
- Exemples

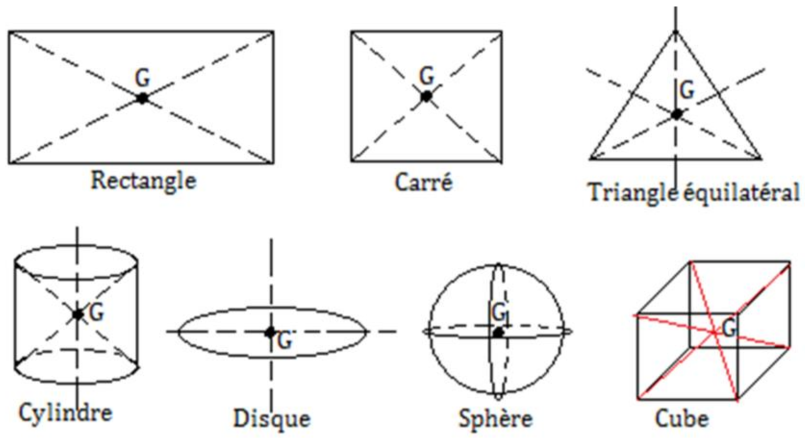


Figure 7.4 : Centre d'inertie de quelques solides particuliers.

4.4. Détermination du centre d'inertie d'un solide par calcul

- Considérons un corps constitué de petits corps de masses m_1, m_2, …, m_n, placés respectivement aux points G_1, G_2,…, G_n. On appelle centre de masse G, le barycentre des points pondérés (G_1, m_1), (G_2, m_2), …, (G_n, m_n) i.e.

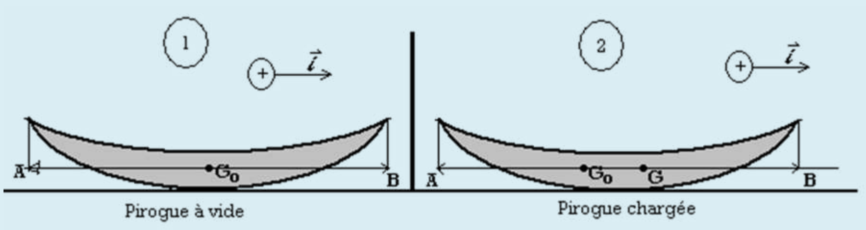
$$m_1\overrightarrow{GG_1} + m_2\overrightarrow{GG_2} + \cdots + m_n\overrightarrow{GG_n} = \vec{0} \qquad (7.3)$$

- Soit O, l'origine du repère cartésien. On a par définition :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{m_1\overrightarrow{OG_1} + m_2\overrightarrow{OG_2} + \cdots + m_n\overrightarrow{OG_n}}{m_1 + m_2 + \cdots + m_n} \qquad (7.4)$$

Exemple

Détermination de la position du centre de masse d'une pirogue.
Une pirogue de longueur l = 5m et de masse M = 150kg, est au repos sur une eau tranquille. Lorsqu'elle est vide, le centre de gravité se trouve à égale distance des extrémités. Déterminer la nouvelle position du centre de gravité lorsque la pirogue a un passager de masse m = 60kg assis à l'une de ses extrémités. On admettra que le centre de gravité de la pirogue non chargée est sur la même horizontale que le centre de gravité du passager. Comme l'indique la figure 1.6 ci-dessous.



Solution

Pirogue $\begin{cases} \bullet\ l = AB = 5cm \\ \bullet\ M = 150kg \end{cases}$ *au repos sur l'eau. Passager de masse m = 60kg au point* B.

À vide : $AG_O = BG_O = \frac{1}{2}AB = \frac{1}{2}l$. *Soit G, le barycentre des points pondérés* (G_O, M) *et* (B, m), *on a :*

$$M\overrightarrow{GG_O} + m\overrightarrow{GB} = \vec{0} \ (1)$$

Considérons un repère unidimensionnel ou unidirectionnel, d'origine A d'axe x et orienté suivant $\vec{i}$. *En introduisant A dans (1) d'après Chasles, on aura :*

$$M\overrightarrow{GG_O} + m\overrightarrow{GB} = M(\overrightarrow{GA} + \overrightarrow{AG_O}) + m(\overrightarrow{GA} + \overrightarrow{AB}) = (M+m)\overrightarrow{GA} + M\overrightarrow{AG_0} + m\overrightarrow{AB} \ (2)$$

Projection de (2) suivant x i.e. $\vec{i}$ $\begin{cases} \Rightarrow \overrightarrow{AG_x} = \dfrac{M\overrightarrow{AG}_{Ox} + m\overrightarrow{AB}_x}{M+m} \Leftrightarrow AG\vec{i} = \left(\dfrac{MAG_O + mAB}{M+m}\right)\vec{i} \\ \Rightarrow AG = \dfrac{MAG_O + mAB}{M+m} \end{cases}$

Or $AG_O = (½)\,\ell$ *et* $AB = \ell \rightarrow AG = \left(\dfrac{M+2m}{2(M+m)}\right)\times \ell$ AN: AG = 3,21 m

5. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Centre de gravité	Center of gravity
Centre d'inertie	Center of inertia
Centre de masse	Center of mass
Système isolé	Isolated system

EXERCICES DE LA LEÇON 7 : LA PREMIÈRE LOI DE NEWTON SUR LE MOUVEMENT – LE PRINCIPE DE L'INERTIE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : système ; système isolé ; système pseudo-isolé.
2. Énoncer le principe de l'inertie.
3. Expliquer la différence suivante.
   Comment est-il possible qu'un moustique puisse battre les ailes plus de 1000 fois par seconde alors que vous-mêmes ne pouvez effectuer qu'à peine deux aller-retour avec votre bras pendant le même temps bien que vous soyez beaucoup plus fort ?
4. Donner 3-exemples de référentiel inertiel.
5. QCM

5.1. Que peut-on dire de la vitesse d'un solide en équilibre statique sur un plan horizontal ?
(a) Sa vitesse est nulle
(b) Sa vitesse est constante
(c) Sa vitesse augment ou diminue.

5.2. Le poids d'un solide déformable s'applique :
(a) Au centre d'inertie
(b) Au centre de gravité
(c) Au centre de masse

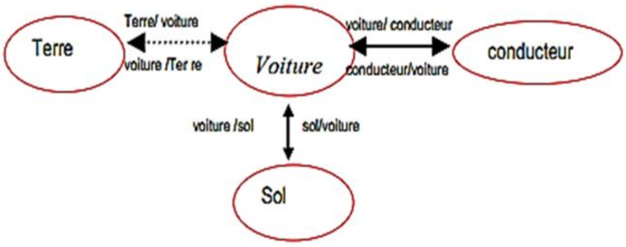
5.3. Que peut-on dire de la vitesse d'un solide en équilibre dynamique sur un plan horizontal ?
(a) Sa vitesse est nulle
(b) Sa vitesse est constante
(c) Sa vitesse augment ou diminue.

5.4. Le poids d'un solide indéformable s'applique :
(a) Au centre d'inertie
(b) Au centre de gravité
(c) Au centre de masse

5.5. Si $\Sigma\vec{F} \perp \vec{V}$ alors le mouvement est :
(a) Circulaire
(b) Rectiligne
(c) Elliptique

5.6. Si $\Sigma\vec{F} \parallel \vec{V}$ alors le mouvement est :
(a) Circulaire
(b) Rectiligne
(c) Elliptique.

6. Citer deux forces s'exerçant à distance, par contact.
7. On considère le diagramme voiture-interaction suivant.

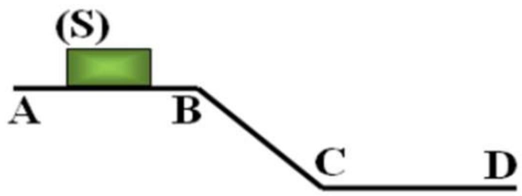


7.1. Donner la liste des forces qui s'exercent sur la voiture.

7.2. Dans le cas où la voiture est à l'arrêt, faire un schéma des forces exercées sur la voiture.

Exercice 2 : Application des savoirs

1. Un solide (S) se déplace sur un rail composé de trois parties similaires AB, BC et CD. Le mouvement du centre d'inertie de (S) est rectiligne uniforme de A à B pour un référentiel terrestre.

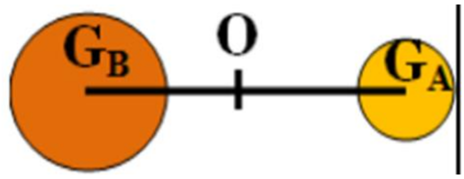


1.1. Faire l'inventaire des forces appliquées à (S). Est-ce que le contact se fait sans frottement ?

1.2. Décrire qualitativement, le mouvement du centre d'inertie de (S) sur les parties BC et CD.

1.3. Calculer le temps nécessaire pour que le solide parcoure la distance AB = 1 m avec la vitesse V = 0,5 m.s^{-1}.

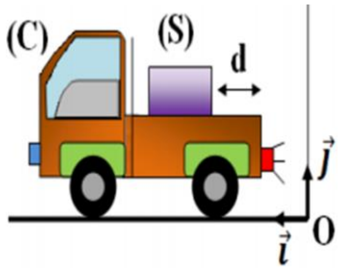
2. On considère deux corps sphériques A et B, leurs masses respectives m_A = 400 g et m_B = 800 g et la distance entre leurs centres d'inerties G_A et G_B est d = 100 cm et sont associés à une liaison solide de masse négligeable.



2.1. Donner l'expression de la relation barycentrique qui détermine la position de G, centre d'inertie du groupe {A, B} pour le point O au milieu de [AB].

2.2. En appliquant cette relation, déterminer la distance G_AG.

3. Un camion (C) circulant sur une route rectiligne et horizontale, transporte sur son plateau lisse, un morceau de glace de m = 20 kg. Le camion roule à vitesse constante V_0 = 36 km/h. Le morceau de glace reste immobile au milieu du plateau.



3.1. Faire l'inventaire des forces agissant sur le morceau de glace.

3.2. Décrire le mouvement du morceau de glace dans un référentiel lié au camion.

3.3. Décrire le mouvement du morceau de glace dans un référentiel lié à la route.

3.4. À un instant t_1, le camion a soudainement changé sa vitesse $\vec{V}_0$ à $\vec{V}_1 = 3\vec{V}_0$, pendant la durée Δt = 0,1 s, puis il garde plus tard sa vitesse $\vec{V}_1$.

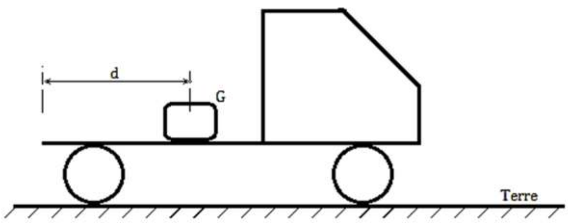
3.4.1. Pour le camion, est-ce que le principe d’inertie est vérifié pendant la durée Δt ? Justifier.

3.4.2. Pour le morceau de glace, est-ce que le principe d’inertie est vérifié pendant la durée Δt ? Why ?

3.4.3. Trouver la vitesse du morceau de glace par rapport à celle du camion et son sens de mouvement pendant la durée Δt.

3.4.4. Sachant que le morceau de glace se trouve à d = 1,5m de l’arrière du camion à l’instant t_1, la glace tombe-t-elle du camion ?

4. Un camion est initialement immobile par rapport au sol horizontal. Un bloc de glace G de masse m = 200 g est posé, immobile, sur sa benne, à une distance d = 4,0 m de l’arrière du camion. On prendra g = 10 $N.kg^{-1}$.



4.1. Énoncer la première loi de Newton.

4.2. Qu’est-ce qu’un référentiel ? Quand dit-on qu’il est galiléen ?

4.3. Quelles informations de l’énoncé permettent d’affirmer le bloc de glace constitue un système pseudo-isolé ?

4.4. Représenter, en précisant l’échelle utilisée, les forces extérieures agissant sur le morceau de glace.

4.5. Le camion démarre brutalement ; on supposera qu’il atteint instantanément une vitesse V = 2,0 $m.s^{-1}$ qui restera ensuite constante et on négligera toutes les formes de frottement. Peut-on toujours considérer le bloc de glace comme pseudo-isolé après le démarrage ?

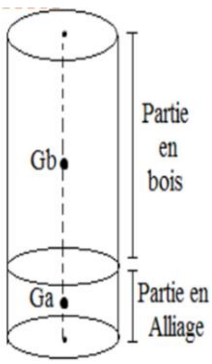
4.6. Décrire, le justifiant, le mouvement de G pour un observateur fixe par rapport à la Terre.

4.7. Pendant combien de temps, le bloc G restera sur le camion après qu’il ait démarré ?

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Cylindre

Un cylindre de rayon r = 3 cm est formé de 2 parties :
- Une partie en bois de longueur 10 cm
- Une partie en alliage de longueur 1 cm.



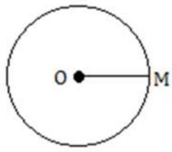
Déterminer la position du centre d’inertie de ce cylindre.

Données :
- Masse volumique du bois : $0,8 g.cm^3$.
- Masse volumique de l’alliage : 8 g/cm^3.

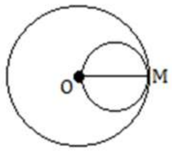
Situation 2 : Freinage d’un autobus

Lorsque le conducteur d’un autobus freine brutalement, les passagers sont projetés vers l’avant. Expliquer ce phénomène.

Situation 3 : Position du centre de masse d’une sphère



On considère une plaque homogène de très faible épaisseur, de forme circulaire et de rayon R.
- Où se trouve son centre de gravité ?



À la distance R/2 de O, on fixe une autre plaque homogène de même nature, d’épaisseur négligeable et de rayon r = R/2.
- De combien et dans quel sens se déplace le centre de gravité ?

Situation 4 : Sable mouvant

Vous assistez impuissant à la mésaventure d’un malheureux qui s’enfonce dans le sable mouvant.
- Quels conseils pouvez-vous lui donner ?

- Est-il utile que vous alliez vous-même dans un élan d’héroïsme, vous embourber dans le sable mouvant pour l’aider ?

Situation 5 : Science ou fiction

Un camion contenant plusieurs oiseaux enfermés dans son compartiment de marchandises est un peu trop lourd pour passer sur un pont.
Le chauffeur du camion fait du bruit pour inciter les oiseaux à voler.
Parviendra-t-il à traverser le pont ? Justifier soigneusement.

Situation 6 : English language

Énoncer, en anglais, la première loi de Newton sur le mouvement.

Situation 7 : Forces et mouvements

- Quelles sont les forces exercées sur un corps posé sur une table horizontale ? Quelles sont les forces exercées sur un système en mouvement rectiligne uniforme sur une table horizontale ?
- Lors du démarrage brutal d’un ascenseur vers le haut, le cartable que vous tenez à la main vous parait-il plus lourd, aussi lourd ou moins lourd ?

MODULE ⇒ **MOUVEMENTS ET INTERACTIONS** 2

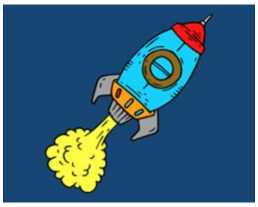
Leçon 8

LE VECTEUR QUANTITÉ DE MOUVEMENT

ACTIVITÉ(S)

Observe les images ci-contre

(a) Quelles sont les grandeurs physiques mises en exergue sur ces figures ?
(b) De quoi dépend le mouvement du bouchon du champagne ? De la fusée ?
(c) Quelle relation peut exister entre ces grandeurs ?
(d) Donner alors la définition de la quantité de mouvement ainsi que ses caractéristiques.



Objectifs

- Définir et expliciter la quantité de mouvement d'un mobile ;
- Utiliser le principe de conservation de la quantité de mouvement pour expliquer le changement ou la constance de la vitesse : notion de chocs.

1. Définitions, symbole et unité

- Un **point matériel** est un point de dimension suffisamment petite assimilable à un point.
- Un **système matériel** est un ensemble de points matériels.
- Dans la définition du mouvement d'un système matériel, il existe un point particulier appelé **centre d'inertie** caractérisant le système.
- Un système (solide) est dit **homogène**, s'il a les mêmes propriétés en chacun de ses points.
- Lorsque le solide est homogène, on dit indifféremment centre **d'inertie**, centre de **symétrie**, centre de **masse** ou centre de **gravité** et est noté **G**.
- Soit (S) un solide de masse m et dont le centre d'inertie G est animé de la vitesse $\overrightarrow{V_G}$ dans un repère (R) d'espace.

  On appelle **vecteur quantité de mouvement** $\vec{P}$ de (S), la grandeur vectorielle, produit de la masse m de (S) par le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_G}$ de son centre d'inertie :

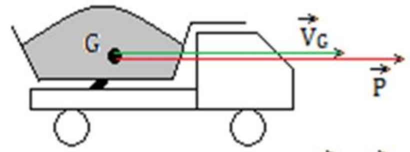


Figure 8.1 : Représentation de $\vec{P}$ et $\overrightarrow{V_G}$

$$\vec{P} = m \times \overrightarrow{V_G} \qquad (8.1)$$

Remarque

- $\vec{P}$ et $\overrightarrow{V_G}$ sont des vecteurs colinéaires de même sens car m > 0 et de même origine.
- En module, $P = m.V_G$ $\begin{cases} P : en..kg.m/s....ou..kg.m.s^{-1} \\ m : en..kg \\ V_G : en..m/s...ou..m.s^{-1} \end{cases}$ (8.2)
- La caractéristique $P = f(V_G)$ est une droite de pente positive égale à la masse du solide en mouvement.

1.1. Caractéristiques

Les caractéristiques du vecteur quantité de mouvement sont les suivantes :

- **Origine** : Centre d'inertie du système d'étude.
- **Sens** : celui du vecteur vitesse
- **Direction** : celle du vecteur vitesse
- **Module ou intensité** : $P = mV_G$.

1.2. Vecteur quantité de mouvement d'un solide en translation

Pour un solide de masse m et de centre d'inertie G, animé d'un mouvement rectiligne et se déplaçant à la vitesse $\vec{V}_G$, son vecteur quantité de mouvement $\vec{P}$ est défini par :

$$\vec{P} = m\vec{V}_G$$

1.3. Vecteur quantité de mouvement d'un système de plusieurs corps

La quantité de mouvement d'un système de plusieurs corps est égale à la somme vectorielle des quantités de mouvement individuel des corps des corps qui le constituent :

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \cdots + \vec{P}_n = m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2 + \cdots + m_n\vec{V}_n$$

Or dans un système, $V_{i=1,n} = V_G \rightarrow V_1 = V_2 = ... = V_G$.

$$\Rightarrow \vec{P} = \sum_{1=1}^{n} (m_1 + m_2 + \cdots + m_n) \cdot \vec{V}_G \Leftrightarrow \vec{P} = M\vec{V}_G ... avec .. M = \sum_{i=1}^{n} m_i = m_1 + m_2 + \cdots + m_n$$

2. Conservation de la quantité de mouvement

2.1. Principe de conservation

Énoncé

Pour un système isolé ou pseudo-isolé, le vecteur quantité de mouvement reste constant au cours de l'évolution du système : $\vec{P} = \overrightarrow{cte}$.

2.2. Quelques applications

2.2.1. Choc entre deux solides (calcul des vitesses avant et après le choc)

1er cas : **Les solides restent accrochés après le choc : choc mou**

Adams joue à la fé-fé (jeu de billes) sur un sol horizontal. Il lance, à la vitesse $\vec{V}_1$ une bille (B_1) de masse m_1, qui, après un parcours, entre en collision avec une bille (B_2) de masse m_2 sur sa trajectoire immobile. Après la collision, les deux billes restent collées et vont dans la même direction. Donner l'expression de la vitesse $\vec{V}$ de l'ensemble {B_1 ; B_2} après le choc jusque avant qu'elles ne se séparent.

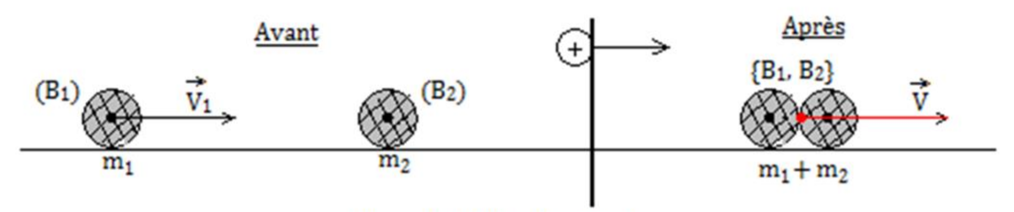


Figure 8.2 : Situation de choc mou

- Avant le choc : $\vec{P} = m_1\vec{V}_1 + \vec{0}$

- Après le choc : $\vec{P'} = (m_1 + m_2)\vec{V}$
- Conservation de quantité de mouvement : $\vec{P} = \vec{P'} \Leftrightarrow m_1\vec{V_1} = (m_1 + m_2)\vec{V}$

- On en déduit alors que : $\begin{cases} \vec{V} = \dfrac{m_1}{m_1 + m_2}\vec{V_1} \\ V = \dfrac{m_1}{m_1 + m_2}V_1 \end{cases}$

2e cas : Les deux solides se séparent après le choc dans de directions privilégiées : choc élastique

On admet à présent qu'après le choc, les deux billes précédentes prennent chacune une direction privilégiée dans le plan du sol tel que (B_1) forme un angle α par la direction de départ et (B_2) un angle β.

Déterminons les expressions des vitesses $\vec{V}'_1$ et $\vec{V}'_2$ des billes (B_1) et (B_2) respectivement après le choc.

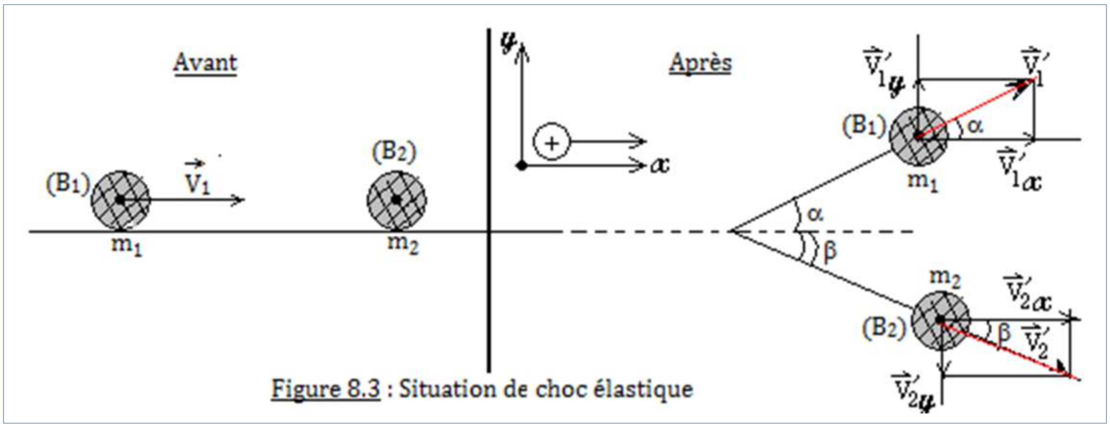


Figure 8.3 : Situation de choc élastique

- Avant le choc : $\vec{P} = m_1\vec{V_1} + \vec{0}$
- Après le choc : $\vec{P'} = m_1\vec{V}'_1 + m_2\vec{V}'_2$
- Conservation de la quantité de mouvement : $\vec{P} = \vec{P'} \Leftrightarrow m_1\vec{V_1} = m_1\vec{V}'_1 + m_2\vec{V}'_2$
- En projetant cette dernière relation suivant les axes x et y, on a :

$$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\begin{cases} m_1\overrightarrow{V_{1x}} = m_1\overrightarrow{V'_{1x}} + m_2\overrightarrow{V'_{2x}} \\ m_1\overrightarrow{V_{1y}} = m_1\overrightarrow{V'_{1y}} + m_2\overrightarrow{V'_{2y}} \end{cases} \xrightarrow{Algébrisation} \begin{cases} m_1V_1 = m_1V'_{1x} + m_2V'_{2x} \\ 0 = m_1V'_{1y} - m_2V'_{2y} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} mV_1 = m_1V'_1\cos\alpha + m_2V'_2\cos\beta \\ 0 = m_1V'_1\sin\alpha - m_2V'_2\sin\beta \end{cases}$$

Exemple

Un neutron vient frapper, à la vitesse $V_n = 10^6$ m/s, un noyau d'hélium immobile. Le noyau d'hélium est projeté dans le sens de $\vec{V_n}$ à la vitesse $V_h = 4.10^5$ m/s, tandis que le neutron rebondit dans le sens inverse, à la vitesse $V_n' = 6.10^6$ m/s.

Quelle relation peut-on en déduire entre la masse m_h du noyau d'hélium et la masse m_n du neutron ?

Solution

- Avant le choc : $\vec{P} = m_n\vec{V_n}$
- Après le choc : $\vec{P'} = m_n\vec{V}'_n + m_h\vec{V_h}$
- Conservation : $\vec{P} = \vec{P'} \Leftrightarrow m_n\vec{V_n} = m_n\vec{V}'_n + m_h\vec{V_h}$
- Selon l'énoncé, on a : $\begin{cases} m_nV_n = -m_nV'_n + m_hV_h \\ \dfrac{m_h}{m_n} = \dfrac{V_n + V'_n}{V_h} = 17{,}5 \end{cases} \Rightarrow m_h = 17{,}5m_n$

2.2.2. Le recul d'une arme à feu

L'objectif ici, est de trouver l'expression de la vitesse $\vec{V}$ de recul d'une arme en feu de masse M, en fonction de la vitesse $\vec{v}$ de déplacement de la balle lâchée par le fusil.

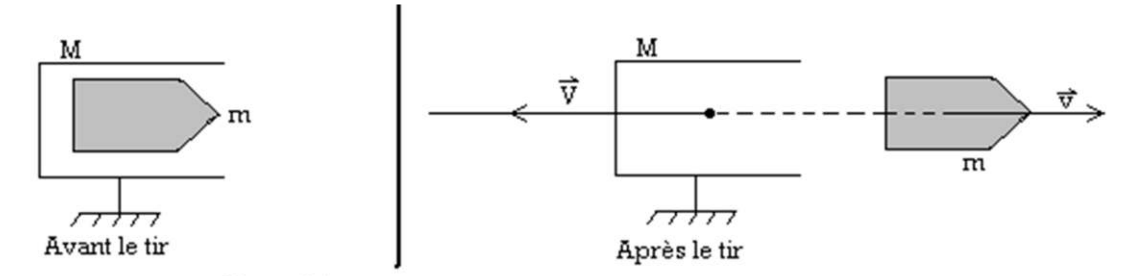


Figure 8.4 : Recul d'une arme à feu

- Avant le tir : $\vec{P}$
- Après le tir : $\vec{P'} = M\vec{V} + m\vec{v}$
- Conservation : $\vec{P} = \vec{P'} \Leftrightarrow M\vec{V} + m\vec{v} = \vec{0}$
- Selon la figure, on en déduit alors que, $\begin{cases} \vec{V} = -\dfrac{m}{M}\vec{v} \\ V = \dfrac{m}{M}v \end{cases}$

2.2.3. La propulsion des engins : Cas d'une fusée

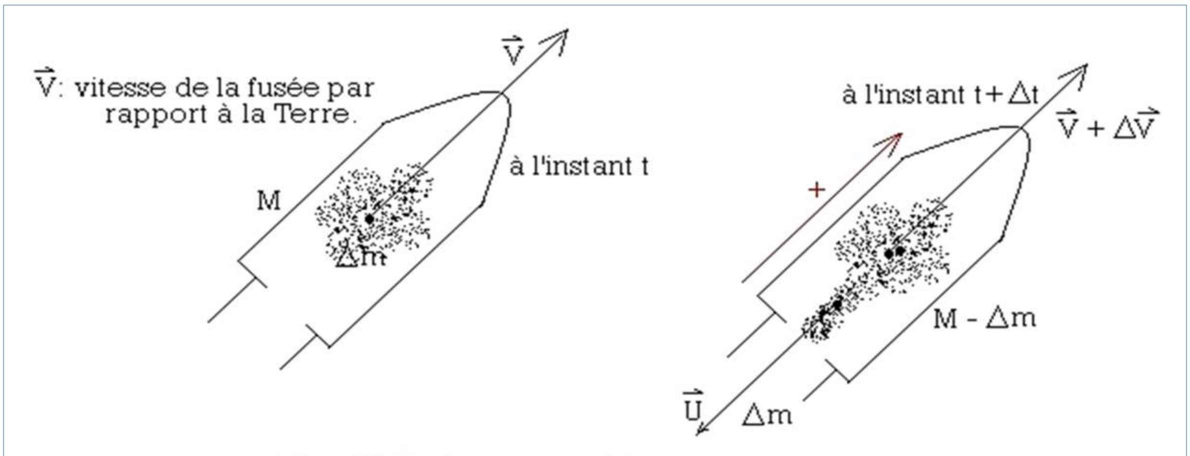


Figure 8.5 : Fusée en propulsion

- À l'instant t, $\vec{P} = M\vec{V}$
- À l'instant t + Δt, $\vec{P'} = (M - \Delta m)(\vec{V} + \Delta\vec{V}) + (\Delta m)\vec{U}$

  Avec $\begin{cases} \vec{U}, vitesse\ d'éjection\ des\ gaz\ par\ rapport\ à\ la\ fusée \\ \vec{U} + (\vec{V} + \Delta\vec{V}),\ vitesse\ d'éjectionpar\ rapport\ à\ la\ Terre \end{cases}$
- Conservation : $\vec{P} = \vec{P'} \Leftrightarrow M\vec{V} = (M - \Delta m)(\vec{V} + \Delta\vec{V}) + (\Delta m)\vec{U}$
- On a alors, $\begin{cases} \Delta\vec{V} = -\dfrac{\Delta m}{M}\vec{U} \\ \Delta V = \dfrac{\Delta m}{M}U \end{cases}$ La relation vectorielle est appelée principe de propulsion par réaction.

3. Jeu bilingue

"For an isolated or pseudo-isolated system, the momentum vector remains constant during the evolution of the system".

EXERCICES DE LA LEÇON 8 : LE VECTEUR QUANTITÉ DE MOUVEMENT

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : système ; système matériel ; vecteur quantité de mouvement.
2. Énoncer le principe de conservation de la quantité de mouvement.
3. Citer trois systèmes qui utilisent le principe de conservation de la quantité de mouvement.
4. Donner les caractéristiques du vecteur quantité de mouvement.
5. Vrai ou faux

5.1. La quantité de mouvement d'un système s'exprime en kg.m^2.

5.2. La quantité de mouvement est une grandeur vectorielle.

5.3. La nature regorge des systèmes purement isolés.

5.4. Pour un solide homogène, les propriétés chimiques sont identiques en chacune de ses parties.

5.5. Newton est le premier à avoir mis sur pied le concept d'inertie.

5.6. Les vecteurs quantité de mouvement et vitesse d'un système, ont les mêmes caractéristiques.

6. QCM

6.1. L'intensité du vecteur quantité de mouvement d'un système de masse m animé d'une vitesse de module V est :
(a) P = m/V
(b) P = mV
(c) P = V/m

6.2. La quantité de mouvement d'un solide de masse 1kg animé d'une vitesse de 1m/s est :
(a) P = 1 kg.m/s
(b) P = 1 J
(c) P = 1.

