

PHYSIQUE

2^{ème} année de l'enseignement secondaire
SCIENCES

Auteurs

Abdelhamid BEN HENDA : Inspecteur Principal

Saloua FENNICHE TRABELSI : Inspectrice

Chafik TOULGUI : Professeur Principal

Evaluateurs

Ftough DAOUD : Inspecteur Général de l'Education

Adelhafidh GHARBI : Professeur de l'Enseignement Supérieur

Slaheddine MIMOUNI : Inspecteur

PRÉFACE

L'ouvrage que nous présentons est le manuel de Physique de l'élève conforme au programme de la deuxième année secondaire de la section SCIENCES. L'absence de livre du professeur à ces niveaux d'enseignement, a amené les auteurs à concevoir et réaliser un manuel destiné à devenir un outil de travail pour l'élève autant que pour le professeur. En effet :

En ce qui concerne le premier utilisateur qu'est l'élève, l'ouvrage poursuit un double objectif :

- * séduire l'élève en proposant des démarches qui s'appuient sur l'observation de l'environnement familier et quotidien ; cela revient à faire sortir l'enseignement de la Physique du cadre étroit et rébarbatif du laboratoire vers une prise directe sur la réalité, d'une part, et montrer que des phénomènes communs très variés sont explicables grâce à un petit nombre de lois physiques, d'autre part.

- * Inculquer des savoir et des savoir-faire rigoureux susceptibles de constituer une plateforme solide sur laquelle pourra s'ancrer ultérieurement un enseignement scientifique plus approfondi.

Le professeur de Physique, quant à lui, trouvera dans ce manuel une source d'inspiration suffisamment riche pour réaliser un cours personnel. En effet, là où un seul exemple d'observation ou une seule expérience suffisent souvent pour introduire la notion ou saisir le concept, leur multiplication peut parfois donner une impression de redondance que le lecteur pressé pourrait reprocher à certains passages. Les auteurs ont fait ce choix dans le dessein d'enrichir le contenu tout en laissant à l'enseignant la marge nécessaire pour choisir librement, dans un large éventail, l'exemple le plus pertinent et l'observation la plus conforme au vécu de ses élèves, d'une part, et aux possibilités de son laboratoire, d'autre part.

La rédaction du manuel s'est attachée à souligner l'essentiel mais avec le souci constant d'éviter de tomber dans le superficiel et de maintenir une ligne de rigueur dans les raisonnements et les protocoles expérimentaux.

Dans chaque chapitre, l'aspect expérimental est prédominant ; les expériences sélectionnées font rarement intervenir un matériel de laboratoire sophistiqué, par contre elles sont souvent facilement reproductibles par l'élève lui-même hors de la classe et avec des moyens matériels ordinaires et courants. Le but n'est pas de promouvoir un enseignement de la physique du pauvre, mais essentiellement d'aiguiser le sens de l'observation de l'élève, d'exciter et d'entretenir sa curiosité scientifique. Les nombreuses questions que le lecteur rencontre sous les titres «**ACTIVITE**» ou «**SITUATION**» vont dans ce sens. L'élève est ainsi mis sur la voie qui lui permet d'acquérir des capacités réelles d'interrogation et d'exploration de la réalité physique qui l'entoure avec l'œil de l'investigateur scientifique objectif.

Des **EXERCICES RESOLUS** ponctuent le cours. On les rencontre chaque fois que la résolution de problèmes, mettant en jeu les notions et concepts introduits, nécessite la mise en pratique de méthodes particulières ou des mécanismes de raisonnement dont l'acquisition est déterminante pour la suite. L'acquisition de ces éléments de méthodologie permet à l'élève d'aborder par ses propres moyens la résolution des exercices de chaque chapitre.

La rubrique **ACTIVITE EXPERIMENTALE**, est un prolongement du volet expérimental du cours de chaque chapitre qui peut faire l'objet d'une séance de TP ou de TP-cours. Certaines expériences du cours y sont parfois carrément reprises ou seulement complétées par d'autres en vue de couvrir la totalité des objectifs visés par le chapitre.

L'ESSENTIEL DU COURS résume les savoir et savoir-faire importants à retenir tout en explicitant les objectifs visés par le programme et inscrits en tête de chaque chapitre. Placée juste avant les exercices, cette rubrique permet à l'élève une consultation immédiate et aisée.

L'évaluation fait l'objet de la rubrique **EXERCICES** divisée en deux niveaux :

- * «**Ai-je retenu l'essentiel ?** » : Des exercices variés (QCM, textes à compléter...) permettent d'évaluer les capacités de type **A₁**.

- * «**Je sais appliquer le cours**» : Des exercices de difficultés graduées permettent d'évaluer et consolider les savoir toutes capacités confondues.

«**INFOSCIENCE**» réalise des ouvertures en direction d'autres champs de la connaissance humaine en relation directe avec le cours du chapitre concerné : Sciences appliquées, Technique, Sciences de la vie et de la Terre, Histoire des Sciences, Problèmes de l'environnement...

Les auteurs accueilleront volontiers toutes suggestions, remarques et critiques de la part de tous leurs collègues et, par avance, les en remercient.

Les Auteurs

CIRCUITS ÉLECTRIQUES



- L'énergie électrique indispensable à notre société est transportée sous de très hautes tensions, 220 000 V par exemple et 400 000 V sur certains réseaux de distribution.
- La production de cette énergie s'accompagne malheureusement d'une dégradation presque inévitable de notre environnement. Chaque lampe que l'on allume ou que l'on oublie d'éteindre contribue à l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère et donc à l'échauffement de la planète par l'effet de serre.

Sommaire

CHAPITRE 1

PUISSANCE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE



Tous ces appareils fonctionnent sous la même tension du secteur 220 V. Ils se distinguent entre eux par des puissances de chauffe différentes.

OBJECTIFS

- Déterminer la puissance électrique mise en jeu dans une portion de circuit électrique ;
- Déterminer l'énergie électrique mise en jeu dans une portion de circuit pendant un intervalle de temps Δt ;
- Distinguer un récepteur actif d'un récepteur passif ;
- Mesurer une puissance électrique avec un wattmètre.

1 Chapitre 1 : Puissance et énergie électrique

Page 8

CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE

CHAPITRE 2



Or, cuivre, nichrome... des métaux différents pour des usages divers en électricité et électronique. Comment faire son choix dans la vaste gamme des métaux et des alliages ?

OBJECTIFS

- Distinguer un bon conducteur d'un mauvais conducteur du courant électrique
- Comparer la conductibilité électrique de divers matériaux
- Mesurer à l'ohmmètre la résistance électrique d'un conducteur
- Expliquer le principe de fonctionnement du rhéostat ou du potentiomètre
- Définir la résistivité d'un conducteur
- Citer des exemples types de variation de la résistivité d'un matériau en fonction de la température.

1 Chapitre 2 : Conductivité électrique

Page 23

RECEPTEURS PASSIFS (1)

CHAPITRE 3



Un grand nombre des composants de nos circuits électroniques sont des **résistors** (ou **résistances**) dans le jargon des électroniciens) portant des inscriptions codées en couleurs. Serait-ce pour le même usage que celui de la résistance chauffante du sèche-cheveux ou du fer à repasser ?

OBJECTIFS

- Connaître point par point ou éventuellement acquiescé à l'ordinateur la caractéristique d'un dipôle.
- Reconnaître un conducteur ohmique ou résistor grâce à l'aspect isolé de sa caractéristique ($U \propto I$).
- Connaître la loi d'Ohm relative à un conducteur ohmique
- Appliquer la loi d'Ohm pour calculer l'une des trois grandeurs U, I, R connaissant les deux autres
- Lire la valeur de la résistance d'un conducteur ohmique en utilisant le code des résistors.
- Déterminer la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

1 Chapitre 3 : Récepteurs passifs (1)

Page 37

RECEPTEURS PASSIFS (2)

CHAPITRE 4



Guirlandes et lustre pour décoration lumineuse. Que se passe-t-il si une lampe est grillée dans le 1^{er} ou le 2^{ème} cas ?

OBJECTIFS

- Reconnaître et nommer un type d'association de résistors ou conducteurs ohmiques dans un schéma électrique ou dans un montage.
- Appliquer les lois d'association des conducteurs ohmiques.
- Appliquer la loi de Joule.

1 Chapitre 4 : Récepteurs passifs (2)

Page 55

RECEPTEURS ACTIFS

CHAPITRE 5



L'énergie électrique est utilisée pour d'autres besoins que le chauffage : production de mouvements, électrolyse industrielle (réactions chimiques)...

OBJECTIFS

- Identifier un récepteur actif dans un montage ou sur un schéma électrique.
- Reconnaitre le montage d'un récepteur actif.
- Tracer la caractéristique ($U \propto I$) d'un récepteur actif.
- Déterminer graphiquement les grandeurs caractérisant un récepteur actif.
- Appliquer la loi d'Ohm relative à un récepteur actif.
- Calculer la puissance utile d'un récepteur actif.
- Calculer le rendement d'un récepteur actif.

1 Chapitre 5 : Récepteurs actifs

Page 69

LE DIPÔLE GÉNÉRATEUR

CHAPITRE 6



Champ d'éoliennes

Chaque éolienne est un convertisseur de l'énergie mécanique du vent en électrique : c'est un générateur complet : comment tous ces générateurs sont-ils associés pour alimenter par un seul câble un ensemble d'habitations ?

OBJECTIFS

- Identifier un dipôle générateur dans un montage ou sur un schéma électrique
- Reconnaitre le montage d'un dipôle générateur.
- Tracer la caractéristique ($U \propto I$) du dipôle générateur.
- Déterminer graphiquement la f.e.m. et la résistance interne du dipôle générateur.
- Appliquer la loi d'Ohm relative à un dipôle générateur.
- Calculer la puissance utile d'un dipôle générateur.
- Calculer le rendement d'un dipôle générateur.
- Caractériser le générateur équivalent à une association de générateurs en série et à une association en parallèle.

1 Chapitre 6 : Le dipôle générateur

Page 81

ADAPTATION : LOI DE POUILLET

CHAPITRE 7



Chacune de ces lampes est un récepteur passif que l'on peut associer avec l'un de ces générateurs. Toutes les associations sont-elles possibles ? Toutes les associations possibles donnent-elles un fonctionnement satisfaisant de la lampe ?

OBJECTIFS

- Déterminer graphiquement le point de fonctionnement d'un circuit consistant d'un générateur et d'un récepteur
- Appliquer la loi de Pouillet pour la détermination de l'intensité du courant qui circule dans un circuit comportant des générateurs et des récepteurs montés en série.
- Résoudre un problème d'adaptation entre un générateur et un récepteur par la méthode graphique.
- Résoudre un problème d'adaptation entre un générateur et un récepteur en appliquant la loi de Pouillet.

1 Chapitre 7 : Adaptation - Loi de Pouillet

Page 97

LE COURANT ALTERNATIF

CHAPITRE 8



La production et la distribution du courant du secteur nécessite la construction de machines électriques très lourdes : leur principe de fonctionnement est-il différent des composants miniatures que nous utilisons quotidiennement ?

OBJECTIFS

- Reconnaître une tension variable.
- Reconnaître une tension variable périodique.
- Déterminer la période, la fréquence et l'amplitude d'une tension périodique.
- Reconnaître une tension alternative.
- Reconnaître une tension alternative sinusoïdale.
- Mesurer à l'aide d'un ampèremètre une intensité efficace.
- Calculer le rapport en tension et celui en intensité d'un transformateur.
- Donner les caractéristiques du la tension du secteur.
- Reconnaître les dangers du courant de secteur et appliquer les règles de sécurité.
- Utiliser à bon escient un transformateur.
- Schématiser et réaliser un montage permettant de relever un courant alternatif.

1 Chapitre 8 : Le courant alternatif

Page 109

Prérequis

SAVOIRS

- Je sais que le courant électrique est transporté par les électrons libres dans les métaux et par les ions dans les solutions conductrices (électrolytes) ;
- Je connais le sens conventionnel de circulation du courant électrique ;
- Je sais qu'il existe des générateurs et des récepteurs ;
- Je sais comment relier la quantité d'électricité Q à l'intensité I ;
- Je connais les unités du Système International de l'intensité et de la tension électriques ;
- Je connais les lois des circuits électriques : loi de conservation de l'intensité ou loi des nœuds ; loi d'additivité des tensions ou loi des mailles ;

SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX

- Je sais mesurer une intensité avec un ampèremètre analogique ou numérique ;
- Je sais mesurer une tension avec un voltmètre analogique ou numérique ;
- Je sais mesurer une intensité ou une tension avec un multimètre numérique ;
- Je sais réaliser des circuits électriques fermés avec des générateurs, piles, lampes, LED, ... ;
- Je sais réaliser des montages en série et des montages en parallèle ;

SAVOIR-FAIRE THEORIQUES

- Je sais vérifier la loi des nœuds et la loi des mailles dans un circuit.
- Je sais calculer une quantité d'électricité ou une intensité en appliquant la relation $Q=I.t$;
- Je sais appliquer la loi des nœuds et la loi des mailles.

PUISSANCE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE



Tous ces appareils fonctionnent sous la même tension du secteur 220 V.
Ils se distinguent entre eux par des puissances de chauffe différente.

OBJECTIFS

- Déterminer la puissance électrique mise en jeu dans une portion de circuit électrique ;
- Déterminer l'énergie électrique mise en jeu dans une portion de circuit pendant un intervalle de temps Δt ;
- Distinguer un récepteur actif d'un récepteur passif ;
- Mesurer une puissance électrique avec un wattmètre.

1. Electricité au quotidien

Faisons un inventaire des appareils électriques utilisés à la maison (Fig 1). Sur chacun de ces appareils, on trouve des indications fournies par le fabricant :

- Imprimées sur le verre de la lampe ou gravées sur son culot métallique ;
- Imprimées sur une plaque signalétique (moteur, fer à repasser, sèche-cheveux...) ou sur le corps de l'appareil (Fig 2);
- Imprimées dans les données techniques d'une notice d'utilisation fournie avec l'appareil (poste TV, réfrigérateur, lave-linge...).



Fig.1- Appareils électroménagers

Activité de recherche

Remplir le tableau ci-dessous avec les données trouvées pour chaque appareil en remplissant les cases avec les chiffres accompagnant les symboles indiqués.

Appareil \ Symbole	V	A	W ou VA	Hz
Fer à repasser				
Sèche-cheveux				
Lampe à incandescence				



Fig.2- Plaque signalétique d'un appareil électroménager

Connaissez-vous la signification de tous les symboles trouvés ? Certains ont déjà été rencontrés en 1^{ère} Année, comme le volt (V) et l'ampère (A).

Tous les appareils portent une indication accompagnée du symbole W. Il s'agit de la puissance électrique exprimée en watt (W). Parfois on trouve une indication accompagnée du symbole (VA) ; il s'agit aussi d'une puissance de l'appareil exprimée en VoltAmpère.

2. Puissance électrique reçue par un appareil électrique

Alimentons une lampe marquée 6V-5W sous une tension continue U voisine de 6 V. Son éclat est normal et elle fonctionne dans les conditions prévues par le fabricant. Cette lampe fonctionne dans les **conditions nominales**. Mesurons l'intensité qui la traverse; nous lisons $I = 0,83$ A. Mesurons I pour deux autres valeurs de U.

Résumons les résultats de nos observations dans le tableau suivant :

U(V)	Fig 3 a : Lampe en sous-tension : 3 V	Fig 3 b Conditions nominales : 6 V	Fig 3 c : Lampe en surtension : 8 V
I(A)	0,35	0,83	1
Eclat de la lampe	Pâle	Normal	Vif
Produit $U \cdot I$	1,05	5	8

Le produit $U \cdot I$ ne correspond à l'indication de la puissance de la lampe appelée **puissance nominale** que lorsqu'elle est alimentée sous 6V (tension nominale).

Remarque

Il est toujours possible (mais pas recommandé) de faire fonctionner un appareil électrique dans des conditions différentes des conditions nominales.



Fig.3a



Fig.3b



Fig.3c

La puissance reçue varie selon que la tension d'alimentation U est supérieure ou inférieure à la tension nominale U_n .

Si $U < U_n$: l'appareil est en sous-tension ; la puissance reçue est inférieure à celle nominale ; s'il s'agit d'une lampe, son éclat est pâle ; s'il s'agit d'un moteur, il tourne plus lentement...

Si $U > U_n$: l'appareil est en surtension ; la puissance reçue est supérieure à celle nominale ; la lampe brille avec un très vif éclat, le moteur tourne avec une vitesse plus grande... Dans tous les cas la durée de vie de ces appareils est écourtée. Le fabricant fournit parfois une tension maximale $U_{\max}$ à ne dépasser en aucun cas sous peine d'endommager immédiatement l'appareil. A cette tension maximale, on peut faire correspondre une puissance maximale $\mathcal{P}_{\max}$ au delà de laquelle aucun fonctionnement normal n'est possible.

Recommençons avec une lampe de feu arrière d'une voiture portant les indications 12V-15W. Nous obtenons un résultat analogue.

En courant continu, la puissance électrique $\mathcal{P}$ reçue par un appareil électrique, alimenté sous une tension U et traversé par l'intensité I , est :

$$\mathcal{P} = U.I$$

$\mathcal{P}$ s'exprime en watt (W), U en volt (V) et I en ampère (A).

Le watt a des multiples et des sous-multiples :

- Le kilowatt = 1000 W = 10^3 W
- Le mégawatt = 1000 000 W = 10^6 W
- Le milliwatt = 0,001 W = 10^{-3} W
- Le microwatt = 10^{-6} W

La relation $\mathcal{P} = U.I$ est valable en courant continu quel que soit l'appareil utilisé (éclairage, chauffage, moteur...). Cependant, en courant du secteur elle reste exacte pour les appareils de chauffage et les lampes à incandescence, mais devient approximative pour d'autres appareils (moteurs, transformateurs...). La puissance réellement consommée par ces appareils reste néanmoins très proche du produit ($U.I$) ; c'est pour cette raison que l'on exprime parfois le produit ($U.I$) en VA et non pas en W.

Remarque

Sur certaines lampes (Fig. 4) c'est l'intensité nominale qui est marquée avec la tension de service. Aussi n'est-il plus nécessaire d'indiquer en plus la puissance nominale puisqu'on peut toujours la calculer.



Fig.4- Lampes à filament

Exercice résolu

Énoncé		Solution
Sur la photo ci-dessous on lit sur le corps de l'élément chauffant appelé «résistance» : 220V – 60W. Calculer l'intensité du courant nominal qui le traverse.  Fig.5- Fer à souder	 Fig.6- la «résistance» de rechange du fer à souder	On a $U = 220V$ et $\mathcal{P} = 60W$ avec $\mathcal{P} = U.I$ On en déduit : $I = \frac{\mathcal{P}}{U} \Rightarrow I = 0,273 \text{ A}$

La puissance électrique consommée par un récepteur se mesure directement à l'aide d'un **wattmètre** (voir fiche «Activité expérimentale»). Le wattmètre (Fig.7) contient un dispositif électronique qui mesure U et I , effectue leur produit et affiche le résultat sur un cadran avec une échelle graduée en watt.

3. L'énergie électrique

La production et la distribution de l'électricité dans notre pays sont gérées par la STEG. L'électricité n'est pas gratuite et les clients de la STEG sont les logements des citoyens, les fermes, les usines, les commerces, l'éclairage public...

Tous ces clients consomment de l'énergie électrique qui est facturée par la STEG et se mesure à l'aide d'un compteur placé à l'entrée de chaque installation (Fig.8).

La ligne de la STEG joue le rôle du générateur qui fournit l'énergie électrique que tous les récepteurs de l'installation consomment. Il en est de même de tous les circuits électriques où circule un courant continu : il y a toujours au moins un générateur et un ou plusieurs récepteurs.

3.1. Le compteur domestique

Activité

Observer le compteur domestique installé à la maison et relever les chiffres qui apparaissent dans la fenêtre toutes les douze heures : 7H du matin, 19H, 7H du lendemain...

À côté des chiffres on voit inscrit le symbole kWh, c'est-à-dire kilowatt-heure (Fig.9 et 10). C'est l'unité d'énergie facturée par la STEG. On peut donc penser tout de suite que l'énergie électrique dépend à la fois de la puissance fournie à l'installation et du temps.

Au dessous des chiffres, on voit dans une fenêtre un disque en aluminium avec un repère rouge qui tourne lentement lorsqu'il y a des appareils électriques en marche dans la maison. Le repère rouge permet de compter le nombre de tours effectués pendant une durée déterminée. Le disque est à l'arrêt si tous les appareils de la maison ont été débranchés. Le mouvement de rotation du disque entraîne un totaliseur à roues qui affiche l'énergie consommée.

Sous le disque on lit **c (ou k) = 2 Wh/tr** par exemple, ce qui correspond à l'énergie consommée quand le disque fait un tour complet. C'est une constante du compteur (Fig.9 et 10).

En allumant successivement une lampe de 100 W, puis deux lampes, on peut remarquer que le disque tourne d'abord lentement, puis plus vite et d'autant plus rapidement qu'il y a d'appareils électriques en marche. L'énergie consommée dans un même laps de temps est d'autant plus grande qu'il y a de lampes allumées.

Quelle relation peut-il y avoir entre l'énergie, la puissance et le temps ?



Fig.7- Le Wattmètre

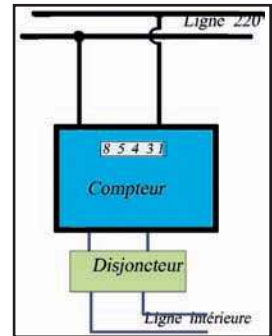


Fig.8- Branchement du compteur



Fig.9- Compteur d'énergie électrique



Fig.10- Compteur d'énergie double tarification

3.2. Expérience

Avec une seule lampe allumée à la maison, compter le nombre de tours n et la durée Δt correspondante en fraction d'heure. Calculer l'énergie consommée $E_e = n.c$ en Wh ; c ou k étant la constante du compteur utilisé, qui représente l'énergie consommée quand le disque fait un tour complet.

n	1	2	3	4	5
$\Delta t' \text{ (h)}$					
$E_e \text{ (Wh)} = n.c$					
$\frac{E_e}{\Delta t}$					

On constate que le rapport $\frac{E_e}{\Delta t}$ est pratiquement constant et égal à $\mathcal{P}$, la puissance de la lampe allumée.

On peut reprendre l'expérience après avoir allumé deux lampes de même puissance. Le rapport précédent est doublé et égal à $2\mathcal{P}$.

L'énergie électrique E_e consommée par une portion de circuit est proportionnelle à la durée Δt ; la constante de proportionnalité est la puissance totale $\mathcal{P}$ mise en jeu dans cette portion d'où :

$$\frac{E_e}{\Delta t} = \mathcal{P} \quad \text{soit} \quad \boxed{E_e = \mathcal{P} \cdot \Delta t}$$

Unités de l'énergie :

- Lorsque $\mathcal{P}$ s'exprime en watt (W) et Δt en heure (h), E_e s'exprime en watt-heure (Wh)
- Lorsque $\mathcal{P}$ s'exprime en Watt (W) et Δt en seconde (s), E_e s'exprime en joule (J) ;

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh}$$

Le watt-heure, le kilowatt-heure et le joule sont des unités d'énergie.

Le joule (J) est l'unité légale d'énergie du Système International (SI).

D'autre part on a : $\mathcal{P} = U \cdot I$ d'où $\boxed{E_e = U \cdot I \cdot \Delta t}$

E_e s'exprimera en joule (J) quand U s'exprime en volt, I en ampère et Δt en seconde.

E_e s'exprimera en joule (J) quand $\mathcal{P}$ s'exprime en watt (W) et Δt en seconde.

$$E_e = \mathcal{P} \cdot \Delta t \quad \text{d'où} \quad \boxed{\mathcal{P} = \frac{E_e}{\Delta t}}$$

La puissance mise en jeu apparaît ainsi comme une vitesse de transfert (ou débit) d'énergie entre le générateur et le récepteur ; ce qu'exprime très bien l'équivalence d'unité suivante :

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule par seconde.}$$

Exercice résolu

Enoncé	Solution
Sur la plaque signalétique d'un four électrique, on lit : 220V-1500W. Pour la cuisson d'un gâteau, ce four est resté allumé pendant 32 minutes environ. 1- Calculer l'énergie consommée en joule et en kWh. 2- Calculer le coût de l'heure de cuisson avec ce four sachant que la STEG facture 116 millimes le kWh (toutes taxes comprises).	1 - $E_e = \mathcal{P} \cdot \Delta t$ - avec $\Delta t = 32 \times 60 \text{ s} = 1920 \text{ s}$ et $\mathcal{P} = 1500 \text{ W}$, on aura $E_e = 288.10^4 \text{ J}$ ou 2880 kJ - avec $\mathcal{P} = 1,5 \text{ kW}$ et $\Delta t = \frac{32}{60} \text{ h}$ on aura $E_e = 1,5 \times \frac{32}{60} = 0,8 \text{ kWh}$ 2- En une heure de cuisson l'énergie consommée sera : $E'_e = 1500 \times 1 = 1500 \text{ Wh} = 1,5 \text{ kWh}$ le coût de l'heure de cuisson sera : $1,5 \times 116 = 174 \text{ millimes}$

Remarque

Pour économiser de l'énergie, il faut limiter la durée de fonctionnement des appareils au strict nécessaire ; par exemple, il n'est pas indispensable de laisser certains appareils en «veille» (avec une LED rouge allumée (TV, récepteur satellite, PC, chaîne ou lecteur DVD...)). En veille, pendant une journée, ils consomment autant que lorsqu'ils sont allumés pendant 4 heures. Penser à les arrêter complètement pour prolonger leur vie tout en assurant des économies d'énergie appréciables.

4. Effet Joule

Rappel : l'effet thermique est l'un des quatre effets du courant électrique et il se manifeste dans tout conducteur parcouru par un courant électrique.

4.1. Mise en évidence

Touchons la surface extérieure d'un moteur électrique en marche depuis quelques minutes ; elle est chaude. Reconnaissons avec d'autres appareils électriques en marche.

Le fonctionnement de tous les appareils électriques s'accompagne d'un dégagement plus ou moins important de chaleur.

Activité

Déterminer la fonction des récepteurs électriques consignés dans le tableau suivant en plaçant une croix dans la colonne qui convient . On peut placer pour un même récepteur une croix dans plus d'une case.