6.3. La quantité de mouvement est une grandeur :
(a) Algébrique
(b) Positive
(c) Négative

6.4. Si l'on double soit la vitesse ou la masse d'un système, sa quantité de mouvement :
(a) Quadruple
(b) Triple
(c) Double.

Exercice 2 : Application des savoirs

1. Calculer la quantité de mouvement d'une flèche de 125 g se déplaçant à la vitesse de 60 km/h.
2. Sous l'action d'un pétard, un objet initialement au repos se brise en deux parties de masses inégales.

2.1. Dessiner les vitesses des deux parties.

2.2. Déterminer la vitesse $\vec{v}_2'$ du deuxième morceau si la masse du premier morceau est de 2 kg et sa vitesse $v_1' = 6{,}0$ m.s^{-1} et la masse totale est de 8 kg

3. Une bille de masse m$_1$ = 12 g arrive avec une vitesse inconnue $\vec{v}_1$ sur une bille immobile de masse m$_2$ = 24 g. Après le choc, la vitesse de la première bille, de norme 0,5 m/s, forme un angle de 30° avec la direction de départ et la seconde bille de module 0,40 m/s, un angle de -20°.

3.1. Représenter la situation avant et après le choc.

3.2. Exprimer les vitesses $\vec{v}_1'$ et $\vec{v}_2'$ des billes après le choc.

3.3. À partir du système obtenu, déterminer $\|\vec{v}_1\|$.

4. On considère une fusée remplie de combustible, immobile dans l'espace et loin de tous corps célestes. L'étude se déroule dans un référentiel galiléen, dont les axes sont définis par la direction de trois étoiles éloignées.

4.1. Qu'appelle-t-on référentiel galiléen ? Quel est le référentiel approprié pour cette étude ?

4.2. Que peut-on dire du système fusée + combustible ?

4.3. Exprimer et calculer le vecteur quantité de mouvement $\vec{P}_{tot}$ du système fusée + combustible.

4.4. Pendant un intervalle de temps Δt, les moteurs brûlent 50 kg de combustible, qui est éjecté à une vitesse de 2600 m/s. La fusée atteint alors une vitesse de 130 m/s. Déterminer la masse de la fusée.

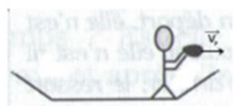
5. Une boule de billard de vitesse initiale $\vec{v}_i$ dans le référentiel terrestre, tape sur une boule initialement au repos et de même masse. Après le choc, la première boule reste immobile.

5.1. Quelle est la propriété du référentiel terrestre ?

5.2. Que dire de la quantité de mouvement u système pseudo-isolé formé par les deux boules, assimilées à des points matériels ?

5.3. Déduire les caractéristiques du mouvement de la seconde boule.

6. Adams est assis dans un canoë au milieu d'un lac. Le canoë est immobile et Adams qui a perdu sa pagaie, souhaite regagner la rive avec son embarcation. Il ne dispose alors que d'une pierre présente dans son canoë. Se rappelant de ses cours de physique de seconde, il décide de la jeter par-dessus bord, horizontalement vers l'arrière de l'embarcation.



On définit la système (S), constitué d'Adams, du canoë et de la pierre.
AN : masse d'Adams : m$_A$ = 55kg ; masse du canoë : m$_C$ = 39 kg ; masse de la pierre : m$_p$ = 4,2 kg ; vitesse de la pierre : V$_p$ = 2,5 m/s.
On néglige les frottements dus à l'air et l'eau.

6.1. Sans justifier, indiquer ce qui se passe après le lancer.

6.2. Avant le lancer, le système (S) est-il isolé ou pseudo-isolé ? Why ?

6.3. Exprimer le vecteur quantité de mouvement avant le lancer.

6.4. Exprimer puis calculer la valeur de la vitesse $\vec{V}$ du canoë et d'Adams juste après le lancer.

6.5. Dans quel sens se déplace le canoë après le lancer ?

6.6. Quelle est alors la nature du mouvement du canoë ? Est-ce cohérent avec une situation réelle ? Why ?

7. Un wagon de masse 500 kg se déplace à la vitesse de 5m.s^{-1} sur une voie. Il percute un deuxième wagon de masse 1500 kg, immobile. Les deux wagons restent accrochés après le choc.

7.1. Calculer la quantité de mouvement du système.

7.2. Calculer la vitesse de l'ensemble après le choc.

8. Une arme à feu a une masse de 600g. les projectiles qu'elle tire ont une masse de 4g et une vitesse de 300 m.s^{-1} à la sortie du canon.
Calculer la vitesse de recul de l'arme après le tire.

9. Un homme de masse m = 60 kg debout dans une pirogue de masse M = 200 kg, saute sur la rive avec une vitesse initiale v = 5 m.s^{-1}.

9.1. La pirogue reste-t-elle immobile ou se déplace-t-elle ? Justifier votre réponse.

9.2. Si la pirogue se déplace, quelle est la vitesse initiale de ce mouvement ? (On supposera que la pirogue est située dans un plan horizontal défini par la rive).

10. Une fusée évolue dans l'espace à très grande distance de tout astre. Sa masse vaut M = 5 t et sa vitesse V = 50 km.s^{-1}. Pour augmenter sa vitesse, la fusée expulse vers l'arrière une masse de gaz m = 200 kg avec une vitesse, par rapport à la fusée, qui vaut u = 2 km.s^{-1}.
Calculer la vitesse du centre d'inertie de l'ensemble des masses (fusée + gaz) après l'éjection des gaz.

11. Un objet immobile éclate en trois morceaux sous l'action d'un pétard. Après l'action du pétard (en m.s^{-1}), on a : $\vec{v}_1' = \vec{\imath} + 1{,}73\vec{\jmath}$ et $\vec{v}_2' = -1{,}3\vec{\imath} + 0{,}75\vec{\jmath}$. D'autre part, on connait la masse de chaque morceau : m_1 = 15 g, m_2 = 31 g et m_3 = 18 g.

11.1. Faire un croquis de la situation.

11.2. Exprimer les quantités de mouvement avant et après le choc explosif.

11.3. Déterminer $\vec{v}_3'$; sa norme ainsi que l'angle que ce vecteur fait avec l'axe des x.

11.4. Vérifier graphiquement la question (11.3.)

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Bilingual Game.

Translate in English, the conservation of momentum.

Situation 2 : Patineurs

Deux patineurs évoluent ensemble l'un derrière l'autre à la vitesse de 10 m.s^{-1}. La masse du deuxième patineur vaut les $\frac{2}{3}$ de la masse du premier. Le deuxième patineur parvient à s'immobiliser en poussant brusquement le premier vers l'avant.
Déterminer la vitesse acquise par le premier patineur après la poussée.

Situation 3 : Effet de la masse 1

Montrer, à partir d'un calcul explicatif, comment lorsqu'on double la masse d'un système en laissant constante sa vitesse, la quantité de mouvement dudit système double aussi.

Situation 4 : Effet de la masse 2

Un solide de masse M ayant une vitesse initiale, entre en collision avec un solide de masse M' initialement au repos.

- En supposant qu'après le choc les deux solides restent accrochés, donner l'expression de leur vitesse après le choc en fonction de M et M'.
- Pour M = M', que dire des vitesses avant et après le choc ?
- En déduire alors la nature du mouvement dans chaque cas (avant et après le choc).
- Reprendre les questions précédentes lorsqu'après le choc, le solide de masse M forment un angle droit avec la direction du solide de masse M'.

Situation 5 : La grenade

Une grenade, lancée horizontalement à 8 m.s^{-1}, explose en trois fragments égaux. Le premier continu à se déplacer horizontalement à 16 m.s^{-1}. Le deuxième est projeté vers le haut avec un angle de 45° et le troisième vers le bas avec le même angle.

- Exprimer et calculer la vitesse des fragments deux et trois.
- De quel type de choc s'agit-il ? (mou, élastique ou explosif) Why ?

Situation 6 : Le proton

Un proton se déplaçant à 6.10^{7} m.s^{-1}, rebondit sur un noyau d'oxygène (de masse 16 fois plus grande). Le proton est dévié vers l'arrière à la vitesse de 4.10^{7} m.s^{-1} dans une direction faisant un angle de 45° par rapport à la direction incidente.
Dans quelle direction par rapport à la direction initiale du proton, faut-il placer un appareil pour que le noyau d'oxygène soit détecté ?

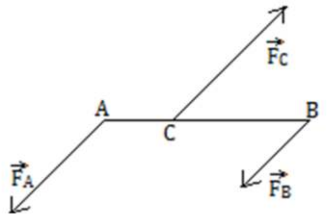
Situation 7 : Réaction chimique

On considère la réaction chimique $H + C\ell \rightarrow HC\ell$. On suppose que l'atome d'hydrogène avant la réaction se déplace vers la droite à la vitesse de 1,57.10^{5} m.s^{-1} et que l'atome de chlore avant la réaction, se déplace dans la direction perpendiculaire à la vitesse de 3,4.10^{4} m.s^{-1}.
Déterminer la grandeur et la direction de la vitesse de la molécule $HC\ell$ (chlorure d'hydrogène).

EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 2 : MOUVEMENTS ET INTERACTIONS MÉCANIQUES

Exercice 1 : Moment d'un système de 3 forces

On se propose de déterminer la force unique $\vec{F}$ équivalente à deux forces parallèles et de même sens $\vec{F}_A$ et $\vec{F}_B$ appliquées aux extrémités A et B d'une tige de masse négligeable.



1. Déterminer les caractéristiques de la force $\vec{F}_C$, parallèle à $\vec{F}_A$ et $\vec{F}_B$, qui maintient la tige en équilibre. Utiliser pour cela, la double condition d'équilibre en choisissant judicieusement l'axe de rotation.
2. En déduire les caractéristiques de la force $\vec{F}$, équivalente à $\vec{F}_A$ et $\vec{F}_B$, c'est-à-dire, qui, à elle seule, équilibrerait la force $\vec{F}_C$.
   AN : $F_A = 6$ N ; $F_2 = 4$ N.

Exercice 2 : Quantité de mouvement et forces

Un fusil de 4,5 kg tire une balle de 8 g à la vitesse de 720 m.s^{-1}.
1. Calculer la vitesse de recul du fusil.
2. Le tireur a amorti le recul en 0,20 s. Calculer la force moyenne développée par le tireur.

Exercice 3 : Force de frottement

Un solide de masse m = 50 kg est en équilibre instable sur un plan incliné d'un angle de 30° avec l'horizontale.
1. Expliquer la phrase : « solide en équilibre instable »
2. Pour stabiliser l'équilibre du solide, on assimile l'existence des forces de frottement $\vec{f}$, parallèle au plan incliné et de sens contraire au mouvement du solide.

2.1. Réaliser une figure de la situation.
2.2. Faire le bilan des forces qui s'appliquent sur le solide littéralement et graphiquement.
2.3. Déterminer l'expression de f, puis calculer sa valeur numérique.

Exercice 4 : Noyaux de carbone

En soumettant des noyaux de carbone C_{12} aux bombardements de particules inconnues, on constate que si ces particules rebondissent en sens inverse, la valeur de leur vitesse diminue de moitié.
Calculer la masse de ces particules inconnues ?

Exercice 5 : Choc

Un objet de 5,0 kg se déplace vers la droite à la vitesse de 10,0 m/s. Il entre en collision avec un objet de 7,0 kg initialement au repos. Après la collision, l'objet de 5,0 kg continue de se déplacer vers la droite, mais maintenant à la vitesse de 1,17 m/s. Dans quelle direction et à quelle vitesse l'autre objet se déplace-t-il?

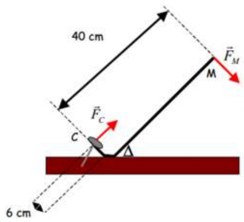
Exercice 6 : Lancer du marteau

Le lancer de « marteau » est une épreuve d'athlétisme qui consiste à projeter le plus loin possible un « marteau » constitué d'une boule d'acier reliée à une poignée par un câble.
La préparation du lancer se fait par un mouvement circulaire.
Après plusieurs tours, l'athlète lâche la poignée pour laisser partir le marteau.
On se placera dans un référentiel terrestre.
1. À quelles forces est soumise la boule d'acier :
   (a) Lors de la préparation ?
   (b) Lorsque le marteau est en vol ?
   (c) Lorsque le marteau est tombé au sol ?
   Faire une figure pour chaque cas.
2. On considère le cas où la boule est au sol.
   Calculer la valeur de la réaction normale du sol si le marteau a une masse de 4,0 kg ± 7% pour une épreuve féminine. Prendre g = 9,8 ± 0,1 (N.kg^{-1})

Exercice 7 : Tournevis

Un tournevis exerce sur les bords de la fente d'une tête de vis deux forces de 45 N ; la distance entre les droites d'actions des forces est de 7mm.
1. Calculer le moment du couple exercé par le tournevis.
2. Quelle force faudrait-il exercer pour que le moment du couple soit 0,42 Nm ?

Exercice 8 : Pied de biche



Un ouvrier utilise un pied de biche pour arracher un clou. Au point M, il exerce une force $\vec{F}_M$ d'intensité 90 N, perpendiculaire au manche du pied de biche. Le pied de biche exerce une force $\vec{F}_C$ sur la tête du clou perpendiculairement au pied de biche. Le pied de biche pivote autour de l'axe de rotation D.
1. Calculer le moment de la force exercée en M par la main de l'ouvrier.
2. Donner l'expression du théorème des moments.
3. Calculer l'intensité de la force exercée en C sur la tête du clou par le pied de biche.

MODULE ⇒ OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE 3

Leçon 9

PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE

ACTIVITÉ(S)

Observe l'image ci-contre

(a) Que font ces hommes ?
(b) Quelle est la source lumière dans cette image ?
(c) Comment se propage la lumière de cette source de lumière ?
(d) Que dire alors de la propagation de la lumière dans le vide ?
(e) Citer d'autres sources de lumière par groupe de sources ?

Objectifs

- Décrire le phénomène de propagation rectiligne de la lumière.
- Interpréter certains phénomènes et le fonctionnement des dispositifs courants tels que les ombres, les éclipses, la chambre noire, etc.

1. Généralité

1.1. Les sources de lumières

- La **lumière** est un rayonnement électromagnétique visible.
- Une **source** de lumière est un objet qui émet de la lumière. On distingue :

- Les **sources primaires** ou **directes**: Sont considérées ainsi toutes sources de lumière qui produisent elles-mêmes leur lumière.

  Exemple : soleil, flamme, lampe à incandescence, Laser, etc.

- Les **sources secondaires** ou **objets diffusants** ou **indirectes** qui, lorsqu'elles sont éclairées, renvoient la lumière dans toutes les directions : c'est le **phénomène de diffusion** de la lumière. Bref, une source secondaire est tout objet éclairé.

  Exemple : la lune, tous les objets vus autour de nous, nuage, atmosphère, etc.

- Lorsque la distance source-récepteur est trop grande par rapport à la dimension de la source, la source est dite **ponctuelle**. Toutefois, si les dimensions de la source sont assez importantes, la source est dite **étendue**.

1.2. Les milieux de propagation

- Les **milieux transparents** : ce sont des milieux qui se laissent parfaitement traverser par la lumière.

  Exemple : l'air, l'eau, verre, etc.

- Les **milieux opaques** : ce sont des milieux qui ne se laissent pas traverser par la lumière.

  Exemple : le bêton, le bois, le mur de maison, etc.

- Les **milieux translucides** : ce sont des milieux qui se laissent traverser par une partie de la lumière reçue, mais ne permettent pas l'identification de la source.

  Exemple : papier huilé, papier calque, verre dépoli (verre privé de sa brillance ou de son éclat), etc.

Remarque

- La vitesse de propagation de la lumière appelée célérité dépend du milieu de propagation. Sa valeur maximale est : **$C \approx 3.10^{8}$ m.s^{-1}** (dans le vide où la pression = 0 Pa).
- L'**année-lumière** (a.l) est la distance parcourue par un rayon lumineux en une année.

1.3. Les récepteurs de la lumière

- Un **récepteur** de la lumière est un dispositif sensible (*ou qui reçoit*) à la lumière. On peut citer :
- L'**œil** : c'est un récepteur **physiologique** de la lumière ; c'est aussi le récepteur de lumière le plus perfectionné.
- La **pellicule photographique**, la **photopile**, sont des récepteurs **photochimiques** (***une réaction photochimique est une réaction chimique due à la lumière***).
- Les photos **diodes**, les photos **résistors**, les capteurs **CCD** (**Charged Couple Device = Dispositif à Transfert de Charge : DTC**), sont des récepteurs **photos électroniques** (***phénomène électrique déclenché dès éclairement***)
- La propagation de la lumière se fait selon le schéma suivant :

SOURCE LUMINEUSE	MILIEUX DE PROPAGATION →	RECEPTEUR DE LUMIÈRE

- La **lumière** est une radiation électromagnétique se propageant d'une source à un récepteur à travers divers milieux de propagation dont en dépend la célérité.

2. Propagation de la lumière

- **Expérience**

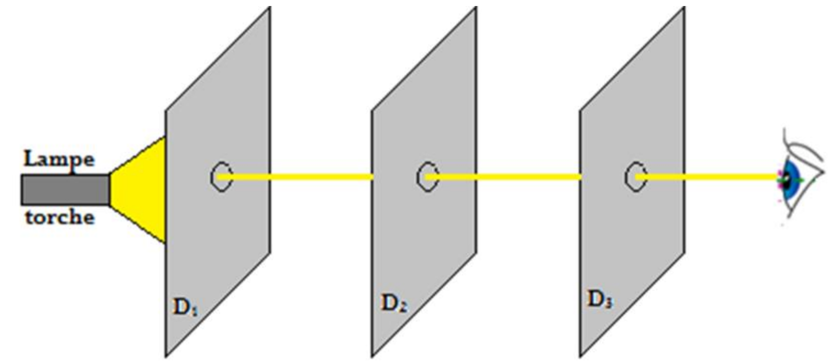


Figure 9.1 : Marche de la lumière issue d'une lampe torche

D_1, **D_2** et **D_3** sont trois diaphragmes percés.

- **Observations**

- Lorsque les centres des tous sont alignés, l'œil perçoit la lumière issue de la lampe torche.
- Lorsque l'on décale verticalement l'un des 3-trous, l'œil ne perçoit plus la lumière.

- **Interprétation**

La lumière se propage en **ligne droite** dans le vide et dans tous les milieux transparents et homogènes.

3. Rayons et faisceaux lumineux

- Le **rayon lumineux** est la direction de propagation de la lumière. C'est aussi tout trajet rectiligne suivi par la lumière.
- La flèche indique le sens de sa propagation.
- Un milieu est dit **homogène** si toutes ses parties sont identiques ou s'il possède partout les mêmes propriétés.
- Dans un milieu **hétérogène** ou **inhomogène**, la propagation de la lumière n'est pas rectiligne.
- Un milieu est dit **isotrope** s'il est doté des mêmes propriétés dans toutes les directions.
- Le « *volume lumineux* » issu d'une source et limité par des bords rectilignes est un **faisceau lumineux** i.e. un ensemble de rayons lumineux.
- Les faisceaux lumineux sont de trois types :

- Les faisceaux lumineux **convergents** en S_1 (figure 9.2 a)
- Les faisceaux lumineux **cylindriques** ou **parallèles** (figure 9.2 b)
- Les faisceaux lumineux **divergents** issus de S_2 (figure 9.2 c)

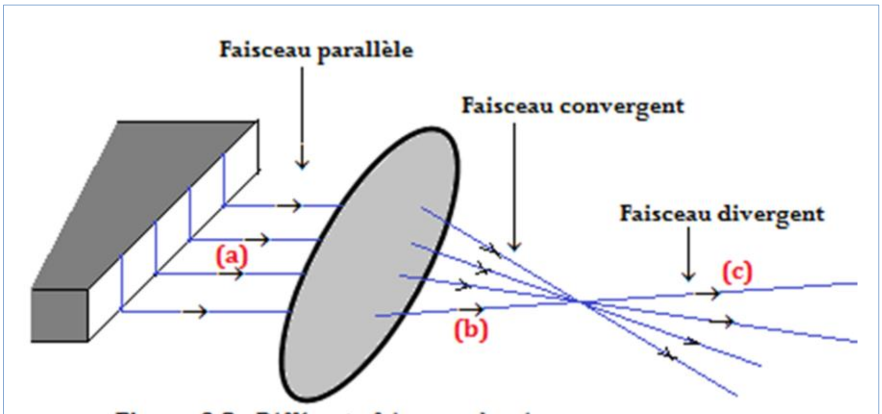


Figure 9.2 : Différents faisceaux lumineux

- Cherchons à isoler un rayon lumineux

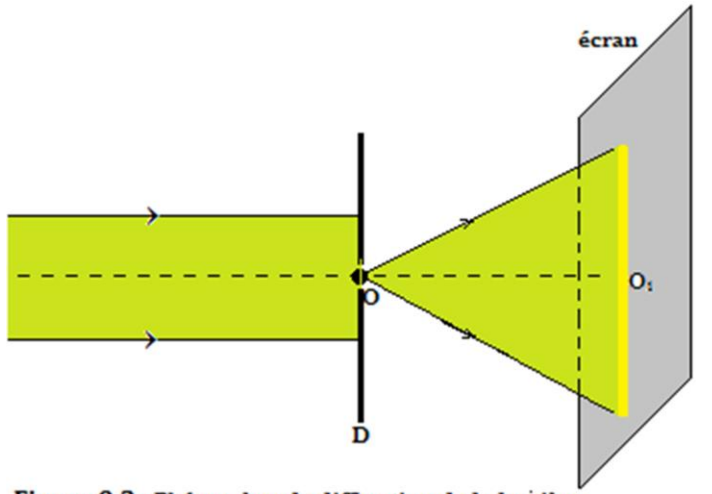


Figure 9.3 : Phénomène de diffraction de la lumière

- Observations

On envoie un faisceau cylindrique sur un diaphragme percé d'un petit trou. Au lieu d'obtenir le rayon lumineux OO_1, on obtient plutôt un faisceau divergent issu de O.

- Interprétation

Le phénomène observé ci-dessus est le phénomène de **diffraction** de la lumière en O i.e. le changement de direction suivit par la lumière à la traversée d'une ouverture étroite.

4. Quelques applications

4.1. La visée optique

- Elle est utilisée par la **topographie** (***réalisation des présentations géographique et cartographique***) pour l'alignement des jalons éloignés entre eux. L'appareil de visée est le **théodolite**.
- Un **jalon** est un piquet qui sert de point de repère pour des alignements.

4.2. Le diamètre apparent d'un objet

C'est l'angle **α**, de mesure généralement faible sous lequel l'objet est vu par l'œil à une certaine distance.

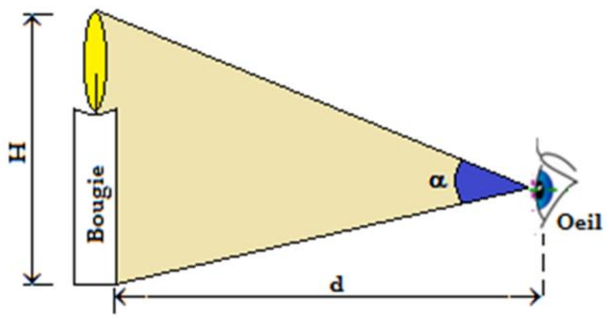


Figure 9.4 : Situation physique

$$\text{tg}\alpha \approx \alpha = \frac{H}{d} \text{ avec } \begin{cases} H..en..(m) \\ d..en..(m) \\ \alpha..en..rad \end{cases} \qquad (9.1)$$

4.3. La chambre noire

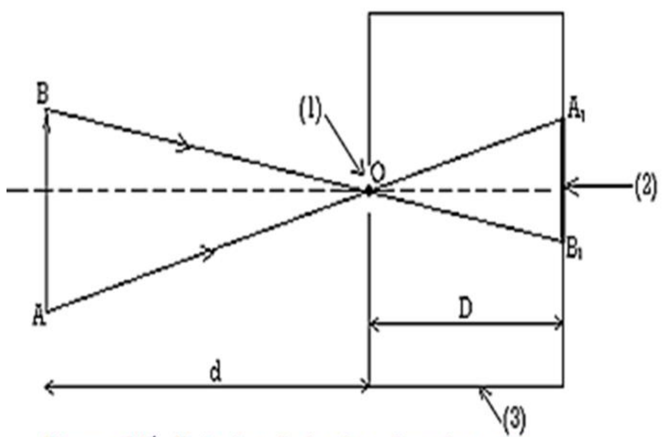


Figure 9.5 : Principe de la chambre de noire

- (1) est l'ouverture ou orifice de la chambre.
- (2) est l'écran translucide en verre dépoli.
- (3) est la profondeur de la chambre.

$\overrightarrow{A_1B_1}$ image de $\overrightarrow{AB}$ à travers la chambre noire, elle est renversée :
Triangles semblables :

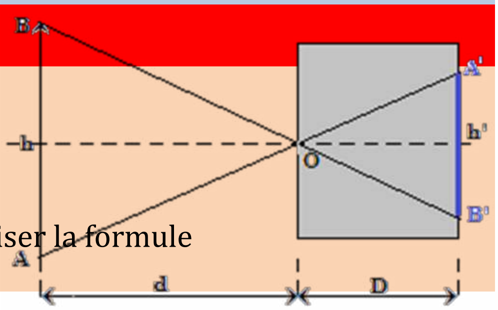
$$\Rightarrow \frac{AB}{d} = \frac{A_1B_1}{D} \qquad (9.2)$$

Activité 9.1

On place à 40 cm de l'entrée d'une chambre noire de profondeur 25 cm, un objet AB de hauteur h = 15cm.

1. Représenter l'image A'B' de l'objet AB donnée par cette chambre noire.
2. Calculer la hauteur h' de l'image A'B'.

Solution



Données : d = 40cm ; D = 25 cm ; AB = h = 15 cm ;
A'B' = h' = ?

1. Représentons l'image A'B' de l'objet AB.
2. Calculons la hauteur h'.

Les triangles OAB et OA'B' étant semblables, on peut donc utiliser la formule 9.2 précédente :

$$tg\hat{O} = \frac{AB}{d} = \frac{A'B'}{D} \Rightarrow \frac{A'B'}{AB} = \frac{D}{d} \Leftrightarrow \frac{h'}{h} = \frac{D}{d} \Rightarrow h' = \frac{D \times h}{d}$$

AN : $h' = \frac{25 \times 15}{40} = 9{,}4cm$

4.4. Formation des ombres

a) Faisceau cylindrique

- Rayons solaires à un moment de la journée → ombre portée au sol.

Considérons la figure 9.6 ci-dessous :

α = angle des rayons par rapport au sol et dépend du moment de la journée.

D'après la formule 9.1,

$$d = \frac{H}{tg\alpha} \qquad (9.3)$$

H = hauteur de l'objet opaque ; d = grandeur de l'ombre portée au sol.

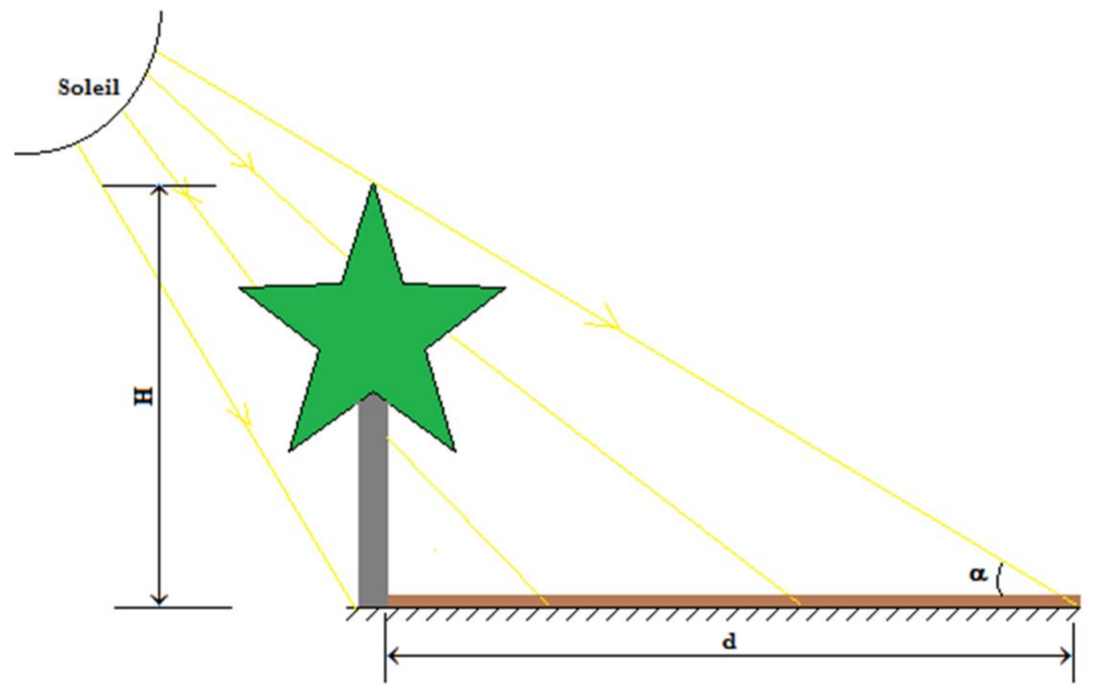


Figure 9.6 : Ombre portée

b) Faisceau conique (source ponctuelle)

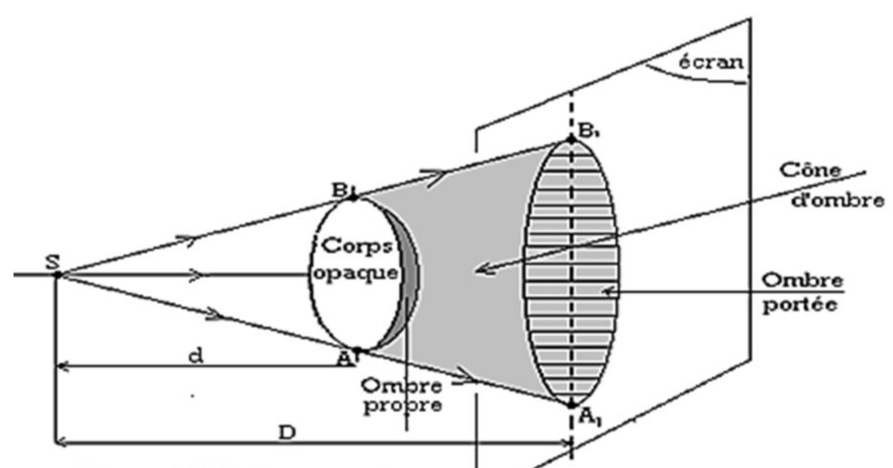


Figure 9.7 : Faisceau conique

$$\frac{AB}{d} = \frac{A_1B_1}{D} \qquad (9.4)$$

c) Cas d'une source étendue

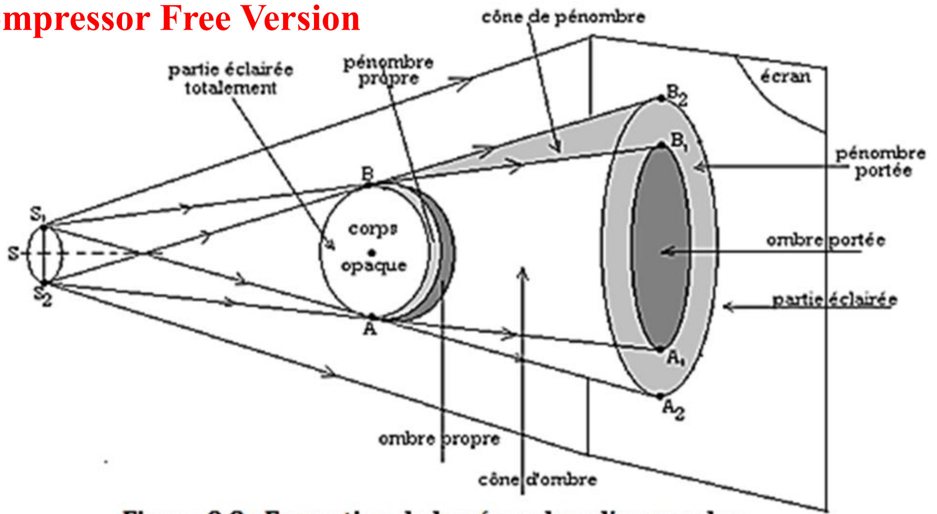


Figure 9.8 : Formation de la pénombre d'un nombre

d) Les éclipses

- La Terre tourne autour du soleil dans le système Solaire et la Lune tourne autour de la Terre. Il peut arriver que dans leur mouvement, les trois corps (*Terre, Soleil, Lune*) soient alignés : on parle alors d'éclipse. Il existe deux types d'éclipses : l'éclipse de la Lune et l'éclipse du soleil.
- Il y a éclipse de la lune quand la lune passe dans le cône d'ombre de la Terre.

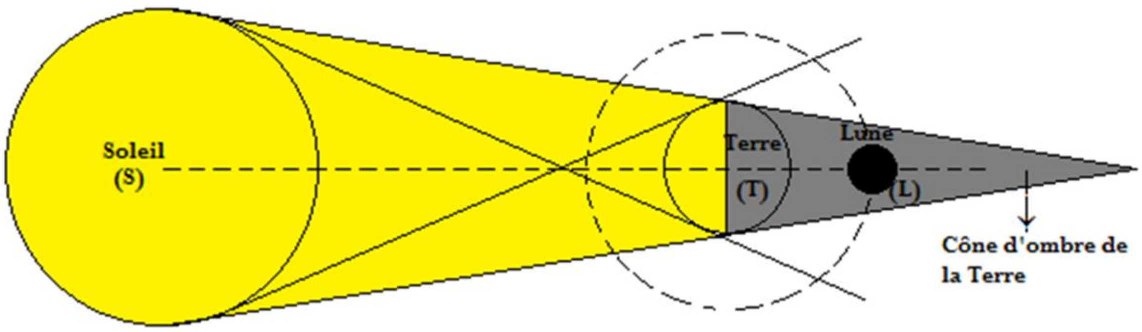


Figure 9.9 : Éclipse de la Lune

- Il y a éclipse du soleil quand le cône d'ombre de la lune est coupé par la Terre.

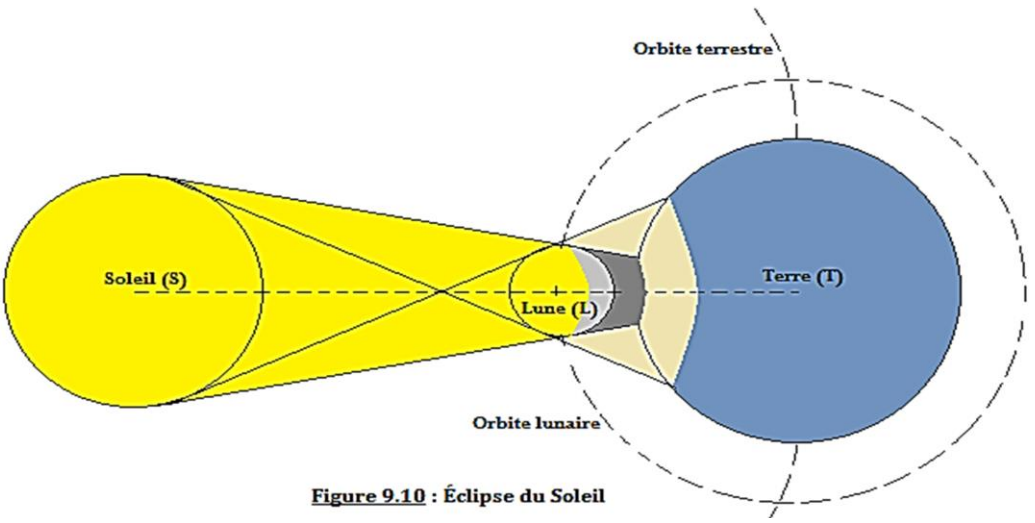


Figure 9.10 : Éclipse du Soleil

Remarque

- Comme application de la propagation de la lumière, on peut citer :
  - Ombre et pénombre
  - L'alignement d'optique
  - La diffraction de la lumière
  - La réflexion de la lumière
  - La réfraction de la lumière
- Le **diamètre apparent** d'un objet est aussi l'angle sous lequel un observateur très éloigné voit cet objet.

Activité 9.2

Pour évaluer la hauteur d'une maison, un observateur situé à 400 m de la maison tient verticalement à bout de bras une règle graduée, située à 0,60 m de son œil. Il voit la maison sous le même angle apparent que 2,4 cm de la règle. Déterminer la hauteur de la maison.

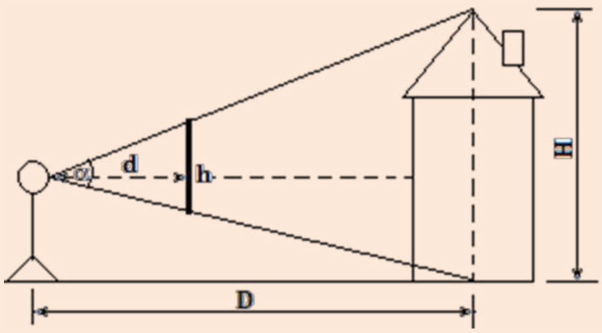
Solution

Données : Notons : D = d(homme, maison) = 400 m ; d = 0,6 m = d(œil, homme) ; H = hauteur de la maison et h = 2,4 cm, la hauteur de la règle.

On a :

$$tg\alpha = \frac{h}{d} = \frac{H}{D} \Rightarrow H = \frac{h}{d} \times D$$

AN : H = 16 m = 1600 cm



5. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Éclipse	Eclipse
Lumière	Light
Soleil	Sun
Lune	Moon
Terre	Earth
Éclipse solaire	Solar eclipse
Éclipse lunaire	Lunar eclipse
Rayon lumineux	Ray light
Faisceau lumineux	Light beam

Sentences

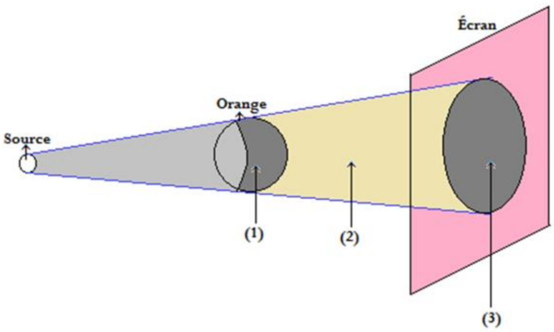
- In the void and in all transparent and homogeneous environments, light propagates in a straight line.
- The light year (a.l) is the distance traveled by a light signal in one year.

EXERCICES DE LA LEÇON 9 : PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : diffraction de la lumière ; diamètre apparent ; lumière ;
2. Décrire le phénomène de l'éclipse du soleil
3. Sur la figure ci-dessous, donner le nom des parties (1), (2) et (3).



4. Recopier et compléter les pointillés des phrases ci-dessous.

4.1. Les corps qui émettent la lumière sont appelés……Une source lumineuse est dite……lorsqu'elle produit elle-même la lumière émise. Elle est dite……lorsqu'elle ne produit pas elle-même la lumière émise.

4.2. La lumière se propage dans un milieu transparent et homogène en……

4.3. Un rayon lumineux est tout……suivi par……On le représente par un……dont la flèche indique le……de la lumière.

4.4. Un faisceau lumineux est un……de rayons lumineux. On distingue……types de faisceaux lumineux : les faisceaux…., les faisceaux…… et les faisceaux……

4.5. Une chambre noire, donne d'un objet une image dont la grandeur dépend de celle de l'…….et de la distance entre l'objet et l'…….de la chambre de la chambre noire.

4.6. L'ombre……est la partie d'un objet éclairé qui ne reçoit aucun rayon lumineux. L'ombre……est la partie de l'écran qui ne reçoit aucun rayon lumineux. Le……est le tronc de cône situé entre le corps opaque éclairé et l'écran. Il ne reçoit aucun rayon lumineux.

5. **Vrai ou faux**

5.1. Pour se propager, la lumière nécessite un milieu matériel.

5.2. Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se propage en ligne droite.

5.3. La propagation rectiligne de la lumière est toujours vérifiée.

5.4. La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est égale à 3.10^{08} m.s^{-1}.

5.5. Dans un milieu transparent, la vitesse de la lumière est supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide.

5.6. Un milieu transparent stop complètement les rayons lumineux.

5.7. L'image donnée par une chambre noire est droite par rapport à l'objet.

5.8. Une éclipse de Soleil est observée lorsque la Lune se trouve dans le cône d'ombre de la Terre.

5.9. La diffraction est la propagation rectiligne de la lumière.

5.10. Un milieu transparent peut devenir opaque lorsque l'épaisseur à travers est grande.

6. **Compréhension du cours**

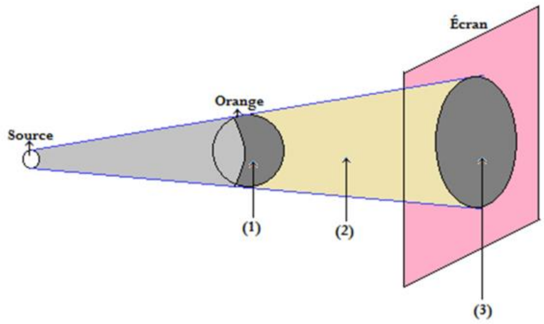
6.1. Énumérer trois applications pratiques qui utilisent le principe de propagation rectiligne de la lumière.

6.2. Décrire le phénomène de la diffraction de la lumière.

Exercice 2 : Application de savoirs

1. **Utilisation directe du cours**

On considère la figure ci-dessous.



Déterminer le diamètre de la partie (3) sachant que celui de l'orange est de 8cm. La source (S) est à 20 cm du corps opaque et l'écran à 30 cm de celui-ci.

2. **Compréhension du cours**

On remplace le corps opaque (orange) de la figure ci-dessus par un disque opaque de rayon 10 cm, placé à 20 cm de la source ponctuelle (S) et à 50 cm de l'écran. Le plan du disque et celui de l'écran sont parallèles. La source (S) est placée sur l'axe du disque.

2.1. Faire un schéma clair du phénomène observé. Préciser l'échelle utilisée.

2.2. Calculer le rayon de l'ombre portée sur l'écran.

2.3. À quelle distance de la source devrait-on placer ce disque pour que l'ombre portée sur l'écran ait une aire triple de celle du disque ?

3. **Propagation de la lumière sur de grande surface.**

La distance entre la Terre (T) et la Lune est de 385 000 km et celle entre le Soleil (S) et la Terre est de 150 millions de km. Le Soleil a un rayon de 696 000 km ; celui de la Lune est de 1740 km ; celui de la Terre est de 6 400 km.

3.1. Calculer le diamètre apparent du Soleil et celui de la Lune vue de la Terre.

3.2. Calculer le diamètre apparent de la Terre vue de la Lune.

4. Application de la chambre noire en photographie

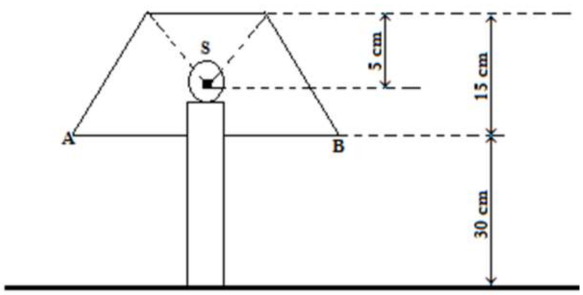
Paul, à l'aide de son appareil photographique assimilable à une chambre noire, décide de photographier son ami André qui a une taille de 1,60 m. André est placé à 3 m de l'objectif assimilable à l'orifice de la chambre noire.

4.1. Faire un schéma clair traduisant le phénomène physique étudié.

4.2. Quelle est la taille sur le film (écran) de l'image d'André si la profondeur de la chambre noire est de 5 cm ?

4.3. Peut-il avec cet appareil réglé dans les conditions de la question (11.2), faire une photo entière de son ami André, s'il est à 2 m de l'objectif ? On suppose que le film (écran) a pour dimensions 35 × 22 mm².

5. Lampe et propagation



La lampe de bureau représentée sur la figure ci-dessus, éclaire la table jusqu'à 40 cm du centre de son pied. Le filament S, dans l'ampoule transparente, est une source lumineuse pratiquement ponctuelle. L'abat-jour, opaque, est de forme tronconique.

En utilisant les données numériques de la figure, déterminer le diamètre AB de la base de l'abat-jour.

6. Propriétés de Thalès : Diamètre apparent

6.1. Un globe de rayon R = 10 cm, émet de la lumière dans toutes les directions en particulier vers l'œil O d'un observateur situé à d = 3 m du centre du globe.
Sous quel angle, maximum, appelé diamètre apparent, l'observateur voit-il le globe ?

6.2. Un observateur regarde la pleine lune. La lune a pour rayon 1 740 km vue de cette observation. La distance observateur centre de la lune est 380 000 km.
Sous quel diamètre apparent voit-il la Lune ?

6.3. Un cercle opaque de 10 cm de diamètre, est placé entre une source de lumière ponctuelle et un écran parallèle à ce cercle, à 1 m de la source et de l'écran.
Calculer le diamètre apparent de l'ombre portée sur l'écran.

6.4. Une source ponctuelle se trouve sur l'axe d'un disque opaque de 5 cm de rayon, à un 1 m de ce cercle.
À quelle distance doit-on placer un écran parallèle au plan du disque pour que la surface de l'ombre portée soit 16 fois plus grande que la surface du disque ?

6.5. Un élève mesure l'ombre d'une règle verticale et constate qu'elle mesure 1 m et son ombre 0,62 cm.
Quelle est la hauteur d'un poteau d'ENEO qui mesure 5 m ?

6.6. Une source de lumière en forme de disque de 1 cm de diamètre, éclaire un disque opaque de même axe, ayant 5 cm de rayon et placé à 50 cm de la source.
Calculer les longueurs de l'ombre portée et de la pénombre sur un écran parallèle au disque et situé à 2 m du disque opaque.

7. Calcul des dimensions d'une ombre

Un disque opaque de 20 cm de diamètre est placé à 50 cm d'une source ponctuelle et à 1,5 m d'un écran.

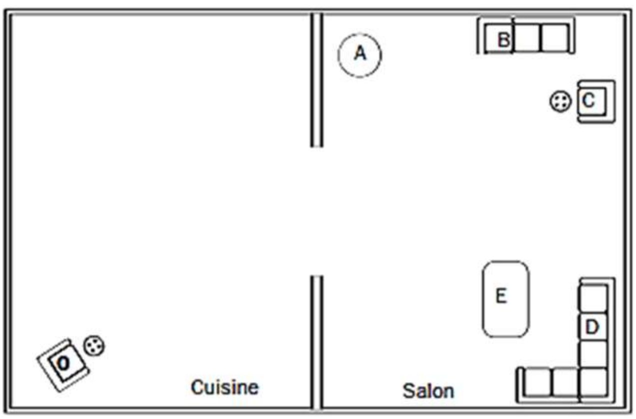
7.1. Faire une illustration de la situation.

7.2. Déterminer le diamètre de l'ombre obtenue.

8. Un disque opaque est placé entre une source et un écran. Si on maintient la source fixe, quelles sont les deux façons d'augmenter la grandeur de l'ombre ?

9. Marche du rayon lumineux

Un observateur est placé en O et regarde à travers la porte séparant la cuisine du salon, comme dans la figure ci-dessous.



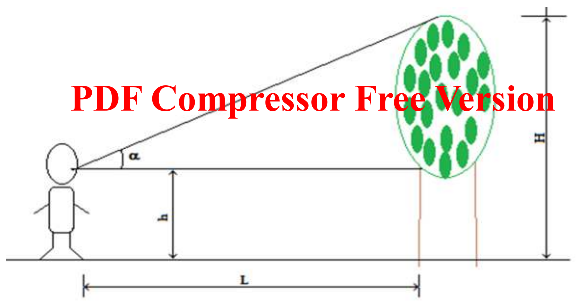
9.1. Construisez les rayons qui délimitent le champ de vision de l'observateur à travers l'ouverture.

9.2. Indiquer par des lettres, quels meubles l'observateur ne peut pas voir.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Propagation et vision relative

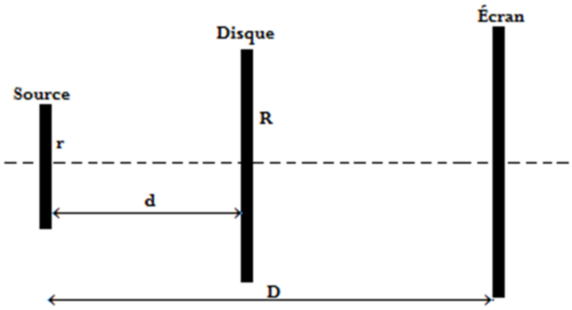
Un élève désire déterminer la hauteur d'un arbre vertical. Pour cela, il s'éloigne du pied de l'arbre d'une distance L = 20 m et vise horizontalement un point du tronc, puis, il vise le sommet de l'arbre. Un instrument approprié lui permet de mesurer l'angle que font entre elles les deux directions de visée. Il trouve α = 40°. Voir figure ci-dessous.



La hauteur entre le sol (supposé horizontal) et l'instrument de visée est h = 1,70 m. L'élève affirme que la hauteur de l'arbre est H = 17 m. A-t-il raison ? Sinon, quelle est son erreur ?

Situation 2

Devant une source lumineuse de rayon r et à la distance d est placé un disque opaque de rayon R, l'ensemble forme une ombre sur un écran placé à la distance D de la source.



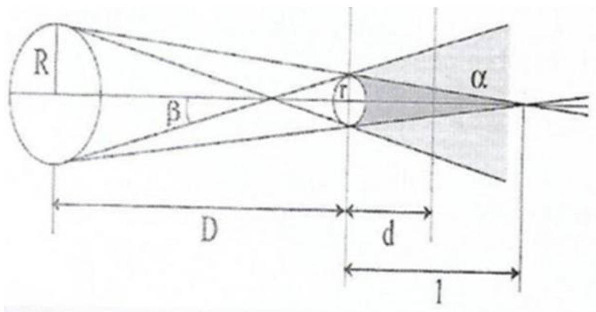
Déterminer :

- Le rayon x de l'ombre en fonction de r, R, d et D.
- Le rayon X de la pénombre en fonction de r, R, d et D.

Application numérique : r = 5cm ; R = 10 cm ; d = 1 m ; D = 2 m.

Situation 3

La Terre de rayon r éclairée par le soleil de rayon R, crée derrière elle, une zone d'ombre et de pénombre. On déterminer les caractéristiques de la zone d'ombre qui a une forme conique (triangulaire sur le plan de la figure).



On donne : R = 690 000 km ; D = 150 millions (distance Soleil–Terre) ; r = 6370 km ; d = 384 000 km (distance Terre–Lune) ; d_2 = 3400 km (diamètre de la Lune).

- Déterminer la longueur l du cône d'ombre en fonction de R, r et D, la distance entre le soleil et la lune.
- À quelle distance d de l'astre, l'ombre et la pénombre, ont une forme circulaire de rayon l_1 ?
- Déterminer l'expression de l_1 en fonction de r, R, D et d.

Situation 4

Un poteau vertical a pour hauteur 2 m. À un certain moment, son ombre sur le sol plat et horizontal, a pour longueur 8,0 m. Au même instant, un peuplier a une ombre sur le sol horizontal, une longueur voisine de 7 m. Les rayons lumineux du soleil sont pratiquement parallèles entre eux.

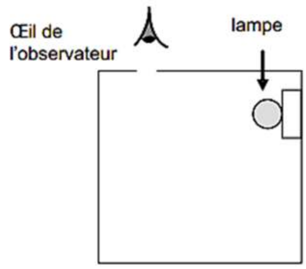
Calculer la hauteur du peuplier.

Situation 5 : Exploitation des documents

- Observe attentivement ces images

Ces deux images de bandes dessinées (BD) contiennent la même erreur scientifique. Laquelle ?

- Une boîte est entièrement tapissée de noir à l'intérieur et percée d'un trou sur le dessus. Une lampe est placée dans la boîte (voir figure). Un observateur regarde par le trou.



- Si la lampe est éteinte, que voit l'observateur ? Justifie ta réponse avec une (ou deux) phrase(s).
- Si la lampe est allumée, que voit-il ? Justifie ta réponse avec une (ou deux) phrase(s).
- Dans la boîte, place une boule blanche de façon à ce qu'elle soit visible par l'observateur quand la lampe est allumée.

Situation 6 : Effet de la lumière

Imagine et décris dans ton cahier, deux situations qui confirment la règle selon laquelle « on ne voit pas la lumière, on voit que des objets ».

- Une situation dans notre environnement familier proche.
- Une situation dans un environnement lointain.

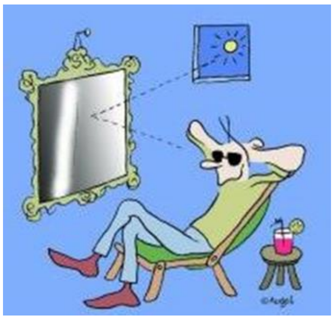
MODULE ⇒ OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE 3

Leçon 10 — LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

ACTIVITÉ(S)

Observe l'image ci-contre

(a) Comment expliquer le fait que cet homme assis puisse observer le soleil à l'extérieur de la maison alors que lui il se trouve à l'intérieur ?
(b) Quels phénomènes physiques sont mis en évidence dans cette image ?
(c) Que se passerait-il s'il ferme la fenêtre ? Ces phénomènes existeraient toujours ?



Objectifs

- Définir : réflexion de la lumière ; miroir.
- Énoncer la loi du retour inverse de la lumière.
- Énoncer et appliquer les lois de la réflexion de la lumière.

1. Définition et mise en évidence

1.1. Définition

La **réflexion de la lumière** est le phénomène de déviation de la lumière dans une direction privilégiée au contact d'une surface plane, polie et réfléchissante appelée miroir-plan.

1.2. Étude expérimentale de la réflexion

- **Dispositif expérimental**

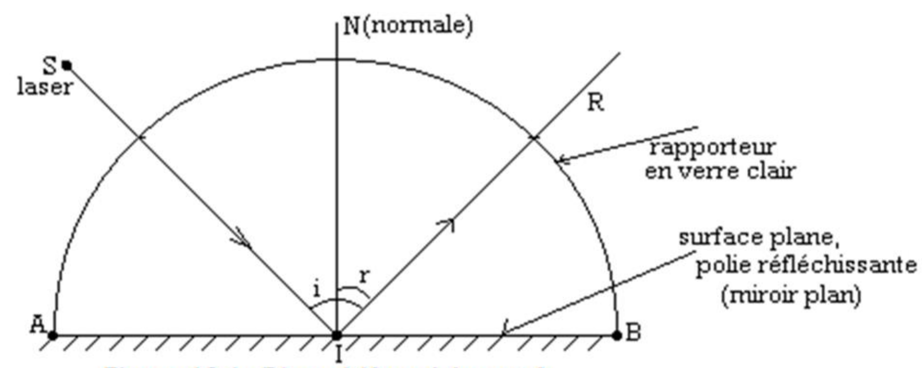


Figure 10.1 : Dispositif expérimental

- **Observations** :

Au contact du rayon lumineux issu de S avec la surface plane au point I, il est dévié dans une direction privilégiée IR. On remarque que :

$$\widehat{SIN} = \widehat{NIR} \qquad (10.1)$$

- **Interprétations** :

- Cette déviation dans une direction privilégiée du rayon SI en IR représente le phénomène de réflexion de la lumière.
- Dans le langage optique :
  - $\overrightarrow{SI}$ = **rayon incident** ;

- $\overrightarrow{IR}$ = rayon réfléchi ;
- $\widehat{SIN}$ = i = angle d'incidence ;
- $\widehat{NIR}$ = r = angle de réflexion ;

- SIN est le plan d'incidence car contient le rayon d'incidence SI ;
- INR est le plan de réflexion car contient le rayon réfléchi IR ;

2. Les lois de la réflexion de la lumière

Les lois de Descartes pour la réflexion :

1ère loi ou loi du plan

Les rayons incident et réfléchi sont contenus dans le même plan d'incidence

2e loi ou loi des angles

L'angle d'incidence **i** est égal à l'angle de réflexion **r** : $i = r$ (10.2)

3. Principe du retour inverse de la lumière

La loi du retour inverse de la lumière : « Le trajet suivi par la lumière n'est pas modifié lorsque l'on change le sens de sa propagation ».

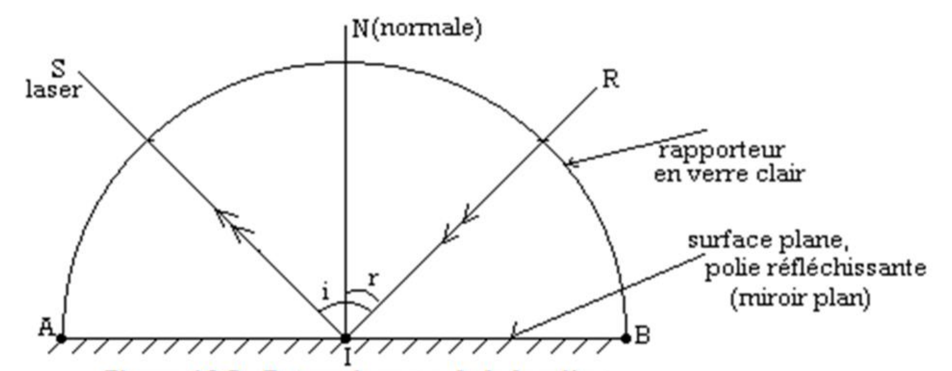


Figure 10.2 : Retour inverse de la lumière

4. Le miroir plan

4.1. Définition et représentation symbolique

- On appelle miroir plan toute surface plane, polie et réfléchissante.
- **Schématisation** :

Exemple : métal poli, vitre, surface d'un nappe d'eau au repos, etc.

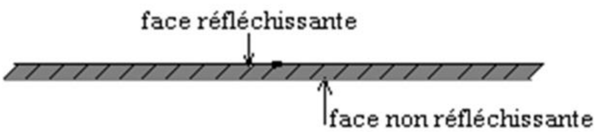


Figure 10.3 : Miroir plan

- En général, pour augmenter le pouvoir réflecteur d'une vitre, on met sur l'une de ses faces, une couche d'argent ou d'étain qui la rendra non réfléchissante.

4.2. Formation de l'image d'un objet à travers un miroir plan

- Un point est objet pour un système optique lorsque les rayons incidents sur le système se croisent en ce point (figure 10.4 a).

Remarque

L'objet est réel lorsque le croisement est effectif en ce point. Mais si les rayons sont interceptés par les systèmes optiques, l'objet est dit virtuel (figure 10.4 b).

- Un point est **image** pour un système optique, lorsque les rayons qui émergent (sortant) le système optique se croisent en ce point (figure 10.4 c).

Remarque

L'image est **réelle** lorsque le croisement des rayons est effectif en ce point, mais lorsque les rayons semblent provenir de ce point, l'image est dite **virtuelle** (figure 10.4 d).

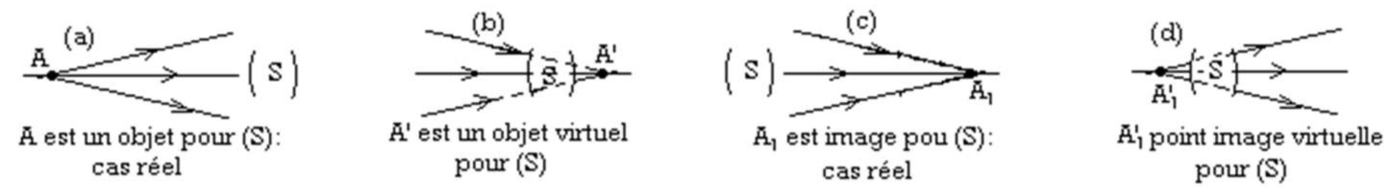


Figure 10.4 : Objet et image

- **Expérience de deux bougies**.

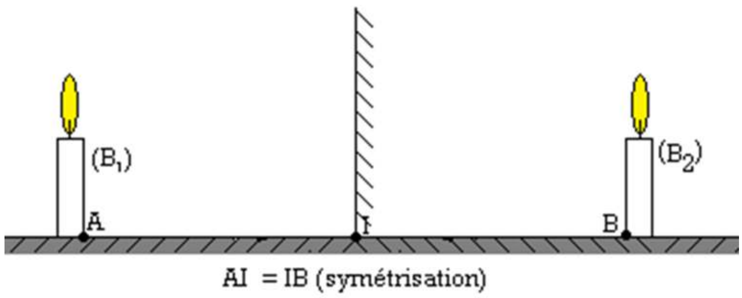


Figure 10.5 : Schéma expérimental

On allume nos deux bougies. Quel que soit la position de l'observateur, du côté de (B_1) ou de celui de (B_2), l'image de (B_1) et celle de (B_2) sont **confondues** à travers le support vertical.

Conclusion

L'image d'un objet à travers un miroir plan est symétrique de cet objet par rapport au plan du miroir.

- **1er cas : Objet réel** $\overline{AB}$

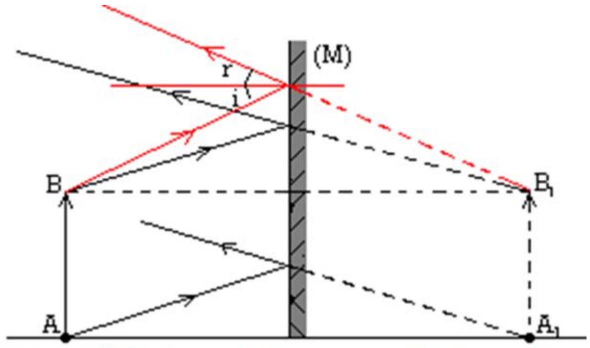


Figure 10.6 : Image à travers un miroir cas d'un objet réel

- $\overline{A_1B_1}$ image virtuelle de l'objet $\overline{AB}$ à travers le miroir plan (M)
- $\overline{AB} = \overline{A_1B_1}$ même grandeur

- **2e cas : Objet virtuel** $\overline{AB}$

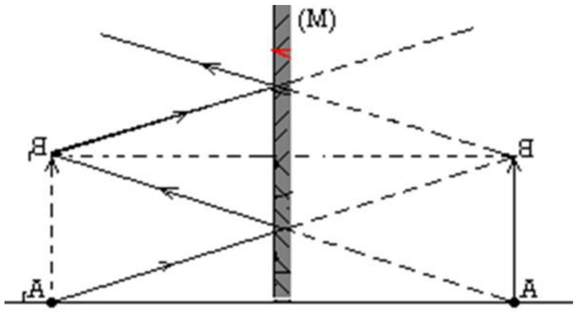


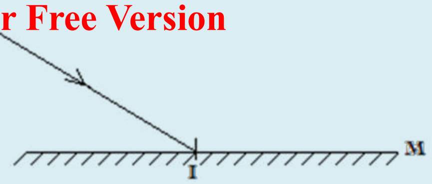
Figure 10.7 : Ca d'un objet virtuel

☞ $\overline{A_1B_1}$ image réelle de l'objet $\overline{AB}$ à travers le miroir plan (M)

☞ $\overline{AB} = \overline{A_1B_1}$ même grandeur

Activité 5.1

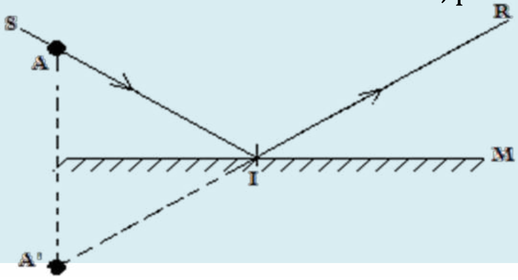
Tracer la marche du rayon incident SI du schéma ci-dessous à travers le miroir M.