Récepteur	Produit de la chaleur	Produit de la lumière	Produit un mouvement	Autres
Lampe à incandescence				
Tube néon				
Sèche-cheveux				
Lave-linge				
Fer à souder				
Fer à repasser				
Perceuse électrique				
Moteur électrique				
Téléviseur				
Chaîne stéréo				

Citer des exemples d'appareils électriques où toute l'énergie électrique reçue se transforme en chaleur.

Dans tous ces récepteurs l'énergie électrique est consommée en se transformant soit en chaleur, soit en lumière, soit en énergie de mouvement ou énergie mécanique, mais tout (ou une partie de cette énergie) est toujours transformée en chaleur.

Définition

On appelle **effet Joule**, la transformation de l'énergie électrique en chaleur dans les conducteurs.

D'après le tableau précédent, certains récepteurs (Fig.11) transforment l'énergie électrique intégralement en chaleur ; de tels récepteurs sont appelés des **récepteurs passifs**.

Dans le sèche-cheveux, une partie de l'énergie électrique est utilisée pour chauffer l'air, le reste est utilisé pour mettre l'air chaud en mouvement rapide grâce à une petite turbine munie d'un moteur électrique. Le moteur électrique consomme de l'énergie électrique et la transforme (aux pertes par effet Joule près) presque entièrement en énergie mécanique.

Les récepteurs dans lesquels l'énergie électrique est transformée partiellement ou totalement en une forme d'énergie autre que la chaleur ou la lumière sont des **récepteurs actifs**.

Exemple : dans un électrolyseur ou une batterie en charge, l'énergie électrique se transforme en «énergie chimique».



Fig.11- Radiateur à bain d'huile



Fig.12- Radiateur (remarquer sa couleur noire) du transistor de puissance d'une alimentation stabilisée

4.2. Intérêt et inconvénients de l'effet Joule

L'effet Joule trouve tout son intérêt dans les appareils électriques conçus pour produire de la chaleur pour le chauffage en général. Dans d'autres appareils électriques destinés à un autre usage, il devient souvent un inconvénient très gênant.

Ainsi, dans une lampe à filament incandescent, l'énergie électrique se transforme en chaleur par effet Joule dans un filament de tungstène très fin. Celui-ci est porté à une température très élevée (2500°C) qui le rend incandescent et lumineux. Seule une partie de l'énergie consommée (20% environ) se transforme alors en énergie lumineuse ; le reste se «perd» en chauffant l'air ambiant.

De même dans un moteur, l'énergie électrique est destinée à être transformée en énergie mécanique (ou énergie de mouvement); mais une partie de l'énergie électrique se transforme en chaleur par effet Joule dans les bobinages et est donc «perdue» (Fig.13). Ce qui explique l'élévation de température du corps du moteur. Si l'élévation de température est excessive et si la chaleur dégagée n'est pas évacuée par un système de refroidissement adéquat, un risque de détérioration du bobinage, par fusion, peut survenir.



Fig.13- Ailettes de refroidissement sur le stator d'un moteur ; (A droite on a ôté la grille du ventilateur).

En Informatique et en Electronique en général, l'effet Joule est un obstacle majeur à la miniaturisation des circuits et à l'augmentation de puissance de calcul des microprocesseurs (le coeur du PC). Ces derniers sont souvent accolés à d'énormes radiateurs refroidis par de petits ventilateurs pour évacuer la chaleur.(Fig.14)



Fig.14- Radiateurs en aluminium et ventilateur miniature sur les processeurs d'un PC

Activité

- Pourquoi dit-on que les tubes néon rayonnent de la lumière froide ?
- Pourquoi certaines lampes (Fig.15) sont dites «économiques» ?
- Comment la lampe de 20 W ci-contre produit-elle autant de lumière qu'une lampe ordinaire de 100 W ?



Fig.15- Lampes «économiques» de 15 et 20 W

Le fusible : Dans les installations domestiques ou autres, les prises de courant du secteur sont souvent protégées par des fusibles. Ce dernier est un composant qui est placé en série dans le circuit à protéger (Fig.16). Il comporte un fil conducteur calibré qui a la propriété de fondre quand l'intensité du courant qui le traverse dépasse une certaine valeur, 10 A par exemple pour une prise ordinaire, 250 mA pour un appareil électronique (Fig.17)...L'effet Joule rend possible, ici, de manière très simple, la protection des appareils électriques.

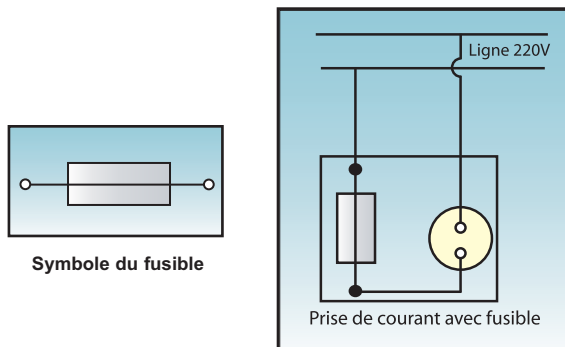


Fig.16- Schéma d'une prise avec (fusible)



Double interrupteur avec fusible

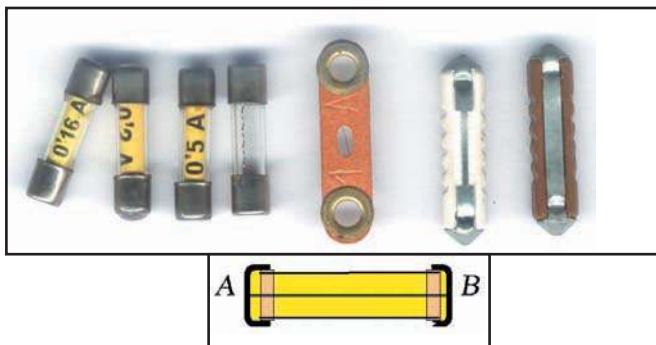
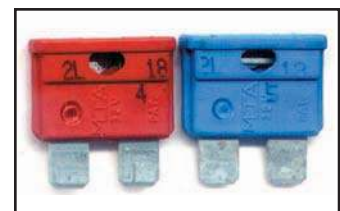


Schéma d'un fusible miniature sous verre
Fig .17- Fusibles de différents calibres et formes



Fusible pour installation électrique de voiture :
Le fusible rouge est «grillé»
Le fusible bleu est neuf

Activité expérimentale

Objectifs

- Identifier les valeurs nominales de tension, d'intensité et de puissance pour un récepteur donné ;
- Utiliser un wattmètre pour mesurer la puissance mise en jeu dans une portion de circuit ;
- Vérifier l'expression $\mathcal{P} = U \cdot I$ en utilisant un voltmètre , un ampèremètre et un wattmètre.

Matériel

- Alimentation stabilisée
- 3 lampes différentes (6V, 5W) , (12V, 18W) , (24V, 55W) avec support
- Un wattmètre, un voltmètre, un ampèremètre
- Des fils de connexion

Manipulation

1. Observer l'appareil de mesure appelé Wattmètre ; Combien y a-t-il de bornes sur la face avant ? Combien y a-t-il de calibres pour l'intensité I , pour la tension U et pour la puissance $\mathcal{P}$?

.....

.....

.....

2. Proposer un schéma de branchement possible de cet appareil pour mesurer la puissance consommée par une lampe. Faire valider le schéma par le professeur avant de le réaliser.

.....

.....

.....

3. Déterminer la tension, l'intensité et la puissance nominales de chacune des lampes à étudier.

.....

.....

.....

4. Vérifier que le wattmètre indique pour chaque lampe une valeur très proche de sa puissance nominale quand elle est alimentée sous sa tension de service ou nominale.

5. Insérer dans le circuit le voltmètre et l'ampèremètre et remplir le tableau ci-dessous. Prendre pour chaque lampe deux valeurs de U et I de part et d'autre de la valeur nominale.

Lampe	N°1			N°2			N°3		
Tension U (V)									
Intensité I (A)									
$U \cdot I$									
$\mathcal{P}$									

Discuter de la précision des résultats et conclure quant à la validité de la relation $\mathcal{P} = U \cdot I$



Fig.18- Wattmètre

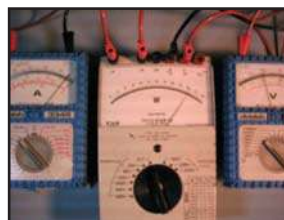


Fig.19- Montage de mesure de puissance

Lecture d'une facture d'électricité

Entre un relevé et le suivant, l'index change (il augmente toujours), signe que le client consomme de l'énergie électrique. C'est la différence entre le nouveau (index) et l'ancien qui donne en kWh l'énergie consommée qui est prise comme base pour établir la facture.

فاتورة استهلاك من 2004.01.09 إلى 2004.05.12									
Références 42548 017 0		Nom et adresse de l'abonné				يقع رافع العداد في Prochaine relève 06 09 2004			
LIBELLE	البيانات	العدد القديم Anc.	العدد الجديد Nouv.	الاستهلاك Consum.	العدد P. U.	مبلغ الاستهلاك Montant Cons.	المبالغ الثابتة Frais fixes	المجموع S/TOTAL	
إضاءة المنزل و التلغزة	04	7864	7128	736	102	71752	5850	77,602 6,144	
الاداءات TVA	8,007	الجملة TOTAL		يطرح A déduire	متخذ بالذمة Arriérés	المبلغ المطلوب Net à payer		يتم قبل A payer avant	
		91,753		48,100	0,094	43,700		03.06.2004	

Fig.19

Pour inciter les citoyens à plus d'économie d'énergie, la STEG a établi une échelle de tarification de l'énergie qui favorise les petits consommateurs. C'est pour cela que la consommation est découpée en tranches avec des prix unitaires croissants de la 1ère à la dernière tranche.

Des frais fixes et des taxes (forfait RTT, TVA) s'ajoutent aux sous-totaux de la consommation pour donner le total à payer.

On peut consulter ci-dessous le fac-similé du dépliant de la STEG sur la tarification de l'énergie.

Niveau de tension	Tarif	Redevance (millime)		Prix de l'énergie (millime)		
		Abonnement	Puissance	Jour	Pointe	Nuit
Basse Tension	Tranche économique (P = 1 à 2 kVA)		100	68		
	Tranche normale (P > 2 kVA)		100	102		
	Eclairage public		200	89		
	Chaque-eau	400		77		
	Irrigation	700		56	Effacement	45

- La TVA est appliquée sur la redevance et la consommation à raison de :
 - 10% pour un usage domestique
 - 18% pour un usage commercial et industriel

- Le forfait RTT se calcule par tranches et s'applique à tous les usagers sauf les lieux de cultes (mosquées...), les associations sportives et les associations à but non lucratif, l'éclairage public, les maisons de Jeunesse, les chauffe-eau, le pompage agricole

Consommation E sur 2 mois (kWh)	Redevance RTT (mil)
E < 50	0
51 < E < 280	10 mil par kWh
281 < E < 300	0
301 < E < 1750	4 mil par kWh
1751 < E	7 dinars tous les 2 mois

L'essentiel du cours

En courant continu, la puissance électrique $\mathcal{P}$ reçue par un récepteur alimenté sous une tension U et traversé par un courant d'intensité I , est proportionnelle à U et à I , c'est-à-dire à leur produit :

$\mathcal{P}$	=	$U \cdot I$
Watt		Volt Ampère
W		V A

Avec le courant du secteur, la relation précédente reste valable pour les appareils de chauffage et les lampes à incandescence.

On mesure directement la puissance électrique mise en jeu dans une portion de circuit avec un appareil nommé **wattmètre**.

L'énergie électrique $\mathcal{E}_e$ consommée par une portion de circuit est proportionnelle à la puissance mise en jeu et à la durée Δt : $\mathcal{E}_e = \mathcal{P} \cdot \Delta t$ ou $\mathcal{E}_e = U \cdot I \cdot \Delta t$

$\mathcal{E}_e$ s'exprime en joule (J) dans le Système International.

On appelle «**effet Joule**» le dégagement de chaleur ou l'effet thermique qui se manifeste lors du passage du courant électrique dans un conducteur. L'effet Joule est utilisé dans les appareils de chauffage mais il est nuisible dans les appareils destinés à un autre usage.

Le fusible est un organe de protection des appareils électriques dont le principe de fonctionnement utilise l'effet Joule ; il est constitué d'un conducteur calibré en vue de fondre et couper le circuit dans lequel il est inséré quand l'intensité qui le traverse dépasse une valeur connue à l'avance.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter les phrases suivantes

- La puissance électrique reçue par un appareil électrique s'exprime en.....de symbole.....dans le Système International.
- L'énergie électrique reçue par un appareil électrique s'exprime en de symbole et en de symbole ; l'unité d'énergie électrique dans le SI est le
- L'énergie électrique est proportionnelle à et à

2- On mesure entre les bornes d'un appareil de chauffage qui reçoit une puissance $\mathcal{P}$ la tension U . Sachant qu'il est traversé par l'intensité I , quelle (quelles) relation (s) vérifie (ent) I , U , $\mathcal{P}$ parmi les suivantes ?

$$\mathcal{P} = \frac{U}{I} ; \quad I = \mathcal{P} \times U ; \quad U = \frac{\mathcal{P}}{I} ; \quad I = \frac{\mathcal{P}}{U} ; \quad \mathcal{P} = I \times U ; \quad \mathcal{P} = U \times I$$

3- L'énergie électrique E_e , la puissance $\mathcal{P}$ et la durée de fonctionnement Δt sont liées par la (ou les) relation(s) suivante(s) :

$$\mathcal{P} = \frac{E_e}{\Delta t}; \quad E_e = \frac{\mathcal{P}}{\Delta t}; \quad \Delta t = \frac{E_e}{\mathcal{P}}; \quad E_e = \mathcal{P} \times \Delta t; \quad \mathcal{P} = \frac{\Delta t}{E_e}$$

Choisir la ou les bonnes réponses.

4- Citer trois méthodes permettant de mesurer l'énergie électrique reçue par un dipôle alimenté en courant continu pendant une durée Δt donnée.

5- Dans les relations des exercices 2 et 3, en quelles unités faut-il donner I , U et Δt quand on désire exprimer $\mathcal{P}$ en W et E_e en Wh.

6- Qu'appelle-t-on «effet Joule» ?

7- Recopier et compléter en choisissant éventuellement la réponse parmi celles proposées.

Un wattmètre est un appareil de mesure de ; il possède (2, 4 ou 6).....bornes de branchement. On le branche aux bornes du récepteur :

- a) En (série ou parallèle)
- b) En série (et , ou).....en parallèle.

8- Faire un schéma du branchement d'un wattmètre aux bornes d'un récepteur en précisant les entrées utilisées.

Je sais appliquer le cours

9- Sur le culot d'une lampe code-phare d'automobile, on peut lire les indications 12V-60W/55W. Calculer l'intensité qui traverse cette lampe selon qu'elle fonctionne en phare (feux de route) ou en code (feux de croisement).

10- On a remplacé l'ampoule grillée d'une lampe torche par une lampe neuve de puissance nominale 5 W. Alimentée sous 3 V (2 piles de 1,5 V chacune) elle est parcourue par un courant d'intensité 0,6A.

- a) Quelle est la puissance reçue par la lampe ?
- b) Cette lampe brillera-t-elle normalement ?

11- Un réfrigérateur consomme en 24 heures d'utilisation normale 0,9 kWh d'énergie électrique pour maintenir une température de conservation correcte des aliments. La puissance électrique consommée lorsque le moteur fonctionne est 150 W.

- a) Exprimer en Wh l'énergie consommée en 24 h.
- b) Calculer la durée de fonctionnement du moteur en 24 h.
- c) Sachant que le moteur tourne pendant 15 min chaque fois que la porte du réfrigérateur s'ouvre pendant 10 s, calculer le nombre de fois qu'on l'a ouverte en 24 h.

12- Dans le tableau ci-après, on a mesuré la tension U et l'intensité I pour chaque appareil en fonctionnement normal :

Lampe torche	Portable GSM	Diode LED	Télécommande	Baladeur
3,5 V	3,6 V	1,8 V	3 V	6 V
0,3 A	0,5 A	20 mA	30 mA	100 mA

Calculer en W, pour chaque appareil , la puissance électrique consommée.

13- Le distillateur d'eau du laboratoire de chimie a une puissance de 2,5 kW. Il met environ 9 min pour porter à l'ébullition les 4L d'eau de robinet à la température ambiante qu'il contient au départ .

- Quelle est, en joules, l'énergie électrique consommée par le distillateur pour faire bouillir l'eau? L'exprimer en Wh.
- Le distillateur produit 3,5L d'eau distillée à l'heure. Sachant que la consommation journalière du laboratoire est de 15L d'eau distillée et que le kWh est facturé 116 millimes par la STEG, calculer le coût de production du litre d'eau distillée et les frais journaliers du laboratoire de chimie.

14- Dans le lustre d'une salle de séjour, on a monté 1 lampe centrale de 60 W et 5 lampes de 25 W chacune à la périphérie. Avec un interrupteur à double commande, on a la possibilité d'allumer indépendamment : la lampe centrale seule, les 5 lampes périphériques seules, ou les 6 lampes à la fois.

- Calculer en kWh l'énergie consommée dans chaque cas sachant que la durée d'utilisation moyenne est de 3 h 40 min par jour.
- Quel est le coût d'une veillée de même durée dans le séjour à raison de 0,116 dinar le kWh.

15- Dans un atelier de confection, le circuit d'éclairage comporte des lampes de différentes puissances et des projecteurs alimentés en parallèle sur une ligne de 220 V et répartis ainsi: 13 lampes de 60 W, 6 lampes de 100 W et 4 projecteurs de 500 W. On dispose des fusibles calibrés suivants : 0,5 A ; 1 A ; 5 A ; 10 A ; 16 A ; 20 A ; 32 A.

- On veut que dans chaque ligne alimentant une lampe ou un projecteur, l'intensité ne dépasse pas le double de l'intensité nominale de fonctionnement. Quel fusible doit-on choisir pour chaque lampe ou pour chaque projecteur ?
- On veut établir une protection également par fusible sur la ligne d'alimentation de l'ensemble; le fusible est choisi de façon que l'intensité ne dépasse pas de plus de 30 % l'intensité maximale en fonctionnement normal. Quel fusible doit-on choisir ?

16- La batterie d'un téléphone portable comporte les indications suivantes : 3,6V-900mAh (lire milliampère-heure). Le portable consomme une puissance de 20 mW en veille et de 1 W en communication.

- A quelle grandeur physique correspond l'unité mAh ?
- Déterminer, en joules , l'énergie électrique totale que la batterie peut théoriquement fournir à pleine charge.
- Calculer les durées de fonctionnement dont on dispose entre deux recharges en veille ou en communication.

17- La notice d'un lave-linge comporte les indications suivantes :

- Alimentation 220V—50Hz 3200 W
 - Programme économique 1,2 kWh pendant 50 min
 - Programme normal 1,8 kWh pendant 75 min
- a) Sous quelles autres formes d'énergie retrouve-t-on l'énergie électrique consommée par la machine ?
- b) Calculer l'énergie qui serait consommée durant l'exécution du programme normal si la puissance était constante et égale à celle indiquée sur la notice.
- c) Expliquer pourquoi cette énergie n'est que de 1,8 kWh.
- d) La prise de branchement de ce lave-linge doit-elle supporter 10A ou 15A ?

18- On voit ci-dessous la plaque signalétique d'une alimentation d'ordinateur. Pour alimenter les différents composants d'un microordinateur, on dispose avec les alimentations telles que celle de la photo, de multiples sorties délivrant des tensions standards très diverses. Chacune de ces sorties peut donner une intensité variable selon les besoins entre 0A et la valeur maximale indiquées.

- a) Vérifier les valeurs de puissance indiquées en courant continu.
- b) Comparer la puissance totale disponible à celle indiquée. Conclure.

COBA		SWITCHING POWER SUPPLY						250W					
		MODEL:PS-250S(P/PFC)											
AC~ INPUT	VOLTAGE			CURRENT			FREQUENCY						
	115V~ 230V~			7A 4A			50~60Hz						
DC --- OUTPUT	+3.3V	+5V	+12V	-5V	-12V	+5V SB	PS-ON	POK	COM				
	15A	23.5A	9.5A	0.5A	0.5A	1.5A	REMOTE	P.G.	RETURN				
MAX.	165W		114W	2.5W	6W	7.5W	—	—	—				
 CAUTION: HAZARDOUS AREA DO NOT REMOVE THIS COVER ! . SELECT THE RIGHT VOLTAGE! Better Quality Temperature Controller Fan. Besser Qualität Temperaturgerechter Lüfter							FAN CONTROL INNER TEMPERATURE 30°C FAN-2000 RPM 25°C FAN-1200 RPM 18°C FAN-500 RPM						
													

Fig.21

Le compteur domestique

I- Les compteurs traditionnels

Ils possèdent un double système de bobines : la bobine «Tension» est branchée en dérivation sur la ligne 220 V du secteur. La bobine «Intensité» est branchée en série avec le conducteur de phase ; elle est traversée par le courant qui alimente l'installation électrique de l'abonné. L'action conjuguée de ces deux bobines entraîne la rotation d'un disque d'aluminium dont le nombre de tours est proportionnel à l'énergie consommée.



Fig.22-

II- Les nouveaux compteurs

Les nouveaux compteurs sont dits « numériques ». Une sonde à «effet Hall» (puce électronique) génère à partir des valeurs de la tension U du secteur et de l'intensité I consommée par l'utilisateur une information sur leur produit $U.I$ sous forme d'une tension u proportionnelle. Un circuit électronique à affichage digital permet après étalonnage d'afficher la puissance consommée à chaque instant. Un totalisateur électronique commandé par un chronomètre intégré permet de déterminer et de mémoriser l'énergie consommée au cours du temps . Un programme permet d'offrir à l'utilisateur diverses possibilités d'affichage :

- Total général de l'énergie consommée en kWh (index)
- Total de la consommation entre deux dates ou heures
- Puissance consommée instantanée en W ou kW
- Puissance souscrite par l'abonné (selon contrat)
- L'intensité maximale atteinte dans l'installation (en A)
- D'autres informations qui intéressent les techniciens et agents de la STEG.

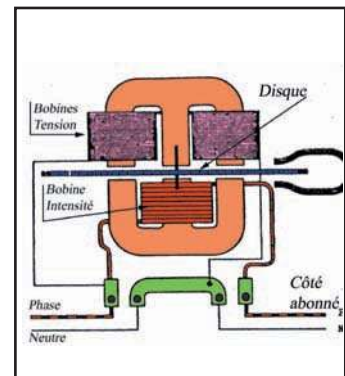


Fig.23-



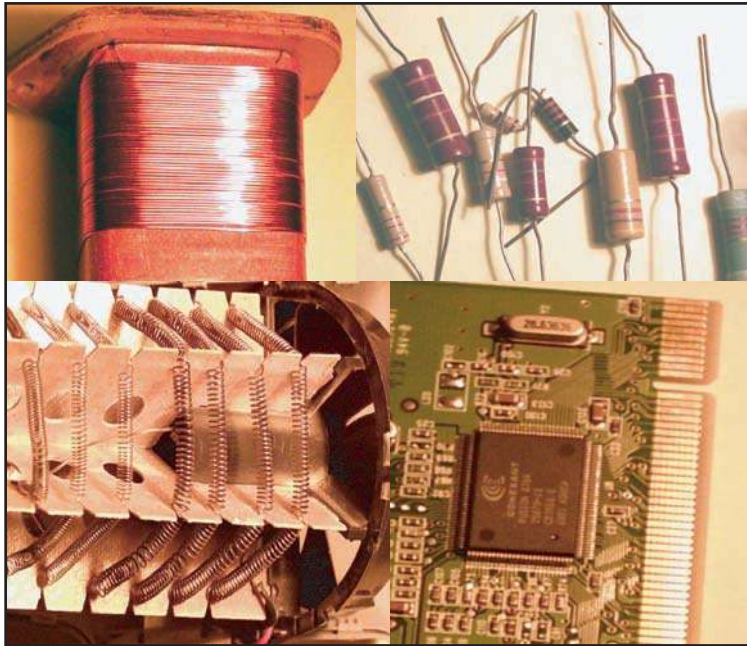
Fig.24-

L'appareil est, d'autre part, équipé d'un récepteur de télécommande qui permet aux agents de la STEG de relever à distance les informations enregistrées par le compteur. En plus du gain de temps, la présence de l'abonné n'est plus nécessaire pour effectuer le relevé périodique.

CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE

CHAPITRE

2



Or, cuivre, nichrome... des métaux différents pour des usages divers en électricité et électronique. Comment faire son choix dans la vaste gamme des métaux et des alliages ?

OBJECTIFS

- Distinguer un bon conducteur d'un mauvais conducteur du courant électrique
- Comparer la conductibilité électrique de divers matériaux
- Mesurer à l'ohmmètre la résistance électrique d'un conducteur
- Expliquer le principe de fonctionnement du rhéostat ou du potentiomètre
- Définir la résistivité d'un conducteur
- Citer des exemples types de variation de la résistivité d'un matériau en fonction de la température.

1. Rappel : Conducteurs et isolants

Réalisons le montage de la photo 1 et de la figure 2. A et B sont les extrémités libres, munies de pinces crocodile, de deux fils de connexion. Interposons entre A et B des échantillons de différents matériaux : métal, graphite, bois, verre, plastique...

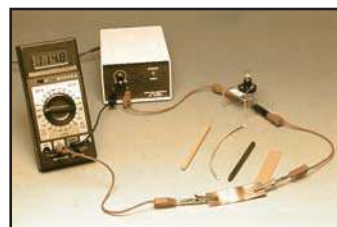


Fig.1

Observons l'éclat de la lampe et la déviation de l'aiguille de l'ampèremètre. La lampe brille et on peut lire l'intensité du courant dans le circuit lorsqu'on place entre A et B certains échantillons : ces échantillons sont faits de matériaux qui laissent passer le courant électrique, ce sont des **conducteurs**.

Exemples : métaux, graphite (électrode en charbon d'une pile), solution de sel de cuisine...

Il ne se passe apparemment rien si on reprend l'expérience avec d'autres échantillons.

Les matériaux qui les constituent ne permettent pas le passage du courant électrique ; ce sont des **isolants électriques**.

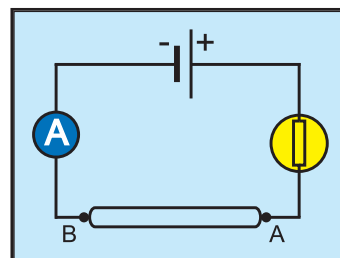


Fig.2

Exemples : le verre, le bois sec, les matières plastiques...

Remplaçons l'ampèremètre par un microampèremètre, ou mieux, par un galvanomètre et refaisons l'expérience avec un échantillon d'isolant (agitateur en verre propre et sec, fil de nylon...) et un générateur capable de délivrer une tension assez élevée (quelques centaines ou milliers de volts) (fig. 3).

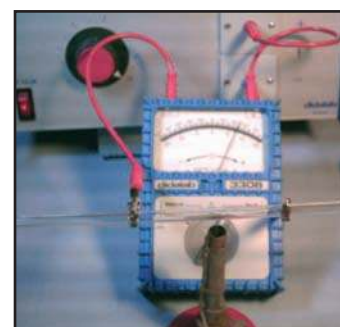


Fig.3 -

Soumis à 6 kV, le tube de verre chauffé conduit le courant électrique

L'aiguille du microampèremètre dévie, une intensité passe dans l'échantillon d'isolant.

Les isolants conduisent très faiblement le courant électrique.

2. Conductibilité

Reprenons l'expérience de la figure 1 et interposons entre A et B des échantillons de mêmes formes et dimensions mais de matières différentes : fer, cuivre, plastique, bois sec, bois mouillé, corps humain, eau salée... Mesurons l'intensité dans le circuit.

L'intensité est plus élevée pour certains échantillons que pour d'autres ; on dit que les substances qui les constituent ont des conductibilités électriques différentes.

Définition

La conductibilité est une propriété physique qui caractérise la facilité avec laquelle la matière se laisse traverser par le courant électrique.

➤ Les corps dont la conductibilité est élevée sont de bons conducteurs du courant électrique.

Un conducteur parfait aurait une conductibilité infinie.

➤ Les corps dont la conductibilité est faible sont de mauvais conducteurs du courant électrique.

Un isolant parfait aurait une conductibilité nulle.

Tous les métaux et leurs alliages sont de bons conducteurs du courant électrique. Mais le conduisent-ils tous de la même façon ?

Avec des échantillons de mêmes formes et dimensions de métaux différents, on constate que l'intensité mesurée n'est pas la même.

Les métaux sont de bons conducteurs, mais ils n'ont pas tous la même conductibilité.

3. Résistance électrique

3.1. Éléments chauffants d'un appareil électrique

Dans beaucoup d'appareils électriques, l'énergie électrique se transforme en chaleur par effet Joule. Dans un réchaud électrique, on distingue bien le fil en forme de ressort qui rougit et dégage de la chaleur quand l'appareil est branché. Les fils nus ou recouverts de porcelaine réfractaire et isolante que l'on trouve dans un réchaud, séchoir, chauffage, fer à repasser... sont appelés, dans le langage courant et commercial, «résistances». Ce sont les éléments chauffant de l'appareil (fig.4).

On trouve dans le commerce une grande variété de ces «résistances», chacune caractérisée par la puissance électrique consommée et par la tension d'alimentation nominale ; exemples : 600W—220V, 800W—220V...

Découpons une de ces «résistances», achetée dans le commerce, en un certain nombre de morceaux de différentes tailles (fig.5). Reprenons l'expérience de la figure 1 en intercalant entre A et B successivement les morceaux de «résistance».

La lampe ne brille pas de la même façon et l'ampèremètre indique une intensité différente à chaque fois.

Tout se passe comme si chaque morceau de conducteur opposait une résistance différente au passage du courant dans le circuit, d'où l'appellation «résistance».

Cette expérience montre que pour le même matériau, la «résistance» varie selon les dimensions du conducteur ; ici par exemple, c'est la longueur du fil mis en circuit qui varie.

Plus le fil est long, plus sa «résistance» augmente et plus l'intensité décroît dans le circuit.

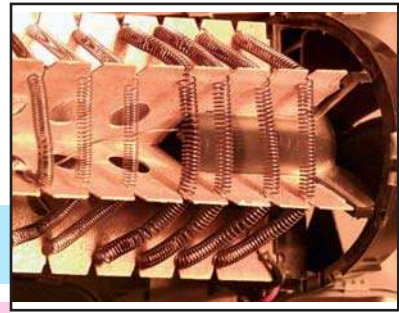


Fig. 4

Résistance de sèche-cheveux



Fig. 5

Fil résistant de différentes longueurs

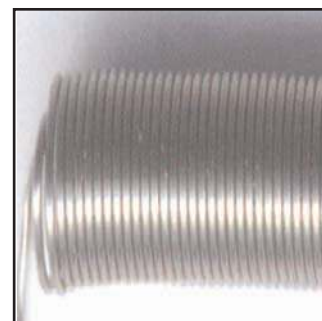


Fig. 6

Morceau de résistance grossi

L'analogie hydraulique de la figure ci-dessous (Fig.7) montre que la pompe tournant toujours à la même vitesse ne permet pas d'avoir toujours le même débit d'eau quand il y a dans le circuit du gravier ou du sable.

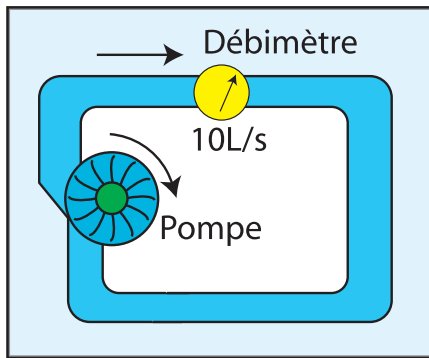


Fig.7 a

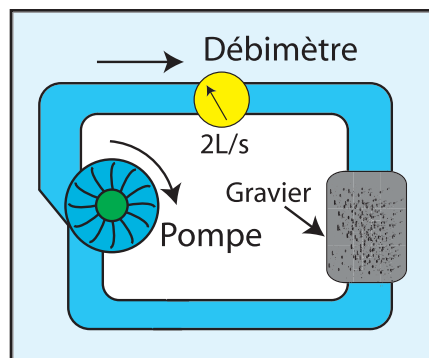


Fig.7 b

3.2. Interprétation microscopique

• Dans le **conducteur métallique**, parcouru par un courant, le mouvement d'ensemble des **électrons libres** à travers le réseau solide formé par les atomes fixes, est gêné et contrarié par les multiples collisions entre les électrons et les atomes du réseau cristallin (fig.8 a).

Cette opposition au mouvement des électrons dans les conducteurs métalliques a comme conséquence :

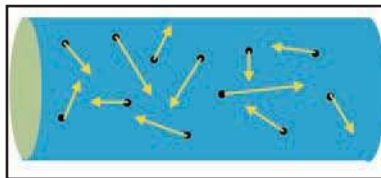


Fig.8 a

Agitation chaotique des électrons
 $I = 0$

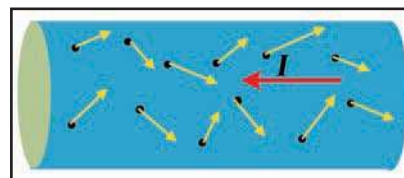


Fig.8 b

Mouvement d'ensemble des électrons
vers la droite
 $I \neq 0$ (sens conventionnel vers la gauche)

- Un ralentissement de leur mouvement, donc un affaiblissement de l'intensité I dans le circuit ;
- Un dégagement de chaleur, qui est l'effet Joule, analogue à celui que l'on observe lors du freinage d'un mouvement par frottement.

Dans les conditions ordinaires d'utilisation, tout conducteur métallique a cette propriété. On dit qu'il a une résistance électrique symbolisée en général par la lettre R .

• Dans la **solution électrolytique** : les conducteurs métalliques ne sont pas les seuls concernés ; en effet, dans les solutions électrolytiques, c'est le déplacement **des ions** dans la solution qui est gêné par le reste des particules. Une solution électrolytique ainsi qu'un électrolyte possèdent également une résistance électrique.

• Electrons libres (dans les conducteurs métalliques), ions (dans les solutions électrolytiques) sont appelés **porteurs de charges**.

Définition

On appelle résistance R d'un corps conducteur la grandeur physique qui caractérise le freinage des porteurs de charges assurant le passage du courant électrique dans ce conducteur.

3.3. Application : Fonctionnement d'un rhéostat

Pour faire varier l'intensité dans un circuit électrique comprenant un générateur et un ou plusieurs récepteurs, on intercale en série la résistance adéquate R grâce à un rhéostat (fig.9).

Le curseur C mobile permet d'insérer dans le circuit entre A et C la longueur de fil résistant nécessaire pour obtenir l'intensité désirée.



Fig.9 a

Rhéostats ou potentiomètres

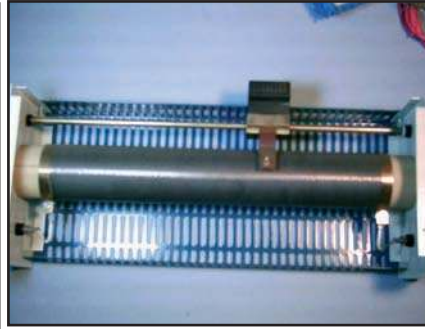


Fig.9 b

Rhéostat de laboratoire

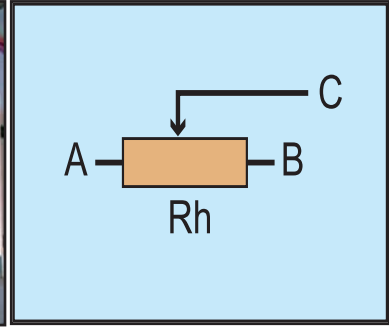


Fig.9 c

Symbole du rhéostat

4. Mesure directe d'une résistance

La résistance d'un conducteur est une grandeur physique qui caractérise chaque conducteur et pas seulement les conducteurs métalliques.

C'est une grandeur physique dont la valeur s'exprime en **ohm (Ω)**, dans le Système International ; cette unité admet des multiples : le kilohm ($k\Omega$) et le mégohm ($M\Omega$) tels que :

$$1 \text{ k}\Omega = 1000 \text{ } \Omega = 10^3 \text{ } \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 1000 \text{ } 000 \text{ } \Omega = 10^6 \text{ } \Omega$$

La valeur de la résistance d'un conducteur se mesure directement à l'aide d'un ohmmètre. C'est généralement un multimètre qui possède cette fonction de mesure parmi d'autres (fig.10).

Il suffit de le brancher comme sur la figure 10, aux bornes du conducteur avec le commutateur placé sur «**OHM**» ou « **Ω** » pour qu'il affiche la valeur de la résistance électrique de ce conducteur en Ω , $k\Omega$ ou $M\Omega$ selon le calibre choisi.



Fig.10

Mesure d'une résistance

Activité

- Mesurer la résistance d'un rhéostat à l'aide d'un ohmmètre en déplaçant le curseur entre les deux extrémités. Comparer les résultats avec les inscriptions portées par l'appareil.
- Mesurer la résistance d'un élément chauffant de réchaud électrique.

Attention

Ne jamais mesurer la résistance d'un conducteur quand celui-ci est parcouru par un courant électrique. La mesure de la résistance se fait toujours hors-circuit.

5. Résistivité d'un matériau

On peut classer les métaux en usage en électricité par ordre de conductibilité croissante en mesurant la résistance de fils de mêmes dimensions de ces métaux (voir fiche Activité expérimentale).

La résistance des échantillons mesurée ainsi, fig.12, permet de déterminer la résistivité ρ des matériaux qui les constituent. Sa valeur est numériquement égale à la résistance entre les faces opposées d'un cube d'arête 1 m et s'exprime en $\Omega \cdot m$ dans le Système International. C'est une constante physique du métal ou, en général, du matériau homogène considéré.

Métal ou alliage	Composition des alliages	Résistivité ($10^{-8} \Omega \cdot m$) à 20°C	Résistance d'un fil (Ω) longueur 1m, section 1mm ²
Argent		1,63	0,016
Cuivre		1,72	0,017
Or		2,20	0,022
Aluminium		2,83	0,028
Tungstène		5,51	0,055
Zinc		6,02	0,060
Laiton	65% Cu, 35% Zn	7,5	0,075
Nickel		7,98	0,080
Fer		10,06	0,101
Plomb		22	0,22
Maillechort	60% Cu, 25% Zn, 15% Ni	30	0,30
Ferronickel	75% Fe, 25% Ni	81,5	0,82
Mercure		95	0,95
Nichrome	65% Ni, 23% Fe, 12% Cr	110	1,1

Définition

La **résistivité** ρ d'un matériau conducteur homogène est une grandeur physique qui caractérise la résistance d'un volume cubique unitaire de ce matériau. Sa valeur numérique est égale, dans le S.I., à la résistance mesurée entre les faces opposées d'un cube d'arête 1m de ce matériau. La résistivité ρ s'exprime en $\Omega \cdot m$.



Fig.11 a

Résistance d'une colonne de liquide

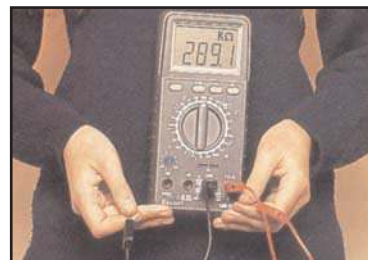


Fig.11 b

Résistance du corps humain

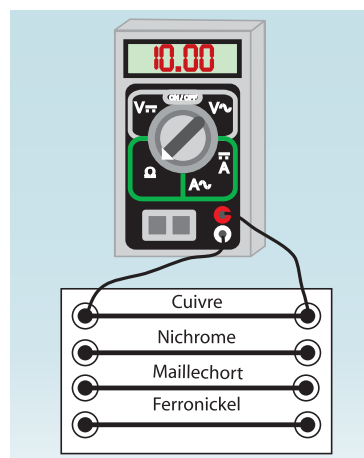
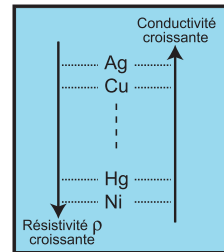


Fig.12

Le tableau précédent montre une échelle croissante de résistivité de haut en bas et, corrélativement une conductivité décroissante, ce qui fait apparaître l'argent suivi du cuivre comme les meilleurs conducteurs du courant électrique.

La résistivité varie considérablement avec la nature des matériaux ; celle des bons conducteurs (métaux) varie de 10^{-8} à $10^{-6} \Omega.m$; celle des bons isolants industriels (papier paraffiné, micanite, huiles, matières plastiques...) varie de 10^{10} à $10^{16} \Omega.m$.

Il existe cependant une grande variété de matériaux ayant des valeurs de résistivités intermédiaires ; on connaît en particulier des corps purs simples et des composés pour lesquels la résistivité est comprise entre 0,1 et $10^5 \Omega.m$: ce sont les **semiconducteurs**.



Semiconducteurs	Résistivité à 20°C
Carbone	$1,6 \cdot 10^{-5} \Omega.m$
Silicium	$4 \cdot 10^3 \Omega.m$
Germanium	$0,7 \cdot 10^2 \Omega.m$

6. Influence de la température

6.1. Cas d'un métal pur

Chauffons un fil AB de fer ou de cuivre très fin après l'avoir inséré dans l'un des circuits ci-dessous (fig 13 a et 13 b).

Il est également possible de bobiner le fil de cuivre ou de fer sur la panne d'un fer à souder à condition de mettre une couche de ruban isolant en téflon sous le fil.

On constate que dès que la température du fil AB commence à s'élever, l'intensité indiquée par le milliampèremètre se met à chuter. La résistance du fil AB a donc augmenté. L'ohmmètre permet d'afficher plus facilement cette variation (Fig.13).



◀ **Fig.13 a**
On lit $R = 47,9 \Omega$ à température ambiante



Fig.13 b ▶
On lit $R = 49,2 \Omega$ quand le fil est chauffé

Pour un métal pur, la résistivité croît avec la température.

Métal	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 0°C)	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 20°C)	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 100°C)
Argent	1,51	1,63	2,13
Cuivre	1,56	1,72	2,24
Or	2,04	2,20	2,84
Aluminium	2,48	2,83	3,55
Tungstène	4,9	5,51	7,30
Nickel	6,14	7,98	10,33
Fer	8,9	10,06	14,7

Exemples : La résistance d'un fil de cuivre double quand la température passe de 0°C à 250°C ; celle du filament d'une lampe à incandescence est 10 à 12 fois sa valeur à froid quand il atteint sa température de fonctionnement (2500°C).

6.2. Cas des alliages

La variation de la résistivité avec la température pour les alliages est analogue à celle des métaux mais elle est nettement moins importante, voir tableau ci-dessous.

Cette variation est même pratiquement nulle pour certains alliages comme celui qui est justement appelé «constantan».

Métal	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 0°C)	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 20°C)	Résistivité ρ $10^{-8} \Omega.m$ (à 100°C)
Ferronickel	80	81,5	87,2
Nichrome	109,6	110	111,8

6.3. Cas du carbone et des semiconducteurs

Reprenons de nouveau l'expérience de la figure 1. Intercalons, entre A et B, une électrode en graphite (électrode de pile usagée ou d'électrolyseur).

L'ohmmètre indique clairement une diminution importante de la résistance de l'électrode quand on élève sa température (Fig.14).

La résistivité du carbone décroît quand la température s'élève.

Le carbone (graphite pur) partage cette propriété avec la famille des semiconducteurs dont font partie le silicium, le germanium et tous leurs alliages avec les éléments voisins dans la classification périodique des éléments chimiques. Les semiconducteurs sont extrêmement importants dans l'industrie électronique et microélectronique.



Fig.14 a
A froid, l'électrode de graphite a une résistance de 0,3 Ω



Fig.14 b
A chaud, sa résistance descend au dessous de 0,1 Ω (on lit 00,0)

6.4. Cas des solutions conductrices

Remplaçons le conducteur métallique AB par un tube en U rempli par une solution d'eau salée dans laquelle plongent deux électrodes en nickel. Chauffons la base du tube.

On constate avec l'un ou l'autre des deux montages du paragraphe 6.1, que la résistance de la solution conductrice diminue quand sa température s'élève.

6.5. Cas des isolants

La baguette de verre chauffée devient conductrice du courant électrique (fig.15). Il en est de même de l'air sec qui devient conducteur quand il est chauffé : c'est en partie ce qui explique le phénomène de la foudre dont la cause principale est le courant d'air chaud entre le sol et les nuages chargés d'électricité.

D'autres matériaux isolants voient aussi leurs propriétés isolantes se dégrader quand la température s'élève.

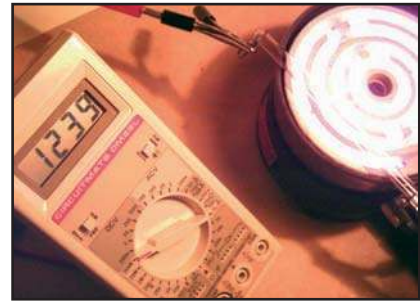


Fig.15

Le tube de verre chauffé à une résistance mesurable : 1239 MΩ

7. La supraconductivité

Pour beaucoup de matériaux conducteurs (métaux purs et alliages en particulier), la résistivité varie dans le même sens que la température : elle décroît quand la température s'abaisse.

Pour certains d'entre eux, la valeur de la résistivité s'effondre brusquement et devient nulle quand on atteint une température assez basse caractéristique du matériau étudié appelée température critique θ_c . θ_c est une caractéristique du matériau étudié.

Exemple : pour le mercure θ_c est de l'ordre de -269°C , c'est-à-dire 4K. (fig.16).

Pour d'autres matériaux (des alliages le plus souvent), θ_c est nettement plus élevée mais toujours négative.

Ce phénomène est appelé la supraconductivité (supraconduction) et le matériau devient supraconducteur, c'est-à-dire un conducteur parfait.

Un courant produit dans un circuit supraconducteur continuera à y circuler indéfiniment sans générateur et sans perte d'énergie par effet Joule.

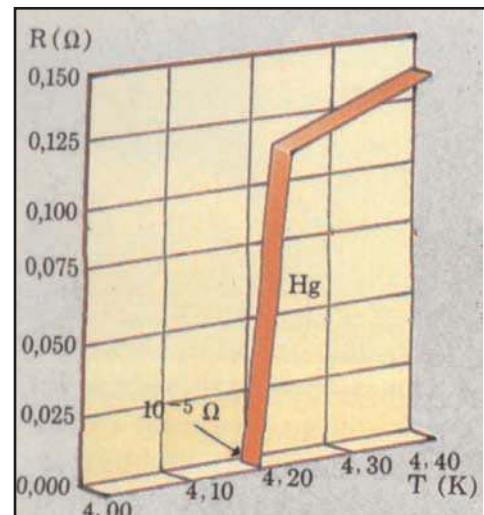


Fig.16

Activité expérimentale

Objectifs

- Vérifier que la résistance d'un conducteur filaire dépend de ses dimensions
- Comparer les conductibilités de quelques métaux et alliages
- Classer quelques alliages par ordre de résistivité croissante ou décroissante.

Matériel

- Un ohmmètre numérique
- Une planchette (20x40cm), des punaises à tête métallique nue (non plastifiée)
- Du fil résistant de différents diamètres à découper en tronçons de 35 cm en cuivre, fer, nichrome, maillechort, ferronickel
- Deux fils de connexion ou les cordons à pointes de touche du multimètre

Manipulation

1. Prendre des fils de nichrome (ou autre) de même section et les fixer entre deux punaises enfoncées dans la planchette. Choisir des écartements différents entre les punaises (15, 25, 35 cm). Mesurer la résistance de chaque brin et dresser un tableau de valeurs.

2. Reprendre pour tous les autre fils dont on dispose (autres alliages et autres sections) et vérifier que pour un métal et une section donnés, la résistance d'un fil est proportionnelle à sa longueur.

3. Prendre des fils de nichrome (ou autre) de sections S différentes coincés entre des punaises avec des écartements identiques (le plus grand possible, 35cm) ; mesurer la résistance de chaque brin et dresser un tableau de valeurs.

4. Reprendre avec les autres alliages ou métaux et vérifier que pour un métal et une longueur donnés, la résistance d'un fil est proportionnelle à $(\frac{\ell}{S})$

5. Montrer en utilisant les données du tableau de la page 29, que pour un fil de nature donnée de résistance R , de longueur ℓ et de section S , la quantité $R \frac{S}{\ell}$ est une mesure de la résistivité ρ du métal qui le constitue.

6. Conclure et classer ces métaux ou alliages par ordre de résistivité croissante.

N.B : Pour faire varier la section d'un conducteur quand on ne dispose pas d'un diamètre différent, il est possible d'utiliser deux ou trois brins de même longueur...ce qui fait doubler ou tripler la section du conducteur (mais pas le diamètre).

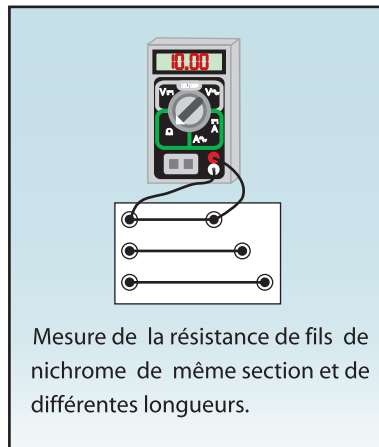


Fig.17 a

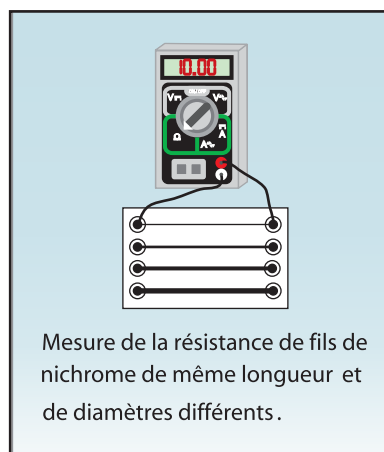


Fig.17 b

L'essentiel du cours

Tout conducteur du courant électrique possède une résistance de symbole général R .

La résistance R d'un conducteur se mesure directement à l'ohmmètre et s'exprime en ohm (Ω). Elle dépend, à une température donnée, des dimensions et de la nature de ce conducteur.

La résistance d'un conducteur homogène de longueur ℓ et de section S est proportionnelle à $\left(\frac{\ell}{S}\right)$.

La résistivité ρ d'un conducteur homogène est une caractéristique physique de ce corps dont la valeur numérique est égale dans le Système International à la résistance entre les faces opposées d'un cube d'arête 1m. La résistivité varie dans le même sens que la température pour les métaux et certains de leurs alliages et en sens inverse pour les isolants et les semiconducteurs.