Solution

Méthode :

- Placer un point A sur le rayon SI, puis construire le symétrique A’ de A par rapport au plan du miroir.
- Tracer en interrompu, le segment A’I.
- Prolonger le segment A’I en continu au-delà du miroir, puis orienter le rayon IR : c’est le rayon réfléchi

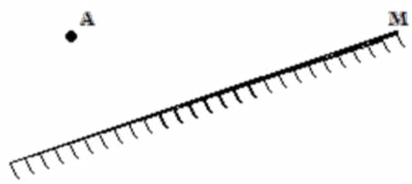


Activité 5.2

Construire l’image A’ du point objet A à travers le miroir M :

4.2.1. 1er cas : Sans utiliser le rayon lumineux.

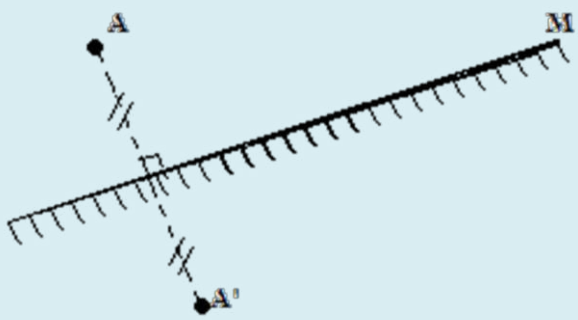
4.2.2. 2^{e} cas : en utilisant le faisceau de rayons lumineux.



Solution

1. 1er cas : Sans utiliser le rayon lumineux.

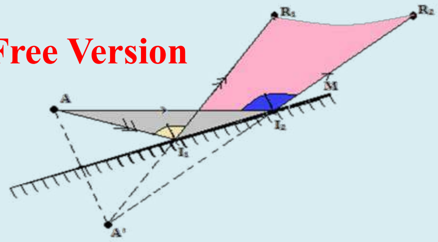
Il suffit pour cela de tracer le symétrique A’ de A par rapport au plan du miroir.



2. 2^{e} cas : En utilisant les faisceaux lumineux.

<u>**Méthode**</u>

- Choisir deux points d’incidence I_1 et I_2 sur M ;
- Tracer la marche des rayons incidents AI_1 et AI_2 ;
- Tracer les rayons réfléchis I_1R_1 et I_2R_2. Leurs prolongements se rencontrent en A’.

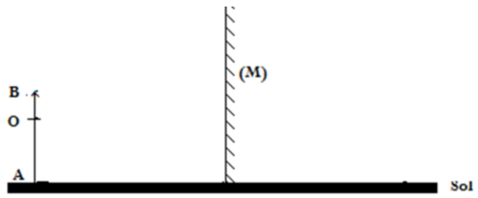


Activité 5.3

Une personne AB de taille 1,70 m, est placée devant un miroir (M). Ses yeux (O) sont situés à 10 cm du sommet A de la tête (voir figure). Le miroir et la personne sont supposés verticaux.

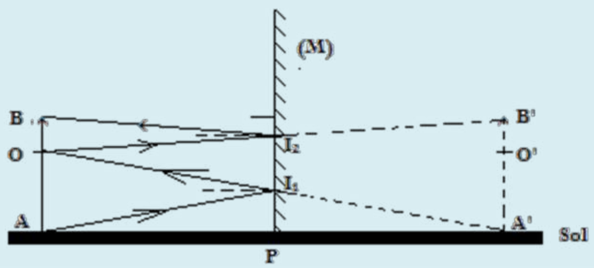
1. Construire l'image A'B' de la personne AB. Quelle est sa nature ? Sa taille ?
2. La personne veut se voir « en pied » i.e. en entier.

1.1. À quelle hauteur maximale h du sol doit se trouver le bas du miroir ?
1.2. Quelle est la hauteur minimale l du miroir ?



Solution

1. Construction, nature et taille de A'B'



- A'B' est virtuelle et a même taille de l'homme AB.

2. Déterminons :

2.1. La hauteur maximale h = I_1P.

$$tg\hat{A'} = \frac{I_1P}{A'P} = \frac{AO}{AA'} \Rightarrow \frac{h}{AO} = \frac{AO}{2AO} \Leftrightarrow h = \frac{OA}{2}$$

Or, OA = AB – OB $\Rightarrow h = \frac{AB - OB}{2} = 0{,}80m$

2.2. La hauteur minimale l = I_1I_2 du miroir.

$$tg\hat{O} = \frac{I_1I_2}{AP} = \frac{A'B'}{AA'} \Rightarrow \frac{\ell}{AP} = \frac{AB}{2AP} \Leftrightarrow \ell = \frac{AB}{2}$$

Car A'B' = AB ; AA' = 2AP.

AN : ℓ = 0,85 m

5. Jeu bilingue

Sentences

Law of the plane: "The incident and reflected rays are contained in the same plane of incidence."

Law of angles: "The angle of incidence i is equal to the angle of reflection r: r = i."

EXERCICES DE LA LEÇON 11 : LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : réflexion de la lumière ; rayon incident ; rayon réfléchi ; angle d'incidence ; angle de réflexion ; miroir plan.

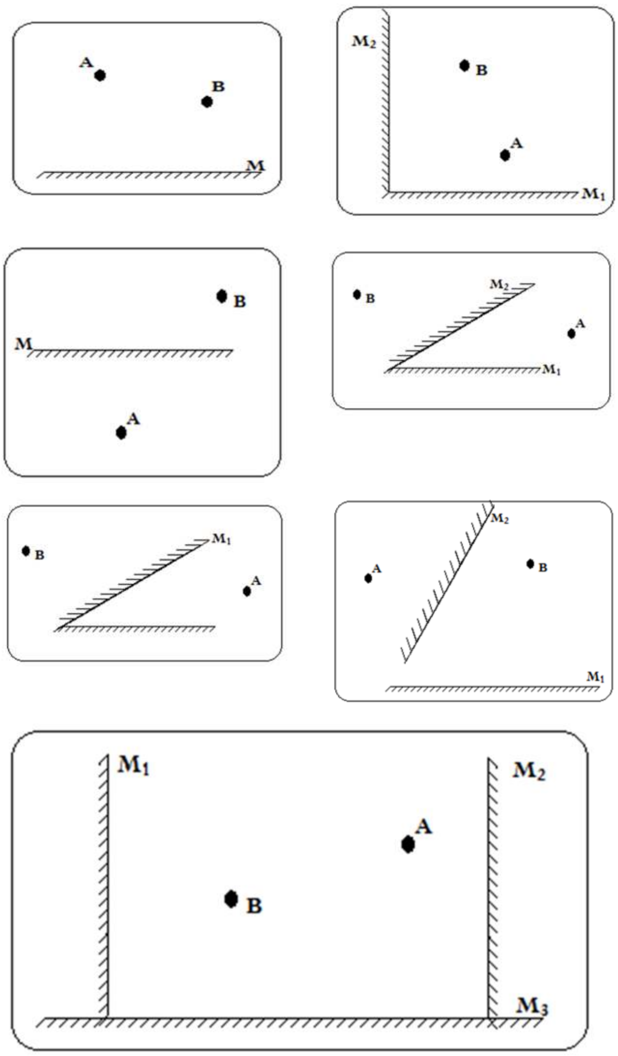
2. Énoncer :
➲ Les lois de Descartes sur la réflexion de la lumière.
➲ La loi du retour inverse de la lumière.

3. Recopier et compléter les phrases suivantes :
3.1. L'angle d'incidence, est l'angle entre le.....et la......à la surface de séparation.
3.2. Lorsque la lumière rencontre un miroir, elle se.......On trouve une application de ce phénomène dans les......
3.3. La réflexion de la lumière est le renvoi de la lumière par une......dans une direction donnée.
3.4. L'......est défini par le rayon réfléchi et la normale au plan du miroir.
3.5. Le point objet est réel lorsque le faisceau lumineux incident est.......et le point image est virtuel lorsque le faisceau lumineux émergent est.....
3.6. Un miroir plan, donne d'un objet réel une image......qui est......de l'objet par rapport au plan du miroir.

4. Répondre par vrai ou faux et corriger les affirmations fausses.
4.1. Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale sont dans le même plan d'incidence.
4.2. L'huile au repos est un miroir.
4.3. L'angle d'incidence est toujours égal à l'angle réfléchi.
4.4. La réflexion est le renvoi de la lumière dans toutes les directions.
4.5. Une vitre dépolie est un miroir.
4.6. Tout objet à travers lequel l'image est symétrique à son objet, est appelé miroir plan.

5. Choisir la bonne réponse.
5.1. Le rayon incident est :
(a) Normal au plan du miroir
(b) Égal au rayon réfléchi
(c) Contenu dans le plan du rayon réfléchi.
5.2. Lorsqu'on fait roter un miroir d'un angle α, alors :
(a) L'angle d'incidence rote de 2α
(b) L'angle de réflexion rote de 2α
(c) L'angle d'incidence et l'angle réfléchi rotent de 2α.
5.3. Un miroir plan, donne d'un objet virtuel, une image :
(a) Virtuelle
(b) Réelle.
5.4. Un rayon perpendiculaire au plan du miroir tombe sous une incidence de :
(a) 90°
(b) 0°
(c) 45°.
5.5. L'angle de réflexion d'un rayon incident tombant à 32° par rapport au plan du miroir, a pour valeur :
(a) 32°
(b) 58°
(c) 64°
5.6. L'image à travers un miroir plan de l'immatriculation CE 1973F est :
(a) F3791EC
(b) EC9137F
(c) 
5.7. L'image virtuelle de l'image virtuelle d'un objet vu à travers un miroir plan est :
(a) Virtuelle
(b) Réelle.
5.8. L'image de la main droite vue à travers un miroir plan est :
(a) La main gauche
(b) La main droite
(c) Aucune réponse n'est juste.

6. Construire l'image des points A et B et préciser leur nature ainsi que celle de leur image, dans chacune des figures ci-dessous. (En utilisant deux méthodes différentes i.e. sans utiliser les rayons lumineux et en utilisant les rayons lumineux)



Exercice 2 : Application des savoirs

1. Un homme est debout devant un miroir plan à une distance de 2 m du miroir.

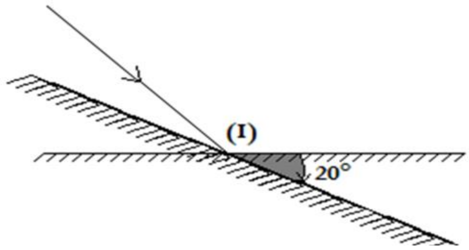
1.1. À quelle distance se trouve-t-il de son image ?

1.2. On place derrière lui, un autre miroir à la même distance. On suppose qu'il est placé de manière que chaque miroir ne donne qu'une seule image. Quelle est la distance qui sépare les deux images ?

2. Un pinceau lumineux issu d'un laser arrive sur un miroir plan en un point I. On fait tourner le miroir d'un angle $\alpha = 20°$ autour de l'axe (Δ) orthogonal au plan d'incidence et passant par le point I.

2.1. Représenter le rayon incident et les rayons réfléchis avant et après la rotation.

2.2. Déterminer l'angle de rotation du rayon réfléchi.



3. L'œil O d'un observateur est placé à 1 m d'un miroir plan.

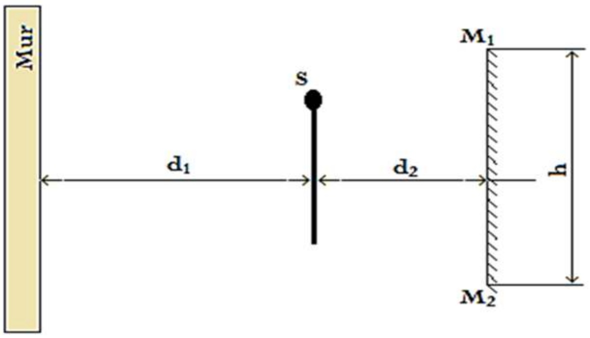
3.1. À quelle distance est-il de son image O' ?

3.2. On déplace le miroir parallèlement à lui-même, d'abord en avant de 25 cm, puis en arrière de 25 cm.

(a) Que devient dans chaque cas, la distance de l'œil à son image ?

(b) Généraliser ces résultats dans l'énoncé d'un théorème concernant la translation d'un miroir plan.

4. On désire éclairer une portion d'un mur vertical à l'aide d'une source ponctuelle lumineuse S située sur l'axe d'un miroir plan circulaire M_1M_2 de diamètre h disposé verticalement. Les distances qui séparent S respectivement du mur et du miroir sont d_1 et d_2 (voir figure). Pour cela, un faisceau lumineux issu de S et dirigé en sens opposé du mur, éclaire toute la surface du miroir et on obtient une tâche lumineuse circulaire sur le mur.

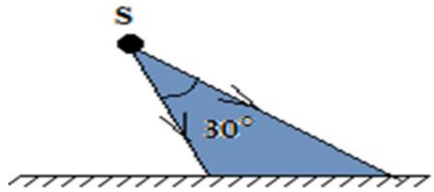


4.1. Reproduire la figure et construire l'image de S donnée par le miroir.

4.2. Tracer les marches des rayons lumineux qui, issus de S, frappent le miroir en deux points M_1 et M_2 diamétralement opposés.

4.3. En déduire le rayon de la tâche lumineuse formée sur le mur.
AN : $d_1 = 2$ m ; $d_2 = 50$ cm ; $h = 20$ cm.

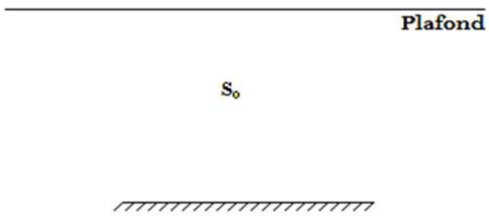
5. Deux rayons lumineux incidents issus d'une source ponctuelle S et contenus dans un même plan vertical font entre eux un angle de 30°. Ces rayons tombent sur un miroir plan horizontal comme l'indique la figure ci-dessous.
Déterminer l'angle que font entre eux leurs rayons réfléchis.



6. Une source lumineuse ponctuelle S éclaire un miroir plan circulaire de 20 cm de diamètre ; elle se trouve à 60 cm au-dessus du miroir et dans son axe. Il se forme alors une tâche lumineuse circulaire sur le plafond situé à 2 m au-dessus du miroir.

6.1. Représenter le dispositif à l'échelle 1 : 20 et tracer la marche des rayons lumineux extrêmes.

6.2. Calculer le diamètre de la tâche lumineuse formée au plafond



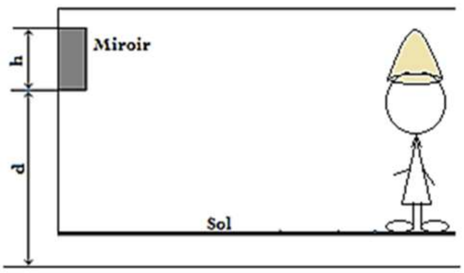
7. Un miroir plan vertical rectangulaire a pour hauteur h = 95 cm, son bord inférieur horizontal, est situé à la distance d = 95 cm du sol. Un homme se tenant bien vertical, se regarde dans cette glace. L'homme a ses yeux à 1m du miroir et à 1,70 m du sol.

7.1. Peut-il observer l'image de son chapeau ? De ses chaussures ?

7.2. L'homme touche avec sa main droite, la branche droite de ses lunettes. Décrire le geste fait par l'homme image.

7.3. L'homme se rapproche du miroir, ses yeux sont maintenant à 30 cm du miroir. Peut-il alors observer l'image de ses chaussures ?

7.4. L'homme, qui est un physicien avisé, calcule qu'en baissant le miroir, il pourrait se voir du chapeau aux chaussures. De combien de cm ou m devrait-il baisser le miroir ?



PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Dimensions et forme d'images

Un miroir plan circulaire de diamètre 20 cm est placé verticalement contre un mur dans une pièce sombre ; une source lumineuse quasi ponctuelle S est placée sur l'axe du miroir à 80 cm du miroir.
Préciser la forme et les dimensions de la zone éclairée sur le mur parallèle, opposé, situé à la distance de 4m du miroir.

Situation 2 : Position par rapport à un miroir

Une personne d'une hauteur de 1,80 m, se regarde dans un miroir plan. Les yeux sont à 10 cm du sommet de la tête.
Quelles doivent être la dimension minimale et la distance au sol du miroir pour que l'observateur se voie tout entier ?

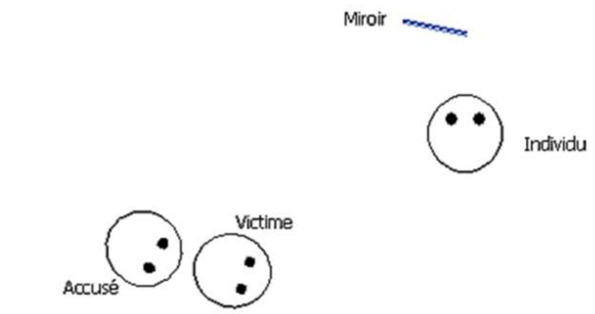
Situation 3 : Marche des rayons lumineux

Deux miroirs font entre eux un angle de 90°.

- Un rayon lumineux incident situé dans un plan perpendiculaire à l'intersection des 2-miroirs subit 2-réflexions successives.
  Comparer les directions du rayon incident et du rayon réfléchi.
- Une source lumineuse S est située entre les 2-miroirs à 3 cm de l'un et 4cm de l'autre.
  Construire les images successives données par l'ensemble des 2-miroirs. À quelle figure géométrique appartiennent-elles ?

Situation 4 : Le témoin et l'Accusé

Lors d'un procès, on vous charge d'analyser la véracité d'un témoignage important pour incriminer l'accusé, qui aurait volé un portefeuille dans un magasin. Un individu situé devant le miroir plan d'une petite boutique dit avoir vu l'accusé voler la victime par le miroir. La situation a été recréée sur le schéma ci-dessous.

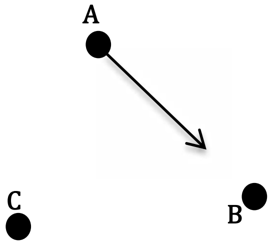


L'individu pouvait-il voir le visage du voleur ? Justifier votre réponse en ressortant le champ de vision du témoin.

Situation 5 : Marche des rayons lumineux

Un rayon lumineux issu du point A, se propage en direction du point B.

Comment faut-il disposer un miroir plan en B et un second miroir plan en C, pour que le rayon réfléchi après réflexion en B et C, passe par A ?

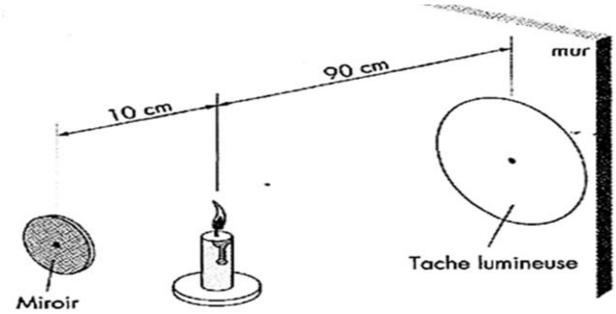


Situation 6 : Objet et image à travers un miroir

Une personne est debout à 2,8 m devant un miroir plan.
Quelle est la distance qui la sépare de son image ?

Situation 7 : Détermination des dimensions

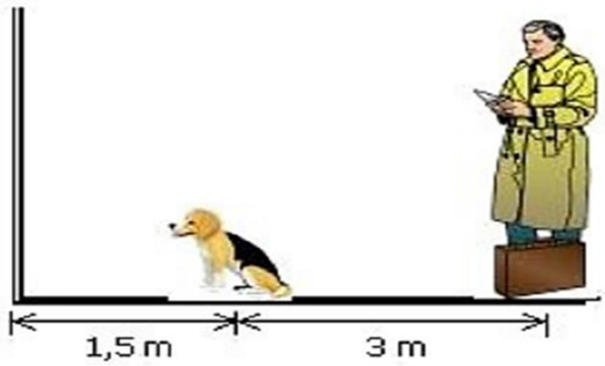
Une bougie, considérée comme source ponctuelle, est située à 10 cm d'un miroir plan de forme circulaire et de rayon égal à 2,5 cm.



Quel est le diamètre de la tâche lumineuse projetée après réflexion, sur un mur situé à 90 cm de la bougie du côté opposé du miroir ?
La flamme est sur l'axe de symétrie du miroir ; le plan du mur et celui du miroir sont parallèles.

Situation 8 : L'homme et le chien

Un homme de 1,50 m est debout à 3 m d'un chien. Le chien devant lui est placé à 1,5 m d'un miroir et mesure 0,5 m de haut. La distance entre les yeux de l'homme et le sol est de 1,45 m et la distance entre les yeux du chien et le sol est de 0,45 m.



- Quelle serait la hauteur du plus petit miroir accroché sur le mur, qui permettrait au chien de se voir au complet ?
- À quelle hauteur devrait-il accrocher le miroir ?
- Quel est le plus petit miroir, accroché au mur, qui permettrait au chien de voir l'homme au complet ?

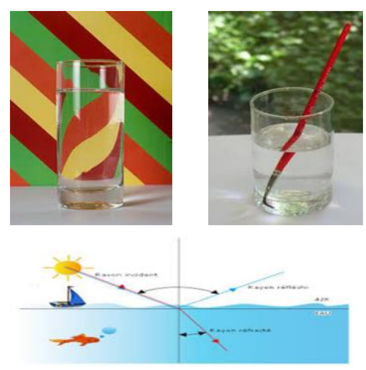
MODULE ⇒ **OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE** 3

Leçon 11 LA RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

ACTIVITÉ(S)

Observe les images ci-contre

(a) Comment expliquer la déformation des traits colorés, du pâton dans un verre d'eau ?
(b) Quels phénomènes physiques sont mis en évidence dans ces images ?
(c) Proposer alors une définition de la réfraction de la lumière.



Objectifs

- Définir : réfraction de la lumière ; dioptre ; indice d'un milieu ; réfraction limite ; réflexion.
- Énoncer et appliquer les lois de la réfraction de la lumière.

1. Définition et mise en évidence

1.1. Définitions

- On appelle **réfraction** de la lumière, le brusque changement de direction que subit la lumière à la traversée de la surface de séparation de deux milieux homogènes et transparents appelés **surface réfringente** ou **dioptre plan**.
- Le **dioptre** est la surface de séparation de deux milieux transparents
- Lorsque cette surface est plane, le dioptre est appelé **dioptre plan**.

Exemple : **air – eau, air –verre, eau – verre, etc.**

1.2. Étude expérimentale de la réfraction

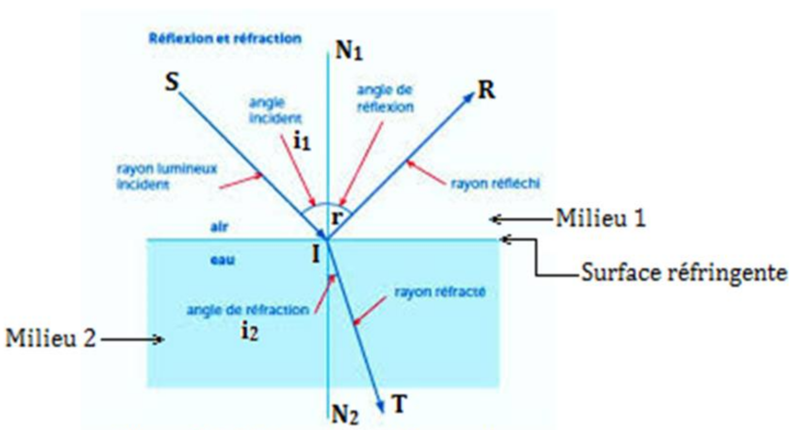


Figure 11.1 : Croquis expérimental

Notons :

- SI, rayon incident
- IT, rayon transmis ou **réfracté**
- IR, rayon réfléchi
- I, point d'incidence
- IN_1 est la normale à la surface de séparation des deux milieux.
- SIN_1 est le plan d'incidence.
- $\widehat{SIN_1}$, angle d'incidence noté i_1.
- $\widehat{N_2IT}$, angle de réfraction noté i_2.

Remarque

Dans l'environnement, les phénomènes de réfraction et de réflexion sont généralement simultanés (cas de la figure 6.1 ci-dessus).

2. Les lois de la réfraction

Loi de DESCARTES-SNELL sur la réfraction de la lumière

- **1ère loi ou loi du plan** : Le rayon réfracté est contenu dans le plan d'incidence.
- **2e loi ou loi des angles** : Pour deux milieux homogènes et transparents donnés, les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont dans un rapport constant i.e. :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = constante \qquad (11.1)$$

3. Indice de réfraction d'un milieu et dioptre

3.1. Indice absolu de réfraction « n »

- C'est le rapport de la célérité **C** de la lumière dans le vide, à la vitesse **V** de la lumière dans ce milieu :

$$n = \frac{C}{V} \quad (n > 1) \qquad (11.2)$$

3.2. Indice relatif de deux milieux

- L'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu (1), est le rapport de l'indice absolu du milieu (2) à l'indice absolu du milieu (1) :

$$n_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (11.3)$$

Remarque

- La loi des angles peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = cste = n_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2 \qquad (11.4)$$

- Lorsque **n_1** est supérieur à **n_2**, le milieu (1) est dit **plus réfringent** que le milieu (2).
- Une lumière monochromatique est une lumière constituée d'une seule raie.

Activité 11.1

Un rayon lumineux, se propageant de l'air vers le verre, arrive à la surface du dioptre sous une incidence de 30°. L'indice de réfraction du verre $n_2 = 1{,}62$, et celui de l'air est $n_1 = 1$. Déterminer l'angle de réfraction i_2.

Solution

En appliquant la formule (11.4), on aura : $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin i_1 \Rightarrow i_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\sin i_1\right) = 25{,}9°$.

Exemple d'indices absolus (*valeur moyenne*)

Substance	Verre	Eau	Benzène	Air	Diamant
Indice (n)	1,52	1,33	1,50	1	2,42

3.3. Construction d'images à travers un dioptre plan

Notons **A_1** l'image du point **A** par rapport au dioptre plan.

- **1er cas** : $n_1 < n_2 \Rightarrow i_2 < i_1$ (figure 11.2 a)

  Preuve : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin i_2}{\sin i_1} < 1 \Rightarrow \sin i_2 < \sin i_1 \Leftrightarrow i_2 < i_1$

Conséquence : Le rayon réfracté se rapproche de la normale.

- 2e cas : $n_1 > n_2 \Rightarrow i_2 > i_1$ (figure 11.2 b)

Conséquence: Le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

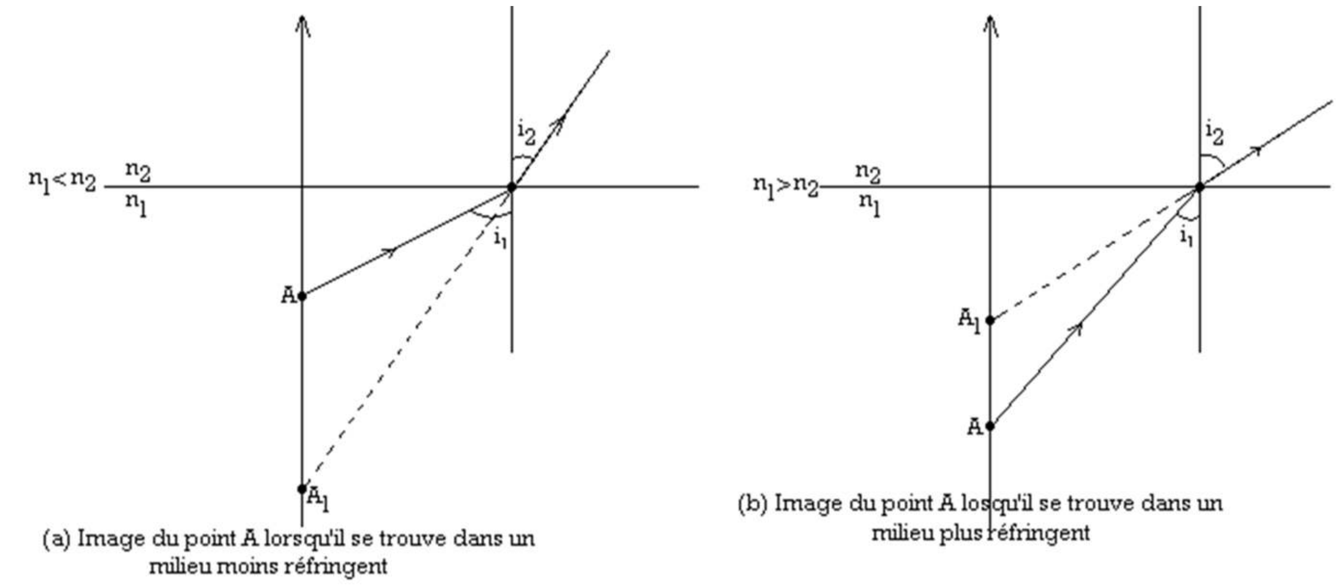


Figure 11.2 : Image d'un point A à travers un dioptre plan.

Remarque

- Tout rayon normal (**$i_1 = 0°$**) au dioptre plan, le traverse sans déviation.
- Pour des petits angles ($\leq 9°$), **sin(i) ≈ i** et **sin(r) ≈ r**. les angles *i* er *r* s'expriment en radians.

Activité 11.2

Un rayon lumineux passe d'un milieu (1) à un milieu (2). Les angles d'incidence et de réfraction sont respectivement 60° et 50°.

1. Lequel des deux milieux est le plus réfringent ? Justifier votre réponse.
2. Calculer l'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu (1)
3. Le milieu (2) et un verre d'indice de réfraction 1,50.

(a) Calculer l'indice de réfraction du milieu (1).

(b) En vous référant au tableau des valeurs moyennes d'indices relatifs, donner la nature du milieu (1).

Solution

1. Soient i = 60° l'angle d'incidence et r = 50° l'angle réfracté. On constate que i > r, soit que le rayon réfracté se rapproche de la normale. Donc, le milieu (2) est plus réfringent que le milieu (1).
2. Calculons l'indice relatif n_2 du milieu (1) par rapport au milieu (1).