Un supraconducteur est un conducteur dont la résistance est nulle ($\rho = 0$). Le phénomène de la supraconductivité apparaît au-dessous d'une température θ_c appelée température critique caractéristique du matériau utilisé.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter :

- Dans un conducteur métallique, le courant électrique résulte d'un déplacement d'.....
- Dans une solution conductrice, ce sont les.....qui assurent le passage du courant électrique.
- Un matériau bon conducteur du courant électrique est un matériau qui a une élevée et une faible
- La résistance d'un conducteur se mesure à l'aide d'un.....et son unité dans le S.I. est

2- Répondre par VRAI ou FAUX aux propositions suivantes

Les matières plastiques sont généralement des isolants
Tous les métaux conduisent le courant électrique de la même façon
Tout conducteur électrique possède une résistance
Dans un circuit en série avec un rhéostat de résistance R , pour augmenter l'intensité, il faut augmenter R
La résistivité d'un conducteur métallique diminue lorsque sa température s'élève
Le conducteur qui a la plus forte résistivité est le meilleur conducteur
Certains métaux ou alliages ont parfois une résistance nulle
Tous les matériaux peuvent devenir supraconducteurs à basse température

Je sais appliquer le cours

3. Le cuivre est meilleur conducteur que l'aluminium.
- 3.1. Un fil d'aluminium est toujours plus résistant qu'un fil de cuivre de mêmes dimensions, (Répondre par vrai ou faux).
- 3.2. Deux fils d'aluminium de même section ont des longueurs différentes ; le plus long a la plus faible résistance. (Répondre par vrai ou faux).
- 3.3. Pour obtenir deux conducteurs de même résistance, on doit utiliser soit deux fils de même longueur mais de sections différentes, soit deux fils de même section mais de longueurs différentes. Dire dans chaque cas lequel des métaux est utilisé pour le fil le plus long ou le fil de plus grande section.
4. Pourquoi le choix du fil de fer pour l'installation électrique domestique ne constitue-t-il pas un bon choix quoique moins cher ?
5. Une lampe à filament de carbone pour les expériences de laboratoire est montée dans un circuit électrique en série avec un rhéostat. On augmente l'intensité qui la traverse. La résistance du filament a-t-elle augmenté ou diminué ?
6. On dispose de fils de nichrome de même section et de longueurs différentes : 0,25m ; 0,75m ; 1m ; 1,25m. Le fil de longueur 0,75 m a une résistance de 0,83 Ω . Calculer la résistance des autres fils.
7. La résistance d'un fil de cuivre de 0,2 mm de diamètre et de 100 m de longueur est 35,8 Ω ; choisir la bonne réponse :
- 7.1. La résistance d'une longueur de 10 m de ce fil est-elle 3,58 Ω ou 358 Ω ?
- 7.2. La résistance d'un fil de cuivre de diamètre 0,4 mm et de 100m de longueur est-elle de 17,9 Ω ou de 8,95 Ω , ou de 71,6 Ω ?
- 7.3. L'aluminium est moins bon conducteur que le cuivre. La résistance de 50 m de fil d'aluminium de diamètre 0,4 mm est-elle de 4,5 Ω ou de 7,36 Ω ?
8. Pour comparer les propriétés conductrices des alliages, on a mesuré la résistance de fils, de longueurs et de sections différentes et on a reporté les résultats dans le tableau suivant :

Alliage	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Résistance (Ω)
Maillechort	0,5	10	15,2
Constantan	0,5	10	24,9
Ferronickel	0,7	5	10,7
Nichrome	0,7	10	28,2
Manganine	0,5	20	42,8

- 8.1. Classer les fils selon les valeurs croissantes de leur résistance.
- 8.2. Comparer la résistivité du ferronickel à celle du nichrome.
- 8.3. Comparer la résistivité du constantan à celle de la manganine.
- 8.4. Le ferronickel est-il plus ou moins bon conducteur que le constantan ? Justifier.
- 8.5. Classer tous ces matériaux, du meilleur au plus mauvais conducteur.

La supraconductivité

De quoi s'agit-il ?

La supraconductivité fut découverte par le physicien hollandais H.KAMERLINGH ONNES en 1911. Les supraconducteurs sont des conducteurs parfaits : leur résistance est nulle.

Quels sont les matériaux supraconducteurs ?

Cette propriété n'apparaît que dans certains matériaux et au dessous d'une certaine température caractéristique de chaque matériau appelée température critique. Avant 1986, on ne connaissait qu'une centaine de matériaux possédant cette propriété et à des températures inférieures à -250°C ; il est très difficile d'atteindre ces températures dans l'industrie.

Mais depuis cette date, les matériaux dont la température critique est nettement plus élevée ont été découverts en grand nombre ; c'est à cette date (1986) que G.BEDNORZ et K. Alex MÜLLER

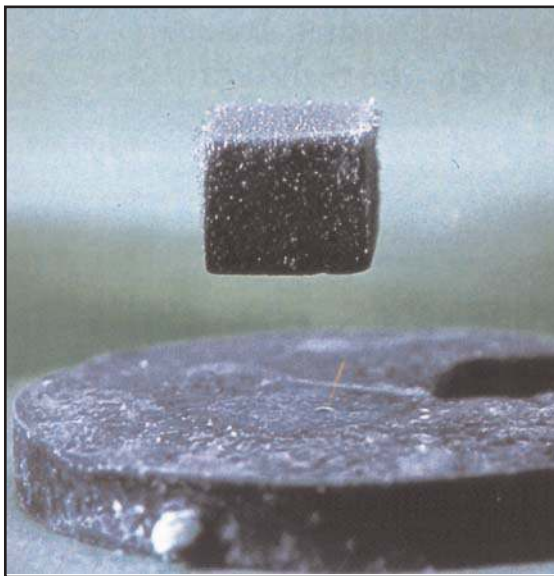


Fig.18 - Lévitation d'un aimant audessus d'un supraconducteur

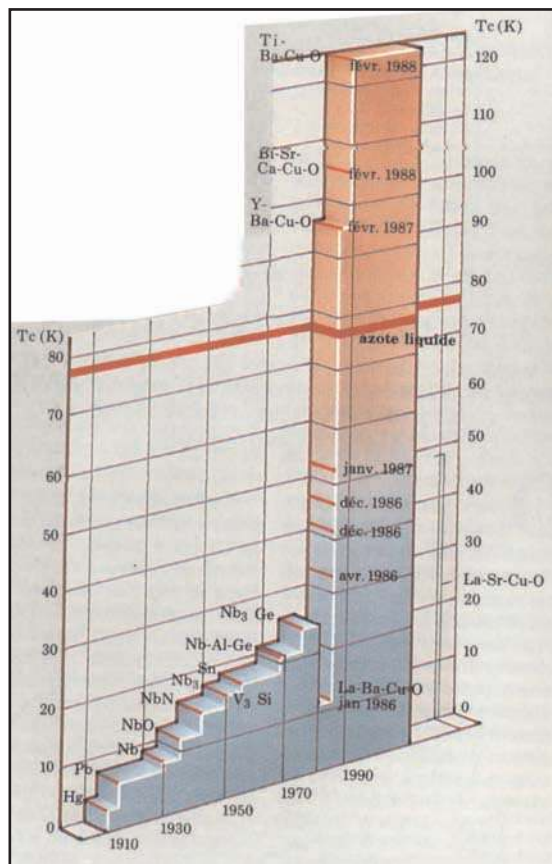


Fig.19 - Evolution de la température critique T_c (K) depuis 1910. La ligne rouge est la température de l'azote liquide. T_c (K) est donnée en degré Kelvin (K) ; pour passer des degrés Kelvin aux degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) utiliser la relation $\theta_c (^{\circ}\text{C}) = T_c (\text{K}) - 273$

(prix Nobel de Physique 1987) ont annoncé la synthèse d'une substance supraconductrice à une température de -238°C .

En fait, le grand essor de la supraconductivité a démarré avec la découverte de matériaux dont la température critique est supérieure à celle de l'azote liquide (-192°C) ; l'azote liquide est un produit industriel très facile à obtenir et à distribuer.

En décembre 1993 une équipe de recherche à Grenoble a annoncé avoir réussi la synthèse d'un supraconducteur à -3°C . Ce matériau est un composé d'oxyde de cuivre, de baryum et de mercure.

Quel est l'intérêt de la supraconductivité ?

De nombreuses équipes travaillent dans le monde sur ce sujet car l'intérêt économique et industriel de la supraconductivité est considérable.

Avec des supraconducteurs, il est possible de fabriquer des électroaimants extrêmement puissants et de dimensions raisonnables ; ces électroaimants sont très utilisés dans les laboratoires de recherche de Physique atomique.

Une autre application intéressante de ces électroaimants existe depuis quelques temps déjà : le «maglev» (de lévitation magnétique, utiliser ce terme comme mot-clef pour la recherche sur Internet sur le sujet) ; c'est un train qui flotte à quelques millimètres sur les rails par répulsion magnétique et qui roule à très grande vitesse ; un de ces trains circule au Japon entre Tokyo et Kofu (fig 20).

En médecine, certains types de scanner (imagerie par RMN c'est-à-dire Résonance Magnétique Nucléaire) utilisent également des aimants très puissants à supraconducteurs.

En Electronique, des «puces» hautement intégrées utilisent des matériaux semiconducteurs et des supraconducteurs pour diminuer dans de très larges proportions l'échauffement par effet Joule.



Fig.20 -Le train japonais à lévitation magnétique ; il permet d'atteindre des vitesses très élevées.

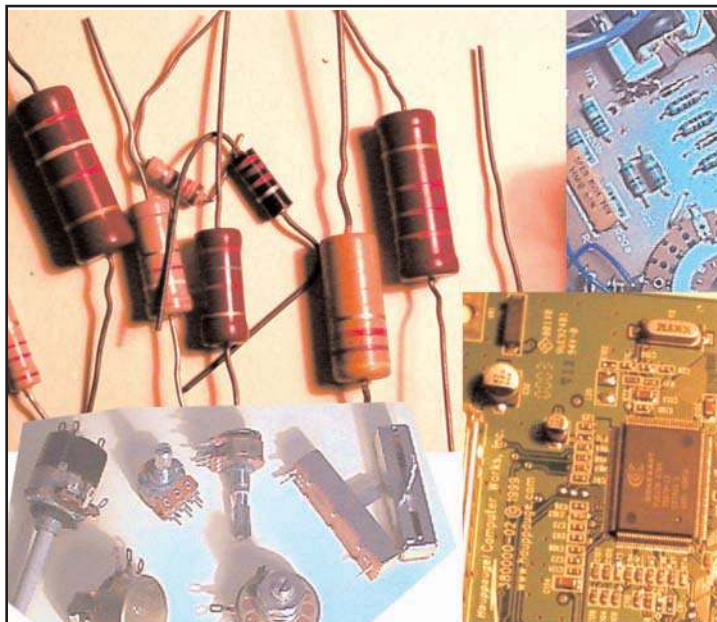


Fig.21 - Le scanner (IRM) a permis une exploration du corps humain sans les inconvénients des rayons X.

RECEPTEURS PASSIFS (1)

CHAPITRE

3



Un grand nombre des composants de ces cartes électroniques sont des résistors (ou «résistances» dans le jargon des électroniciens) portant des inscriptions codées en couleurs. Serait-ce pour le même usage que celui de la «résistance» chauffante du sèche-cheveux ou du fer à repasser ?

OBJECTIFS

- Construire point par point ou éventuellement acquérir à l'ordinateur la caractéristique d'un dipôle.
- Reconnaître un conducteur ohmique ou résistor grâce à l'aspect linéaire de sa caractéristique $U = f(I)$.
- Connaître la loi d'Ohm relative à un conducteur ohmique.
- Appliquer la loi d'Ohm pour calculer l'une des trois grandeurs U, I, R connaissant les deux autres.
- Lire la valeur de la résistance d'un conducteur ohmique en utilisant le code des couleurs.
- Déterminer la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

1. Les dipôles électriques

1.1. Définition

On appelle dipôle en électricité tout appareil électrique ou composant électronique ou montage électrique possédant deux pôles ou bornes.

Le dipôle est dit élémentaire s'il se réduit à un seul composant: électrolyseur, lampe à incandescence, diode LED...; il est dit composé s'il comprend plusieurs composants : guirlande lumineuse, sèche-cheveux...

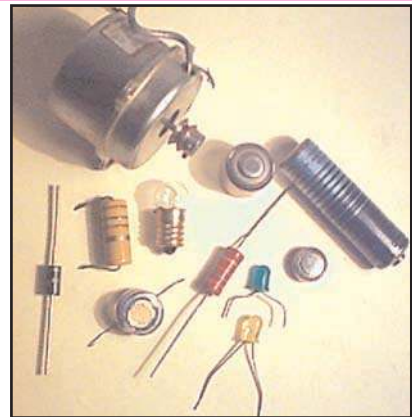


Fig. 1- Des exemples de dipôles

Activité

Chercher d'autres dipôles élémentaires et composés.

1.2. Dipôles actifs , dipôles passifs

Relions les bornes d'une pile à un voltmètre ; nous lisons une tension ; Il en est de même d'une batterie, d'une alimentation stabilisée en marche, d'une cellule photovoltaïque (pile solaire), d'une génératrice de bicyclette... Tous ces dipôles sont capables de fournir un courant électrique dans un circuit extérieur ; ce sont des **dipôles actifs**.

Tous les générateurs sont des dipôles actifs.

Relions les bornes d'une lampe à incandescence à un voltmètre.

Celui-ci n'indique aucune tension même sur les plus petits calibres ; il en est de même d'une diode LED, d'un fer à repasser, d'un haut-parleur, d'un rhéostat...

Aucun de ces dipôles n'est capable de fournir un courant électrique dans un circuit extérieur ; ce sont des **dipôles passifs**.



Fig. 2- Les piles rechargeables : des Dipôles actifs



Fig.3- Dipôles passifs enfichables

Remarque

Tous les récepteurs ne sont pas des dipôles passifs ; on verra (Chapitre 5) deux exemples de récepteurs actifs.

2. Tracé de la caractéristique d'un dipôle quelconque

2.1. Grandeurs relatives à un dipôle

Pour tout dipôle inséré entre les points A et B d'un circuit électrique parcouru par un courant I (fig 4), on sait définir

- une tension U_{AB} entre ses bornes, mesurable par un voltmètre placé en dérivation ,
- une intensité I , la même en tout point du circuit, indiquée par un ampèremètre placé en série avec le dipôle.

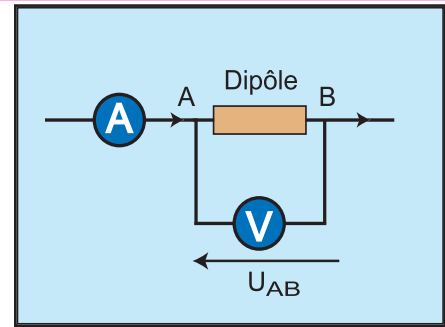


Fig. 4

Ya-t il une relation entre ces deux grandeurs pour un dipôle donné ?

Les expériences qui suivent vont pouvoir donner des éléments de réponse à la question.



Fig. 5

2.2. Montage d'étude

Comme il existe deux grandeurs U et I relatives à un dipôle, on peut concevoir soit un montage qui permet de régler U aux bornes du dipôle soit un montage qui permet de régler I .

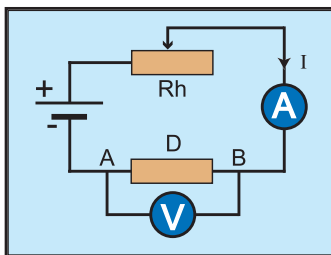


Fig. 6 a

Le rhéostat inséré en série permet de faire varier I

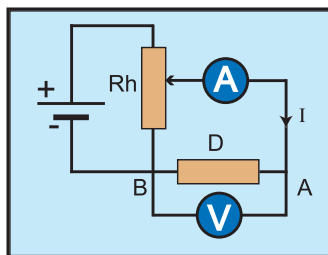


Fig. 6 b

Le rhéostat placé en parallèle sur le générateur permet de faire varier la tension U_{AB}

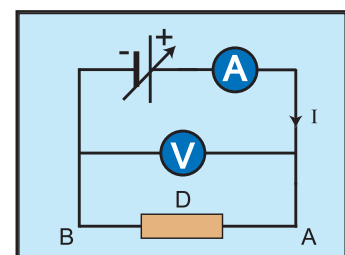


Fig. 6 c

Avec un générateur de tension stabilisée réglable, on choisit U et on mesure I ou l'inverse.

2.3. Point de fonctionnement d'un dipôle

Avec les montages précédents, pour le même dipôle (D) et un réglage donné du circuit extérieur, U et I sont bien déterminés et caractérisent son état de fonctionnement actuel. Le couple de valeurs (I, U) est appelé point de fonctionnement du dipôle (D).

Définition

On appelle point de fonctionnement d'un dipôle le couple de valeurs (I, U) de l'intensité du courant qui le traverse et de la tension mesurée entre ses bornes dans un état de fonctionnement donné.

2.4 Caractéristique d'un dipôle : la lampe à incandescence

Choisissons comme dipôle (D) une lampe à incandescence et faisons varier U (ou I) à ses bornes A et B.

On constate que I (ou U) varie également. On obtient les couples de valeurs (U_1, I_1) , (U_2, I_2) , (U_3, I_3) ,... On obtient ainsi un ensemble de points de fonctionnement du dipôle (D).

$I_{AB}(\text{mA})$	50	200	300	400	500
$U_{AB}(\text{V})$	0,25	1,65	3,11	5,00	7,31

Chaque fois que l'on reprend pour le même dipôle (D) les mesures dans les mêmes conditions, on retrouve invariablement les mêmes points de fonctionnement que l'on peut placer sur un graphe.

Pour un dipôle donné, il existe ainsi une relation entre la tension U entre ses bornes et l'intensité I qui le traverse ; cette relation s'écrit soit $U = f(I)$, soit $I = g(U)$.

Remarque

Pour chaque dipôle, le fabricant ou le constructeur définit un domaine d'utilisation en fournissant une valeur maximale admissible soit pour I , soit pour U , soit pour la puissance $\mathcal{P}$. Il s'agit de ne pas les dépasser en cours de manipulation.

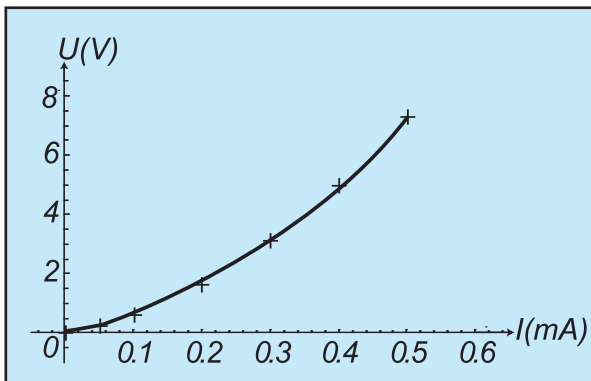


Fig. 7 a

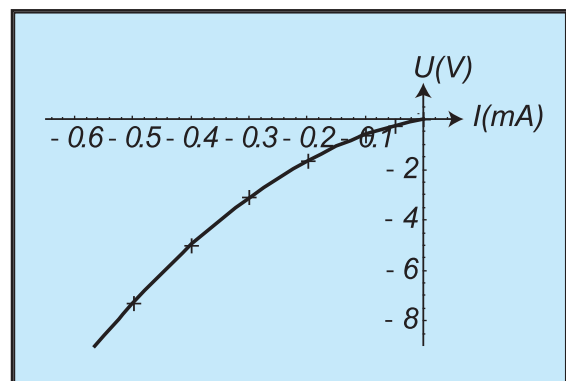


Fig. 7 b

L'ensemble des points de fonctionnement du dipôle (D) reportés dans un système d'axes avec des échelles adéquates a l'allure d'une courbe ; c'est la courbe représentative de la relation $U = f(I)$ ou $I = g(U)$ dans le domaine des mesures effectuées (Fig.7 a).

Remarque

Comme il n'est possible expérimentalement de déterminer qu'un nombre limité de points de fonctionnement du dipôle, l'ensemble de la courbe est ensuite reconstitué en joignant par une courbe les points expérimentaux.

Reprenons l'étude précédente, sans rien modifier au reste du circuit ; débranchons et rebranchons le dipôle lampe après l'avoir retourné ; le courant la traverse maintenant dans le sens (B,A) ; reprenons les mesures et le tracé de la courbe représentative de la relation $U = f(I)$ dans le nouveau domaine de mesures en adoptant les conventions suivantes :

- Quand le courant traverse le dipôle de A vers B, l'intensité I_{AB} est comptée (et mesurée) positivement. Il en est de même de U_{AB} .
- Quand le courant traverse le dipôle de B vers A, I_{BA} est comptée (et mesurée) positivement ainsi que U_{BA}

On peut regrouper sur le même système d'axes, les deux graphiques des figures (7 a) et (7 b)

On a $U_{BA} = - U_{AB} = U$ et on pose $I_{AB} = - I_{BA} = I$

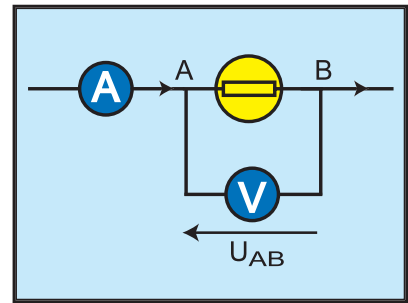


Fig. 8 a

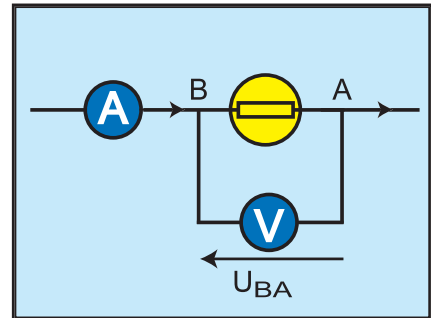


Fig. 8 b

On obtient ainsi la courbe de la figure 9 ; cette courbe est appelée la **caractéristique intensité-tension** du dipôle lampe à incandescence.

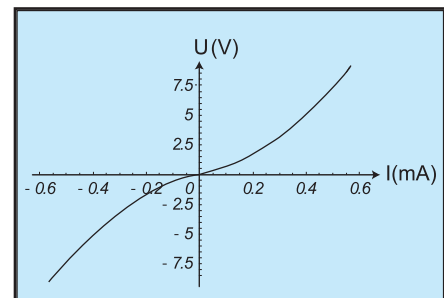


Fig. 9

Remarque

Si on porte la tension U en abscisses et l'intensité I en ordonnées, la courbe représentative $I = g(U)$ est appelée caractéristique tension-intensité (Fig. 10).

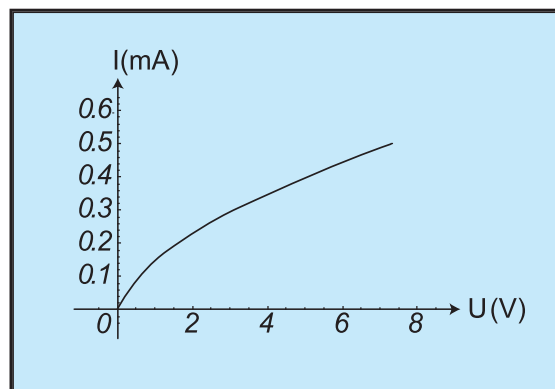


Fig. 10

3. Caractéristiques d'autres exemples de dipôles passifs

Faisons les mêmes expériences avec d'autres dipôles passifs : une autre lampe plus puissante, une diode, un morceau de fil résistant de résistance $R = 50\Omega$, des composants électroniques appelés «résistance», diode, varistance, thermistance.

On obtient des caractéristiques intensité-tension très variées (fig 11, 12, 13).

On voit tout de suite que les caractéristiques de la lampe, du fil résistant et de la varistance sont symétriques par rapport à l'origine.

On dit que la lampe, le fil résistant et la varistance sont des dipôles symétriques. Ces dipôles se comportent de la même façon que le courant les traverse dans un sens ou dans l'autre.

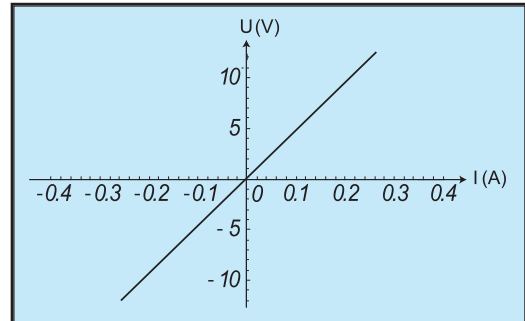


Fig. 11- Caractéristique d'un fil résistant

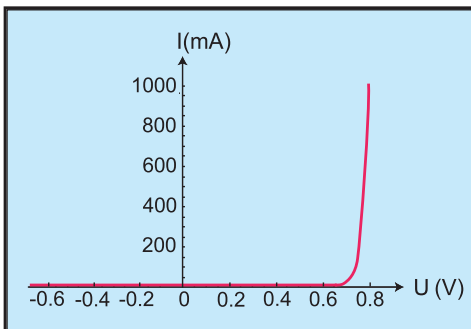


Fig. 12- Caractéristique d'une diode

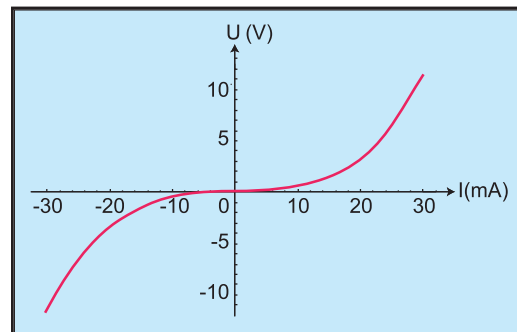


Fig. 13- Caractéristique d'une varistance

Le sens du courant qui traverse un dipôle symétrique n'a aucun effet sur son fonctionnement.

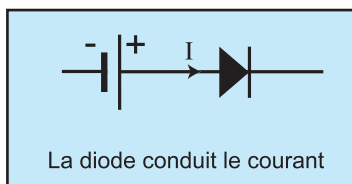


Fig. 14 a

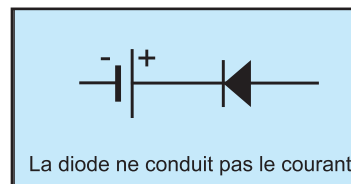


Fig. 14 b

La diode par contre a une caractéristique très dissymétrique. C'est un dipôle non symétrique ; en effet , la diode est une très bonne conductrice du courant électrique lorsque son anode est reliée du côté pôle (+) du générateur (Fig.14) ; on dit alors qu'elle est montée dans le sens direct ou passant. Montée dans l'autre sens , elle bloque pratiquement le passage du courant dans le circuit. On dit qu'elle est montée dans le sens inverse ou non passant.

Définition

La diode idéale est un dipôle dissymétrique équivalent à une résistance nulle dans le sens passant et à une résistance infinie dans le sens non passant.

Une diode idéale se comporte donc pratiquement comme un interrupteur fermé dans le sens passant et ouvert dans le sens non passant.

Remarque

En fait, dans les conditions d'expériences ordinaires, un courant très faible (quelques microampères) circule en sens inverse. Les conditions ordinaires d'expériences sont telles que l'on ne dépasse pas en **inverse** la tension maximale recommandée par le fabricant ; 400V est une valeur courante par exemple.

4. Les conducteurs ohmiques

Le dipôle fil résistant a une caractéristique intensité-tension remarquable : c'est un segment de droite centré sur l'origine des coordonnées (Fig. 15).

Définition

Un dipôle dont la caractéristique est un segment de droite passant par l'origine est appelé **conducteur ohmique** ou **résistor**.

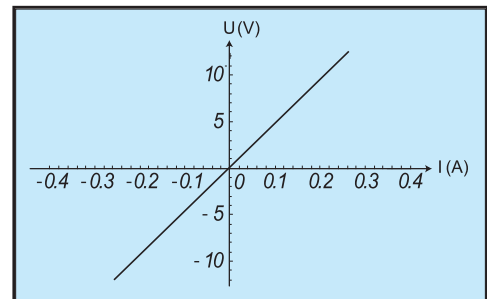


Fig. 15

Le symbole du résistor est donné par les figures 16 et 17.

La tension U_{AB} entre les bornes de ce dipôle et l'intensité I_{AB} qui le traverse (figure 18), sont proportionnelles et toujours de même signe.

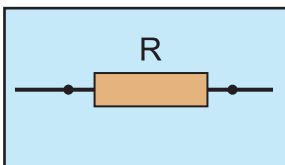


Fig. 16

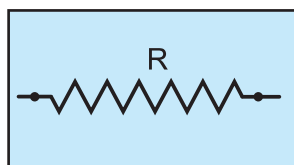


Fig. 17

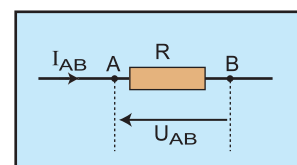


Fig. 18

$\frac{U_{AB}}{I_{AB}} = \text{constante}$; cette constante est donnée par le coefficient directeur de la droite linéaire représentative de la relation $U = f(I)$.

Mesurons la résistance R du dipôle fil résistant à l'aide d'un ohmmètre et comparons ; on trouve :

$$\frac{U_{AB}}{I_{AB}} = R$$

L'équation de la caractéristique d'un conducteur ohmique s'écrit donc :

$U_{AB} =$	$R \cdot$	I_{AB}
Volt	ohm	ampère
V	Ω	A

La relation précédente est l'expression de la **loi d'Ohm** relative à un conducteur ohmique écrite avec les unités légales.

Loi d'Ohm relative à un conducteur ohmique :

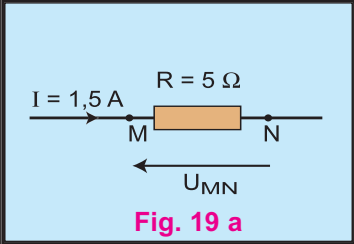
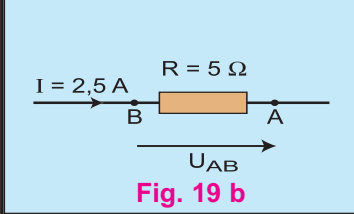
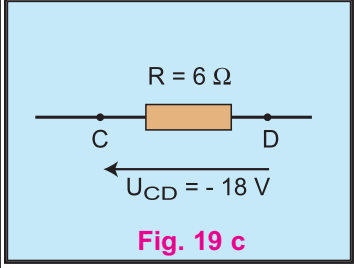
La tension U_{AB} aux bornes d'un conducteur ohmique ou résistor est égale au produit de sa résistance R par l'intensité I_{AB} qui le traverse de A vers B.

La loi d'Ohm permet de définir avec précision l'unité de résistance dans le Système International. On a en effet : $\frac{U_{AB}}{I_{AB}} = R$; quand la tension et l'intensité sont chacune égale à l'unité, la résistance du conducteur ohmique est égale à 1Ω .

Définition

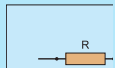
L'ohm (Ω) est la résistance d'un conducteur qui, soumis à une tension de 1V, est traversé par une intensité égale à 1A.

Exercice résolu

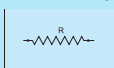
Enoncé		Solution
Soit les éléments de circuits suivants ; répondre aux questions posées pour chaque schéma.		
a- Quelle est la valeur de la tension U_{MN} ? (Fig.19 a)	 Fig. 19 a	a- Le courant circule de M vers N; on peut écrire la loi d'Ohm $U_{MN} = R \cdot I_{MN}$; soit $U_{MN} = 5 \times 1,5 = 7,5 \text{ V}$
b- Quelle est la valeur de la tension U_{AB} ? (Fig.19 b)	 Fig. 19 b	b- Le courant circule de B vers A; on peut appliquer la loi d'Ohm ; $U_{BA} = R \cdot I_{BA}$; soit $U_{BA} = 5 \times 2,5 = 12,5 \text{ V}$ d'où $U_{AB} = - U_{BA} = -12,5 \text{ V}$
c- Quel est le sens du courant I dans la branche CD et son intensité ? (Fig.19 c)	 Fig. 19 c	c- La tension U_{CD} est négative ; le courant circule donc de D vers C et la loi d'Ohm donne : $U_{DC} = R \cdot I_{DC}$ d'où $I_{DC} = \frac{U_{DC}}{R} = \frac{-U_{CD}}{R} = \frac{18}{6} = 3 \text{ A}$

Autre définition

On appelle conducteur ohmique , un dipôle qui vérifie la loi d'Ohm , $U = R I$; son symbole dans un circuit est :



ou



.

Les conducteurs ohmiques de faible puissance utilisés en Electronique sont aussi appelés **résistors**.

Remarque

Dans le langage courant, on désigne, fréquemment et abusivement, par «résistance» à la fois le composant (résistor) lui-même et la valeur de sa résistance électrique R .

5. Résistance d'un conducteur ohmique

5.1. Mesure directe à l'ohmmètre

On a déjà vu qu'un multimètre, utilisé en ohmmètre permet de connaître directement, la valeur de la résistance d'un corps conducteur en général, et d'un conducteur ohmique en particulier (Fig. 20).

Attention

Il faut s'assurer avant toute mesure à l'ohmmètre que le conducteur ohmique n'est ni sous tension (parcouru par un courant) ni en dérivation sur d'autres circuits.

5.2. Mesure indirecte

La caractéristique étant une droite linéaire, la mesure d'un couple de valeurs (U,I) suffit pour déterminer la résistance R du conducteur ohmique en appliquant la loi d'Ohm.

Exemple : (12V, 150mA) $\longrightarrow R = U / I = 80 \Omega$
 (15V, 185mA) $\longrightarrow R' = \ll \ll = 81,1\Omega$

On obtient une valeur très voisine de la première ; la différence est due à l'imprécision des mesures de I et U ; c'est pour cela qu'il ne faut pas se contenter d'une seule mesure si on veut une détermination précise de R ; il est toujours recommandé de prendre plusieurs couples de valeurs et de faire la moyenne des résultats trouvés.

5.3. Lecture directe

En Electronique, les résistors sont d'un usage très courant dans les circuits ; la valeur de leur résistance est parfois inscrite en langage clair directement sur le corps du composant lui-même lorsque ses dimensions le permettent ; le plus souvent, les résistors utilisés sont trop petits et toute inscription serait illisible ; c'est pour cela que l'on préfère inscrire la valeur de la résistance en utilisant un code normalisé et universel: le code des couleurs (Fig.21).

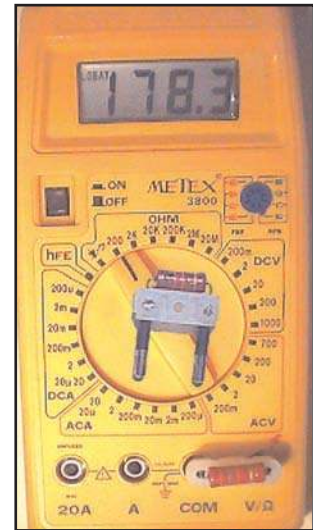


Fig. 20



Fig. 21

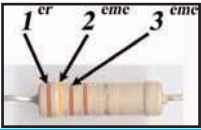
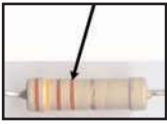
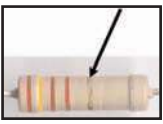
Code de couleurs des résistances			
Lecture	Chiffres significatifs	Multiplicateur	Tolérance
			
Couleur			
Noir	0	10^0 ou 1	0,5 %
Marron	1	10^1	1 %
Rouge	2	10^2	2 %
Orangé	3	10^3	L'absence de l'anneau de tolérance signifie une tolérance de 20 %
Jaune	4	10^4	
Vert	5	10^5	
Bleu	6	10^6	
Violet	7		
Gris	8		
Blanc	9		
Argenté		10^{-2}	10 %
Doré		10^{-1}	5 %

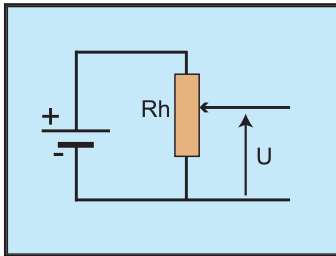
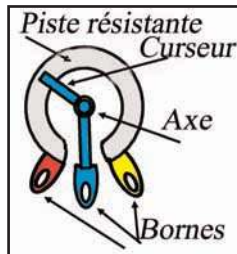
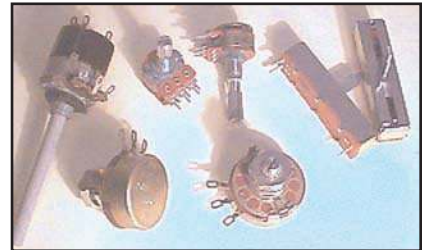
Fig. 22

Exemple :

1er anneau de couleur : Rouge 1er chiffre : 2
 2ème = = = = : Jaune 2ème chiffre : 4
 3ème = = = = : Rouge 3ème chiffre : 2
 4ème = = = = : Marron Multiplicateur : 10
 5ème = = = = : Marron Tolérance : 1%

La résistance est **$R = 2420 \, \Omega$ à 1% près ou $R = (2420 \pm 24) \, \Omega$**

Les résistors les plus courants ne comportent que 4 anneaux de couleur : il n'y a pas de 3ème chiffre significatif et la tolérance ne descend pas au-dessous de 5% (anneau doré).

Activité**Fig. 23 a****Fig. 23 b****Fig. 23 c**

Les petits rhéostats utilisés en Electronique (Fig.23) sont également des conducteurs ohmiques ; ils sont souvent appelés potentiomètres. Expliquer pourquoi en se faisant aider du schéma de montage de la figure (23 a).

6. Puissance dissipée par effet Joule

En courant continu, on a vu que la puissance électrique reçue par un dipôle récepteur est de la forme : $\mathcal{P} = U.I$

Dans un conducteur ohmique de résistance R, cette puissance est intégralement dissipée dans l'air par effet Joule.

Remarque

En Electronique, cependant, les résistors ne sont pas utilisés en tant qu'éléments chauffants mais pour obtenir les valeurs convenables des intensités et des tensions dans les différentes branches d'un circuit. L'effet Joule est ici un effet secondaire nuisible qui oblige parfois à refroidir les cartes électroniques par des ventilateurs puissants.

On peut écrire la puissance dissipée en utilisant la loi d'Ohm ainsi :

$$U = R.I \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mathcal{P} = R.I^2}$$

$$I = \frac{U}{R} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mathcal{P} = \frac{U^2}{R}} \quad \mathcal{P} \text{ en watt quand } U \text{ est en volt, } I \text{ en ampère et } R \text{ en ohm.}$$

Cette puissance doit rester inférieure à la puissance maximale admissible donnée par le constructeur.

Activité expérimentale

Objectifs

- Tracer la caractéristique intensité-tension d'un dipôle
- Identifier par l'aspect de sa caractéristique un dipôle symétrique
- Identifier par l'aspect de sa caractéristique un conducteur ohmique
- Déterminer graphiquement à partir de sa caractéristique la résistance d'un conducteur ohmique
- Utiliser le code des couleurs et l'ohmmètre pour déterminer la résistance d'un conducteur ohmique.

Matériel

- Alimentation stabilisée
- 1 lampe à incandescence (12V,5W), des résistors codés en couleurs de différentes puissances, une diode
- Un voltmètre, un ampèremètre ; un des deux doit être un multimètre utilisable en ohmmètre
- Un interrupteur (à ne pas remplacer par celui de l'alimentation stabilisée), des fils de connexion

Manipulation

Règle de sécurité : Faire valider schéma et montage par le professeur avant toute mise sous tension

1. Schématiser et réaliser le montage d'étude pour chaque dipôle et relever au moins six points de mesures pour chaque sens du courant ; identifier les dipôles symétriques.
2. Remplir un tableau de mesures en précisant les unités et calculer les quotients U/I en chaque point ; est-il possible ainsi d'identifier le conducteur ohmique ? Qu'est-ce qui fait que pour le ou les autres dipôles le quotient U/I soit différent ?
3. Tracer les caractéristiques intensité-tension des dipôles distribués sur papier millimétré avec les échelles adéquates pour chacune.
 - 3.1. Identifier les dipôles symétriques et les conducteurs ohmiques à partir de leur caractéristique.
 - 3.2. Déterminer graphiquement la résistance du ou des conducteurs ohmiques utilisés ; comparer avec les résultats précédents et conclure.
4. Mesurer à l'ohmmètre les résistances des dipôles et comparer avec les résultats précédents.
5. Lire la valeur de la résistance du (ou des) résistor (s) en utilisant le code des couleurs.
6. Discuter de la précision des résultats et commenter la valeur indiquée par le dernier anneau de couleur dit «anneau de tolérance».
7. Ecrire avec les chiffres significatifs adéquats la valeur probable de la résistance R du conducteur ohmique sous la forme $R = (\dots\dots\pm\dots\dots)\Omega$.

Voltmètre, ampèremètre, ohmmètre, quelle différence ?

Un voltmètre, un ampèremètre, un ohmmètre sont des appareils de mesure électriques dont le principe de fonctionnement repose essentiellement sur la loi d'Ohm.

Insérés dans un circuit, le voltmètre ou l'ampèremètre doivent perturber le moins possible les grandeurs à mesurer dans le circuit étudié.

Le voltmètre

Numérique ou analogique, il se branche en parallèle sur le dipôle R parcouru par l'intensité I ; une faible partie i du courant qui circule dans le dipôle est dérivée vers le voltmètre ; dans le voltmètre une résistance r est parcourue par ce courant ; entre ses bornes apparaît une tension $u = r \cdot i$. c'est cette tension qui est mesurée par l'appareil ; on voit bien que $U = R(I-i) = r i$; on en déduit $i = R/(r+R) I$; la perturbation introduite par le voltmètre est d'autant plus petite que r est élevé. Plus r est élevée plus i est petit ; l'appareil doit donc être sensible aux très faibles intensités.

Les voltmètres analogiques les plus sensibles ont une résistance interne r de l'ordre de quelques dizaines de kiloohms et la perturbation introduite sur l'intensité est inférieure au milliampère ; les voltmètres numériques actuels ont une résistance interne de l'ordre de 10 à 15 M Ω et la perturbation introduite est inférieure au microampère.



Fig. 24 - Le galvanomètre d'un appareil de mesures

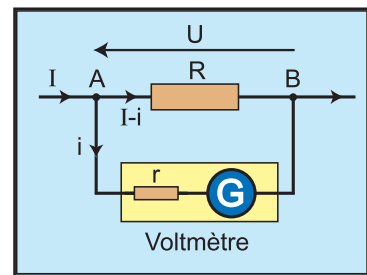


Fig. 25

L'ampèremètre

Numérique ou analogique, il se branche en série avec le dipôle R ; il est parcouru par la même intensité I qui traverse le dipôle ; si r est la résistance interne de l'ampèremètre, il apparaît entre ses bornes une tension $u = r \cdot I$; c'est donc la tension aux bornes du dipôle qui est perturbée ; $U = U' + u$ et $U' = U - r \cdot I$; la tension appliquée à l'ensemble n'est plus égale à celle appliquée aux bornes du dipôle. Cette perturbation est d'autant plus négligeable que la résistance r est faible pour un I donné. Mais le cœur de l'ampèremètre est toujours un voltmètre très sensible qui mesure en fait la tension $u = r \cdot I$ qui est proportionnelle à I ; son cadran est gradué en ampère.



Fig. 26

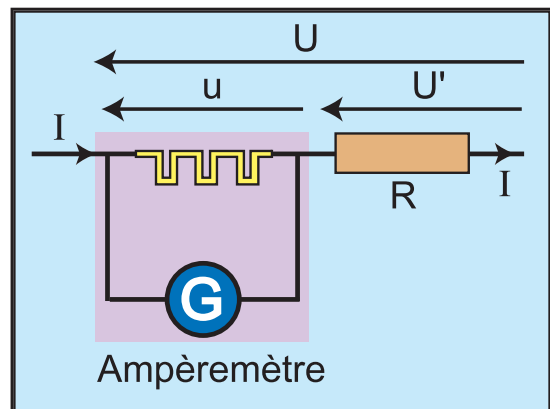


Fig. 27

Finalement dans un multimètre, quand on passe d'une fonction à l'autre on utilise toujours le même appareil de mesure très sensible :

- en mettant en série avec lui une forte résistance , on obtient un voltmètre ;
- en mettant en parallèle une très faible résistance , on obtient un ampèremètre.

L'ohmmètre

L'ohmmètre contient une pile délivrant une tension U constante reliée à une des bornes de l'appareil ; le circuit est ensuite refermé à travers la résistance à mesurer et l'appareil mesure alors l'intensité I qui circule dans le circuit.

On a $U = R.I$, R étant la résistance inconnue à mesurer; Le cadran indique $I = U/R$; comme U est constante (1,5V généralement), I ne dépend que de R ; Le cadran est directement gradué en ohm (pour les appareils analogiques).

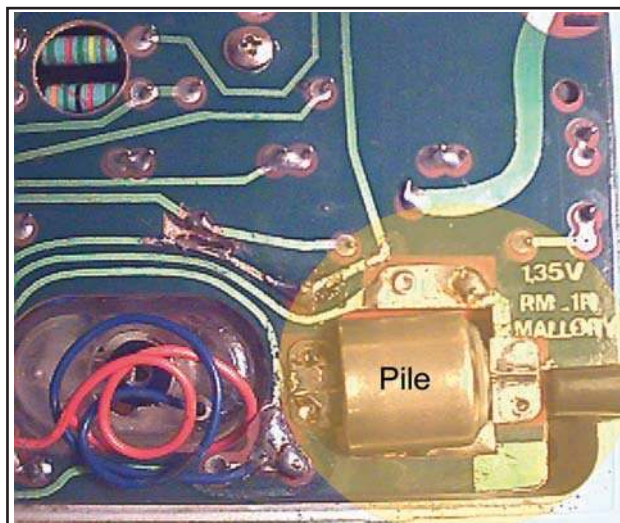


Fig. 28 - a

Vue intérieure d'un ohmmètre montrant la pile de 1,35V.

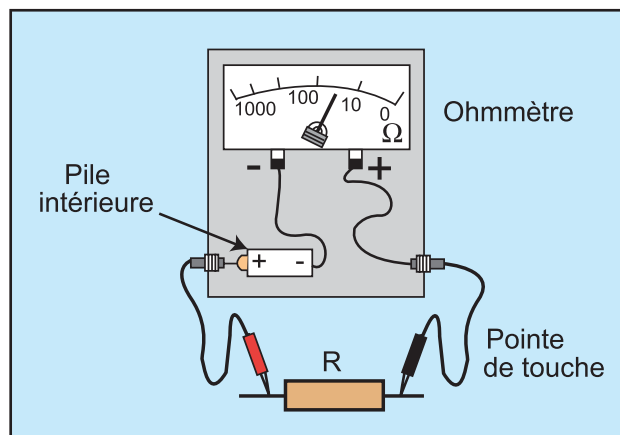


Fig. 28 - b

Schéma de fonctionnement de l'ohmmètre

L'essentiel du cours

Le point de fonctionnement d'un dipôle est le couple de valeurs (I, U) de l'intensité du courant qui le traverse et de la tension entre ses bornes dans un état de fonctionnement donné.

La caractéristique intensité-tension d'un dipôle est le graphe de l'ensemble des points de fonctionnement (I, U) de ce dipôle.

Un conducteur ohmique ou résistor est un dipôle dont la caractéristique intensité-tension est une droite passant par l'origine.

Enoncé de la loi d'Ohm : La tension U_{AB} aux bornes d'un conducteur ohmique ou résistor est égale au produit de sa résistance R par l'intensité I_{AB} qui le traverse de A vers B.

$$U_{AB} = R \cdot I_{AB}$$

Un résistance peut être déterminée directement par lecture du code des couleurs, mesurée directement par un ohmmètre ou calculée à partir de la mesure d'un couple (I, U) en appliquant la loi d'Ohm.

La puissance électrique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique ou résistor est :

$$P = U_{AB} \cdot I_{AB} = R \cdot I_{AB}^2$$

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter par le terme adéquat ou en rédigeant une réponse :

a- Entre les bornes d'un dipôle, on mesure avec un voltmètre une non nulle.

b- Une lampe à incandescence est un dipôle.....dont la caractéristique est une passant par l'origine.

c- Un dipôle symétrique est un dipôle dont la caractéristique est..... ; exemple :(diode, résistor, lampe à filament)

d- La caractéristique d'un conducteur ohmique est une.....passant par.....et son symbole est

e- La constante de proportionnalité entre U et I pour un conducteur ohmique est appelée.....

f- La relation entre U et I pour un conducteur ohmique est.....

g- La loi d'Ohm s'écrit pour le résistor R de la figure 29.
 $U_{AB} = \dots\dots\dots$

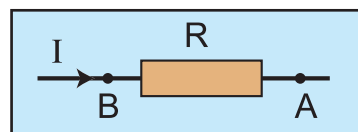


Fig. 29

2- La loi d'Ohm pour le conducteur ohmique s'écrit :

$$R = \frac{U}{I} ; \quad I = R \times U \quad U = \frac{R}{I} ; \quad I = \frac{R}{U} ; \quad R = I \times U ; \quad U = R \times I$$

Préciser l'expression de la loi ainsi que celles qui en découlent ; quelle est la signification de chaque lettre ? Quelles sont les unités correspondantes ?

3- L'expression de la puissance $\mathcal{P}$ dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique de résistance R , soumis à une tension U entre ses bornes et traversé par une intensité I s'écrit

- a-** en utilisant $(\mathcal{P}, U, I)$ ainsi ;
- b-** en utilisant $(\mathcal{P}, U, R)$ ainsi ;
- c-** en utilisant $(\mathcal{P}, R, I)$ ainsi

Je sais appliquer le cours

4- Un conducteur ohmique de résistance $R = 2,2\text{k}\Omega$ est parcouru par un courant d'intensité 30mA . Calculer la tension à laquelle il est soumis.

5- Observer le montage de la figure 30. Calculer la résistance du conducteur ohmique AB .

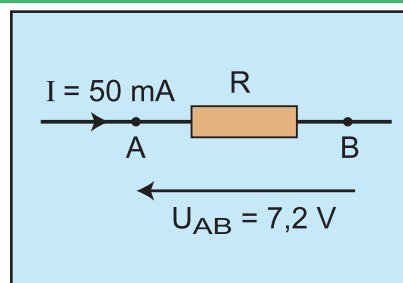


Fig. 30

6- On donne la caractéristique $U = f(I)$ d'un conducteur ohmique sur la figure 31. Déterminer sa résistance. Calculer la puissance dissipée par effet Joule dans ce conducteur au point de fonctionnement indiqué.

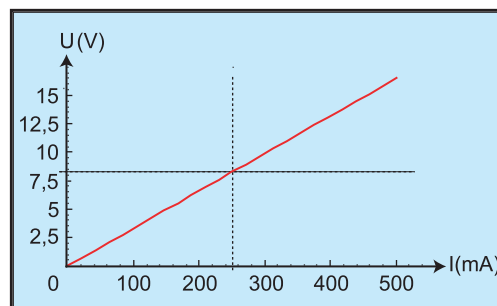


Fig. 31

7- Tracer les caractéristiques intensité-tension de deux conducteurs ohmiques dont les résistances respectives sont 150Ω et 220Ω . Hachurer sur le graphe la zone de fonctionnement normale de ces dipôles sachant que le premier peut dissiper par effet Joule 2W de puissance et le deuxième 1W seulement.

8- On a représenté ci-dessous les caractéristiques de trois dipôles. Lequel (lesquels) est (sont) un (des) conducteur (s) ohmique (s) ?

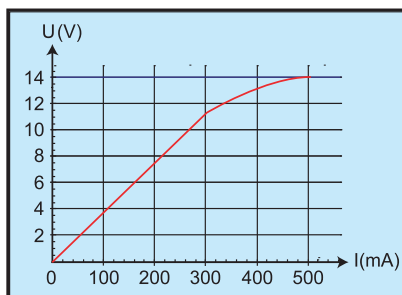


Fig. 32 a

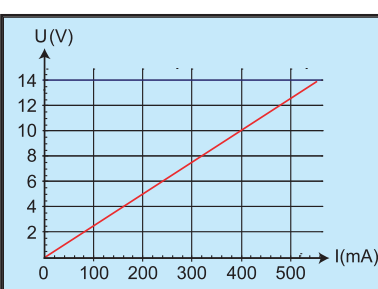


Fig. 32 b

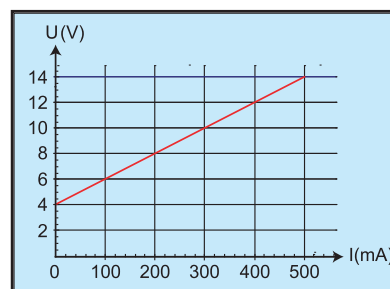


Fig. 32 c

9. Les deux premiers anneaux de couleur d'un résistor monté dans une carte électronique sont dans l'ordre «rouge» et «violet» ; le troisième anneau a été effacé suite à un échauffement accidentel et le dernier est doré. La valeur de sa résistance mesurée à l'ohmmètre est 2650Ω . On est certain que cette valeur doit être comprise entre $2\text{ k}\Omega$ et $4\text{ k}\Omega$.

a- Quelle était la couleur du 3^{ème} anneau ?

- b-** Doit-on remplacer ce résistor suite à cet échauffement ? Justifier.
- 10.** On veut brancher une diode LED rouge sur un générateur comme témoin de fonctionnement ; sa tension et son intensité nominales de fonctionnement sont (1,8 V ; 20 mA). La tension aux bornes du générateur étant $U = 6\text{ V}$, il faut protéger la diode par un résistor R placé en série.
- a-** Faire un schéma du montage et déterminer la tension aux bornes du résistor lorsque la LED fonctionne.
- b-** On dispose d'un lot de résistors dont les résistances sont : $180\ \Omega$, $220\ \Omega$, $330\ \Omega$, $390\ \Omega$. Choisir le résistor qui convient et préciser son code des couleurs.
- 11.** Les trois résistors représentés ci-dessous avec les codes de couleurs ont des puissances maximales admissibles respectivement égales à $1/4\text{W}$, $1/2\text{W}$ et 2W . Indiquer pour chacun les valeurs limites de tension et d'intensité à ne pas dépasser.