   En exploitant la formule (6.4), on a : $n_{2/1} = \dfrac{\sin i}{\sin r} = \dfrac{\sin 60°}{\sin 50°} = 1{,}13$
3. On donne $n_2 = 1{,}50$.

(a) Calculons n_1.

En exploitant la formule (6.3), on a : $n_{2/1} = \dfrac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 = \dfrac{n_2}{n_{2/1}} = \dfrac{1{,}50}{1{,}13} = 1{,}33$

(b) Étant donné que $n_1 = 1{,}33$, selon le tableau des valeurs moyennes, le milieu (1) est de l'eau.

4. Réfraction limite et réflexion totale

4.1. Réfraction limite

- On suppose $n_2 > n_1$ i.e. que le milieu (2) est plus réfringent que le milieu (1) et on considère la formule (11.3) ci-dessus. Posons $i_1 = 90°$ (*incidence rasante → $\sin i_1 = 1$*)

La formule (11.4) devient : $\frac{1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} = n_{1/2}$ posons $i_2 = \lambda$ on obtient

$$\sin\lambda = \frac{n_2}{n_1} \qquad (11.5)$$

- La grandeur λ est appelée **angle de réfraction limite** (ou ***angle critique de fraction***).

Définition

La réfaction limite, est l'angle λ correspondant à une incidence rasante.

Illustration :

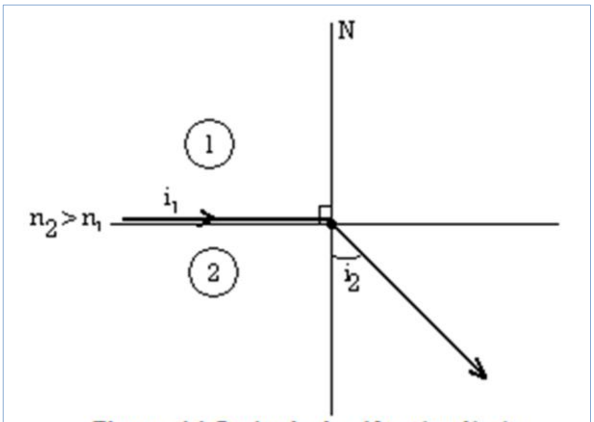


Figure 11.3 : Angle de réfraction limite

4.2. Réflexion totale

- On suppose que $n_2 > n_1$: on écrit à cet effet la loi de retour inverse da la lumière : « pour une incidence, $i_2 = \lambda$, on a une réfraction maximale, ou rasante : $\lambda_{max} = i_2 = 90°$ ».
- Pour $i_2 > \lambda$, il n'y a plus réfraction. Le rayon ne traverse pas le dioptre plan : il y a **réflexion totale**.

Conclusion

Il y a réflexion totale, lorsque l'angle d'incidence i_2 est supérieur à l'angle de réfraction limite λ.

Illustration :

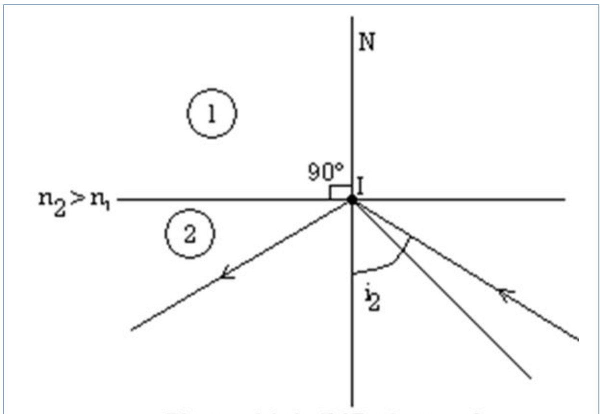


Figure 11.4 : Réflexion totale

Conséquences

- Lorsque la lumière passe d'un milieu d'indice supérieur vers un milieu d'indice inférieur, on obtient une réflexion totale dès lors que l'angle d'incidence sur le dioptre est supérieur à l'angle de réfraction limite.

- Pour des constructions d'images des objets (*ponctuel ou étendu*)
- L'image est rapprochée du dioptre si l'objet est situé dans le milieu le plus réfringent (figure 11.2 b)
- L'image est éloignée du dioptre si l'objet est situé dans le milieu le moins réfringent (figure 11.2 a)

Activité 11.3

Un rayon lumineux se propageant du verre ver l'air, arrive à la surface du dioptre sous une incidence de 45°. L'indice de réfraction du verre est n' = 1,62, celui de l'air est n = 1. Quel phénomène observe-t-on ?

Solution

Le rayon parcourt n' > n il peut donc subir une réflexion totale. L'angle critique ou limite totale λ se calcule par la relation $\sin\lambda = n / n' \Rightarrow \lambda = 38{,}1°$. Or $i = 45° > \lambda$, donc réflexion totale.

5. Applications

5.1. Le prisme à réflexion totale

- Un **prisme** est un milieu homogène et transparent limité par deux plans non parallèles.
- Le **prisme à réflexion totale** est un milieu transparent en verre dont la section est un triangle rectangle et isocèle (figure 11.5).

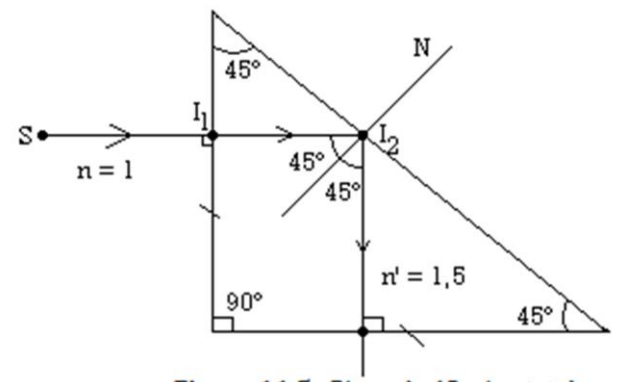


Figure 11.5 : Pisme à réflexion totale

$\sin\lambda = n / n' = 2 / 3 = 0{,}67$
$\Rightarrow \lambda = 41{,}75°$
$45° > \lambda = 41{,}75°$
Incidence > réfraction limite donc réflexion totale.

5.2. Les fontaines lumineuses

Ce sont des réflexions totales successives d'un faisceau lumineux le long d'un jet d'eau sur le dioptre air-eau. Le jet d'eau est illuminé et constitue une fontaine lumineuse. (Figure 11.6)

5.3. Les fibres optiques

Elles comportent un cœur de silice pur d'indice n_1, entouré d'une gaine transparente d'indice n_2 très légèrement inférieur. Elles permettent de transmettre des informations numérisées avec un haut débit. (Figure 11.7)

Activité 11.4

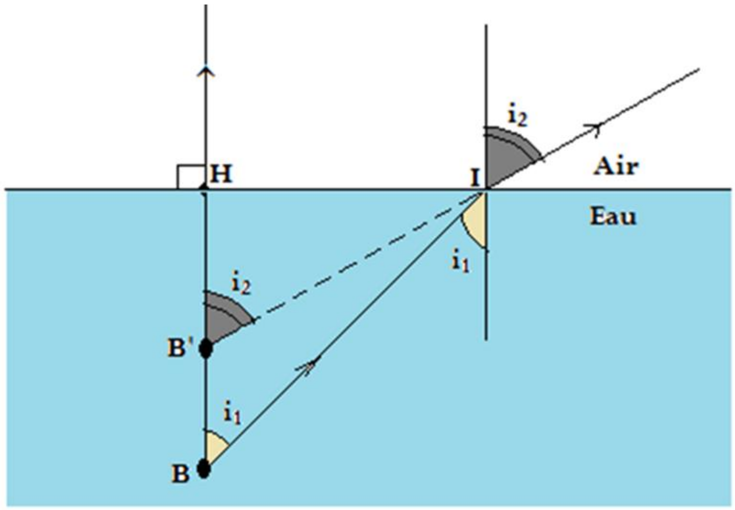
Une bille B assimilable à un point se trouve au fond d'une piscine de profondeur 3 m, remplie d'eau d'indice $n_2 = 1{,}33$.

1. Construire l'image B' de la bille et déterminer sa position par rapport à la surface de l'eau sachant que l'observateur est dans l'eau.

2. À quelle distance de la bille se trouve son image (déplacement apparent) ? On admettra que l'observateur est très proche de la verticale. L'indice de l'air est $n_1 = 1$.

Solution

1. Construction de l'image B'



Déterminons la position de B' par rapport à la surface i.e. HB'.

$$tgi_1 = \frac{HI}{HB} \text{ et } tgi_2 = \frac{HI}{HB'}$$

$$\frac{tgi_1}{tgi_2} = \frac{HB'}{HB} = \frac{i_1}{i_2} = \frac{n_1}{n_2}$$ (Approximation de **Kepler**)

$$\Rightarrow HB' = \frac{n_1 \times HB}{n_2}$$

__AN__ : HB' = 2,26 m.

2. Déterminons le déplacement apparent B'B
   D'après Chasles, on a : HB = HB' + B'B ⇒ B'B = HB – HB'
   __AN__ : B'B = 0,74 m.

__Remarque__

Comme autre application de la réfaction, nous pouvons citer le périscope (figure 11.8).

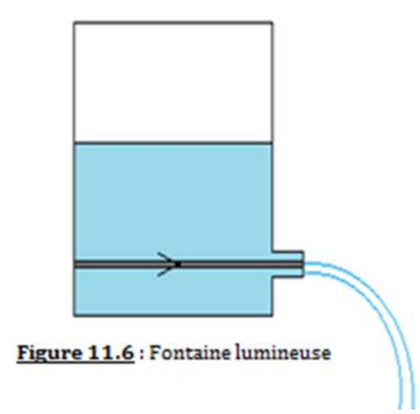


__Figure 11.6__ : Fontaine lumineuse

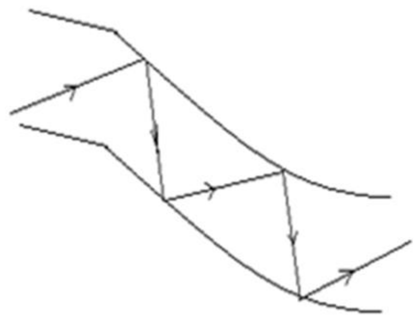


__Figure 11.7__ : Embrigadement d'un rayon lumineux dans une fibre optique

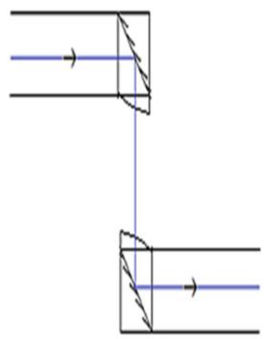


__Figure 11.8__ : Le périscope

6. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Dioptre plan	Plane diopter
Fibre optique	Optical fiber
Fontaine lumineuse	Light fountain

__Sentences__

- __Law of the plane__: "The refracted ray is contained in the plane of incidence".
- __Law of angles__: "For two given homogeneous and transparent media, the sinus of the angles of incidence and refraction are in a constant relationship".

EXERCICES DE LA LEÇON 11 : LA RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : réfraction ; réflexion totale ; réfraction limite.
2. Énoncer les lois de la réfaction.
3. Lister quelques domaines d'application de la réfraction.

4. Recopier et compléter les phrases suivantes :

4.1. La deuxième loi de Descartes – Snell s'écrit……..

4.2. L'indice…..d'un milieu transparent et homogène est le rapport de la célérité de la lumière dans le vide par sa célérité dans ce….

4.3. Fibre optique et périscope sont des applications de la……de la lumière.

4.4. Soient i l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction ; si i > r, le milieu (2) est……..que le milieu (1).

4.5. La surface de séparation de deux milieux transparents est appelée…….

4.6. Un……est un milieu transparent et homogène, limité par deux plans……

5. Répondre par vrai ou faux et corriger les affirmations fausses.

5.1. Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans des plans différents.

5.2. L'approximation de Kepler montre que : $tg(i) \approx i$

5.3. Soient i_0 l'incidence et λ l'angle critique. Il y a réflexion totale, lorsque $i_0 < \lambda$ et réfaction limite si $i_0 > \lambda$.

5.4. La relation $i = nr$ traduit la 2e loi de Descartes-Snell pour de grands angles.

5.5. Lorsque le rayon réfracté s'écarte de la normale, le deuxième milieu traversé est moins réfringent que le premier.

5.6. L'angle de réfaction limite correspond à une incidence de 45°

5.7. L'indice de réfraction de certains milieux est inférieur à 1.

5.8. L'angle de réfraction est toujours inférieur à l'angle d'incidence.

5.9. Le maximum de l'angle de réfraction est 90°.

5.10. Pour qu'un miroir plan soit un dioptre, il suffit de le rendre transparent.

6. Question à choix multiple (QCM)

6.1. Le rayon réfracté est :
(a) Dans le plan d'incidence.
(b) Dans le plan de séparation des deux milieux
(c) Perpendiculaire au rayon incident.

6.2. Un rayon lumineux tombe sous une incidence i sur la surface air-eau, formant avec celle-ci un angle de 30°.

6.2.1. La valeur de l'incidence i est :
(a) 30°
(b) 60°
(c) 90°

6.2.2. La valeur de l'angle de réfraction r est :
(a) 40,63°
(b) 42,31°
(c) 60°

6.3. La deuxième loi de Descartes – Snell pour des petits angles s'écrit :
(a) $\dfrac{\sin i_1}{\sin i_2} = \dfrac{n_2}{n_1}$
(b) $i_1 \times n_1 = i_2 \times n_2$
(c) $i_1 \times n_2 = i_2 \times n_1$

6.4. La formule ou approximation de Kepler s'écrit :
(a) $\dfrac{i_1}{i_2} = \dfrac{n_1}{n_2}$
(b) $\dfrac{i_1}{i_2} = \dfrac{n_2}{n_1}$
(c) Aucune réponse n'est juste.

6.5. L'angle de réfraction limite correspond à une incidence de :
(a) 45°
(b) 90°
(c) 0°

6.6. On mélange dans un bocal, de l'eau de masse volumique égale à 1000 kg.m^{-3} et du cyclohexane de masse volumique égale à 780 kg.m^{-3}. Dans le bocal,
(a) L'eau est au-dessus du cyclohexane ;
(b) L'eau est en-dessous du cyclohexane ;
(c) Les deux substances sont miscibles.

Exercice 2 : Application des savoirs

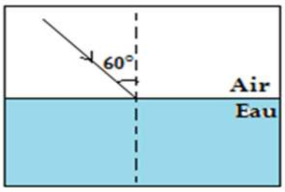
1. Un rayon lumineux se propageant dans l'air, frappe sous l'incidence de 60°, la surface plane d'un bloc de verre d'indice de réfraction 1,5.
Calculer l'angle de réfraction sachant que l'indice de réfraction de l'air est égal à 1.

2. Un rayon lumineux se propage dans de l'eau à la vitesse V. Calculer la vitesse de propagation du rayon lumineux dans l'eau. On donne : indice de l'eau n = 1,33 ; C = 3.10^{8} m.s^{-1} = célérité de la lumière dans le vide.

3. Un rayon lumineux cheminant dans l'air, tombe sur la surface libre de l'eau au repos comme l'indique la figure ci-dessous.

3.1. Quelle est la valeur de l'angle d'incidence ?

3.2. Calculer l'angle de réfraction. L'indice de réfraction de l'eau est n = 1,33.



4. Deux rayons lumineux partant d'une source lumineuse ponctuelle S située à 3 cm dans l'air au-dessus d'un dioptre plan air/eau tombant sur ce dioptre comme l'indique le schéma ci-dessous. I_1I_2 = 5 cm. Indice de l'eau n = 1,33.

4.1. Quelles sont les valeurs des angles d'incidence pour les rayons SI_1 et SI_2 ?

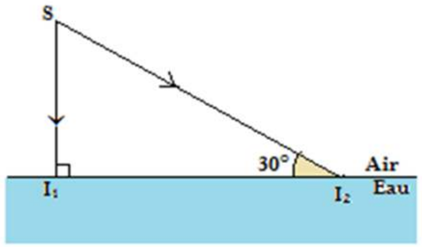
4.2. Montrer que l'angle de réfraction en I_1 est 0° et que l'angle de réfraction en I_2 est 40,6°.

4.3. En utilisant les instruments de dessin :

(a) Reproduire la figure, tracer la marche de chaque rayon lumineux à travers le dioptre plan air/eau et en déduire l'image S' de S.

(b) Tracer par mesurage, la distance qui sépare S' du dioptre plan.

- Quelle est la nature de S' ? Justifier votre réponse.
- Calculer l'angle de déviation du rayon réfracté.



5. Soit un prisme de verre d'indice 1,5. Sa section principale est un triangle rectangle isocèle. Tracer la marche d'un rayon lumineux tombant sous incidence normale tour à tour sur chacune de ses faces.

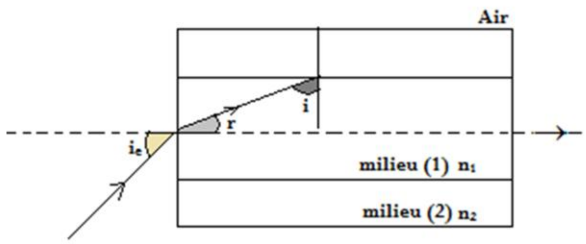
6. Un rayon lumineux arrive de l'aire, d'indice 1, sous une incidence i_e et pénètre dans le cœur de la fibre d'indice n_1.

6.1. Exprimer le sinus de l'angle de réfraction r en fonction de n_1 et i_e.

6.2. L'angle d'incidence sur la surface de séparation cœur-gaine est i. Donner la relation entre i et r et l'expression de cos(i).

6.3. L'indice de la gaine a pour valeur n_2 ($n_2 < n_1$). Exprimer le sinus de l'angle limite de réfraction entre les milieux d'indice n_2 et n_1.

6.4. Démontrer que la condition pour qu'un rayon lumineux se propage dans la fibre s'écrit : $\sin i_e < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$



7. Un miroir plan est placé au fond d'une cuve. Celle-ci contient de l'eau et du cyclohexane, de masse volumique égale à 780 $kg.m^{-3}$, et d'indice de réfraction $n_C = 1,42$. L'indice de réfraction de l'eau est $n_e = 1,33$. Le cyclohexane n'est pas miscible avec l'eau. Un laser à la surface libre du liquide supérieur envoie un faisceau étroit selon un angle d'incidence de 30°.

7.1. Représenter les deux liquides en indiquant celui qui surnage.

7.2. Représenter approximativement la marche du faisceau lumineux subissant les réfractions et la réflexion sur le fond de la cuve.

7.3. Calculer les angles de réfraction correspondant aux dioptres traversés jusqu'au fond de la cuve.

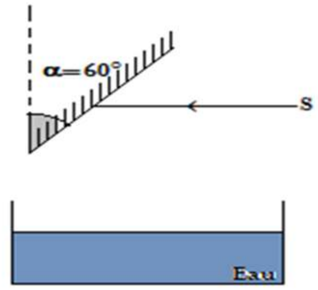
7.4. Déterminer l'angle de réflexion sur le miroir, puis les différents angles de réfraction lors de la traversée des dioptres après cette réflexion.

7.5. Comparer la direction d'émergence du faisceau à celle qu'il aurait dans le cas d'une cuve vide.
(*Probatoire D camerounais 2000*)

8. Un rayon lumineux se propage horizontalement dans l'air. Il rencontre un miroir. Le rayon réfléchi tombe alors sur la surface plane de l'eau contenue dans un cristallisoir. Voir figure.

8.1. Calculer l'incidence sur le miroir et sur la surface de l'eau.

8.2. Calculer l'angle de réfraction, sachant que l'indice de réfraction de l'eau est n = 1,33 et celui de l'air est n'



(*Probatoire C camerounais 2000*)

9. On pose une pièce de monnaie au fond d'un bassin de profondeur h = 1m initialement vide, à la distance d = 1m du rebord (du côté de l'observateur). On s'intéresse à un observateur dont les yeux sont à une hauteur H = 1,60 m du sol

9.1. Représenter la situation.

9.2. Déterminer la distance minimale D du bord à laquelle l'observateur doit s'approcher pour voir la pièce.

9.3. Mêmes questions une fois que le bassin soit rempli d'eau à 95cm du fond du bassin. Indice de l'eau n = 1,33.

10. Un observateur, dont l'œil est à 1,70 m au-dessus d'un miroir plan horizontal, regarde son image. Le miroir plan en question, se trouve au fond d'une cuve.
Dans quel sens et de combien se déplacerait son image, si on versait dans la cuve, 10 cm d'eau (n = 4/3).

11. Une cuve a pour fond, un miroir constitué d'une lame dont la face intérieur est argentée. Cette cuve contient de l'eau. L'indice absolu du verre est n_v = 1,5 et celui de l'eau est n_e = 1,33. Un rayon lumineux arrive de l'air, faisant un angle de 70° avec la surface libre de l'eau.

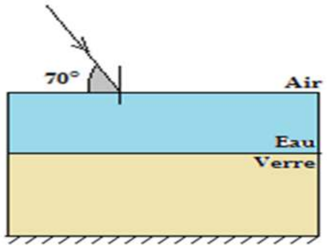
11.1. Calculer l'angle de réfraction limite pour le système air/eau.

11.2. Calculer l'angle de réfraction limite pour le système eau/verre.

11.3. Tracer la marche de la lumière, jusqu'à la sortie de la cuve.

11.4. Calculer les angles d'incidence et de réfraction nécessaires sur chaque dioptre.

11.5. Montrer qu'un rayon sort de cette cuve, par la surface libre, quel que soit l'incidence initiale.



PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1

Un rayon lumineux traverse l'une des faces d'un cube en matière transparente sous une incidence de 45°, puis rencontre une seconde face, perpendiculaire à la première.
En admettant que le plan d'incidence soit normal à ces 2 faces et que le rayon sorte dans l'air en rasant la face de sortie, calculer l'indice de la substance du cube.

Situation 2

Un rayon lumineux tombe à surface libre du dioptre verre/eau sous une incidence de 30°.
Calculer la déviation totale du rayon réfracté. Indice du verre $n_v = 3/2$; indice de l'eau $n_e = 4/3$.

Situation 3

Montrer que si un pécheur voit un poisson dans l'eau à travers le dioptre constitué par la surface libre de l'eau calme, le poisson voit aussi le pécheur. Faire un schéma approximatif du trajet de la lumière.

Situation 4

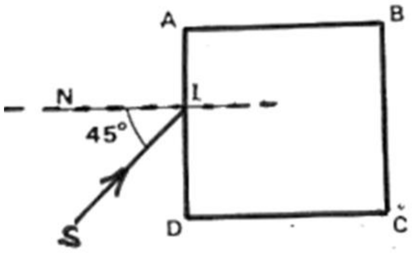
Une source ponctuelle S est située à 1 m de profondeur. Calculer le diamètre de la surface de l'eau traversée par la lumière issue de S et pénétrant dans l'air.

Situation 5

Énoncer les lois de la réfraction de la lumière en anglais.

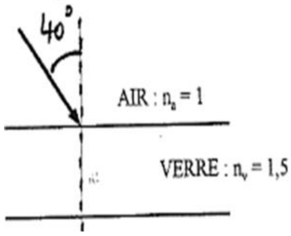
Situation 6

Un rayon incident SI pénètre dans un cube de verre d'indice de réfraction $n = 1,5$ sous une incidence $i_1 = 45°$. Ce rayon atteint la face AB en un point M.
Données : AB = 10 cm ; AI = 4cm.



Situation 7

On considère la figure ci-dessous.



- Tracer la marche du rayon lumineux jusqu'à sa sortie de la lame de verre à faces parallèles.
- Comparer les directions des rayons incident et émergents.
- Conclure.

Situation 8

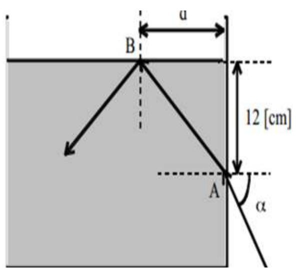
- Tracer un cercle (1) de centre I et de rayon $R_1 = 4$cm proportionnel à $n_1 = 2$. Le prolongement du rayon SI coupe ce cercle en J.
- Tracer un cercle (2) de centre I et de rayon $R_2 = 6$cm proportionnel à $n_2 = 1,5$.
- Tracer la perpendiculaire JH à la surface de séparation (S) sachant que JH coupe le cercle (2) en K.
  Montré que le rayon IK est le rayon réfracté.

Situation 9

Pour atteindre le poisson avec une lance à travers la surface de l'eau, faut-il viser en-dessous ou au-dessus de l'image de celui-ci ?
Justifier votre réponse avec un croquis.

Situation 10

Un rayon lumineux pénètre en A, sous un angle α, dans un récipient contenant de l'eau comme le montre la figure ci-contre.



- Nommer les angles utiles de la figure.
- Calculer l'angle limite en B pour que la réflexion totale se produise en ce point.
- Pour cet angle limite calculé, calculer l'angle α_{limite} correspondant.
- En augmentant l'angle α, le rayon sortira-t-il en B ?

Remarque : On ne tient pas compte du récipient en verre (trop mince).

MODULE ⇒ RÉSISTORS – DIODES – TRANSISTORS – PORTES LOGIQUES 4

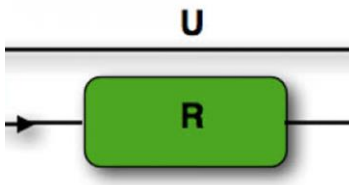
Leçon 12 LES DIPÔLES PASSIFS LINÉAIRES : LES RÉSISTORS

ACTIVITÉ(S)

Dans un fer à repasser, quel organe électrique ou électronique est responsable de son échauffement ?

Identifier chaque équipement définis par les images ci-contre.

Y a-t-il des résistors dans un fer à repasser traditionnel (fer à repasser à charbon) ?



Objectifs

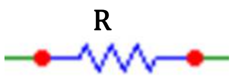
- Définir un résistor et en préciser leurs utilisations ;
- Déterminer la résistance d'un résistor ou la résistance équivalente d'une association de résistors ;
- Utiliser le code des couleurs afin de déterminer la résistance correspondante ;
- Exploiter les lois d'Ohm et de Joule afin de déterminer la résistance d'un résistor.

1. Description, définition et représentation normalisée

- Encore appelé conducteur ohmique, les résistors sont des portions de circuit à deux bornes de branchement, qui transforme totalement toute l'énergie électrique qui les traverse (énergie reçue) en énergie calorifique i.e. en chaleur.
- Un résistor est par conséquent un dipôle passif et dissymétrique.
- Le symbole normalisé d'un résistor est le suivant :

Figure 12.1 : Résistor

Ou



2. Résistance électrique d'un résistor

2.1. L'effet Joule

L'effet Joule représente l'effet calorifique du courant électrique i.e. la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique.

2.2. Quantité de chaleur dégagée dans un résistor par effet Joule

- Expérience

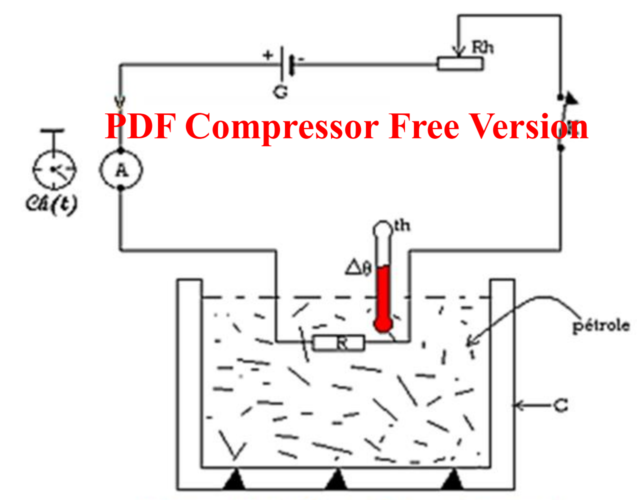


Figure 12.2 : Dispositif expérimental

Matériel :

- Rh : rhéostat, permet de varier l'intensité du courant dans le circuit, mesurée par l'ampèremètre ;
- Ch. : chronomètre, permet de mesurer le temps t de passage du courant électrique ;
- Th : thermomètre, repère les variations de t° $\Delta\theta$ du calorimètre (C). Le calorimètre contient du pétrole dans lequel baigne un résistor R.

NB : t^0 = température

- Observations

  On fait varier tour à tour I et t et on observe les variations de température $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$. On change la nature du résistor. En variant I et t de la même manière, on observe des variations de t^0 $\Delta\theta' \neq \Delta\theta$.

- Interprétation

  $\Delta\theta$ = f (I, t, nature du résistor).

  Or $Q = K.\,\Delta\theta$ d'où Q = f (I, t, nature du résistor). (12.1)

- Résultat expérimental :

- Énoncé de la loi de Joule

«L'énergie électrique W consommée dans un résistor, est égale au produit de la résistance R du résistor par le carré de l'intensité I du courant et par la durée t du passage dudit courant : $W = RI^2t$ ».

- R : résistance du résistor, caractérise sa nature i.e. la difficulté qu'oppose le résistor au passage du courant électrique. Tout dipôle parcouru par un courant électrique s'échauffe par transformation d'une partie de l'énergie électrique qu'il consomme en chaleur : il possède donc une résistance.
- Le calorimètre (C) étant adiabatique, i.e. n'admettant aucun échange de chaleur avec le milieu extérieur, la quantité de chaleur dégagée Q dans le résistor, correspond donc à l'énergie électrique W consommée par le résistor :

$$Q = W \Leftrightarrow m \cdot C \cdot \Delta\theta = R \cdot I^2 \cdot t..avec \begin{cases} R..en..ohms(\Omega) \\ I(A) \\ t(s) \\ W..et..Q...en..joule(J) \end{cases} \qquad (12.2)$$

2.3. Puissance électrique consommée

La puissance P_J (en watt), puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique de résistance R parcouru par un courant d'intensité I, est donnée par :

$$P_J = R \times I^2 \qquad (12.3)$$

Remarque

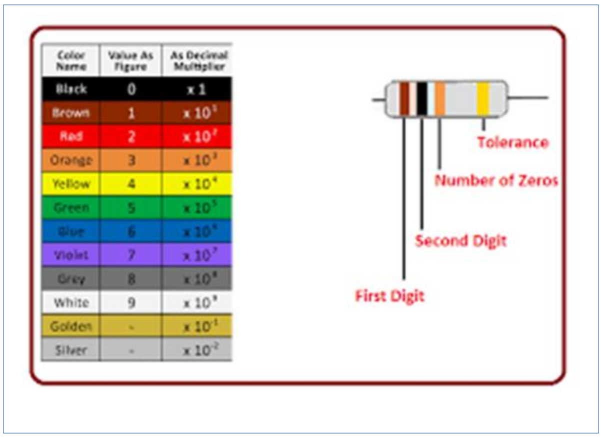
- On mesure la résistance d'un résistor (ou d'un dipôle) à l'aide d'un Ohm-mètre (lecture directe).