Fig. 33

Sachons mesurer

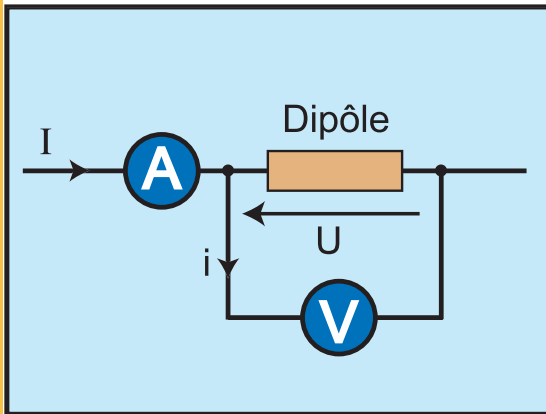


Fig. 34

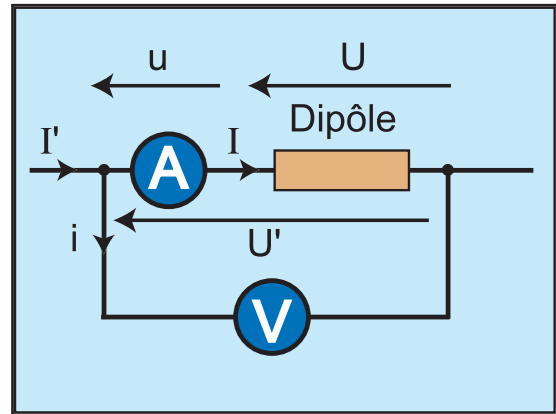


Fig. 35

On sait qu'un ampèremètre se branche en série dans un circuit et qu'un voltmètre se branche en parallèle ou dérivation par rapport au dipôle. Mais comment les placer tous les deux l'un par rapport à l'autre dans le circuit ?

Les schémas ci-dessus montrent deux possibilités de placer la dérivation du voltmètre :

- La courte dérivation, anciennement appelée « en aval », laisse l'ampèremètre avant le noeud
- La longue dérivation, anciennement appelée « en amont », inclut l'ampèremètre dans la portion de circuit entre les noeuds de dérivation.

En courte dérivation, le voltmètre mesure effectivement la tension U aux bornes du dipôle ; la lecture de U est donc correcte. Par contre l'ampèremètre mesure la somme I des intensités qui circulent dans le dipôle ($I-i$) et dans le voltmètre (i). L'intensité qui traverse le dipôle est perturbée par la mesure. La vérification de la loi d'Ohm n'est donc qu'approximative avec ce montage.

En longue dérivation, l'ampèremètre mesure effectivement l'intensité qui traverse le dipôle ; le voltmètre par contre mesure une tension totale U' somme de la tension U aux bornes du dipôle et u aux bornes de l'ampèremètre. C'est la tension aux bornes du dipôle qui est perturbée par la mesure. Là encore la vérification de la loi d'Ohm n'est qu'approximative.

Avec les appareils digitaux ou numériques actuels, ces perturbations des grandeurs électriques à mesurer existent toujours mais sont devenues très faibles. Les erreurs introduites par les appareils sur I ou U sont devenues négligeables par rapport à celles de lecture.

Testeur de piles

Principe de fonctionnement et utilisation :

Les piles de certaines marques sont vendues accompagnées d'un testeur de piles, très simple d'emploi, qui permet de vérifier l'état d'une pile cylindrique de petit modèle.

Les deux photos recto et verso montrent un triangle recouvert d'une encre de couleur sombre avec un «+» du côté du sommet et un «-» du côté de la base.

Soufflons de l'air chaud sur le testeur à l'aide d'un sèche-cheveux : l'encre devient jaune à la pointe du triangle et le jaune remonte vers la base à mesure que le chauffage se prolonge ou que l'on approche le sèche-cheveux, jusqu'à atteindre l'autre extrémité.

Un thermomètre mis entre le testeur et le sèche-cheveux indique une température de l'ordre de 80°C. Si on laisse le testeur se refroidir la barre jaune reprend sa couleur sombre initiale. L'encre utilisée est donc sensible aux variations de température.

Si on place une pile entre les bornes du testeur, la barre jaune réapparaît à la base (côté «replace») et remonte lentement vers la zone marquée «good».



Fig. 36

Utilisation du testeur de piles ; on voit la bande jaune remonter vers «good»



Fig. 37

Photos des deux faces du testeur ; en haut on voit le triangle résistant.

Interprétons :

Le courant qui circule dans le testeur est le même partout (Fig. 38) ; mais dans le triangle conducteur la résistance n'est pas la même partout : elle est plus élevée du côté de la pointe que du côté de la base. L'effet Joule est plus important du côté de la résistance la plus grande c'est-à-dire côté pointe où la couleur jaune apparaît en premier.

➤ Si la pile est bonne («good») , elle délivre une intensité suffisante pour chauffer les parties les plus larges du triangle ; la barre jaune remonte du côté «good»(bon en anglais).

➤ Si la pile est faible, l'intensité délivrée ne permet de chauffer que les parties fines de la pointe du côté «replace» (remplacer en anglais) .

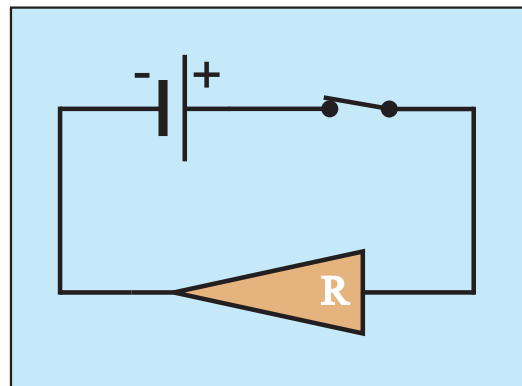


Fig. 38

RECEPTEURS PASSIFS (2)

CHAPITRE

4



Guirlande et lustre pour décoration lumineuse.
Que se passerait-il si une lampe est grillée dans le 1^{er} ou le 2^{ème} cas ?

OBJECTIFS

- Reconnaître et nommer un type d'association de résistors ou conducteurs ohmiques dans un schéma électrique ou dans un montage.
- Appliquer les lois d'association des conducteurs ohmiques.
- Appliquer la loi de Joule.

1. Les dipôles équivalents

Soient deux dipôles D_1 et D_2 branchés comme sur la figure 1. Sur chaque montage, on relève (I, U) pour plusieurs points de fonctionnement. On trace les caractéristiques intensité-tension de D_1 et D_2 dans le même repère de coordonnées.

Si on constate qu'il y a une superposition totale (Fig.2) des deux caractéristiques résultant de la coïncidence entre les points de fonctionnement, on dit alors que D_1 et D_2 sont deux dipôles équivalents ou interchangeables.

⇒ Deux dipôles sont dits équivalents lorsque, quelle que soit la tension U à laquelle ils sont soumis, ils sont traversés chacun par la même intensité I .

⇒ Les caractéristiques intensité-tension de deux dipôles équivalents sont identiques

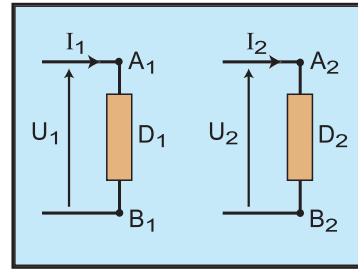


Fig. 1

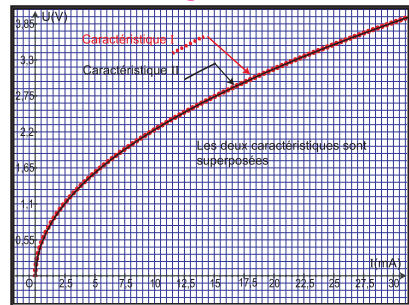


Fig.2

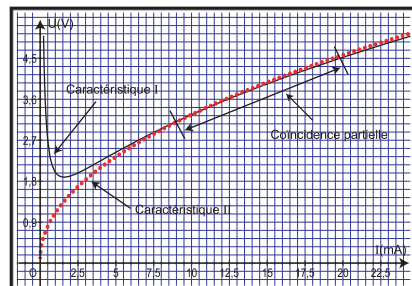


Fig. 3

Remarque

Un seul point de mesure ne permet pas d'affirmer de manière sûre l'équivalence de deux dipôles. Cette dernière peut être approximative dans un petit intervalle de I ou U , là où il y a quasi superposition de caractéristiques (Fig.3).

2. Association de résistors en série

Montons deux résistors R_1 et R_2 (47Ω et 33Ω) comme sur la figure 4 et traçons la caractéristique du dipôle composé obtenu en relevant le couple de valeur (I_{AB}, U_{AB}) .

La caractéristique intensité –tension est un segment de droite linéaire (Fig.5), c'est-à-dire celle d'un conducteur ohmique de résistance R telle que $U_{AB} = R \cdot I_{AB}$.

⇒ Deux **conducteurs** ohmiques en série sont équivalents à un conducteur ohmique.

Déterminons, graphiquement, la pente R de la caractéristique. On trouve approximativement $R = 80 \Omega$, c'est-à-dire $R = R_1 + R_2$.

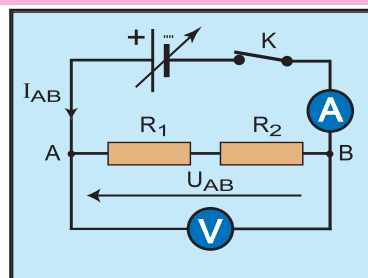


Fig. 4

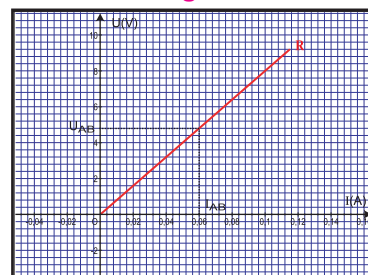


Fig. 5

Activité

Traçons sur le même graphique avec des couleurs différentes les droites linéaires d'équation :

$$U_{AB} = R_1 \cdot I_{AB} \text{ et } U_{AB} = R_2 \cdot I_{AB}. \text{ (Fig.6)}$$

On constate que pour une intensité I_1 quelconque, les points de fonctionnement correspondants sur les trois caractéristiques sont tels que $U = U_1 + U_2$.

Interprétation de ce résultat : le dipôle (AB) est constitué du dipôle (AC) et (CB) en série. Ils sont traversés par une même intensité I_1 . On pose :

$$U_1 = U_{AC}, U_2 = U_{CB} \text{ et } U = U_{AB}.$$

L'additivité des tensions nous permet d'écrire (Fig.7) :

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} \Rightarrow U = U_1 + U_2.$$

La loi d'Ohm nous permet d'écrire :

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 \text{ et } U_2 = R_2 \cdot I_1 \Rightarrow U = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_1$$

$$U = (R_1 + R_2) \cdot I_1 ; \text{ comme } I_1 \text{ est quelconque ,}$$

$$U_{AB} = (R_1 + R_2) \cdot I_{AB}$$

$$\text{En posant } R = R_1 + R_2 \Rightarrow U_{AB} = R \cdot I_{AB}$$

Le dipôle (AB) vérifie la loi d'Ohm ; il est donc bien équivalent à un conducteur ohmique de résistance $R = R_1 + R_2$.

$\Rightarrow$ Deux résistors R_1 et R_2 , placés en série, sont équivalents à un résistor de résistance $R = R_1 + R_2$.

On convient de noter $R_{(R_1, R_2)} = R_1 + R_2$.

La résistance équivalente R est toujours supérieure à la plus grande des résistances mises en série. Une vérification à l'ohmmètre est visible sur la figure 8

Dans notre exemple $R_1 > R_2$ et $R > R_1$

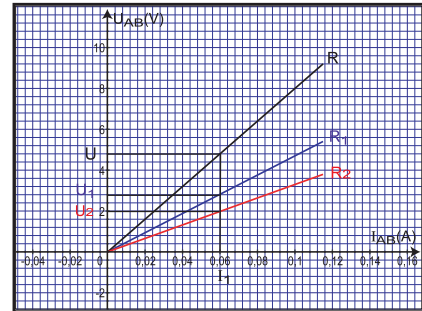


Fig. 6

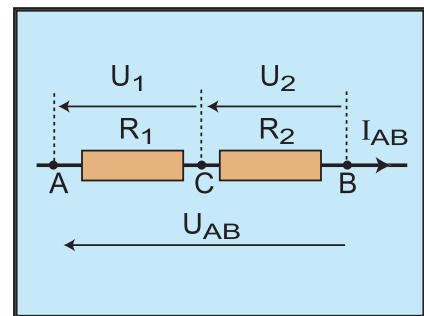


Fig. 7



Fig. 8 a



Fig. 8 b



Fig. 8 c

Intérêt : Les résistors sont fabriqués par série de valeurs normalisées (voir document en fin de chapitre) ; quand on a besoin d'une valeur particulière non disponible, on recourt à l'association.

Exemple : On ne trouve pas dans le commerce un résistor de résistance $350\ \Omega$; le chiffre 35 ne figure dans aucune série. On peut approcher cette valeur par la mise en série de la valeur la plus proche disponible $330\ \Omega$ soit avec $18\ \Omega$ soit avec $22\ \Omega$.

Application

Rhéostat : les spires du conducteur sont autant de résistors identiques mis en série en plus ou moins grand nombre selon la position du curseur.

Pour les essais des circuits et les expériences d'électricité, on a souvent besoin de faire varier la résistance d'une branche de circuit; on utilise pour cela des résistances réglables, soit de manière continue, soit par valeurs discrètes connues échelonnées de 1 en $1\ \Omega$ entre 0 et $10\ \text{k}\Omega$ par exemple; c'est le cas de la «boite de résistances» de la figure 9-a, b

⚠ Attention

L'intensité maximale supportée par les résistors d'une «boîte de résistances» est généralement indiquée sur la face avant. Il est impératif de ne pas la dépasser.

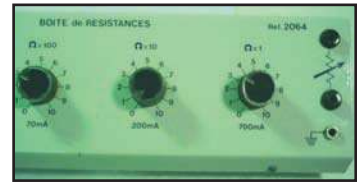


Fig.9 a

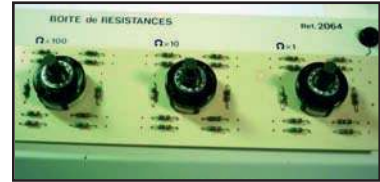


Fig.9 b

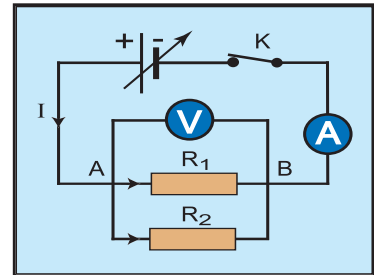


Fig. 10

3. Association de résistors en parallèle

Réalisons le montage de la figure 10. Les résistors R_1 et R_2 sont montés en parallèle. On prendra : $R_1 = 33\ \Omega$ et $R_2 = 67\ \Omega$.

Traçons la caractéristique du dipôle composé entre A et B.

On constate que le dipôle (A, B) a une caractéristique linéaire dont l'équation s'écrit (Fig.11) :

$$U_{AB} = \text{Constante} \cdot I_{AB}.$$

⇒ Deux résistors montés en parallèle sont équivalents à un conducteur ohmique de résistance R tel que $U_{AB} = R \cdot I_{AB}$.

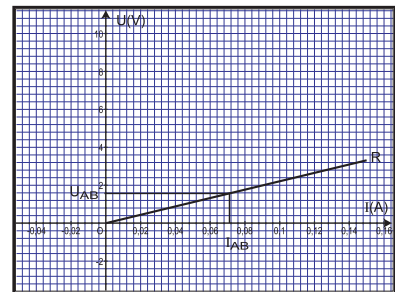


Fig. 11

Activité

Déterminons graphiquement la pente de cette droite.

On trouve une valeur très proche de $R \approx 22\ \Omega$. C'est une valeur inférieure à R_1 et à R_2 . Dans notre exemple on a :

$$R_1 < R_2 \text{ et } R < R_1.$$

R est toujours inférieure à la plus petite des deux résistances mises en parallèle.

Traçons, sur le même graphique, les droites d'équations $U_{AB} = R_1 \cdot I_1$ et $U_{AB} = R_2 \cdot I_2$.

On peut vérifier graphiquement que, quelque soit U, on a : $I_1 + I_2$. (Fig.12)

Interprétons :

La loi des nœuds en A ou en B permet d'écrire : $I = I_1 + I_2$

La loi d'Ohm permet d'écrire :

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 = R I = U.$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ et } I_2 = \frac{U}{R_2} \text{ et } I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot U$$

$$I = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \cdot U ; \text{ soit } U = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \text{ On pose : } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow U = R \cdot I$$

le dipôle (AB) vérifie également la loi d'Ohm ; il est bien équivalent à un résistor de résistance R telle que :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$\Rightarrow$ Deux résistors, de résistances R_1 et R_2 , montés en parallèle, sont équivalents à un résistor de résistance R, telle que : $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

On convient de noter la résistance du dipôle équivalent ainsi $R_{(R1//R2)}$.

$$R_{(R1//R2)} = R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Une vérification à l'ohmmètre est visible sur la figure 13 :



Fig. 13 a



Fig. 13 b



Fig. 13 c

Intérêt : Obtenir une résistance équivalente plus petite entre deux points d'un circuit ;

Exemple : résistance équivalente de l'ampèremètre shunté (Fig.14).

4. Généralisation

Les relations précédentes obtenues dans le cas de deux résistors montés en série ou en parallèle peuvent être étendues aux cas de n résistors en séries ou en parallèle en se ramenant toujours aux cas étudiés précédemment.

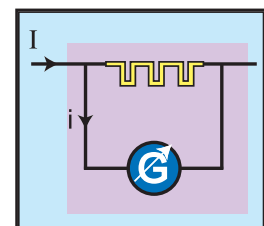


Fig. 14

On obtient ainsi, en raisonnant de proche en proche :

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad \text{pour } n \text{ résistors en série}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad \text{pour } n \text{ résistors en parallèle}$$

5. Association mixte de résistors

Le dipôle (AB) ci-contre (Fig.15) est composé uniquement de conducteurs ohmiques. Sur certaines branches, les résistors sont associés en série. Ces branches sont elles-mêmes en série ou en parallèles avec des résistors. Une telle association est appelée association mixte.

⇒ le dipôle équivalent à une association mixte de résistors est un conducteur ohmique dont la résistance R peut être déterminée de proche en proche en appliquant les deux lois d'association.

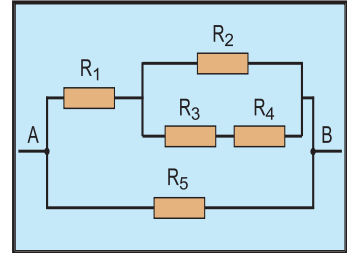


Fig.15

Remarque

L'application des lois d'association précédentes n'est pas toujours aussi simple ni évidente (Voir figure 16). On admet cependant que quel que soit le réseau de résistors branché entre les points A et B, le dipôle équivalent est toujours un conducteur ohmique de résistance R calculable en appliquant les lois des nœuds, des mailles et d'Ohm.

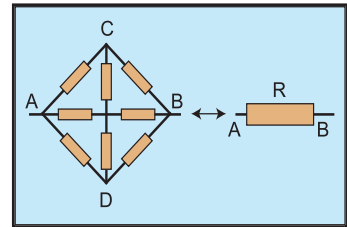


Fig. 16

6. Puissance dissipée par le résistor équivalent

Association série : (Fig.17)

La puissance dissipée par effet Joule dans le dipôle (AB) est égale à la somme des puissances dissipées dans chaque conducteur ohmique :

$$\mathcal{P}_1 = U_1 \cdot I \text{ et } \mathcal{P}_2 = U_2 \cdot I ; \mathcal{P} = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 \Rightarrow \mathcal{P} = (U_1 + U_2) \cdot I$$

$$\Rightarrow \mathcal{P} = UI$$

$$\text{Or } U = (R_1 + R_2) \cdot I \Rightarrow \mathcal{P} = (R_1 + R_2) \cdot I^2 \Rightarrow \mathcal{P} = R \cdot I^2.$$

On peut généraliser ce résultat à n résistors en série.

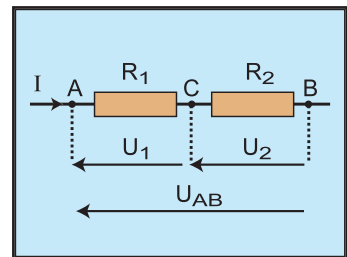


Fig.17

La puissance électrique dissipée par effet Joule entre les bornes d'un ensemble de n résistors en série est égale à la puissance électrique consommée par le résistor équivalent.

Association en parallèle : (Fig.18)

De la même façon, on peut écrire $\mathcal{P}_1 = UI_1$ et $\mathcal{P}_2 = UI_2$.

$$\text{D'après la loi d'Ohm : } \mathcal{P}_1 = \frac{U^2}{R_1} \text{ et } \mathcal{P}_2 = \frac{U^2}{R_2}$$

$$\text{La puissance totale sera : } \mathcal{P} = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot U^2 = \frac{U^2}{R}$$

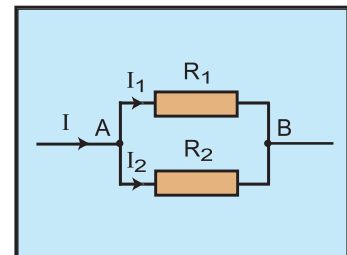


Fig. 18

On peut étendre ce résultat à n résistors en parallèle, soit :

La puissance électrique dissipée par effet Joule entre les bornes d'un ensemble de n résistors en parallèle est égale à la puissance électrique consommée par le résistor équivalent.

Généralisation : Le résultat est le même pour une association quelconque de résistors.

Pour un réseau de conducteurs ohmiques soumis à une tension U entre deux de ses points A et B, la puissance électrique $\mathcal{P}_J$ dissipée par effet Joule est , à chaque instant , égale à $\frac{U^2}{R}$, R étant la résistance équivalente du dipôle composé (AB).

7. La loi de Joule

Dans une portion (AB) de circuit ne comportant que des conducteurs ohmiques, la puissance $\mathcal{P}$ reste constante. On peut alors écrire l'expression de l'énergie électrique consommée par la portion de circuit (AB) ainsi : $W_e = R.I^2 \Delta t$

Dans un conducteur ohmique, cette énergie se dégage intégralement, dans le circuit et dans l'air ambiant sous forme de chaleur notée E_{th} .

$$E_{th} = W_e \quad \text{et} \quad E_{th} = R.I^2 \Delta t.$$

C'est l'expression de la loi de Joule.

Enoncé de la loi de Joule

Dans un conducteur de résistance R parcouru durant Δt par un courant d'intensité I , l'énergie dégagée par effet Joule est proportionnelle au carré de l'intensité qui le traverse et à la durée du courant : $E_{th} = R.I^2 \Delta t$

La loi de Joule peut s'écrire sous diverses formes :

$$E_{th} = R.I^2 \Delta t ; \quad E_{th} = P_J \Delta t ; \quad E_{th} = U.I \Delta t ; \quad E_{th} = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

E_{th} en joule (J) $\mathcal{P}_J$ en Watt (W) ; lorsque U est en Volt (V), I est en ampère (A) , Δt est en seconde (s) et R en ohm (Ω)

Activité expérimentale

Mesurer la résistance d'un conducteur ohmique, soit R ; Insérer ce résistor dans un circuit parcouru par un courant d'intensité I ; mesurer I . A l'aide d'un wattmètre, vérifier l'égalité $\mathcal{P}_J = R.I^2$. (Fig.19)

Application

Nous avons déjà vu quelques applications (Chapitre 2) comme le fusible ; comme autre mesure de sécurité dans les installations électriques, il est important d'appliquer les normes concernant les sections des fils conducteurs utilisés ; pour réduire la quantité de chaleur dégagée par effet Joule dans les conducteurs en cuivre, il est nécessaire de leur donner une résistance assez faible et donc une section suffisante. Des conducteurs mal calculés s'échauffent de manière exagérée et peuvent provoquer des incendies.



Fig. 19

Activité expérimentale

Précision d'une mesure en physique

Objectifs

- Déterminer la distribution statistique d'une grandeur à partir d'un échantillon.
- Evaluer la moyenne d'une grandeur à partir d'un échantillon.
- Ecrire la valeur d'une grandeur entachée d'incertitude.
- Dédire la relation entre tolérance et incertitude relative.

Matériel

- Lot de 100 (minimum 50 résistors) 0,5 W, 1k Ω , 5% (anneau doré)
- Ohmmètre (avec pile en bon état).
- Fils de connexions et deux pinces crocodiles.
- Ordinateur + logiciel (Tableur de type Excel)

Manipulation

- * Partager le lot de résistors entre les groupes (10 à 20 composants par groupe).
- * Mesurer la résistance de chaque composant (choisir le bon calibre pour avoir le maximum de chiffres : 2 k Ω par exemples)
- * Noter toutes les valeurs trouvées même si elles se répètent.
- * Grouper les valeurs en classes de largeur 2 Ω : 1004, 1002, 1000, 998, 996, 994.....
- * Saisir toutes les valeurs dans le Tableur sur le PC (pour tous les groupes)
- * Faire tracer un diagramme en bâton par le PC et par les groupes ; déterminer les caractéristiques de la série :Moyenne, étendue de la série...
- * Quelle est la valeur moyenne de toutes les mesures ? Quelle est la valeur la plus fréquente ?
- * Quelles sont les valeurs extrêmes trouvée pour toutes les mesures ?
- * Comment écrire la valeur de R en tenant compte de toutes les mesures ? Définir ΔR .
- * Comparer la dispersion des valeurs de R sur l'intervalle trouvé avec celle indiquée par le fabricant : anneau de tolérance doré.
- * Déterminer l'intervalle à 90% et à 95%.
- * Présenter le résultat final avec un intervalle de confiance de 90% puis un autre de 95%.
- * Définir $\frac{\Delta R}{R}$.

Association série : En prenant deux résistors au hasard dans les lots précédents :

- * A l'intérieur de quel intervalle vont se retrouver les valeurs de la résistance équivalente $R_{(R1,R2)} = R_1 + R_2$?
- * Quel est l'intervalle d'incertitude et l'incertitude $\Delta R'$?
- * Quelle est l'incertitude relative $\frac{\Delta R'}{R_1 + R_2}$?

Association en parallèle : En prenant deux résistors au hasard dans les lots précédents :

- * A l'intérieur de quel intervalle vont se retrouver les valeurs de la résistance équivalente $R_{(R1//R2)} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$? Trouver l'incertitude $\Delta R''$.

- * Quelle est l'incertitude relative sur $R_{(R1//R2)}$?
- * Présenter le résultat final pour $R_{(R1,R2)}$ et $R_{(R1//R2)}$. Comparer ces résultats avec la tolérance 5% indiquée par le fabricant.

- Deux dipôles sont équivalents lorsque leurs caractéristiques sont identiques.
- Des résistors $R_1, R_2, \dots, R_n$, associés en série sont équivalents à un résistor unique dont la résistance R est égale à la somme de toutes les résistances : $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$
- Des résistors $R_1, R_2, \dots, R_n$, associés en parallèle sont équivalents à un résistor unique dont la résistance R est telle que son inverse est égal à la somme des inverses de toutes les résistances :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

- Le dipôle équivalent à une association mixte de résistors est un conducteur ohmique dont la résistance R est déterminée en appliquant les lois d'association .
- La puissance électrique $\mathcal{P}$ dissipée par effet Joule à chaque instant dans un réseau de conducteurs ohmiques soumis à une tension U entre deux de ses points A et B est égale à $\frac{U^2}{R}$, R étant la résistance équivalente du dipôle composé (AB).
- **Loi de Joule** : Dans un conducteur de résistance R parcouru durant Δt par un courant d'intensité I , l'énergie dégagée par effet Joule est proportionnelle au carré de l'intensité I et à la durée du passage du courant : $E_{th} = R.I^2 \Delta t$

La loi de Joule peut s'écrire sous diverses formes :

$$E_{th} = R.I^2 \Delta t ; E_{th} = \mathcal{P} \Delta t ; E_{th} = U.I \Delta t ; E_{th} = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

E_{th} en joule (J); $\mathcal{P}$ en watt (W) ; lorsque U est en volt (V), I est en ampère (A), Δt est en seconde (s) et R est en ohm (Ω)

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

- 1- Choisir la bonne réponse parmi celles qui sont proposées dans les parenthèses pour chacune des affirmations suivantes :**
- Dans un circuit comportant un conducteur ohmique de résistance R , on insère un deuxième conducteur ohmique de résistance R . L'intensité du courant augmente dans le circuit (Vrai – Faux)
 - Deux résistors placés en parallèles sont équivalents à un résistor de résistance ($2.R, \frac{R}{2}$).
 - La caractéristique intensité-tension du dipôle équivalent à deux résistors en série est un segment de droite de pente ($>, <$) que celle de chacune des caractéristiques de R_1 et R_2 .
 - La résistance équivalente à deux résistors en série est toujours (supérieure / inférieure) à la plus (petite/grande) des deux résistances.
 - La résistance équivalente à deux résistors en parallèle est toujours (supérieure / inférieure) à la plus (petite/grande) des deux résistances.
 - Lorsque, ayant deux résistors en parallèle, l'une beaucoup plus grande que l'autre, la résistance équivalente est très peu différentes de la plus (petite/grande) des deux résistances.
 - Lorsque, ayant deux résistors en série, l'une beaucoup plus grande que l'autre, la résistance équivalente est très peu différentes de la plus (petite/grande) des deux résistances.

2- La puissance dissipée par effet Joule dans la portion de circuit (AB) comprenant un conducteur ohmique de résistance R soumis à une tension U est 100 W. On insère un deuxième conducteur ohmique de résistance R entre les points A et B. La puissance dissipée est (doublée/divisée par deux/multipliée par quatre).

3- Un résistor R , soumis à une tension constante U et parcouru durant 20 s par un courant I dissipe une énergie W_e . Un résistor R identique est branché en parallèle sur le premier. L'ensemble est resté sous tension durant 10s. L'énergie totale dissipée est

W'_e telle que ($W'_e = W_e$; $W'_e = 2. W_e$; $W'_e =$; $W'_e = 4. W_e$).

Je sais appliquer le cours

4-Déterminer, dans les deux cas de figure (Fig.20-a , Fig.20-b), la résistance de chaque résistor et par deux méthodes différentes, la résistance équivalente à l'ensemble.

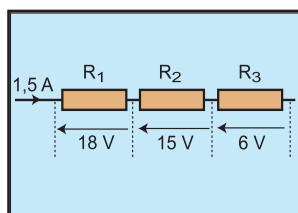


Fig. 20 a

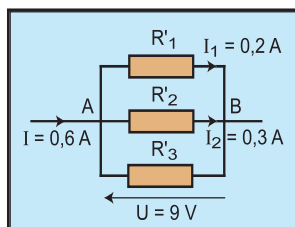


Fig. 20 b

5- Déterminer la valeur de la résistance équivalente des associations de conducteurs ohmiques suivants (Fig.21) vues entre les points A et B. On prendra : $R_1 = 5 \Omega$ et $R_2 = 15 \Omega$.

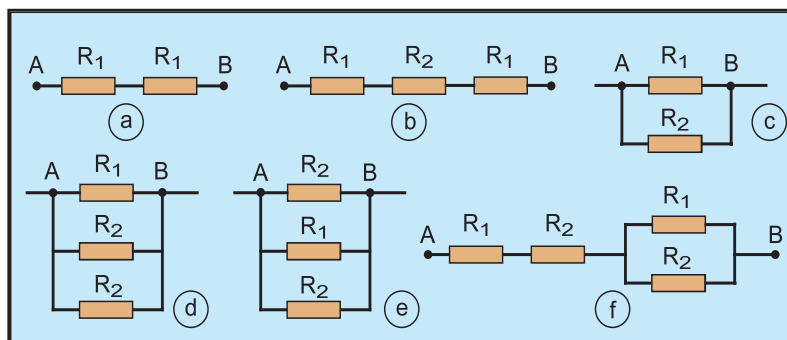


Fig. 21

6- Déterminer la valeur de la résistance équivalente des associations suivantes Fig.22.

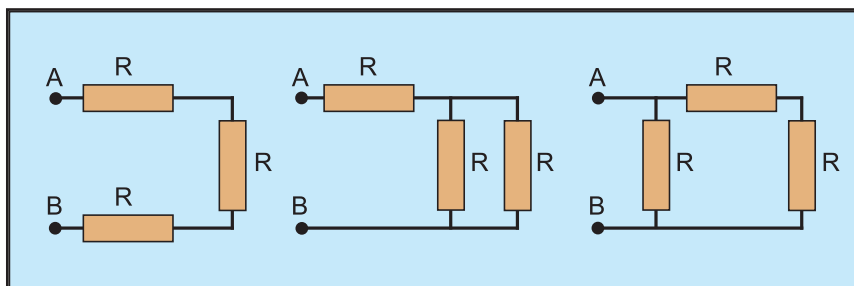


Fig. 22

On donne $R = 5 \Omega$.

7- Déterminer la résistance équivalente au groupement suivant (A,B) (Fig.23) :

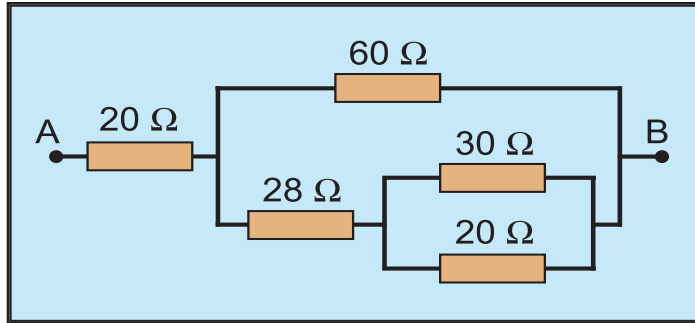


Fig. 23

8- Dans le montage 1 (Fig.24), indiquer sans calcul mais en justifiant la réponse, quel est le résistor aux bornes duquel la tension est la plus grande, la plus petite ?

Dans le montage 2, indiquer, sans calculs mais toujours en justifiant la réponse, quel est le résistor parcouru par l'intensité la plus grande, la plus petite ?

On suppose que dans chaque cas un courant I parcourt le circuit .

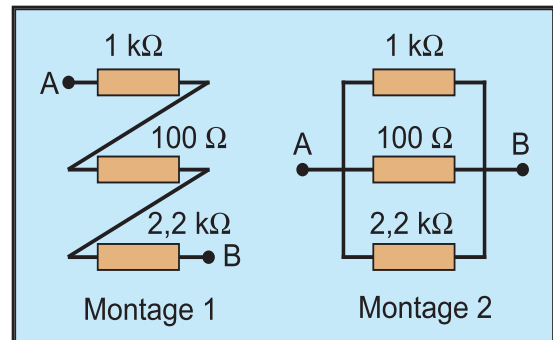


Fig. 24

9- Un résistor de résistance $R_1 = 100 \Omega$ est monté en série avec un rhéostat de résistance totale $R = 1 \text{ k}\Omega$ (Fig.25). Entre les points A et B, on maintient la tension $U_{AB} = 12 \text{ V}$.

a) Déterminer les valeurs maximale et minimale que peut prendre l'intensité I du courant dans la branche AB. Redessiner le circuit avec la position du curseur C correspondant à chaque valeur.

b) Si on désigne par r la résistance du rhéostat pour une position quelconque du curseur C, tracer la courbe représentative de $I = f(r)$.

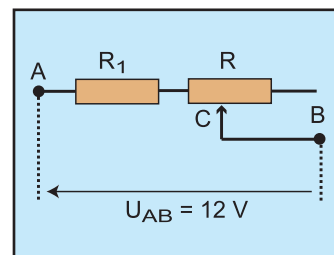


Fig. 25

10- On considère le circuit ci-contre (Fig.26) avec $R_1 = 25 \Omega$ et $R_2 = 100 \Omega$.

a) Déterminer la résistance équivalente du dipôle (AB).

b) En déduire l'intensité I .

c) Déterminer les intensités dans les différentes branches.

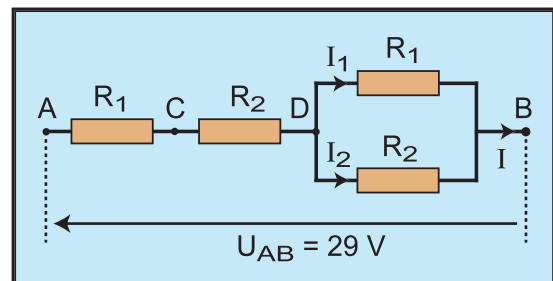


Fig. 26

- 11-** a) Deux résistors R_1 et R_2 sont montés en série (Fig.27-a). Montrer que $U_{AC} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U$.
 b) Montrer que pour une valeur donnée de la résistance réglable R_3 d'un résistor placé entre D et B, le voltmètre placé entre les points C et D indique zéro (Fig.27b).
 c) En déduire alors l'expression de R en fonction de R_1 , R_2 et R_3 .

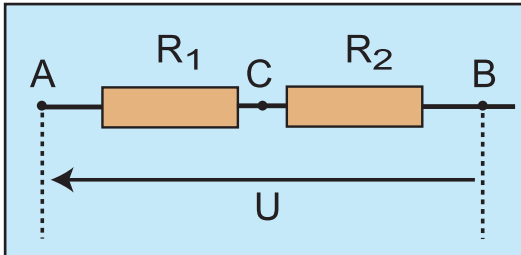


Fig. 27a

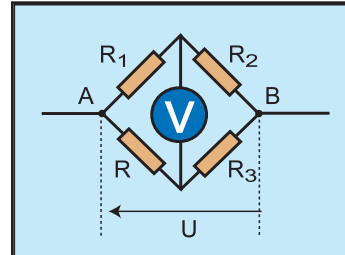


Fig. 27 b

- 12-** On dispose d'un lot de quelques conducteurs ohmiques de résistances 100 Ω , 220 Ω , 330 Ω et 470 Ω . On désire associer ces conducteurs ohmiques pour obtenir une valeur précise de résistance.
 Proposer une association, en utilisant un minimum de composants permettant de réaliser un résistor équivalent de résistance : a) 1 k Ω ; b) 150 Ω ; c) 66 Ω ; d) 33 Ω .
- 13-** Un conducteur ohmique consomme par effet Joule une puissance électrique de 250W ; Que devient cette puissance quand on double l'intensité du courant qui le traverse ? Comment a varié la tension à ses bornes ?
- 14-** Un conducteur ohmique de résistance $R = 50 \Omega$, parcouru par un courant constant, consomme une puissance de 800 watts. On demande de déterminer :
 a) L'intensité du courant qui le traverse
 b) L'énergie électrique, en joule et en kWh, consommée après 3 heures de fonctionnement
 c) La tension électrique maintenue entre ses extrémités.
- 15-** Le constructeur indique pour un résistor R_1 : 47 Ω ; 1W à 70°C. Quelle est l'intensité maximale du courant qui peut traverser ce résistor ?
- 16-** Pour un résistor R_2 le constructeur indique : 495 Ω ; 0,25 W à 125°C. Quelle est la tension maximale qu'il peut supporter ?

Technologie et Fabrication des résistors

Les conducteurs ohmiques utilisés en électronique se classent essentiellement en deux catégories: les «résistances» au carbone et les «résistances» métalliques.

Les résistances au carbone

Les résistances agglomérées : elles sont constituées d'un mélange de carbone (conducteur) , de matière isolante et d'un liant. Tous ces constituants sont réduits en poudre , agglomérés à chaud et isolés dans un tube de plastique ou de céramique. Peu coûteuses et robustes , elles sont peu précises et leur valeur varie avec le vieillissement, c'est-à-dire après une durée de fonctionnement plus ou moins longue ;ce qui occasionne des pannes fréquentes dans les circuits des appareils électroniques où elles sont utilisées. La précision des valeurs de ces résistances est généralement de 20%, parfois 10%. Elles ne sont presque plus commercialisées.



Fig. 28

Les résistances à couche : elles sont obtenues en déposant une très mince couche de carbone (conducteur) sur un bâtonnet de céramique (isolant) ; les extrémités du bâtonnet sont métallisées et munies d'embouts en cuivre étamé sur lesquels sont soudés les fils de liaison. Le conducteur ohmique est ensuite protégé par un vernis épais ou par un revêtement moulé avant le codage ou l'impression de la valeur de la résistance. Ces composants ont généralement une meilleure tenue dans le temps en fonctionnement et on peut les fabriquer avec des tolérances qui descendent à 5%. Ce sont les résistances les plus courantes et les moins chères que l'on trouve actuellement.

Les résistances métalliques

On distingue là aussi deux familles :

- **Les résistances bobinées** : elles sont constituées par un fil d'alliage (nichrome, constantan ...) bobiné sur un support isolant capable de supporter les fortes températures que le fil peut atteindre. On utilise généralement un support en céramique et l'ensemble est ensuite recouvert d'un émail cuit au four pour protéger le fil de l'oxydation et l'isoler. On peut réaliser ainsi des résistances de puissance («résistances émaillées») qui peuvent absorber des puissances de plusieurs dizaines de watts. La même technologie permet de fabriquer des résistances étalons donc très précises et de bonne stabilité par rapport aux variations de température et au vieillissement . Il est possible de les usiner avec des tolérances de l'ordre de 1 ou 2% (Fig.29).



Fig. 29

- **Les résistances à couche métallique** : Ce sont des résistances non bobinées, obtenues par pulvérisation d'oxydes métalliques sur un tube de verre ou de céramique, ou par dépôt d'une couche très mince et calibrée de métaux nobles (cuivre généralement). On obtient des résistances de très haute stabilité et de très bonne précision. Ces résistances sont les seules utilisées dans les circuits des appareils de mesure électriques (ampèremètres, voltmètres...) de classe moyenne (1 à 2%). Leur précision est de l'ordre de 1% (Fig.30).



Fig. 30

Fabrication de valeurs particulières :

Les fabricants de composants électroniques ne mettent sur le marché que des valeurs particulières de résistance regroupées en séries dites par décade ; une décade correspond à un facteur multiplicatif de 10 ; par exemple , on passe de 10 à 100 en multipliant par un facteur 10. La décade est divisée en intervalles dont le nombre détermine le nom de la série ; on dit, par exemple, « série E 6 » ce qui donne 6 intervalles et 6 valeurs par décade qui sont : (10 , 15 , 22 , 33 , 47 , 68), (100 , 150 , 220...). **On voit que les deux premiers chiffres se répètent à chaque décade ; c'est ce qui explique que le code des couleurs utilise deux chiffres significatifs et un multiplicateur (puissance de 10)** (pour les séries E6 et E12).

Série E 6	10				15				22				33				47				68			
Série E12	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82	
Série E24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	42	47	51	56	62	68	75	82	91

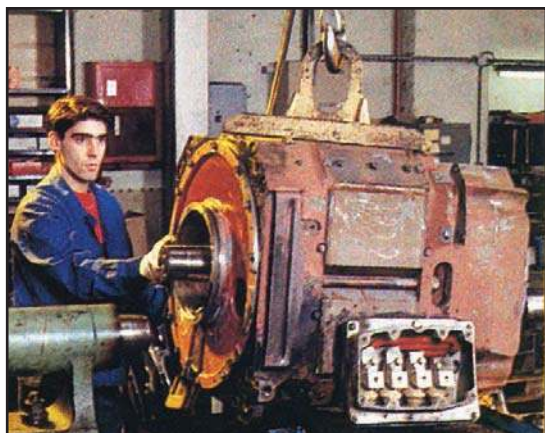
Plus le nombre de valeurs par décade augmente et plus la précision exigée (tolérance) augmente:

Les valeurs de la série E6 sont fabriquées en 10% ; la série E12 en 10% et 5% ; la série E24 en 5% et 2% ; la série E48 en 1% et 2%....etc

RECEPTEURS ACTIFS

CHAPITRE

5



L'énergie électrique est utilisée pour d'autres besoins que le chauffage : production de mouvements, électrolyse industrielle (réactions chimiques) ...

OBJECTIFS

- Identifier un récepteur actif dans un montage ou sur un schéma électrique.
- Réaliser le montage d'étude d'un récepteur actif.
- Tracer la caractéristique $U = f(I)$ d'un récepteur actif.
- Déterminer graphiquement les grandeurs caractérisant un récepteur actif.
- Appliquer la loi d'Ohm relative à un récepteur actif.
- Calculer la puissance utile d'un récepteur actif.
- Calculer le rendement d'un récepteur actif.

1. Définition

Mesurons à l'Ohmmètre la résistance des bobinages d'un petit moteur de radiocassette (Fig.1).

On trouve $r' = 6,8 \Omega$ par exemple.

Réalisons le montage de la figure 2 en utilisant soit le wattmètre soit un ampèremètre et un voltmètre.



Fig.1

Mesurons l'intensité I ainsi que la tension U lorsque le moteur fonctionne ou tourne à son régime normal : $I = 0,075A$; $U = 6V$

La puissance consommée par le moteur est $\mathcal{P}_e = U.I$, soit $0,45W$.

Déterminons la puissance dissipée par effet Joule dans les bobinages du moteur :

$$\mathcal{P}_j = r'.I^2 \text{ On trouve } 0,04W \text{ c'est-à-dire } \mathcal{P}_e > \mathcal{P}_j$$

⇒ Le moteur électrique consomme plus d'énergie électrique en 1 seconde que n'en exige l'effet Joule seul dans les conducteurs qui le constituent. Le moteur est pour cela appelé **récepteur actif**.

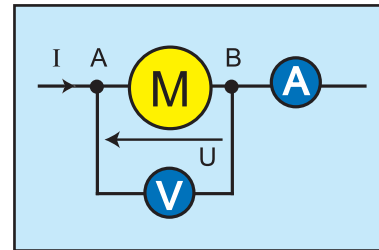


Fig.2-a

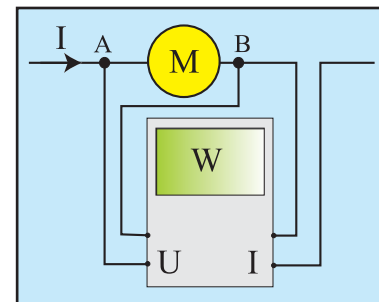


Fig.2-b

Autre exemple de récepteur actif :

On peut refaire l'expérience avec un électrolyseur à électrodes inattaquables en platine rempli par une solution diluée d'acide sulfurique (Fig.3). On trouve encore que $\mathcal{P}_e > \mathcal{P}_j$. On en déduit que l'électrolyseur est un récepteur actif.

Où est passée l'énergie supplémentaire consommée ?

Cas du moteur : Une grande partie de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique ou énergie de mouvement. Le reste correspond au dégagement de chaleur par effet joule.

Cas de l'électrolyseur : les ions se transforment au niveau des électrodes en perdant leurs charges et il se produit des réactions chimiques. L'énergie électrique se transforme en partie en énergie chimique, le reste est transformé en chaleur par effet Joule.

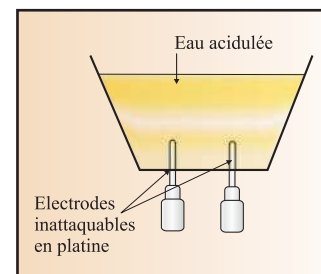


Fig.3 - L'électrolyseur

2. Caractéristique $U = f(I)$ d'un moteur

Le petit moteur de 6 V du paragraphe 1 est monté dans un circuit selon le schéma habituel en vue de déterminer la caractéristique intensité-tension d'un dipôle (Fig.5).

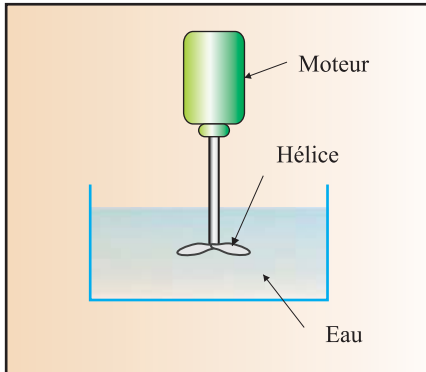


Fig.4

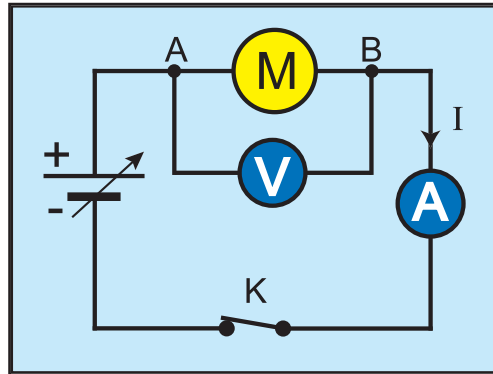


Fig.5



Attention

Il est important d'éviter l'emballement du moteur c'est-à-dire une vitesse de rotation exagérée. C'est ce qui arrive quand il tourne à vide sans charge. Pour le charger, il suffit de monter sur l'arbre, une hélice en plastique ou en carton mince (Fig.4). On s'assure ainsi que le moteur prend à chaque mesure une vitesse pratiquement constante.

Faisons varier l'intensité I , relevons les différentes valeurs de U et remplissons le tableau de mesures suivant :

I (A)					
U (V)					

Les points reportés dans un repère cartésien (I , U) donnent la caractéristique de la figure 6 (Courbe 1)

Pour les très faibles valeurs de I : On constate que le moteur tourne de façon irrégulière avec des vitesses nettement inférieures à sa vitesse de régime normal et s'arrête facilement si on le touche. On a donc intérêt à diminuer le plus possible la charge du moteur en enlevant l'hélice ; les frottements suffisent à maintenir une vitesse de rotation plus ou moins constante. Dans cette zone, la caractéristique est pratiquement une droite verticale.

Elle s'incurve ensuite pour redevenir pratiquement linéaire. Dans la zone linéaire de la caractéristique, la vitesse de régime devient normale et il est difficile de l'arrêter quand il tourne. C'est la zone de fonctionnement normal limitée, à droite, par les tension et intensité maximales.

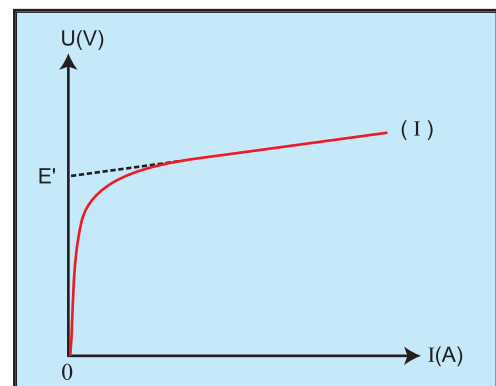


Fig.6

Reprenons les mesures après avoir bloqué le moteur pour l'empêcher de tourner et remplissons le tableau suivant :

I (A)					
U (V)					
U.I (W)					
$r' I^2$ (W)					

⚠ Attention

Il faut éviter de laisser longtemps le moteur bloqué sous tension sous peine de le détériorer. Faire les mesures le plus rapidement possible en ménageant un intervalle de refroidissement suffisant entre une mesure et la suivante (ou libérer le moteur entre deux mesures).

Reporter les couples (I, U) obtenus sur le même graphe et tracer la courbe qui les joint (Courbe II), (Fig.7).

⇒ La courbe (II) ainsi obtenue est une droite pratiquement parallèle à la partie linéaire de la caractéristique du moteur mais elle passe par l'origine.

⇒ Le produit $\mathcal{P}_e = U.I$ est, dans ce cas, pratiquement égal à $\mathcal{P}_j = r'.I^2$. Toute l'énergie électrique prise au générateur est intégralement transformée en chaleur dans les conducteurs du moteur.

⇒ Le moteur bloqué se comporte comme un conducteur ohmique de résistance r' .

⇒ Quand un moteur à courant continu fonctionne normalement, le point de fonctionnement se trouve sur la partie linéaire de la caractéristique dont l'équation est celle d'une droite affine de la forme : $U = a.I + b$.