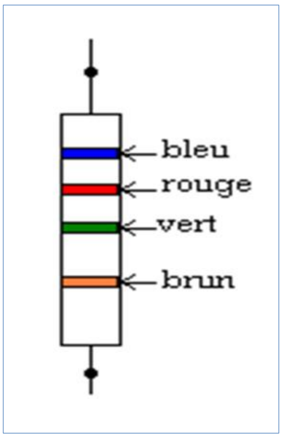
- On peut également utiliser le code des couleurs

Couleur	Noir	Brun	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc
1er et 2e chiffre	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Multiplicateur	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

Couleur	Brun	Or	Rouge	Argent	Sans marquage
Tolérance	1 %	5 %	2 %	10 %	20 %

Exemple : Un résistor se présente comme suit :





La résistance R de ce résistor sera donnée par l'égalité suivante :

$R = 62.10^5 \pm (62.10^5) \times 1\%$

$R = 62.10^5 \pm 62.10^3\ \Omega$

Remarque

Dans le cas des résistors à cinq ou six bagues :

- Les couleurs des trois premières bagues indiquent dans l'ordre les trois premiers chiffres de la valeur de la résistance, la quatrième est le multiplicateur, la couleur de la cinquième bague indique la tolérance et la sixième indique le coefficient de température (variation de la conductivité électrique avec la température).
- La valeur d'une résistance donnée à partir du code des couleurs s'exprime en Ohm sous la forme **$R = (ab.10^n \pm T)\ \Omega$** si on a deux chiffres significatifs a et b ou **$R = (abc.10^n \pm T)\ \Omega$** si on a trois chiffres significatifs a, b et c (T = tolérance).

- **Quelques applications de l'effet Joule**

- Appareils de chauffage : fer à repasser ; thermoplongeur ; réchaud électrique ; chauffe-eau ; bouilloire électrique ; etc.
- Sécurité en électricité : fusibles
- Température d'équilibre d'un fil
- Éclairage électrique par incandescence : lampes à incandescence.
- Etc.

3. La loi d'Ohm

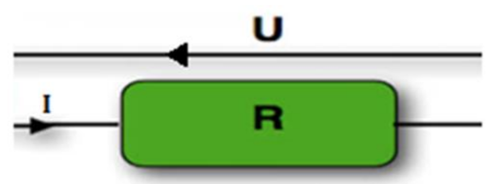


Figure 12.3 : Mise en évidence

- Puissance consommée : $P_{consommée} = U \times I$
- Puissance dissipée : $P_{dissipée} = R \times I^2$

$P_{consommée} = P_{dissipée}$

$$\Leftrightarrow U \cdot I = R \cdot I^2 \Rightarrow U = R \cdot I \qquad (12.4)$$

Unités : U (V) ; R (Ω) ; I (A)

Nota Bene

Cette relation traduit la transformation intégrale de l'énergie électrique en chaleur (énergie calorifique).

Énoncé de la loi d'Ohm

« La ddp U aux bornes d'un résistor, est égale au produit de sa résistance R par l'intensité I du courant qui les parcourt : U = R x I ».

4. Caractéristiques d'un résistor

4.1. Définition

On appelle caractéristique d'un résistor, la représentation graphique de l'expression de la loi d'Ohm aux bornes d'un dipôle dans un RON :

- Graphe : U = f (I) : c'est la caractéristique courant – tension

  Résistor : U = RI → droite croissante de pente R passant par l'origine des axes (y =f (x)= ax)
- Graphe : I = f (U) : c'est la caractéristique tension – courant

Résistor : $I=\frac{U}{R}\rightarrow$ droite croissante de pente $\frac{1}{R}=G$ passant par l'origine des axes (y =f (x)= $\frac{1}{a}x$).

Remarque

$G=\frac{1}{R}=conductance$ du résistor, s'exprime en siemens de symbole S. (12.5)

4.2. Utilité de la caractéristique

- Elle permet de déterminer le point de fonctionnement (I, U) ou (U, I) d'un dipôle.
- Pour le résistor, elle permet de déterminer sa résistance R ou sa conductance G.

4.3. Activité : Travail expérimental

- Dispositif expérimental

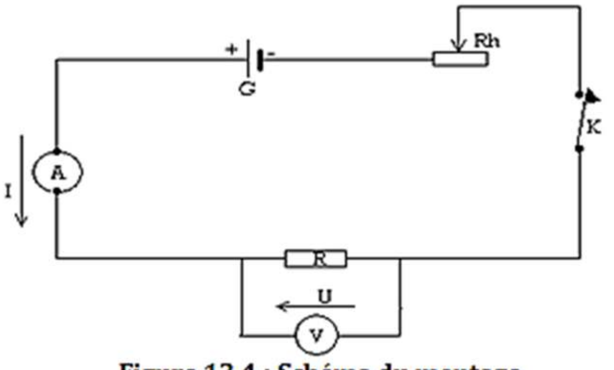


Figure 12.4 : Schéma du montage

- Protocole de manipulation : En déplaçant le curseur de rhéostat, on varie les valeurs de I dans le résistor et par conséquent, les valeurs de U à ses bornes. On obtient un tableau de couple (I, U) permettant le tracer de la caractéristique.
- Traçons la caractéristique courant – tension U = f (I) ci-dessous :

I (mA)	0	30	50	80	100	123
U (V)	0	0,9	1,5	2,4	3,0	3,7

Choix d'une échelle : 2cm pour 1 V ; 1cm pour 0,1 mA.

I (mA)	0	3	5	8	10	12,3
U (V)	0	1,8	3	4,8	6	7,4

On obtient la courbe ci-dessous que nous considérerons comme une droite

R : pente de la droite U =f(I) :

$$R = tg\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

ΔU →2,3cm pour 1,15 V

ΔI→3,9cm pour 39mA = 39.10^{-3}A

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1{,}15}{39.10^{-3}} = 29{,}49.\Omega$$

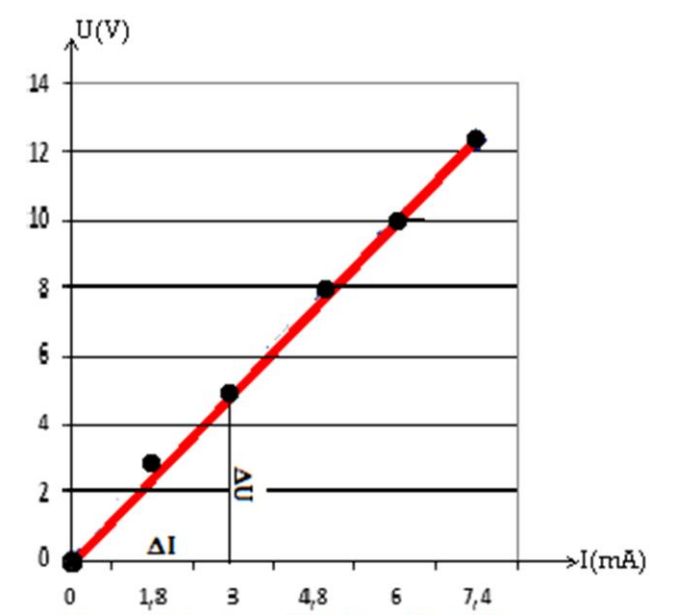


Figure 12.5 : Caractéristique U = f (I)

5. Résistance équivalente : Association des résistors

5.1. Association en série

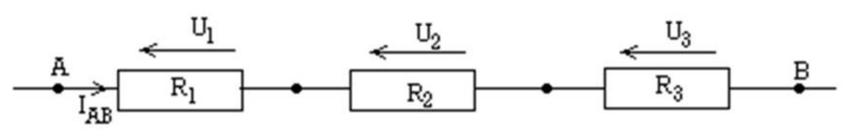


Figure 12.6 : Résistances en série.

On sait qu'en série, la tension équivalente $U_{éq}$ était la somme des tensions de chaque dipôle du circuit soit donc $R_{éq}$ la résistance équivalente du circuit de la figure 12.6 ci-dessus, on a :

$U_{éq} = U_{AB} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$ (1) or $U = RI$ (2)

(2) dans (1) → $R_{éq} \times I_{éq} = R_1I_1 + R_2I_2 + R_3I_3 + \dots$ (3) or en série, $I_{éq} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$(4)

En exploitant (4) dans (3), on obtient :

$$R_{éq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots (5)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{G_{éq}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_3} + \cdots (6)$$

Conclusion 1 : En série :
$$\begin{cases} R_{éq} = \sum_{i=1}^{n} R_i \\ I_{éq} = I_1 = I_2 = \cdots = I_n \\ \frac{1}{G_{éq}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{G_i} \end{cases} \quad (12.6)$$

où n représente le nombre limite de résistances dans le circuit.

5.2. Association en parallèle

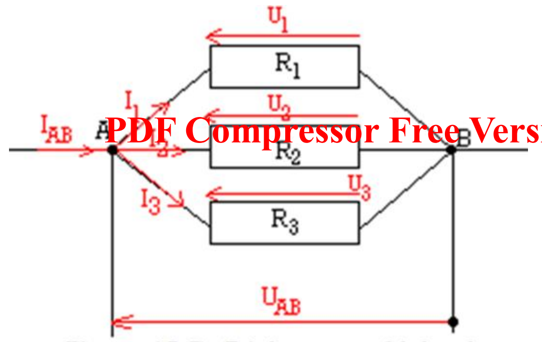


Figure 12.7 : Résistors en dérivation

En dérivation : $U_{éq} = U_{AB} = U_1 = U_2 = U_3 = \ldots(7)$

$I_{éq} = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots$ or $I_{éq} = \dfrac{U_{éq}}{R_{éq}}$

$$\Rightarrow \frac{U_{éq}}{R_{éq}} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \cdots (8)$$

En exploitant (7) dans (8), on obtient :

$$\frac{1}{R_{éq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots$$

Conclusion 2 : En parallèle :
$$\begin{cases} U_{éq} = U_1 = U_2 = \cdots = U_n \\ \dfrac{1}{R_{éq}} = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \dfrac{1}{R_i} \\ G_{éq} = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} G_i \end{cases} \qquad (12.7)$$

Remarque

- Il est possible, lorsqu'on a un montage en parallèle, de ramener ce dernier à un montage en série en calculant les résistances équivalentes correspondantes à chaque portion de circuit puis effectuer la somme des différentes résistances obtenues pour avoir la résistance équivalente ou totale du circuit. On parle aussi de circuit équivalent.
- Lorsque vous avez un montage mixte (série + parallèle), transformer la portion parallèle en série en recherchant sa résistance équivalente.

6. Exemples d'utilisation des résistors

6.1. Diviseur de tension

- Il est parfois nécessaire de disposer dans un circuit d'une tension plus faible que celle du générateur, cela est obtenu à partir d'un pont diviseur de tension.
- Le pont diviseur de tension permet de déterminer une tension proportionnellement à une autre. Ce type de montage est couramment utilisé pour créer une tension de référence dans un circuit électrique.
- Exemple de montage

En appliquant la loi d'Ohm au circuit, on a :

- $U_2 = (R_1 + R_2)I$
- $U_1 = R_2 I$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow U_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_2$$

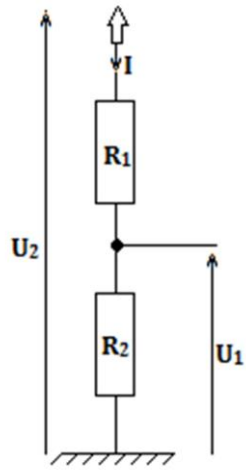


Figure 12.8 : Diviseur de tension

6.2. Montage potentiométrique

- Un rhéostat est un résistor de résistance variable. Il permet, grâce au déplacement de son curseur, de modifier l'intensité du courant dans un circuit.

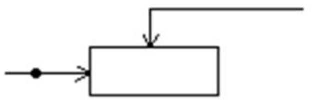


Figure 12.9 : Symbole d'un rhéostat

- On appelle montage potentiométrique, le montage d'un générateur de ddp variable grâce à un rhéostat.

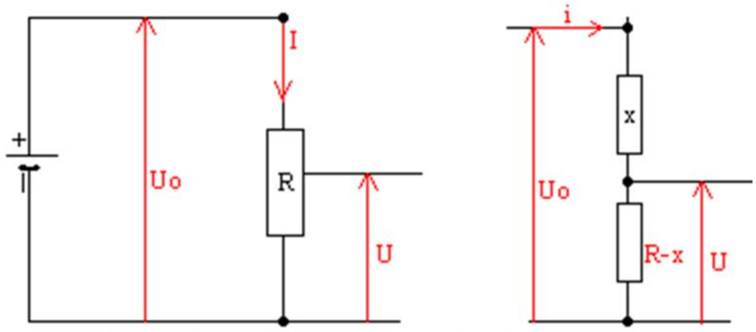


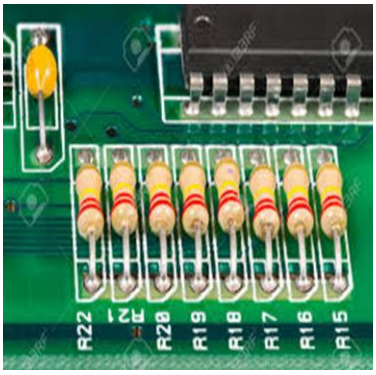
Figure 12.10 : Montage potentiométrique

$$\begin{cases} U_0 = R \cdot i \\ U = (R-x) \cdot i \end{cases} \Rightarrow \frac{U_0}{U} = \frac{R}{R-x} \Rightarrow \begin{cases} U = \dfrac{R-x}{R} \cdot U_0 \\ U_0 = \dfrac{R}{R-x} \cdot U \end{cases}$$

7. Jeu bilingue

Sentences

- A resistor is a cylindrical electric dipole on which are painted colored rings.
- In a series connection, the equivalent resistance is the sum of the resistors of all the resistors of said circuit.
- The potential difference U across an ohmic conductor is equal to the product of its resistance R and the intensity I of the current flowing through it.



EXERCICES DE LA LEÇON 12 : DIPÔLES PASSIFS LINÉAIRES : LES RÉSISTORS

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : résistor ; pont diviseur de tension ; rhéostat ; montage potentiométrique.
2. Énoncer
- La loi d'Ohm pour un conducteur ohmique
- L'effet de Joule.
3. Qu'appelle-t-on caractéristique d'un conducteur ohmique ? Combien existe-t-il ?
4. Quelles sont les méthodes permettant de déterminer la résistance d'un résistor ?
5. Vrai ou faut

5.1. Le résistor est un dipôle dissymétrique.

5.2. En série, la conductance équivalente est la somme des inverses de toutes les conductances du circuit.

5.3. La loi d'Ohm pour un résistor s'écrit R = UI

5.4. Un résistor de ddp 100 V, traversé par un courant d'intensité 0,1 A, a 1000 Ω de résistance.

5.5. Le kilowatt est une unité de puissance.

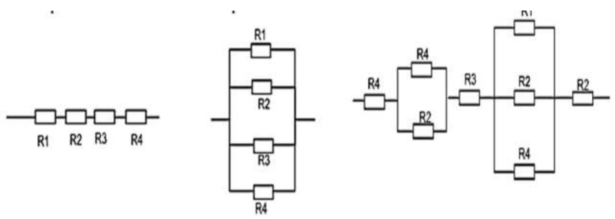
5.6. Un circuit de résistors en série peut être ramené en un circuit de résistors en parallèle.

5.7. Deux résistors identiques sont montés en parallèle. La résistance du groupement est la moitié d'une résistance.

5.8. Deux résistors identiques sont montés en série. La résistance du groupement est le double d'une résistance.

Exercice 2 : Application des savoirs

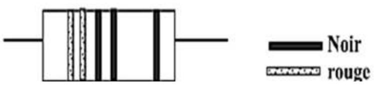
1. Donner l'expression littérale de la résistance équivalente de chacun des trois schémas suivants :



2. Un résistor de résistance R est soumis à une tension U = 40 V pendant 5min.

2.1. Déterminer la valeur de sa résistance en utilisant le tableau et la figure ci-dessous.

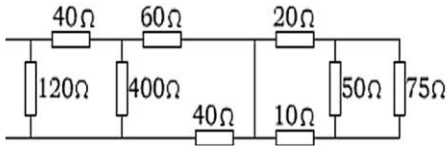
Couleur	Chiffre significatif	multiplicateur	Tolérance
Noir	0	10^0	0,5%
Rouge	1	10^2	2%



2.2. Déterminer l'énergie électrique reçue par le résistor. Que devient-elle ?

3. Combien de résistors de résistance 5Ω faut-il associer, et de quelle façon, pour obtenir un conducteur ohmique de résistance : a) 20Ω ; b) 1Ω ; c) 7,5Ω.

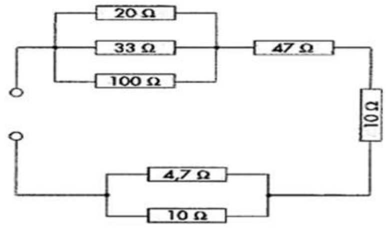
4. La tension aux bornes d'un résistor est U_0 = 12V lorsque l'intensité du courant est I_0 = 200 mA. Calculer la tension U_1 correspondant à une intensité I_1 = 0,4 A.
5. Déterminer la résistance équivalente du circuit suivant.



PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Montage mixte

Déterminer la résistance équivalente du circuit suivant :

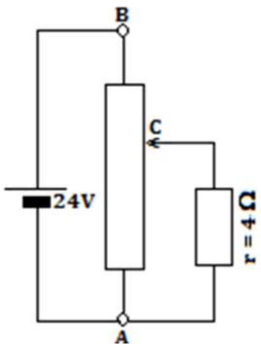


Situation 2 : Diviseur de tension

On se propose de déterminer la tension de sortie d'un circuit constitué d'un générateur qui fournit une tension continue U = 12 V et de résistance de 100Ω et de 2 résistances de 470Ω.
- Proposer le montage correspondant à l'énoncé.
- Montrer alors que la tension de sortie est de 6 V.

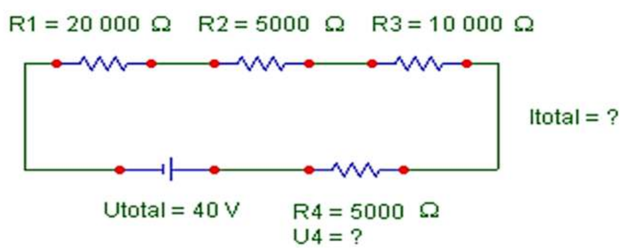
Situation 3 : Montage potentiométrique

À partie d'un générateur délivrant une tension constante de 24V, on réalise un montage potentiométrique à l'aide d'un rhéostat de 24 Ω régulièrement bobiné ; on applique ainsi une tension variable à une résistance r = 4Ω.
Le curseur C étant placé au tiers du rhéostat à partir de B, déterminer :



- La tension U_{CA}
- Les intensités dans la résistance r et les parties CA et BC du rhéostat.

Situation 4 : Un autre genre



MODULE ⇒ RÉSISTORS – DIODES – TRANSISTORS – PORTES LOGIQUES 4

Leçon 13 — LES DIPÔLES PASSIFS NON LINÉAIRES : LES DIODES

ACTIVITÉ(S)

Quelle différence fais-tu entre les différents équipements électroniques ci-contre ?

Identifier chaque équipement définis par les images ci-contre.

Donne une définition de la diode ? Combien de types existe-t-il ?

Objectifs

- Décrire une diode et en préciser le rôle et les utilisations.
- Tracer et exploiter la caractéristique d'un dipôle dissymétrique non linéaire (diode ou varistance).

1. Généralité

- Un dipôle est dit passif non linéaire lorsque le tracer de sa caractéristique n'est pas une droite. On distingue parmi ces types de dipôles les diodes et les varistances.
- Une varistance est un dipôle électronique dont la résistance varie en fonction de la tension d'où l'appellation Voltage Dependent Resistor (VDR) ou Résistance Dépendant de la Tension (RDT). C'est aussi une résistance électrique très fortement non linéaire, utilisée aujourd'hui principalement pour la fabrication des parafoudres. Elle se présente sous la forme d'un disque plat dans un circuit électronique (figure 13.1.). Sa représentation symbolique normalisée est illustrée par la figure 13.2 ci-dessous. Le tracer de sa caractéristique présente une symétrisation au centre du repère comme le présente la figure 13.3.

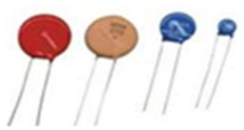


Figure 13.1 : Types de varistance

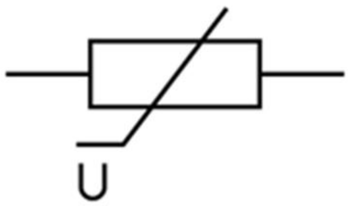


Figure 13.2 : Symbole d'une varistance

Description

Les varistances sont composées d'oxydes métalliques (oxydes de zinc ZnO pour les dernières générations, le carbure de silicium (SiC) ayant été utilisé antérieurement). Les poudres d'oxyde métallique sont assemblées par frittage sous la forme de bloc de céramique, le plus souvent sous forme de cylindre ou de disque.

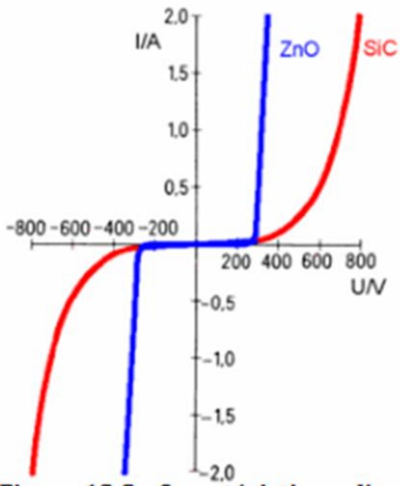


Figure 13.3 : Caractéristique d'une varistance

- Une diode est un dipôle passif dissymétrique qui ne se laisse traverser par le courant électrique que dans un seul sens dit « sens-passent » i.e. de l'anode (A) à la cathode (C). C'est aussi un composant **semi-conducteur** composé de deux **jonctions de dopage opposées**.

Remarque

Une jonction PN ne peut **être conductrice que dans un seul sens**.
Une différence de potentielle positive appliquée entre K et A, ne fera déplacer que très peu d'électrons.

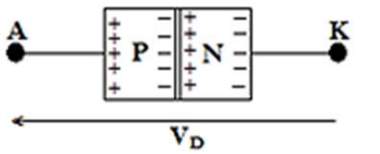


Figure 13.4 : Coupe d'une diode

2. Les diodes à jonction

2.1. Description, définition et définition normalisée

2.1.1. Description

- Une diode à jonction se présente sous la forme d'un petit cylindre portant sur un côté un anneau circulaire colorique (**indiquant la cathode**).
- Une diode à deux bornes de branchement :
  - Une borne d'entrée A (**anode**) située du côté opposé à l'anneau ;
  - Une borne de sortie C (**cathode**) située du même côté que l'anneau
- Schémas d'une diode à jonction

Figure 13.5 : Composant et symbole d'une diode à jonction.

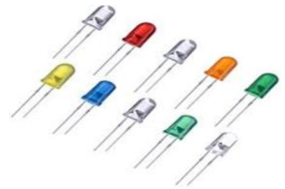


Figure 13.6 : Diodes LED

Remarque

Parmi les diodes à jonction on rencontre aussi les diodes électroluminescences (DEL ou LED fig.13.6) que l'on retrouve dans les télécommandes ou les calculatrices, etc.

2.1.2. Justification expérimentale de la définition de diode

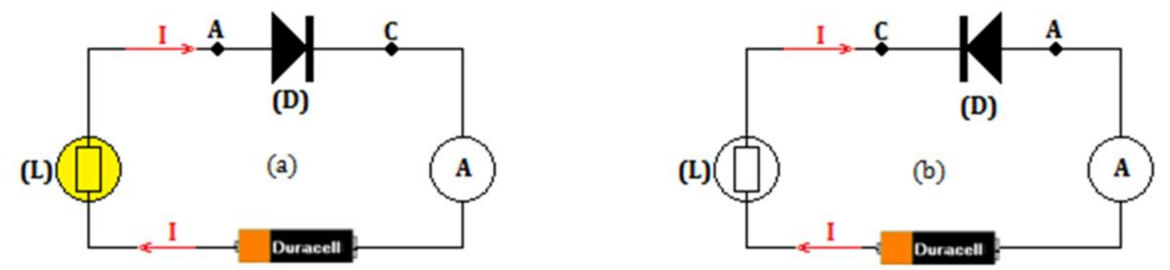


Figure 13.7 : Dispositif expérimental.

Cas de la figure 13.7 (a)

- La lampe (L) brille et l'ampèremètre A dévie.
- La diode est dans son sens-passant et se comporte comme un interrupteur fermé.

Cas de la figure 13.7 (b)

- La lampe (L) brille et A ne dévie plus.
- La diode est dans son sens-bloqué et se comporte comme un interrupteur ouvert.

2.2. Caractéristiques tension-intensité d'une diode à jonction

2.2.1. Montage expérimental

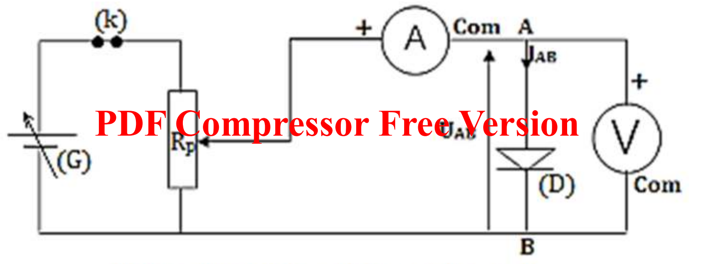


Figure 13.8 : Dispositif expérimental

Matériels

- (G) : générateur de tension variable
- (D) : diode à jonction (1N 4003);
- (A) : milliampèremètre ;
- (V) : voltmètre sensible ;
- R_p : résistance de protection ;
- (k) : interrupteur.

2.2.2. Résultats expérimentaux

Nous exploitons pour cette partie, le tableau de l'exercice 8 page 123 (CA).

U (V)	0	0,1	0,2	0,25	0,32	0,36	0,37	0,40
i (mA)	0	0	5	12	33	100	140	300

Échelle : $\begin{cases} 2cm \to 0{,}1.V ...abscisses \\ 2cm \to 50.mA...ordonnées \end{cases}$

U (V)	0	2	4	5	6,4	7,2	7,4	8
i (mA)	0	0	0,2	0,48	1,32	4	5,6	12

On obtient le graphe ci-dessous.

- **Interprétation**

- Si $U_{AC} < 0$, alors, $I_{AC} = 0$ mA : la diode (D) ne conduit pas le courant (sens-bloqué), la diode est polarisée en inverse.

- Si $U_{AC} > 0$, D est polarisée dans le sens direct. La caractéristique tension-courant présente deux zones :
- Zone (I) : $0 \leq U_{AC} \leq 0{,}20$ V ; $I_{AC} \approx 0$ mA : de O à K, la diode ne conduit pas le courant électrique.

- Zone (II) : $U_{AC} > 0{,}20$ V. L'ampèremètre (A) dévie pour des faibles variations de la tension U_{AC}. La diode conduit le courant électrique, c'est le domaine de KM. La caractéristique tension-courant est presque linéaire.

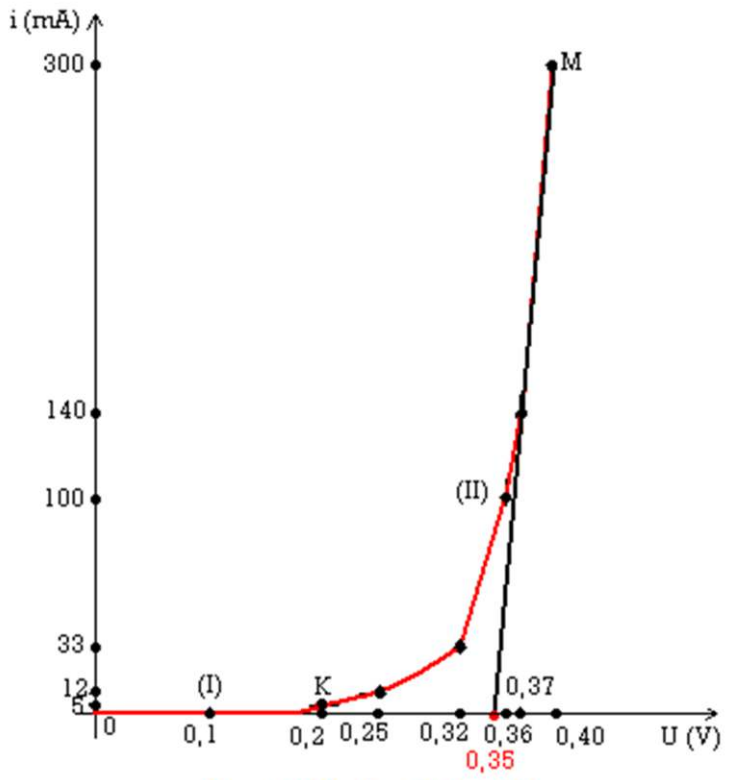


Figure 13.9 : Graphe I = f(U)

- Définition : On appelle tension seuil (U_S) d'une diode, la valeur minimale de la tension U_{AC} à ses bornes à partir de laquelle la diode devient conductrice.

On a alors, U_S = (axe des U_{AC}) ∩ (caractéristique linéaire).

- Déterminons l'équation i = a. U + b de la partie linéaire de la caractéristique.

$$M\begin{pmatrix} U = 0{,}4 \\ i = 0{,}30 \end{pmatrix} .... U_S\begin{pmatrix} U = 0{,}35 \\ i = 0{,}000 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} 0{,}3 = 0{,}4a + b \\ 0 = 0{,}35a + b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 6 \\ b = -2{,}1 \end{cases} \Rightarrow i = 6U - 2{,}1$$

Nota Bene

Une diode est dite idéale, lorsque sa tension seuil est nulle et la caractéristique se présente comme suit :

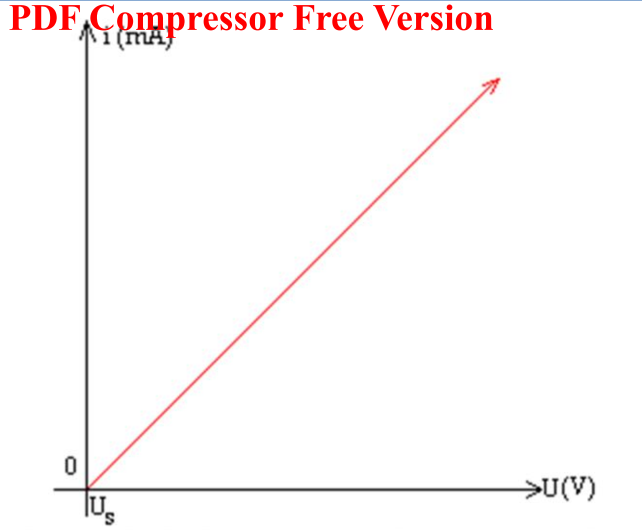


Figure 13.10 : Caractéristique d'une diode idéale.

Dipôle : 1 courant et 1 tension		Présentation du composant
Type de diode	Symbole	Utilisation
Diode « classique » (jonction PN)	I U	Utilisation courante (basse fréquence) : non linéaire et linéaire
Diode Schottky	I U	Utilisation en haute fréquence
Diode Zener	I U	Stabilisation de tension
LED/photodiode	I U	optoélectronique

3. Les diodes Zener

3.1. Description, définition et représentation normalisée

- Une **diode Zener** est un assemblage de deux semi-conducteurs dont les propriétés électriques ont été découvertes par le physicien américain Clarence Zener. Contrairement à une diode conventionnelle qui ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens, le sens direct, les diodes Zener sont conçues de façon à laisser également passer le courant inverse, mais ceci uniquement si la tension à ses bornes est plus élevée que le seuil de l'effet d'avalanche. Ce seuil en tension inverse (tension Zener) est de valeur déterminée pouvant aller de 1,2 V à plusieurs centaines de volts. Certaines diodes Zener comportent une troisième broche qui permet de régler cet effet d'avalanche.
- Schémas d'une diode Zener

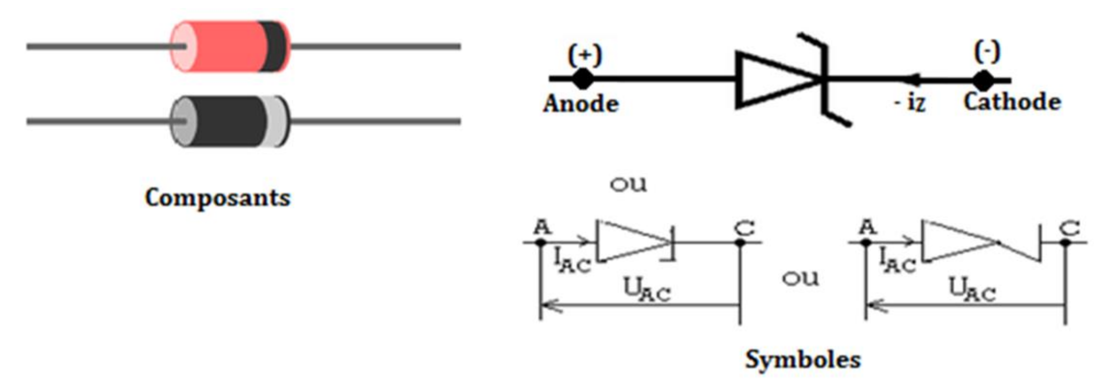


Figure 13.11 : Composants et symboles d'une diode Zener.

3.2. Caractéristique tension-courant

Considérons pour cela, le tableau présentant les variations du courant en fonction de la tension.

U(V)	-6.5	-6.1	-4	-1	0	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
I (mA)	-30	-1	0	0	0	0	0	0	0.5	20	60

$$\text{Échelle : }\begin{cases} 2cm \rightarrow 1.V....abscisses \\ 2cm \rightarrow 10mA...ordonnées \end{cases}$$

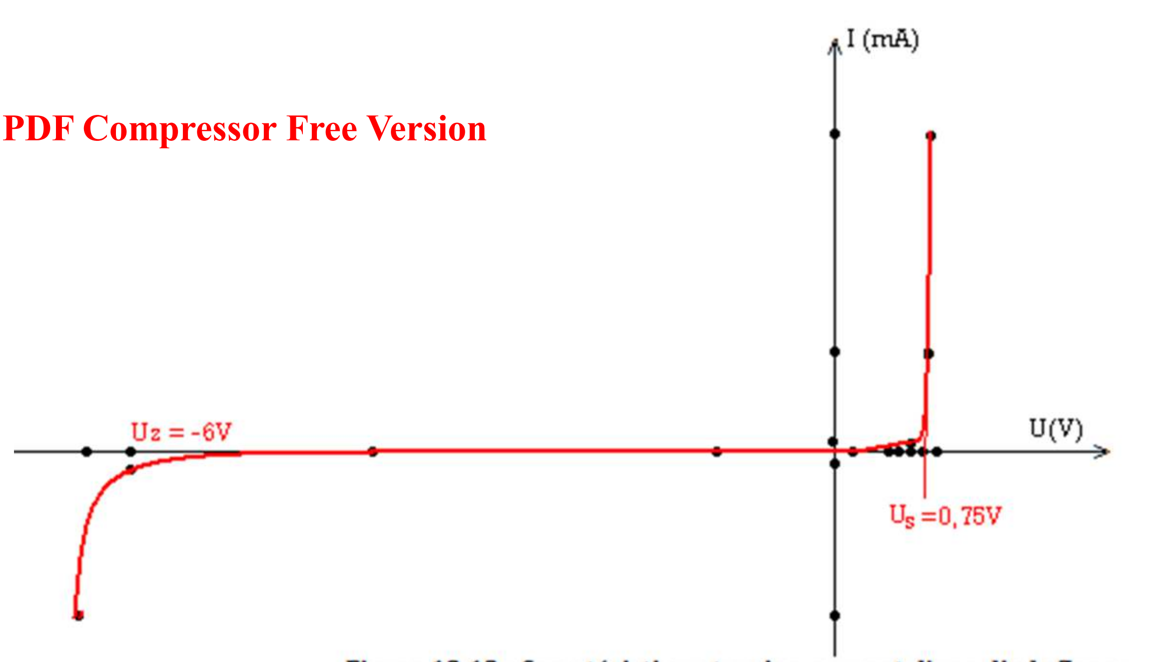


Figure 13.12 : Caractéristique tension-courant d'une diode Zener

Interprétation

- $U_{AC} > U_S \approx 0{,}75$ V : polarisation dans le sens direct. La diode est conductrice.
- $-U_Z < U_{AC} < U_S$: $I_{AC} = 0$ mA → la diode se comporte comme un interrupteur ouvert dans le circuit et $U_Z = 6$V est la tension Zener.
- $U_{AC} < -U_Z$ et $I_{AC} < 0$ → la diode est conductrice mais dans le sens inverse.

4. Applications des diodes

Les diodes permettent le redressement d'un courant alternatif et permettent de stabiliser les tensions.

4.1. Le redressement simple alternance

- **Dispositif expérimental** (figure 13.13)
- **Protocole expérimental**
  Réalisons le montage de la figure 13.a et branchons-le aux entées Y_1 et Y_2 d'un oscilloscope à deux voies. On observe les courbes de la figure 14.a. À partir du montage de la figure 13.b, on obtient les courbes de la figure 14.b.
- **Interprétation**
  La tension délivrée par le générateur est alternative : elle comporte une alternance positive et une alternance négative (signal Y_1).
  Dans le montage de la figure 13.a, la diode ne laisse passer que l'alternance positive alors qu'en 13.b, elle ne laisse passer que l'alternance négative.
- **Conclusions**
  Une diode permet alors de supprimer une alternance. La tension obtenue est dite redressée simple alternance. Le courant obtenu a toujours le même sens.

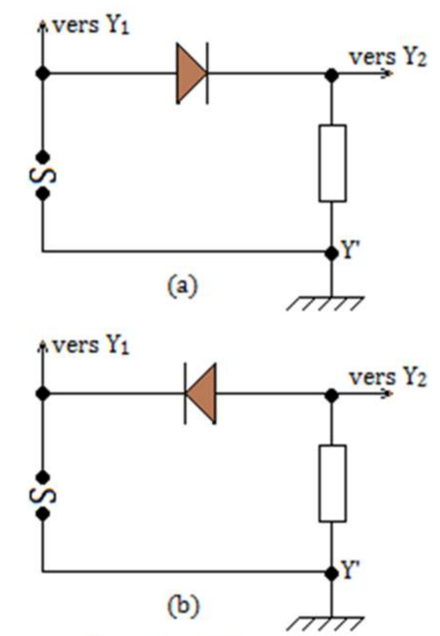


Figure 13.13

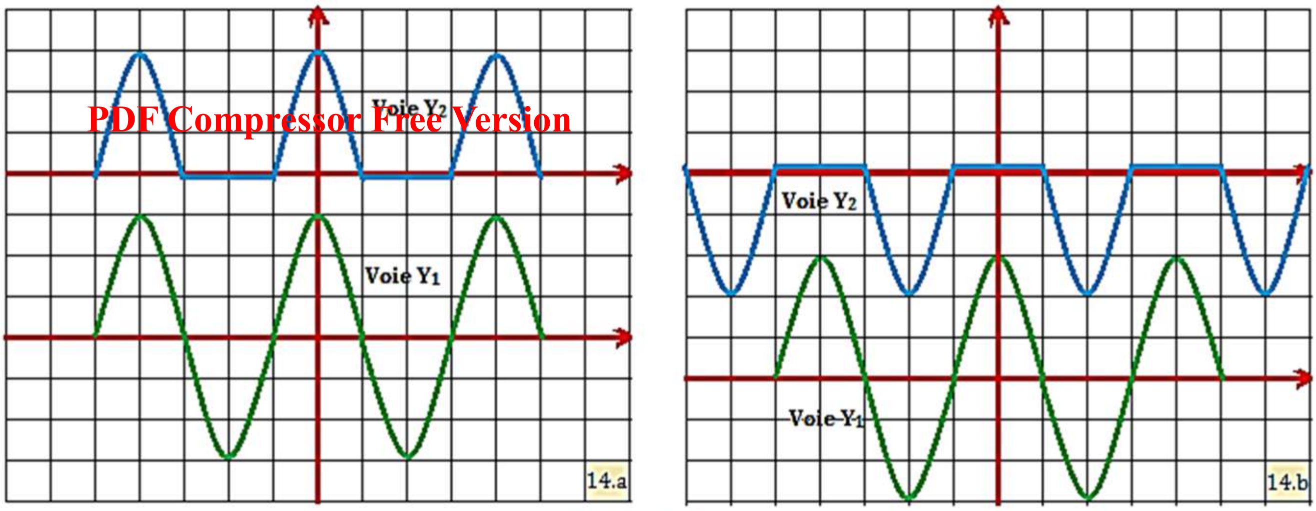


Figure 13.14

4.2. Le redressement double alternance

Expérience

On utilise un « pont » de 4-diodes, $D_1D_2D_3D_4$, montées comme l'indique la figure 13.15.

- La tension alternative issue du secondaire d'un transformateur est appliquée entre les points A et B.
- La résistance R, branchée entre les points C et D, est parcourue par un courant unidirectionnel (mais non constant) de C vers D.
- L'oscillogramme de la figure 13.16 indique la forme de la tension u_2 entre C et D : les alternances négatives de la tension d'entrée ont été « redressées ».

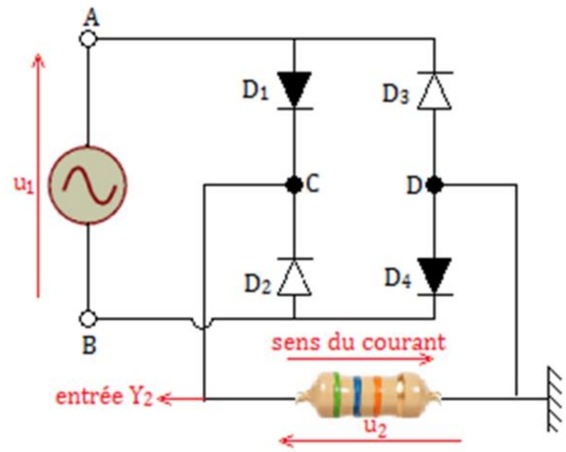


Figure 13.15 : Redressement double alternance

- Pendant l'alternance positive, A joue le rôle du pôle positif du générateur et B celui du pôle négatif. Les diodes D_1 et D_4 sont passantes alors que D_2 et D_3 sont bloquées : le courant circule dans la maille AD_1CDD_4B.
- Pendant l'alternance négative, ce sont les diodes D_2 et D_3 qui sont passantes, mais le courant dans la résistance a toujours le même sens.

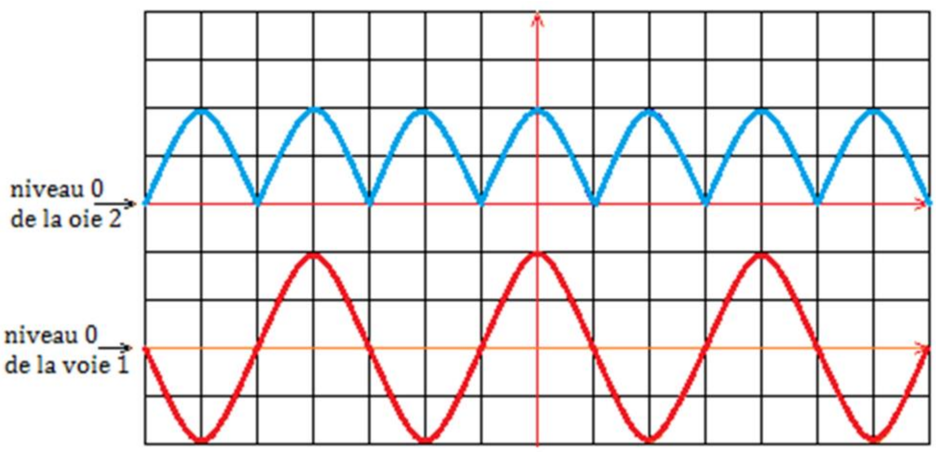


Figure 13.16 : Redressement double alternance. En bas tension sinusoïdale et en haut tension redressée.

Remarque

- Le redressement double alternance constitue la première étape de la transformation d'une tension alternative en tension continue.
- La tension sinusoïdale de la figure 13.16 n'est pas la tension $u_1 = u_{AB}$ de la figure 13.15 qui ne peut être visualisée en même temps que u_2 ; elle a été prélevée sur un autre secondaire du transformateur d'alimentation.

4.3. Stabilisation d'une tension : par diode Zéner

Considérons le montage de la figure 13.17 où une diode Zéner est en série avec une résistance. Remarquons que la diode Zéner est utilisée dans le domaine correspondant à sa caractéristique inverse, ce qui est le cas général.
Si $U > U_Z$ (= tension Zéner), la diode est traversée par un courant ; dans ces conditions, la tension à ses bornes ne varie guère : c'est la tension U_Z. Aux bornes de la diode Zéner, on dispose alors d'une tension stabilisée de valeur U_Z alors que la tension d'alimentation peut varier dans les limites beaucoup plus larges.

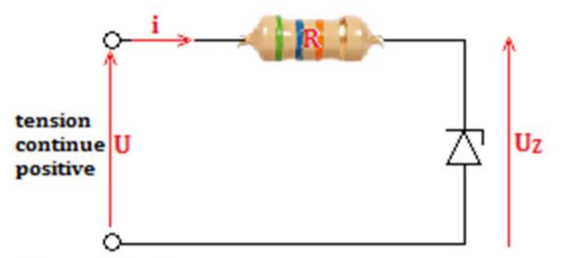


Figure 13.17 : Aux bornes de la diode Zener, la tension est pratiquement constante, tant qu'elle est traversée par un courant.

Remarque

- On peut aussi avoir une stabilisation de tension par varistance. Il suffit de remplacer, dans la figure 13.17, la diode Zéner par une varistance.
- Lorsque la diode conduit, la caractéristique est une droite affine ; la relation entre I_{AB} et U_{AB} est linéaire. La tension aux bornes de la diode peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$U_{AB} = R_D \times I_{AB} + U_S$$

- Pour $I_{AB} = 0$, $U_{AB} = U_S$=tension seuil de la diode.
- R_D (Ω) est appelée résistance dynamique de la diode. Elle peut être calculée à partir des coordonnées de deux points [A, B] d'un intervalle. Par exemple, pour cet intervalle :

$$R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_B - U_A}{I_B - I_A}$$

COMENT

- Une diode Zener est une diode au silicium qui présente à ses bornes une tension indépendante du courant qui la traverse. C'est pourquoi elle est utilisée comme stabilisateur de tension.
- Une diode électroluminescente, dite diode DEL (ou Light Emitted Diodes LED), offre la particularité d'émettre un signal lumineux lorsqu'une tension est appliquée à ses bornes. On l'emploie sur la plupart des appareils dotés d'un affichage numérique, comme les montres à quartz et les calculatrices de poche.

5. Jeu bilingue

Sentences

- A diode is an asymmetrical passive dipole which can only be passed through by the electric current in one direction called "sense-pass" i.e. from the anode (A) to the cathode (C). It is also a semiconductor component composed of two opposite doping junctions.
- A Zener diode is a silicon diode which has at its terminals a voltage independent of the current flowing through it. This is why it is used as a voltage stabilizer.

EXERCICES DE LA LEÇON 13 : LES DIPÔLES NON LINÉAIRES – LES DIODES

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

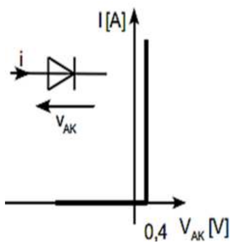
Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : diode ; diode à jonction ; diode Zéner ; caractéristique d'une diode ; tension de seuil ; tension Zéner.
2. Donner le symbole des équipements suivants : diode Zéner ; DEL ; diode à jonction ; varistance.
3. Vrai ou faux

3.1. La diode à jonction peut aussi être utilisée comme stabilisateur de tension.
3.2. Une diode est un dipôle passif dissymétrique.
3.3. Une diode LED est utilisée dans tous les équipements électroniques.
3.4. Une application des varistances est le parafoudre.
3.5. Lorsqu'une diode est polarisée en sens inverse, elle fonctionne comme un interrupteur fermé.
3.6. Une diode idéale et une diode réelle, ont une caractéristique linéaire.
3.7. Il est aussi possible de déterminer la résistance dynamique d'une varistance ou d'une Zéner.

4. On considère la caractéristique suivante :

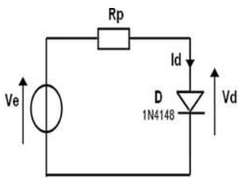
4.1. Est-ce la caractéristique d'une diode réelle, parfaite ou idéale ? Justifier votre choix.
4.2. Expliquer brièvement le fonctionnement de cette diode.



Exercice 2 : Application des savoirs

1- Soit le montage ci-dessous.

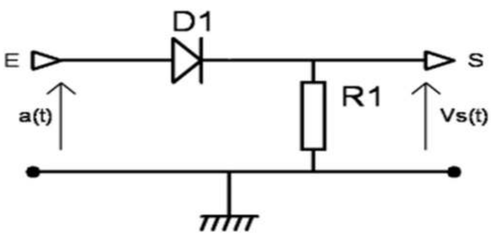
On donne $V_e = +5$ V, $R_p = 1$ kΩ et $V_{seuil} = 0,6$ V.
Déterminer la valeur du courant I_d.



2- Une diode Zéner a une tension $U_Z = 6$V. Elle dissipe une puissance maximale de 0,25W et fonctionne en inverse. On monte cette diode en série avec une résistance R et l'ensemble est alimenté sous une tension de 12V.

2.1. Proposer un schéma du circuit.
2.2. Calculer l'intensité maximale du courant inverse que peut supporter la diode.
2.3. Calculer la valeur minimale à donner à la résistance R.

3- On considère le montage ci-dessous ($V_d = 0,6$V).

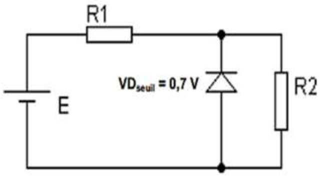


3.1. Pour a(t) = 0V, la diode peut-elle conduire ? Si oui, tracer le chemin du courant. Donner la valeur de la tension $V_S(t)$.
3.2. Pour a(t) = 5V, la diode peut-elle conduire ? Si oui, tracer le chemin du courant. Donner la valeur de $V_S(t)$.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Loi des mailles

On considère la figure ci-contre.
Déterminer V_{R2} si E = 5V, $R_1 = R_2 = 1$ kΩ.



Situation 2 : Étude graphique

On désire tracer la caractéristique I = f(U) d'une diode au germanium (diode à Jonction).

1- Proposer un schéma du montage.
2- Le tableau de mesures suivant a été obtenu.

U(V)	0	0,1	0,2	0,25	0,32	0,36	0,37	0,4
I(mA)	0	0	5	12	33	100	140	300

2.1. Tracer la caractéristique I = f(U) de la diode. Échelle : 2cm → 0,1 V ; 2cm → 50 mA.
2.2. Déterminer la tension de seuil U_S de la diode.
2.3. Déterminer l'équation $\mathbf{I = aU + b}$ de la partie linéaire de la caractéristique.
2.4. Que représentent les constantes a et b ? Calculer a et en déduire la résistance dynamique R_D de la diode.

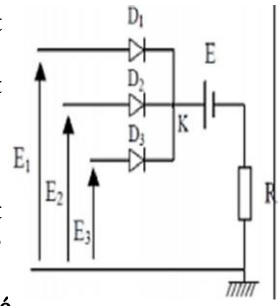
Situation 3 : English Speaking

Give, in English, the definition of a diode, and Zener diode.

Situation 4 : Un autre genre

Observe attentivement la figure ci-dessous

La tension seuil des diodes est 0,6 volt.
Leur résistance dynamique est considérée nulle.
On donne : $E_1 = 30$V ; $E_2 = 10$V ; $E_3 = 15$V ; E = 10V ; R = 20Ω.
Donner, avec justification, l'état (bloqué ou passant) de chaque diode.



Situation 5 : Interpréter l'énoncé

On monte en série un résistor de résistance $R_0 = 20Ω$ avec une diode Zéner de tension $U_Z = 10$ V. La diode est montée en parallèle avec un résistor de résistance $R_2 = 100Ω$. Le circuit est alimenté par un générateur de tension d'entrée $U_e > 0$. L'intensité du courant inverse que peut supporter la Zener est 150 mA.

- Quel est l'objectif de ce montage ?
- Réaliser le circuit ainsi décrit.
- Calculer U_s (tension de sortie) et i_1 (courant traversant R_1).
- Entre quelles limites peut varier la tension d'entrée ?

MODULE ⇒ RÉSISTORS – DIODES – TRANSISTORS – PORTES LOGIQUES 4

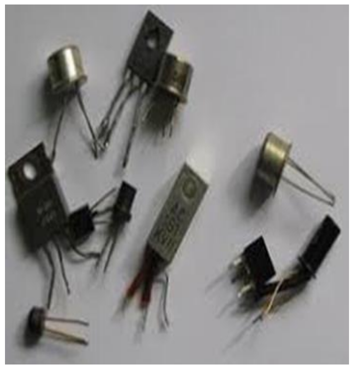
Leçon 14 LES TRANSISTORS BIPOLAIRES

ACTIVITÉ(S)

Quelle différence fais-tu entre les différents équipements électroniques ci-contre ?

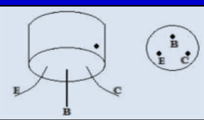
Quel nom commun existe-t-il entre ces équipements ?

Proposer une représentation symbolique de ces équipements électronique



Objectifs

- Définir, décrire et représenter un transistor bipolaire
- Donner le comportement d'un transistor
- Donner les applications des transistors.



1. Description, définition et représentation normalisée

- Il existe deux grandes familles de transistors, répondant à des principes de fonctionnement très différents :

- Les transistors bipolaires (inventés en 1948), qui fait l'objet de notre étude.
- Les transistors à effet de champ

- Le transistor est fondamentalement un composant qui peut être utilisé de deux manières différentes :

- En amplification (base de toute l'électronique analogique)
- En communication (base de toute l'électronique numérique)

- Un transistor se présente sous la forme d'un petit cylindre de quelques millimètres de hauteur d'où émergent trois électrodes appelées : base (B), émetteur (E) et collecteur (C). Il est toujours monté en quadripôle, i.e. avec deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie. L'une des électrodes est donc commune à l'entrée et à la sortie.

- Un transistor est constitué de deux jonctions PN (ou diodes) montées en sens inverse. Selon le sens de montage de ces diodes, on obtient deux types de transistors :

- Les transistors NPN. La base (B), zone de type P, est située entre deux zone de types N (émetteur et collecteur). On les représente comme suit :

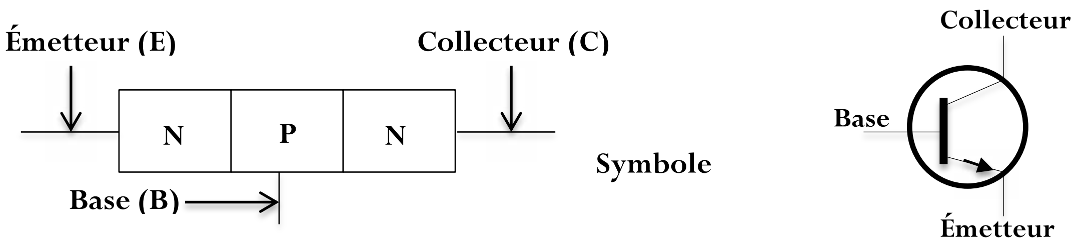


Figure 14.1 : Représentation et symbole d'un transistor NPN

- Les **transistors PNP**. La base (B), zone de type **N**, est située entre deux zones de type **P** (**émetteur et collecteur**). On les représente comme suit :

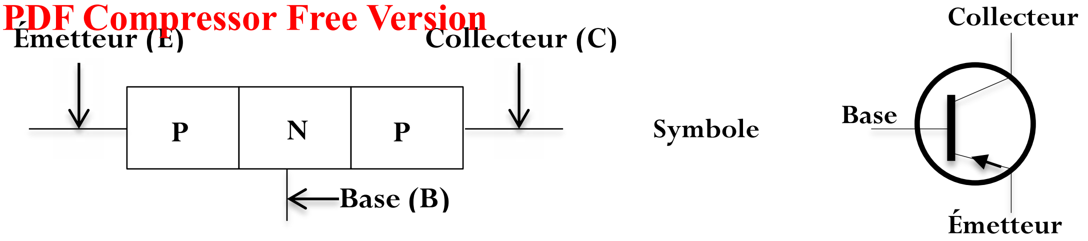


Figure 14.2 : Représentation et symbole d'un transistor PNP

- L'émetteur (E) est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'**effet transistor** qui permet à la diode, qui est en inverse, de conduire quand une tension est appliquée sur la base. On obtient alors les représentations ci-dessous :

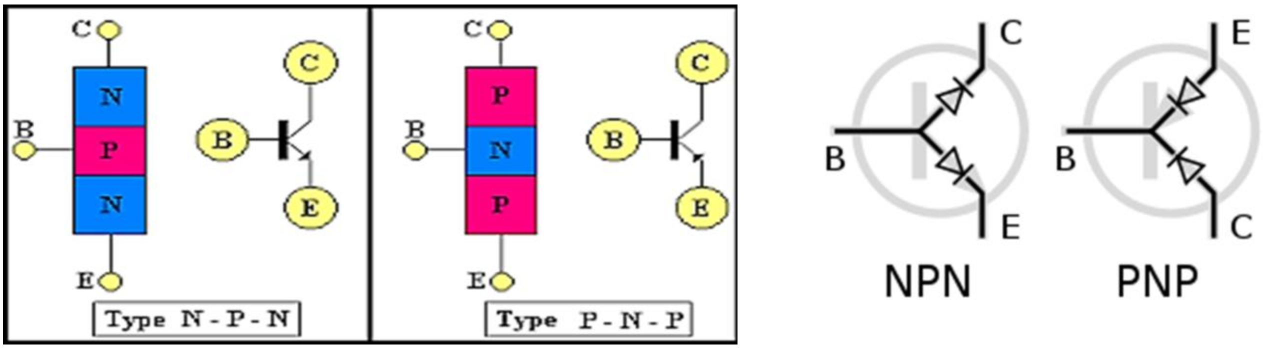


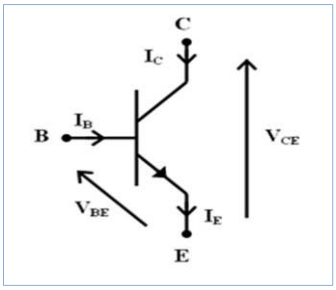
Figure 14.3 : Autres représentations des transistors NPN et PNP

- On définit alors, un transistor comme l'association de deux diodes montées en sens inverse.

2. Comportement d'un transistor
2.1. Sens de polarisation et relations

La règle de polarisation d'un transistor est la suivante :

- Deux sources d'alimentation sont nécessaires pour assurer un fonctionnement correct du transistor. Elles sont souvent notées :
- V_{BB} : alimentation du circuit Base
- V_{CC} : alimentation du circuit Collecteur.



Remarque

L'alimentation V_{BB} est parfois réalisée à partir de V_{CC}.

- Caractéristiques d'un transistor

- Les constructeurs donnent en général les valeurs ci-dessous à ne pas dépasser afin d'éviter la détérioration du transistor :
- V_{CE0} ou V_{max} : tension collecteur/émetteur maximale (à $V_{BB} = 0$)
- V_{BE0} : tension base-émetteur maximale
- I_{Cmax} : courant maximal dans le collecteur
- P : Puissance maximale que peut dissiper le transistor : $P = V_{CE} \times I_C$ **(14.1)**

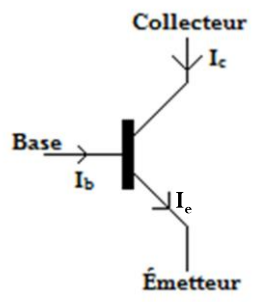
- Schéma de principe

C'est un petit courant I_b dans la base qui permet le passage d'un courant I_c, beaucoup plus fort, du collecteur vers l'émetteur.
Le courant de base est donc multiplié par un coefficient β :

$$I_C = \beta \times I_b. \qquad (14.2)$$

Avec β = gain en courant du transistor.
La loi des nœuds ou loi de **Kirchhoff**, donne :

$$I_e = I_C + I_b \qquad (14.3)$$



Remarque

- Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur dont le principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN, l'une en direct et l'autre en inverse.
- NPN ⇒ grandeurs positives et PNP ⇒ grandeurs négatives.
- La puissance dissipée par un transistor se limite à P_{max}.
- Si $I_b = 0$, on a $I_c = 0$: le transistor est dit **bloqué**. Le transistor fonctionne alors comme un interrupteur ouvert entre collecteur et émetteur.
- Si $I_b \neq 0$, on a $I_c \neq 0$: le transistor est dit **saturé** ou **passant**. Le transistor fonctionne alors tel un interrupteur fermé entre collecteur et émetteur.
- Lorsque $100 \prec \beta \prec 300$, le transistor est dit **petits signaux**.
- Lorsque $30 \prec \beta \prec 100$, le transistor est de **puissance**.
- Le réseau de caractéristiques est donné pour une température définie.
- V_{BE} ne dépend pratiquement pas de V_{CE}, le réseau d'entrée ne comporte qu'une seule courbe.
- I_{CE} dépend faiblement de V_{CE}, le réseau de transfert ne comporte souvent qu'une seule courbe.

2.2. Étude du courant d'entrée I_B en fonction de la tension d'entrée U_{BE}

Pour y parvenir, considérons la figure 14.4 ci-dessous :

Légende

- R_b et R_c sont respectivement les résistances de limitation des courants I_b et I_c.
- U_{BE} : la tension de sortie
- U_{CC} : tension d'alimentation du circuit collecteur
- U_{BB} : tension d'alimentation du circuit de base.
- I_b : le courant d'entrée ou de la base.

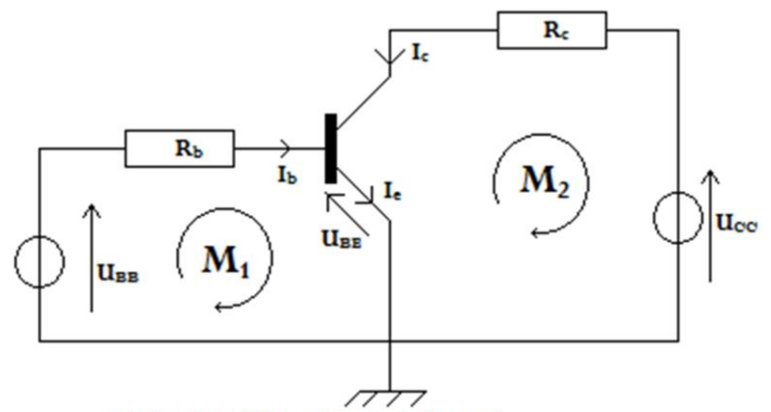


Figure 14.4 : Dispositif expérimental

- En exploitant la maille M_1 du circuit 14.4, on trouve, $I_b = \dfrac{U_{BB} - U_{BE}}{R_b}$ (14.4)
- Et la maille M_2 montre que, $I_c = \dfrac{U_{CC} - U_{BE}}{R_c}$ (14.5)

2.3. Étude du courant de sortie I_C en fonction du courant d'entrée I_B

Dès que la jonction base-émetteur conduit, le transistor devient conducteur et alors, le courant collecteur I_C est pratiquement proportionnel au courant base I_B :

$$I_C = \beta \times I_B \qquad (14.6)$$

le coefficient β est appelé **gain en courant** du transistor.

3. Applications des transistors

- En **communication**

  - Le transistor bipolaire est très utilisé en communication. Le principe de base peut être représenté par le montage inverseur ci-contre (figure 14.5).
  - Condition de blocage (interrupteur ouvert) :

$$I_b = 0 \Rightarrow V_{BE} << V_{sat}. \qquad (14.7)$$

  - Condition de saturation : $I_b \succ\succ \frac{I_C}{\beta_{\min}}$ (14.8)

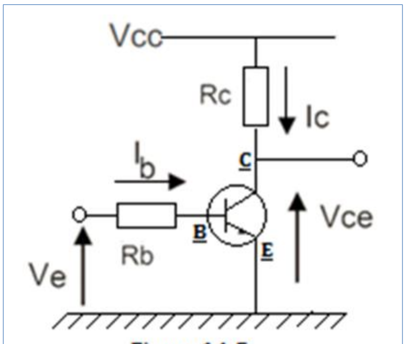


Figure 14.5

  - Dans ce cas, les paramètres importants sont le temps de communication à l'ouverture et la fermeture ainsi que la résistance en circuit ouvert R_{off} et en circuit fermé R_{on} (R_{csat}).

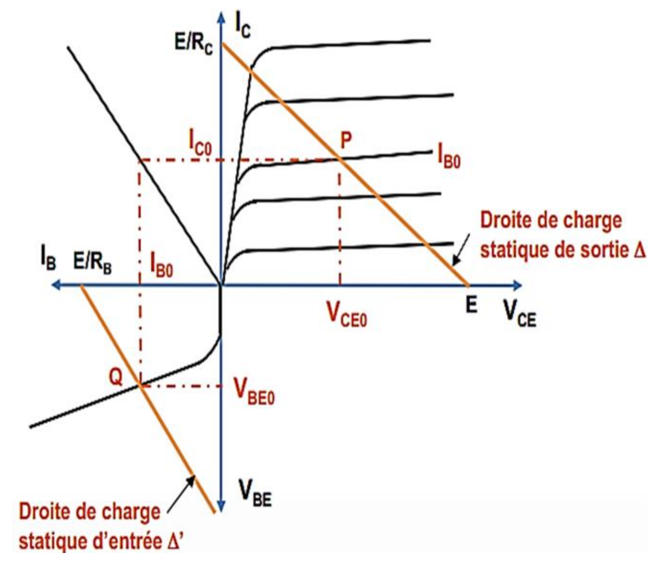
- En **amplification**

  Pour fonctionner en amplification, un transistor doit être alimenté de façon à ce qu'il soit en **régime linéaire**. Pour cela, un circuit de polarisation doit lui être appliqué.
  Les effets d'amplification de courant sont observés lorsque :

$$\begin{cases} I_c = \beta \times I_b \\ I_b + I_c = I_e \\ I_e = (1+\beta) I_b \approx \beta \times I_b \approx I_c \end{cases} \qquad (14.9)$$

- La technologie bipolaire est plutôt utilisée en analogique et en électronique de puissance.
- Les technologies FET et CMOS sont principalement utilisées en électronique numérique (réalisation d'opérations logiques). Ils peuvent être utilisés pour faire des blocs analogiques dans des circuits numériques (régulateur de tension par exemple). Ils sont aussi utilisés pour faire des commandes de puissance (moteurs) et pour l'électronique haute tension (automobile). Leurs caractéristiques s'apparentent plus à celles des tubes électroniques. Ils offrent une meilleure linéarité dans le cadre d'amplificateurs Hi-Fi, donc moins de distorsion.

- Le point de fonctionnement Q dans le réseau d'entrée $I_B = g(V_{BE})$ est situé à l'intersection de la droite de charge Δ'
- Le point de fonctionnement P dans le réseau de sortie $I_C = f(V_{CE})$ est situé à l'intersection de la droite de charge Δ et d'une caractéristique I_B = cste.
- La partie de la droite de charge statique située entre les points de blocage E et de saturation E/R_C, définie la zone active : $I_{Cblocage} \leqslant I_C \leqslant I_{Csaturation}$.
- Au point de saturation, le transistor idéal est équivalent à un interrupteur fermé.
- Au point de blocage, le transistor idéal est équivalent à un interrupteur ouvert



Polarisation du transistor : Point de fonctionnement.

EXERCICES DE LA LEÇON 14 : LES TRANSISTORS BIPOLAIRES

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : transistor ; montage émetteur commun.
2. Énumérer, en les différenciant, les types de transistors.
3. Donner les domaines d'application des transistors.
4. Vrai ou faux

4.1. Lorsque $I_b = 0$, le transistor est en mode bloqué.

4.2. Pour $\beta \succ 100$, le transistor est idéal.

4.3. On a une amplification de courant lorsque $I_B = \beta I_C$

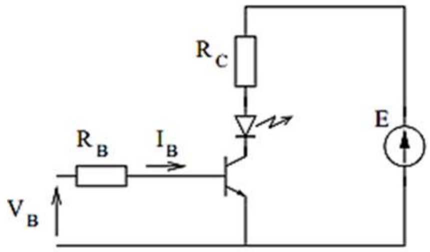
4.4. La loi de Kirchhoff s'écrit : $I_c = I_e - I_b$.

4.5. Même si le transistor n'est pas polarisé, il est possible de déterminé son point de fonctionnement.

5. Expliquer brièvement, le mode de fonctionnement d'un transistor bipolaire.

Exercice 2 : Application des savoirs

1. On souhaite commander le LED à partir d'un signal V_B prenant deux valeurs : 0 ou 5 V. On donne E = 12V.

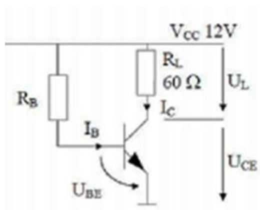


La LED est modélisée par $V_D = 1{,}6$ V et $r_D = 10\Omega$. Le transistor a un gain de 200, une tension bas-émetteur de 0,6 V et une tension collecteur-émetteur en saturation de 0,4 V.

1.1. Calculer R_C pour que le courant circulant dans la LED lorsque le transistor est saturé soit égal à 10mA.

1.2. Calculer R_B pour saturer le transistor lorsque $V_B = 5$ V ($I_C/I_B = \beta/2$).

2. On considère le montage ci-dessous avec un transistor npn de gain en courant statique $\beta = 100$ et la tension entre la base et l'émetteur est de 0,7V.



2.1. On désira avoir un courant de 100 mA dans la charge R_L, quelle valeur de résistance R_B faut-il choisir ?

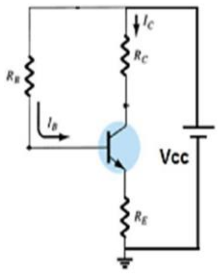
2.2. Si l'on fait varier R_B alors I_B varie et donc I_C varie aussi. Quelle est la valeur maximale qu'on peut obtenir pour I_C (transistor saturé) ?

2.3. Quelle est la valeur minimale de R_B pour saturer le transistor ?

3. On considère le montage précédent (exercice 2), avec un transistor tel que $\beta = 80$ et $V_{BE} = 0{,}7$ V. On désire avoir un point de fonctionnement tel que $V_{CE} = 6$V et $I_C = 3{,}6$ mA.
Quelles valeurs faut-il donner à R_B et R_L ?
4. On possède un transistor dont le coefficient d'amplification est de 100, une thermistance qui a pour relation R = 400(110-Téta). La tension du courant U_{BE} est égale à 0,8 V. Déterminer la température sous laquelle le transistor devient saturé.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1

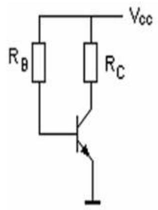


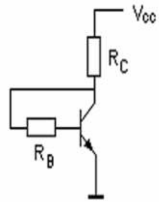
On donne $R_B = 430$ kΩ, $R_C = 2$kΩ, $R_E = 2$ kΩ, $\beta = 100$, $V_{BE} = 0{,}7$V, $V_{CC} = 15$V.

- Calculer les coordonnées du point de fonctionnement I_{C0}, V_{CE0}.
- Calculer les potentiels V_C, V_B et V_E.
- Sur un papier millimétré, tracer la droite de charge statique et le point de fonctionnement. Définir une échelle.

Situation 2

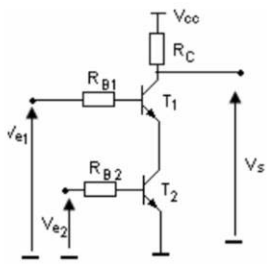
Calculer les résistances nécessaires à la polarisation d'un transistor npn au silicium dans chacun des montages ci-contre.
On donne $\beta = 100$, $V_{CC} = 10$V, $I_{C0} = 1$ mA et $V_{BE} = 0{,}7$ V.





Situation 3

Le transistor ci-contre, travaille en régime de communication. Compléter le tableau ci-dessous et en déduire la fonction du montage.



V_{e1}	V_{e2}	T_1	T_2	V_s

Situation 4 : Étude graphique

Pour étudier la fonction amplificateur de courant du transistor BD 137 de type NPN, on réalise un montage à émetteur commun avec un générateur continu de tension réglable de 0 à 12 V et deux ampèremètres.
Les résultats expérimentaux (en mA) sont reportés dans le tableau suivant :

I_B	0	0,2	0,4	0,8	1,0
I_C	0	30	60	120	150

6. Faire le schéma du montage et indiquer le sens du courant dans chaque branche du circuit.
7. Tracer la courbe $I_C = f(I_B)$. Conclure.
8. Déterminer le coefficient d'amplification β.

MODULE ⇒ RÉSISTORS – DIODES – TRANSISTORS – PORTES LOGIQUES 4

Leçon 15

LES PORTES LOGIQUES DE BASE

ACTIVITÉ(S)

Il fera beau	Travail achevé	Promenade

S'il fait beau ce soir et si j'ai fini ma préparation, j'irai me promener.

- Compléter le tableau ci-contre.
- En posant oui = 1 et non = 0, reprendre ce tableau avec ces valeurs.
- Quelle préposition lie les grandeurs 0 et 1 ?

Objectifs

- Donner la table de vérité des fonctions logiques de base (NOT, AND, OR)
- Utiliser les circuits logiques dans un circuit donné.

1. Historique

- Bon nombre de chercheurs ont tenté de trouver une manière infaillible de raisonner. Georges Boole traduisit les relations logiques en équations ce qui donna l'algèbre Booléenne. Il définit ainsi les règles qui permettent de faire des raisonnements valides pour autant que les « variables logiques » ne puissent avoir que deux valeurs possibles : Oui ou Non, Vrai ou Faux, 1 ou 0. Celles-ci doivent être des variables binaires.
- Shannon (1916 – 2001), l'inventaire du mot « bit », démontra que l'algèbre de Boole était applicable aux circuits électriques. Cela permit à cette époque, d'automatiser les centraux téléphoniques.

2. Exemples d'utilisation des portes logiques (NOT, AND, OR et leurs tables de vérité)

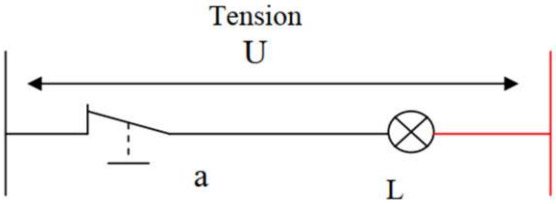
2.1. Généralité

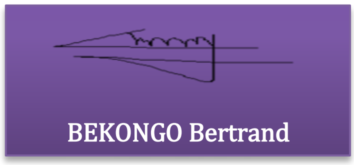
- L'algèbre de Boole est un système binaire.
- Un système binaire est un système qui ne peut exister que dans deux états autorisés.
- Diverses représentations peuvent être utilisées pour représenter ces deux états :
  - **Numérique** : 0 et 1.
  - **Logique** : Vrai et Faux.
  - **Électronique** : ON et OFF, haut et bas.
- Toute fonction logique peut être réalisée à l'aide d'un nombre de fonctions logiques de base appelées portes.
- Une porte logique est définie par :
  - Une table de vérité et/ou une expression logique (équation) définissant son résultat en fonction de son (ou ses) entrée(s).
  - Un symbole graphique.
- Comme fonctions (ou portes) logiques, on peut citer : la porte NOT (NON), AND (ET), OR (OU) qui sont les portes de base.

2.2. La porte NON (NOT)

Elle est caractérisée par une entrée et une sortie. Le complémentaire de a est noté $\bar{a}$ et se lit « non a » ou « a barre ».

- Le schéma électrique est le suivant :

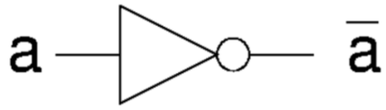




- L'équation correspondante est : $L = \bar{a}$.
- Sa table de vérité est :

a	L ($\bar{a}$)
0	1
1	0

- Son symbole logique est :



2.3. La porte AND (ET)

- Elle est caractérisée par deux entrés et une sortie.
- a ET b est noté a.b ou ab ou a^b.
- Ses caractéristiques sont les suivantes :
- Équation : la lampe brille si on appuie sur a ET sur b : L = a^b.
- Sa table de vérité est :

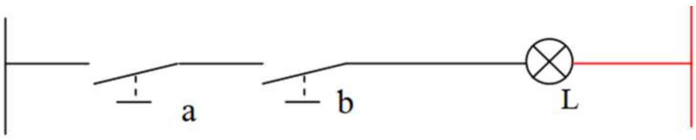
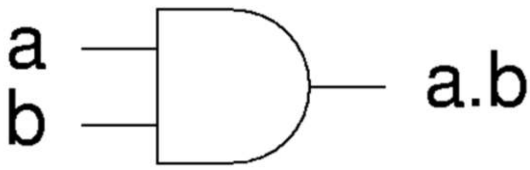


Schéma électrique

a	b	L
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1



Symbole logique

2.4. La porte OR (OU)

- Elle est caractérisée par deux entées et une sortie.
- a OU b est noté $a + b$ ou $a \vee b$.
- Ses caractéristiques sont les suivantes :
- Équation : la lampe brille si l'on appuie sur a OU sur b : $L = a + b$.
- Sa table de vérité est :

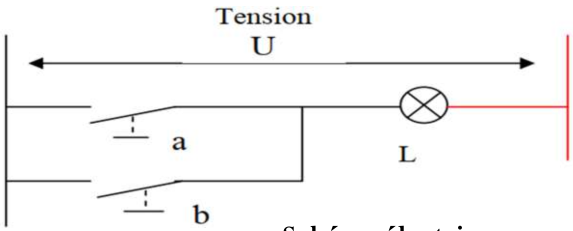
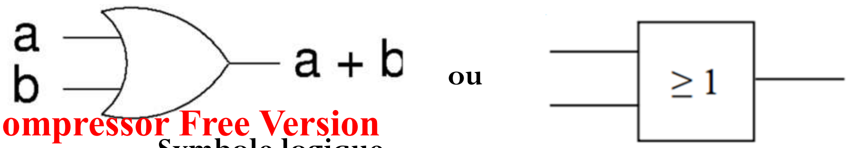
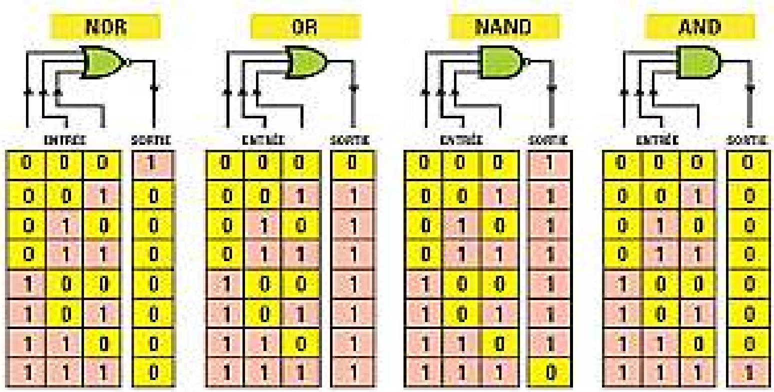


Schéma électrique

a	b	L
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1



Symbole logique



ENTRÉE			NOR SORTIE	OR SORTIE	NAND SORTIE	AND SORTIE
0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	1	0
1	1	0	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0	1

Synthèse des portes logiques de base

3. Exemples d'utilisation des circuits logiques de base

Comme exemples, on peut citer :

- L'analyse des circuits
- L'additionneur demi-bit et n-bits
- En informatique avec l'algèbre de Boole. Exemple : si 1 = 1 alors **vrai** sinon **faux.**
- Opérations mathématiques

9. Constantes : $a + 0 = a$; $a + 1 = a$; $a.0 = 0$; $a.1 = a$.
10. Idempotence : $a + a = a$ $a.a = a$
11. Complémentation : $a + \bar{a} = 1$ $a.\bar{a} = 0$
12. Commutativité : $a + b = b + a$ $a.b = b.a$
13. Distributivité : $a + (bc) = (a + b)(a + c)$ $a(b + c) = (ab) + (ac)$
14. Associativité : $a + (b + c) = (a + b) + c = a + b + c$ $a(bc) = (ab)c = abc$
15. Loi de De Morgan : $\bar{a} + \bar{b} = \overline{ab}$ $\overline{ab} = \bar{a} + \bar{b}$
16. Autres relations : $\bar{\bar{a}} = a$ $a \oplus b = (a + b)\overline{ab}$

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Porte logique	Logic gate
Circuit logique	Logic circuit
Fonction logique	Logic function

Sentences

- Any logic function can be performed using a number of basic logic functions called doors.
- A logic gate is defined by:
  - A truth table and / or a logical expression (equation) defining its result according to its (or its) entry (s).
  - A graphic symbol.

EXERCICES DE LA LEÇON 15 : LES CIRCUITS LOGIQUES DE BASE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définir : porte logique ; table de vérité.
2. Donner deux domaines d'application des circuits logiques.
3. Vrai ou faux
3.1. En logique, a.a = a et a + 1 = a
3.2. L'algèbre binaire n'a que deux valeurs 0 ou 1.
3.3. En algèbre binaire, le nombre qui suit directement 1 est 10.
3.4. Si l'état ouvert est 0 et l'état fermé est 1 alors, 1 + 1 signifie que l'on a ouvert et fermé comme état final.
3.5. L'expression a + (a.b) = a est toujours vraie.
4. Recopier et compléter le tableau suivant.

a	b	a+b	ab	$\overline{a+b}$	$\overline{ab}$	a+$\bar{b}$	$a\oplus b$
0	1						
1	0						
0	1						
1	0						

Exercice 2 : Application des savoirs

1. Convertir 10 + 13 (base 10) en base binaire.
2. Écrire plus simplement :
2.1. $a.b + \bar{c} + c.(\bar{a} + \bar{b})$
2.2. $(a + b + c).(\bar{a} + b + c) + a.b + b.c$
2.3. $(x + y).z + \bar{x}.(\bar{y} + z) + \bar{y}$
3. Convertir 10 + 13 (base 16) en base 2.
4. Calculer : 1001 + 1111001
5. Convertir en binaire 99 – 35 et 99 + 35

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

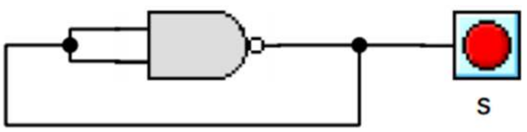
Situation 1

On dispose de quatre lampes à incandescence dans un circuit électrique.

17. Quels sont les états possibles (allumé ou éteint) de ces lampes ?
18. En posant allumé = 1 et éteint = 0, donner la table de vérité de ce circuit.
19. Cette table correspond à quelle fonction (no, and, or ou xor) ? Réaliser, si possible, le circuit logique correspondant.

Situation 2

On considère la figure suivante.



Montrer qu'il s'agit d'un oscillateur.

Situation 3

Trois interrupteurs k_1, k_2, et k_3 commandent le démarrage de deux moteurs M_1 et M_2 selon les conditions suivantes :

- Le moteur M_1 ne doit démarrer que si aux moins deux interrupteurs sont fermés ($k_{i=1,2,3} = 1$)
- Dès qu'un ou plusieurs interrupteurs sont activés, le moteur M_2 doit démarrer.

Réaliser un circuit logique permettant de réaliser M_1 et M_2 avec des opérateurs NOT et AND, tout en définissant leur table de vérité.

Situation 4

En jetant deux pièces de monnaie dans une boîte fermable, et en considérant uniquement les positions plates des pièces, quels sont les différents résultats possibles ? Répondre en ressortant la table de vérité de chaque pièce de monnaie.

Situation 5

Bouba possède un fer à repasser à chaleur. Depuis un certain temps, il a constaté que son fer ne produit plus de la chaleur.

20. Identifier le problème posé par le fer de Bouba.
21. Proposer une solution permettant à Bouba de remettre son fer en bon état de fonctionnement.
22. Bouba peut-il trouver une alternative au fer à repasser sachant que sa maman dispose d'une bonne quantité de charbon ? Ou a-t-il une autre solution pour repasser ses vêtements ?

Situation 6

On réalise un montage dans lequel, une lampe (L) est commandée à partir de deux points.

23. Faire le montage du circuit.
24. Ressortir la table de vérité de ce circuit. À quelle fonction logique correspond ce circuit ?

Situation 7

Les habitants de la localité de Guidjamoutou ne peuvent plus utiliser le seul fer à repasser à courant du village car celui qu'ils ont ne produit plus de la chaleur. Certains appareils électroniques ne fonctionnent plus normalement car ils ne parviennent plus à stabiliser la tension du courant.

25. Quel(s) est (sont) le(s) problème(s) soulevé(s) dans ce texte ?
26. Quelle(s) peut(vent) être la (les) cause(s) de ce (ces) problème(s) ?
27. Quelles solutions appropriées préconiser pour résoudre le(s) problème(s) sus évoqué(s) ?

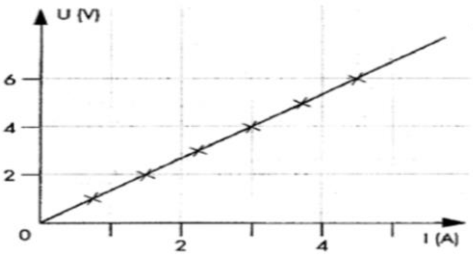
EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 4 : RÉSISTORS, DIODES, TRANSISTORS ET PORTES LOGIQUES

Exercice 1 : Circuit logique 1

On se propose de commander l'ouverture d'un robinet à partir de deux points A et B. Selon le montage, le robinet est ouvert si et seulement si les deux points A et B sont en position **on** et non pas dans les cas contraires i.e. si l'un ou l'autre est en position **Off**. Donner la table de vérité correspondant à l'énoncé.

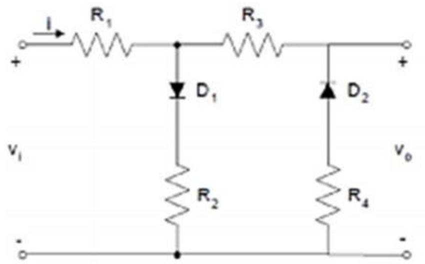
Exercice 2 : Résistor 1

La caractéristique d'un conducteur ohmique est représentée sur la figure ci-dessous.



Déterminer sa résistance et sa conductance.

Exercice 3 : Diode 1



Trouver les expressions de i en fonction de V_i en précisant l'intervalle de leur validité et en faisant varier V_i de -10 V à +10 V. On supposera que les diodes sont idéales.

$R_1 = 100\ \Omega$; $R_2 = 500\ \Omega$; $R_3 = 400\ \Omega$; $R_4 = 600\ \Omega$.

Exercice 4 : Raisonnement logique

Un élève s'interroge pour savoir s'il est sage pour lui de sortir ce soir. Il doit prendre une décision en fonction des quatre propositions indépendantes suivantes :

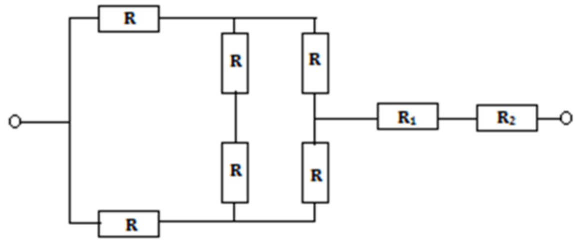
A = assez d'argent ; B = devoirs pas faits ; C = voiture de papa disponible ; D = taxi en grève.

D'où on déduira que l'élève sortira si A est vraie, B fausse et que C est vraie ou D fausse.

1. Quelles sont les différentes conditions pour que l'élève sorte ?
2. Comment peut-on qualifier l'expression logique « sortir » ?
3. Proposer à l'élève une table de vérité permettant de donner la valeur pour chaque combinaison de résultat possible.

Exercice 5 : Les résistors

On considère le montage suivant



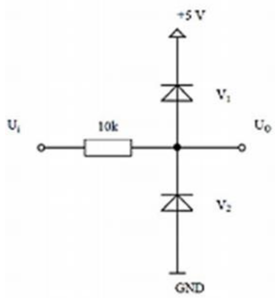
Montrer que ce regroupement de résistors, peut se ramener à un montage en série de trois résistors. Déterminer alors l'expression de la résistance équivalente du circuit en série obtenu en fonction de R, R_1 et R_2.

AN : $R = 10\ \Omega$; $R_1 = 50\ \Omega$; $R_3 = 100\ \Omega$.

Exercice 6 : Diode et résistance

Calculer U_0 si :

(a) $U_i = +15$ V
(b) $U_i = +3$V
(c) $U_i = 0$ V
(d) $U_i = -10$ V



La tension seuil de la diode est supposée 0,6 V et sa résistance dynamique est nulle.

Exercice 7 : Étude graphique

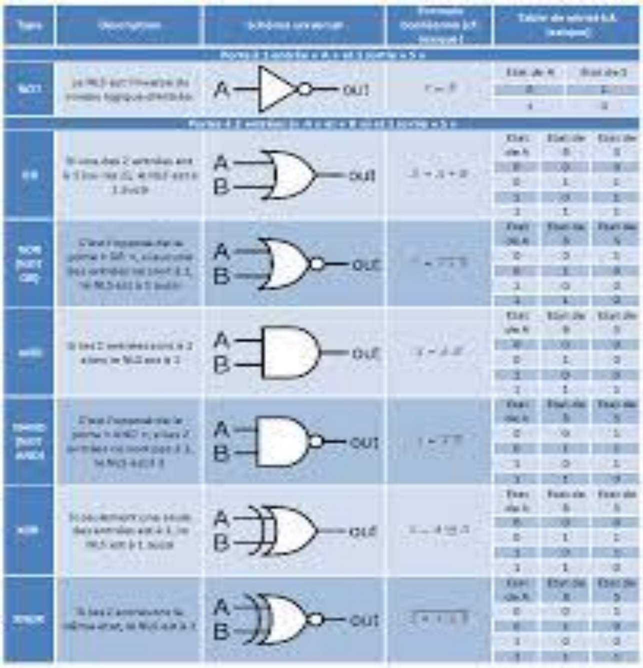
On souhaite tracer la caractéristique intensité-tension d'un dipôle D. Pour effectuer les mesures, on dispose d'un générateur de tension réglable que l'on monte en série avec le dipôle D et un interrupteur.

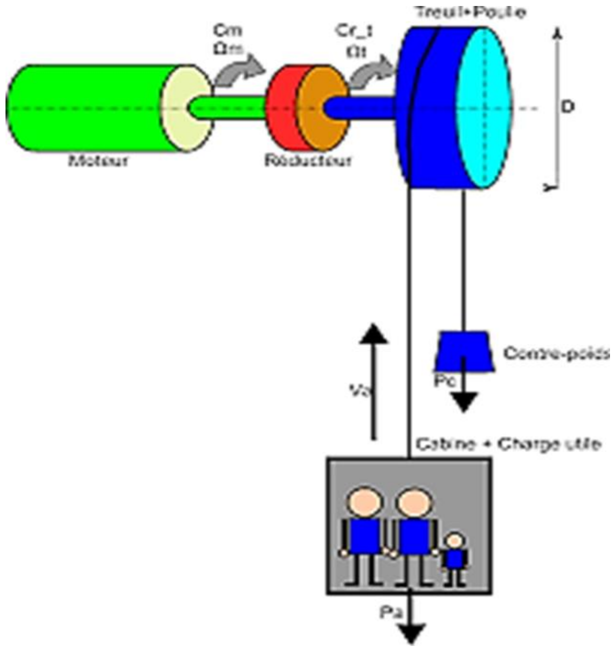
1. Réaliser le schéma du montage.
2. Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs expérimentales des mesures.

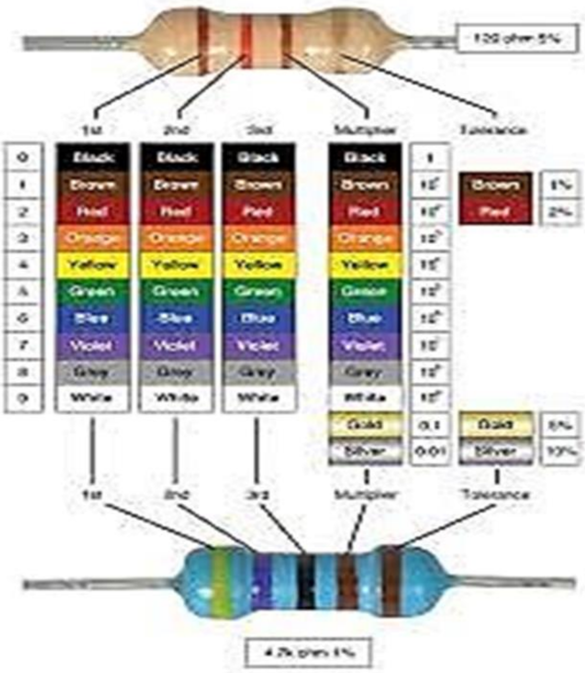
U(V)	0,0	0,5	1,2	2,1	2,9	3,4	4,2	4,7
I(mA)	0	8	19	33	46	54	67	75

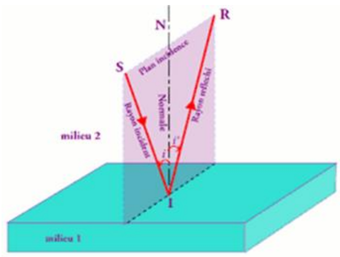
2.1. Tracer la caractéristique intensité-tension du dipôle. Échelle : 1cm → 10 mA et 1cm → 1 V.
2.2. Pourquoi la caractéristique permet-elle de déduire que la diode D est un conducteur ohmique ?
2.3. Déterminer graphiquement la résistance du résistor et en déduire la conductance du conducteur.
2.4. Quelle est la valeur de la ddp aux bornes du résistor lorsqu'il est parcouru par un courant de 10 mA.

3. On souhaite confirmer la valeur de la résistance de ce dipôle en la mesurant. Préciser le nom de l'appareil à utiliser et faire le schéma normalisé du branchement à réaliser pour faire la mesure.









Merci à tous !

BEKONGO BERTRAND