En prolongeant cette droite, elle coupe l'axe des tensions en un point d'ordonnée $b = E'$. E' est la **force contre électromotrice** du moteur bloqué. La pente a de cette droite est homogène à une résistance. C'est la pente de la courbe II : C'est donc la **résistance interne r'** du moteur.

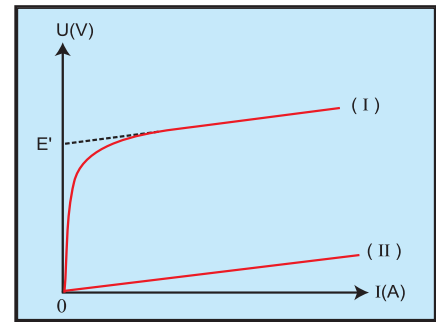


Fig.7

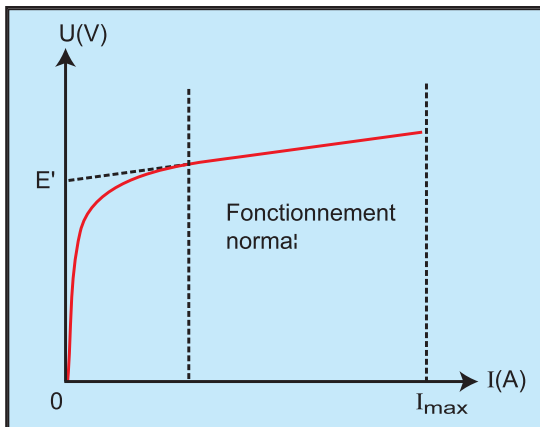


Fig.8

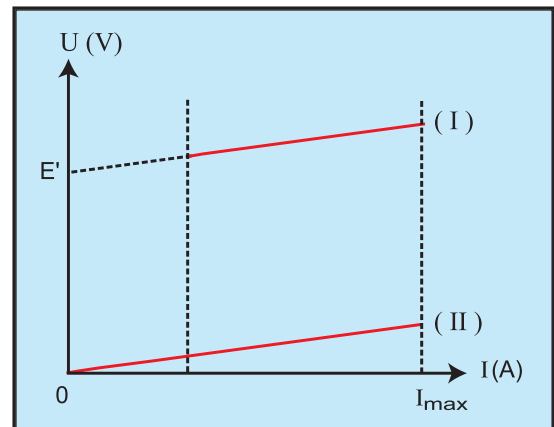


Fig.9

D'où l'équation de la partie utile de la caractéristique du moteur (Fig.9) :

$$U = E' + r'.I$$

Condition théorique de fonctionnement d'un moteur :

L'équation de la partie utile de la caractéristique étant $U = E' + r'.I$ et $r'.I \geq 0$, on a toujours $U \geq E'$.

Pour qu'un moteur à courant continu fonctionne normalement, il faut que la tension à ses bornes soit supérieure (ou à la limite égale) à sa force contre électromotrice E' .

Pourquoi E' est appelée force contre électromotrice ?

Montons sur l'arbre du moteur un disque métallique ou en carton de grand diamètre. Lançons le moteur avec une tension déterminée. Quand il atteint sa vitesse de régime, ouvrons l'interrupteur.

Le moteur continu à tourner pendant quelques secondes. L'ampèremètre indique $I = 0$ mais sur le voltmètre on lit une tension positive de quelques volts et on voit qu'elle diminue en même temps que la vitesse jusqu'à s'annuler.

On peut vérifier ainsi que juste au moment où $I = 0$, on lit E' que l'on compare avec la valeur graphique extrapolée.

A ce moment, le moteur se comporte comme un dipôle pourvu d'une tension E' non nulle à ses bornes opposée à celle de l'alimentation (puisque le pôle (+) du dipôle est relié au pôle (+) de l'alimentation) ; d'où la dénomination « récepteur actif » pour le dipôle et « force contre électromotrice » pour E' .

3. Caractéristiques d'un électrolyseur

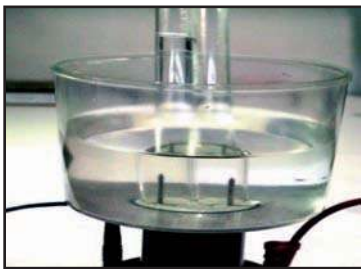


Fig. 10 a

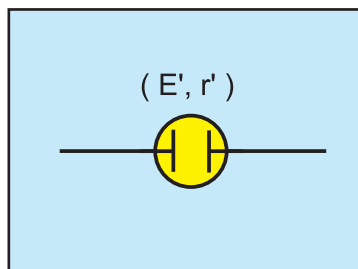


Fig. 10 b

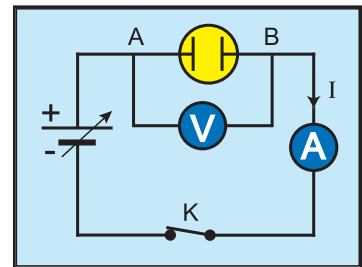


Fig. 11

Réalisons le montage d'étude en remplaçant le moteur électrique par l'électrolyseur de la figure 3 du paragraphe 1. (fig.10 et 11)

Faisons l'étude expérimentale proposée dans «Activités expérimentales» en fin de chapitre.

On obtient une courbe (fig.12) analogue à celle du moteur que l'on peut décomposer en deux zones distinctes :

- Une zone où on n'observe aucun dégagement gazeux et où I est pratiquement nul ; puis à partir d'une tension $U=U_0$ un début de dégagement de gaz (zone courbe de la caractéristique) et une intensité I qui commence à croître.

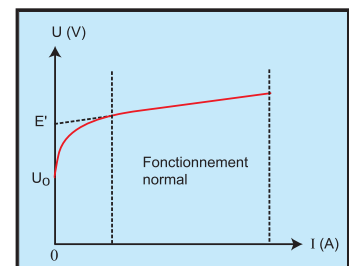


Fig. 12

- Une zone linéaire où l'électrolyseur fonctionne normalement avec un dégagement de gaz de plus en plus important à mesure que I augmente.

- Si on prolonge la partie linéaire de la caractéristique, elle va couper l'axe des ordonnées en un point E' ; de même, la pente de la courbe est positive.

On peut écrire son équation : $U = E' + r' \cdot I$,

E' est la force contre électromotrice de l'électrolyseur, r' est sa résistance interne. Là aussi, le fonctionnement n'est possible que lorsque $U \geq E'$.

Maintenons l'électrolyseur en fonctionnement durant quelques minutes puis ouvrons l'interrupteur et observons rapidement l'indication du voltmètre quand l'ampèremètre indique zéro.

On lit une tension très proche de la valeur E' au départ, elle diminue ensuite plus ou moins rapidement selon la sensibilité du voltmètre.

Ainsi pendant quelques fractions de seconde, l'électrolyseur se comporte comme un dipôle pourvu d'une tension E' opposée par rapport à l'alimentation d'où la dénomination récepteur actif pour le dipôle et force contre électromotrice pour E' .

Remarque

Tous les électrolyseurs ne sont pas des récepteurs actifs ; un électrolyseur rempli d'une solution de sulfate de cuivre (CuSO_4) avec deux électrodes en cuivre a une caractéristique **linéaire** (Fig.13). Cet électrolyseur n'a pas de f.c.é.m. : $E' = 0$ mais $r' \neq 0$. C'est un dipôle passif. Après un temps de fonctionnement, l'anode est rongée (perd du métal) et la cathode se recouvre d'une même quantité de cuivre ; tout se passe comme si du métal est transporté de l'anode à la cathode sans autre dépense d'énergie que les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Ce type d'électrolyseur est appelé **électrolyseur à anode soluble**.

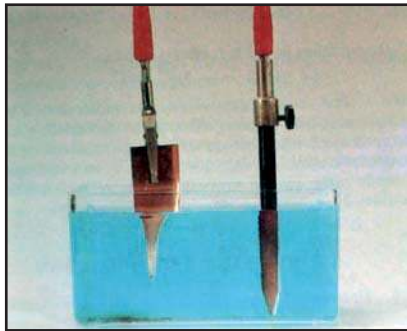


Fig. 13-a

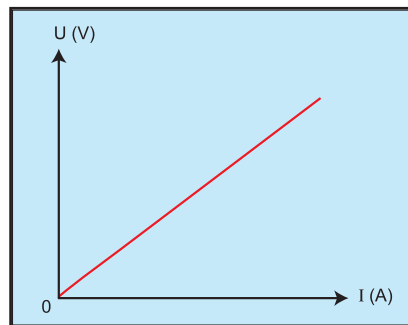


Fig. 13-b

4. Loi d'Ohm relative à un récepteur actif

Un récepteur actif est caractérisé par sa force contre électromotrice (f.c.é.m.) E' et sa résistance interne r' .

Pour l'un comme pour l'autre des deux récepteurs étudiés (Fig.14), on peut écrire l'équation de la caractéristique sous la forme suivante :

$$\begin{matrix} U_{AB} & = & E' & + & r' \cdot I_{AB} \\ \text{(V)} & & \text{(V)} & & \text{(\Omega) (A)} \end{matrix}$$

La relation précédente est l'expression de la loi d'Ohm relative à un récepteur actif en fonctionnement normal.

$r' \cdot I_{AB} = U_{AB} - E'$ est appelée chute de tension dans r' .

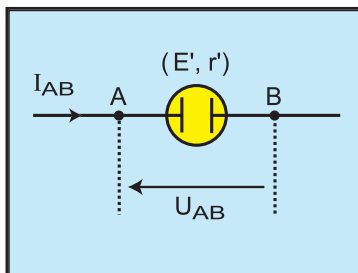


Fig. 14 a

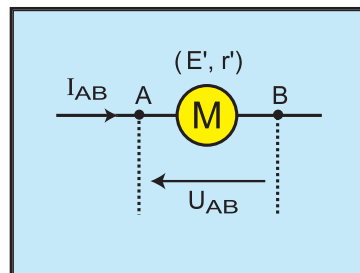


Fig. 14 b

Enoncé de la loi d'Ohm pour les récepteurs actifs :

La tension aux bornes d'un récepteur actif (AB) en fonctionnement normal est égale à sa f.c.e.m. E' augmentée de la chute de tension $r'.I_{AB}$ dans sa résistance interne r' .

D'où le schéma équivalent : moteur idéal en série avec un résistor de résistance r' . (Fig.15)

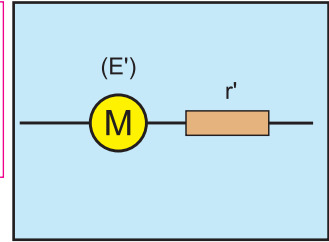


Fig. 15

Remarque

Un résistor est un récepteur passif ($E' = 0$) et la loi d'Ohm s'écrit alors $U_{AB} = R.I_{AB}$.

L'expression précédente peut donc être considérée comme générale et valable pour tout type de récepteur.

5. Puissance et énergie électrique reçues par un récepteur actif

Dans le paragraphe I, on a montré qu'un récepteur actif consomme plus d'énergie que n'en exige l'effet Joule seul. En effet :

$$\text{Loi d'Ohm : } U_{AB} = E' + r'.I_{AB} \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_e = U_{AB}.I_{AB} \\ \Rightarrow \mathcal{P}_e = E'.I_{AB} + r'.I_{AB}^2 = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_j$$

$\mathcal{P}_j = r'.I_{AB}^2$: c'est la puissance consommée par effet Joule dans la résistance interne (bobinage, électrolyte) et qui n'a d'autre conséquence que d'élever la température du récepteur.

$\mathcal{P}_u = E'.I_{AB}$: c'est la fraction de la puissance transformée par le récepteur en une forme d'énergie autre que la chaleur: mécanique pour le moteur, chimique pour l'électrolyseur. C'est la **puissance utile**.

Un moteur électrique est d'autant plus puissant que la puissance utile $\mathcal{P}_u$ est élevée.

Si le récepteur fonctionne pendant un intervalle de temps Δt , on peut calculer l'énergie électrique consommée W_e , l'énergie utile E_u et l'énergie Joule E_{th} en multipliant les puissances correspondantes par Δt .

$$W_e = \mathcal{P}_e \cdot \Delta t = \mathcal{P}_u \cdot \Delta t + \mathcal{P}_j \cdot \Delta t \\ E_u = \mathcal{P}_u \cdot \Delta t \quad \text{et} \quad E_{th} = \mathcal{P}_j \cdot \Delta t \\ E_u = E'.I_{AB} \cdot \Delta t \quad \text{et} \quad E_{th} = r'.I_{AB}^2 \cdot \Delta t$$

Pour un récepteur donné, on cherche toujours à minimiser les échauffements et les pertes par effet Joule, en utilisant des fils de gros diamètre pour le moteur, et des électrodes de grande surface et rapprochées, plongées dans des solutions concentrées d'électrolyte pour les électrolyseurs.

Comme on ne peut pas éliminer totalement ces pertes, il est intéressant de connaître la fraction de puissance utile restituée par un récepteur. On parle alors de **rendement**.

Définition

Le rendement ρ d'un récepteur actif est le rapport de la puissance utile $\mathcal{P}_u$ à la puissance totale consommée :

$$\rho = \frac{E'.I_{AB}}{U_{AB}.I_{AB}} \Rightarrow \rho = \frac{E'}{E' + r'.I_{AB}} \quad r' \text{ étant toujours non nulle} \Rightarrow \rho < 1.$$

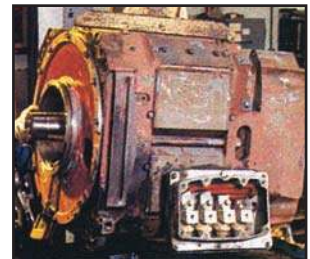


Fig. 16

Le rendement ρ est un nombre sans unité.

Les moteurs électriques sont parmi les machines électriques qui ont le meilleur rendement :

$\rho = 0,90$ est une bonne valeur moyenne.

Activité expérimentale

Objectifs

- Schématiser et réaliser le montage d'étude d'un récepteur actif : l'électrolyseur.
- Tracer la caractéristique intensité-tension d'un électrolyseur.
- Déterminer graphiquement la f.c.e.m. E' d'un électrolyseur.
- Déterminer graphiquement la résistance interne r' d'un électrolyseur.
- Déterminer le paramètre (r' ou E') qui est influencé par la concentration de la solution.

Matériel

- Un voltmètre ordinaire, un voltmètre numérique (résistance interne élevée), un ampèremètre, une alimentation stabilisée à tension réglable, un interrupteur et des fils de connexion.
- Un électrolyseur à électrodes inattaquables et trois solutions aqueuses de soude sous 3 concentrations différentes : $0,1\text{mol.L}^{-1}$; $0,25\text{mol.L}^{-1}$; $0,5\text{mol.L}^{-1}$
- Des feuilles de papier millimétré.

Manipulation

1. Schématiser et réaliser le montage d'étude pour le dipôle électrolyseur vide.
2. Remplir l'électrolyseur avec la solution de soude à $0,1\text{M}$ et faire varier l'intensité du courant en prenant au moins 4 mesures pour $0 < U < 1,5\text{V}$.
3. Commencer à augmenter l'intensité I à partir de zéro en surveillant l'électrolyseur et noter la valeur U_0 de U pour laquelle apparaît un début de dégagement gazeux sur les électrodes.
4. Tracer la caractéristique intensité-tension de l'électrolyseur.
5. Déterminer les paramètres du récepteur actif (E' et r') à partir de la courbe.
6. Vérifier ces valeurs en prenant encore 2 ou 3 autres mesures de couples (I, U) et en appliquant la loi d'Ohm pour les récepteurs actifs.
7. Vérifier expérimentalement la valeur de E' : on utilisera le voltmètre numérique pour faire rapidement une lecture de la tension qui apparaît aux bornes du récepteur actif au moment où l'interrupteur est ouvert ($I=0$). Comparer avec la valeur graphique précédente.
8. Changer de solution électrolytique et choisir la méthode la plus rapide pour déterminer les nouveaux paramètres du récepteur actif (E' et r') ; reprendre cette détermination avec la 3ème solution. Que peut-on en déduire quant à la relation entre E' , r' et la concentration de la solution?

L'essentiel du cours

- On appelle récepteur actif tout récepteur qui consomme plus d'énergie électrique que n'en exige l'effet Joule seul quand un courant parcourt les conducteurs qui le constituent.
- Dans un récepteur actif une grande partie de l'énergie électrique consommée est transformée en une forme d'énergie autre que la chaleur : mécanique, chimique, ou autre.
- La caractéristique linéarisée intensité-tension, d'un récepteur actif est une portion de droite affine d'équation : $U = E' + r' I$; E' est la force contre électromotrice (f.c.e.m.) du récepteur et r' sa résistance interne.
- Loi d'Ohm pour les récepteurs actifs : la tension aux bornes d'un récepteur actif (AB) en fonctionnement normal, est égale à sa f.c.e.m. E' augmentée de la chute de tension ohmique $r' \cdot I_{AB}$ dans sa résistance interne r' .
- La puissance électrique consommée par un récepteur actif est : $\mathcal{P}_e = E' I_{AB} + r' I_{AB}^2$
- La puissance utile délivrée par un récepteur actif est : $\mathcal{P}_u = E' \cdot I_{AB}$
- La puissance perdue par effet Joule dans les conducteurs est : $\mathcal{P}_j = r' \cdot I_{AB}^2$
- Le rendement ρ d'un récepteur actif est le rapport de la puissance utile à la puissance électrique

totale consommée :

$$\rho = \frac{E'}{E' + r' \cdot I_{AB}}$$

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

- La tension à vide d'un récepteur actif est donnée par l'indication d'un voltmètre très sensible.
- Un récepteur actif est caractérisé par sa tension interne.
- Un récepteur actif est caractérisé par sa force électromotrice E' et sa résistance interne r' .
- L'équation de la caractéristique d'un récepteur actif est de la forme $U = r' \cdot I + E'$.
- Il est dangereux de mettre un récepteur actif en court-circuit.
- Tout récepteur actif peut être considéré comme un récepteur actif parfait en série avec un conducteur ohmique.
- La tension aux bornes d'un dipôle actif est égale à sa f.c.e.m. E' quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse.

2- Sous quelles formes l'énergie électrique reçue par un électrolyseur est-elle convertie ?

3- Sous quelles formes l'énergie électrique reçue par un moteur est-elle convertie ?

4- Définir par une phrase la force contre électromotrice d'un récepteur actif.

Je sais appliquer le cours

5- On dispose d'un électrolyseur (A,B) à électrodes en carbone et contenant une solution de chlorure de sodium. Pour une tension U_{AB} inférieure à 2,5V on n'observe aucun dégagement gazeux et l'intensité I du courant est nulle. Pour une tension supérieure on observe un dégagement gazeux sur les électrodes et le passage d'un courant ; on a relevé les couples de valeurs suivants :

$I(\text{mA})$	2	5	10	19	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{AB}(\text{V})$	2,75	2,85	2,95	3,10	3,20	3,27	3,35	3,42	3,50	3,56	3,63	3,70

- 5.1.** Tracer la caractéristique intensité-tension de ce récepteur ; préciser le domaine de fonctionnement où la caractéristique est linéarisable.
- 5.2.** Déterminer la f.c.e.m. et la résistance interne de l'électrolyseur.
- 5.3.** Calculer la puissance électrique consommée et le rendement de ce récepteur quand il est parcouru par un courant d'intensité $I = 80\text{mA}$.
- 6.** Un électrolyseur de f.c.e.m. $2,4\text{V}$, de résistance interne 10Ω , est parcouru par un courant d'intensité $0,75\text{A}$.
- 6.1.** Quelle est la puissance électrique reçue par ce récepteur ?
- 6.2.** Calculer, après 1 heure de fonctionnement :
- l'énergie électrique consommée ;
 - l'énergie utilisée pour provoquer les réactions chimiques ;
 - l'énergie perdue par effet Joule ;
 - le rendement de l'électrolyseur.
- 7.** Un moteur électrique fonctionne sous une tension continue de 110V pour une intensité de $4,8\text{A}$. La puissance mécanique utile développée par ce moteur est de 490W . On admet que les pertes par effet Joule sont égales aux pertes dues aux frottements internes.
- 7.1.** Calculer la puissance électrique fournie au moteur.
- 7.2.** Calculer le rendement de ce moteur
- 7.3.** Calculer les pertes par effet Joule et la résistance interne de ce moteur.
- 7.4.** Déterminer sa f.c.e.m. E' .
- 8.** En 12 min, un électrolyseur de f.c.e.m. $1,8\text{V}$ utilise une énergie de 900J pour réaliser des réactions chimiques.
- 8.1.** Calculer sa puissance utile ainsi que l'intensité du courant qui le traverse.
- 8.2.** Déterminer sa résistance interne et son rendement sachant qu'il est alimenté sous une tension de 6V .
- 9.** Un moteur électrique est alimenté sous une tension constante $U = 12\text{V}$. Sa résistance interne est $r' = 20\Omega$.
- 9.1.** Ecrire l'expression de la f.c.e.m. E' en fonction de U , r' et I . Donner l'allure de la courbe $E' = f(I)$. A quoi correspond, physiquement, le cas $E' = 0$?
- 9.2.** Ecrire l'expression de la puissance utile $\mathcal{P}_u$ développée par le moteur en fonction de I .
- 9.3.** Calculer pour $I = 0,3\text{A}$, la f.c.e.m. et le rendement du moteur.

Electrométallurgie en solution aqueuse

On nomme électrolyse l'ensemble des réactions chimiques qui sont causées par le passage du courant électrique dans une solution d'électrolyte. Les solutions d'électrolytes contiennent des ions qui subissent des transformations chimiques au contact des électrodes de l'électrolyseur.

L'utilisation de l'électrolyse dans l'industrie pour la préparation ou le traitement des métaux remonte à la deuxième moitié du XIXème siècle. L'électrométallurgie s'est ensuite développée très vite et on distingue actuellement trois types de méthodes :

- Le raffinage électrolytique des métaux (pour le cuivre notamment)
- La production des métaux (zinc, manganèse, cadmium, aluminium...)
- La galvanotechnique ou électrodéposition (nickelage, chromage, argenture et dorure...) qui sont des techniques de traitement des surfaces.

Raffinage électrolytique du cuivre

L'électrotechnique est le domaine d'utilisation le plus important du cuivre : moteurs, alternateurs, câbles électriques, circuits imprimés... Mais il est nécessaire que le métal soit très pur, la présence d'impuretés faisant en effet augmenter la résistivité et donc les pertes par effet Joule dans les circuits en cuivre. Or le cuivre brut provenant de la métallurgie thermique contient beaucoup d'impuretés malgré que la teneur en cuivre pur soit de 99,5%.

Pour éliminer ces 0,5% d'impuretés, on réalise **une électrolyse à anode soluble**. Dans une telle électrolyse une anode en métal M plonge dans une solution contenant des ions de ce métal. Au cours de l'électrolyse, l'anode perd du métal M et la cathode se recouvre d'une même masse du métal M.

L'anode est en cuivre brut à 99,5% à affiner et la cathode en cuivre électrolytique très pur. L'électrolyte est une solution de sulfate de cuivre (CuSO_4 à 40 g.L⁻¹) et d'acide sulfurique (H_2SO_4 à 200g.L⁻¹). On obtient par cette méthode du cuivre très pur à 99,95%.

On récupère au cours de cette électrolyse les boues résiduelles qui sont très riches en métaux nobles (or, argent...) ; on estime qu'environ 80% de l'argent produit dans le monde provient du raffinage électrolytique des métaux et principalement du cuivre. La seule usine qui réalise cette purification en France par exemple produit 47000 tonnes de cuivre par an, ainsi que 20 tonnes d'argent et 100kg d'or.



Fig. 17



Fig. 18

Elaboration de l'aluminium

L'élaboration de l'aluminium est essentiellement électrolytique. Le premier lingot de ce métal a été montré pour la première fois par Sainte-Claire Deville en 1854 et il a fallu attendre 1886 pour la mise au point des premiers procédés industriels à base d'électrolyse pour sa production en usine.

• La cuve à électrolyse :

La tension aux bornes de la cuve à électrolyse est très basse, comprise généralement entre 3,6V et 4V. La f.c.é.m. théorique est de l'ordre de 1,05V, mais on est obligé de tenir compte des diverses chutes de tension (électrodes, bain électrolytique).

Au contraire, l'intensité du courant électrique est la plus élevée possible ; on arrive à des intensités de l'ordre de 100 000 A.

Pour véhiculer ces intensités énormes il faut choisir des électrodes de grandes surfaces, réfractaires aux températures atteintes, et qui ne font pas intervenir des réactions nuisibles ; de plus elles doivent être faciles à fabriquer et à remplacer. Pour toutes ces raisons les électrodes sont en graphite (carbone).

L'aluminium se rassemble au fond de l'électrolyseur à l'état liquide avec un degré de pureté de l'ordre de 99,9%.



Fig. 19

Galvanotechnique

Le procédé consiste à déposer par électrolyse, sur un objet métallique, un métal différent de façon à en améliorer les propriétés en surface.

On réalise le chromage (dépôt de chrome), le nickelage (dépôt de nickel), le cadmiage (dépôt de cadmium), le zincage (dépôt de zinc), l'étamage (dépôt d'étain) pour augmenter soit la dureté soit la résistance à la corrosion, l'argenture (dépôt d'argent) et la dorure (dépôt d'or) dans un but décoratif.

Les objets n'ont pas besoin d'être métalliques, il suffit qu'ils soient conducteurs ou rendus conducteurs ; l'objet à métalliser constitue la cathode, l'électrolyte est une solution d'un sel du métal à déposer.

C'est ainsi que même des objets en plastique peuvent être dorés ou argentés après les avoir recouverts d'une couche de peinture au graphite qui les rend conducteurs en surface.

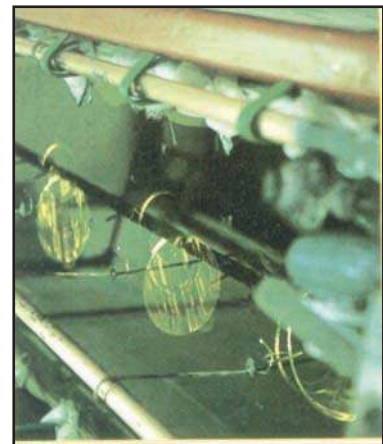
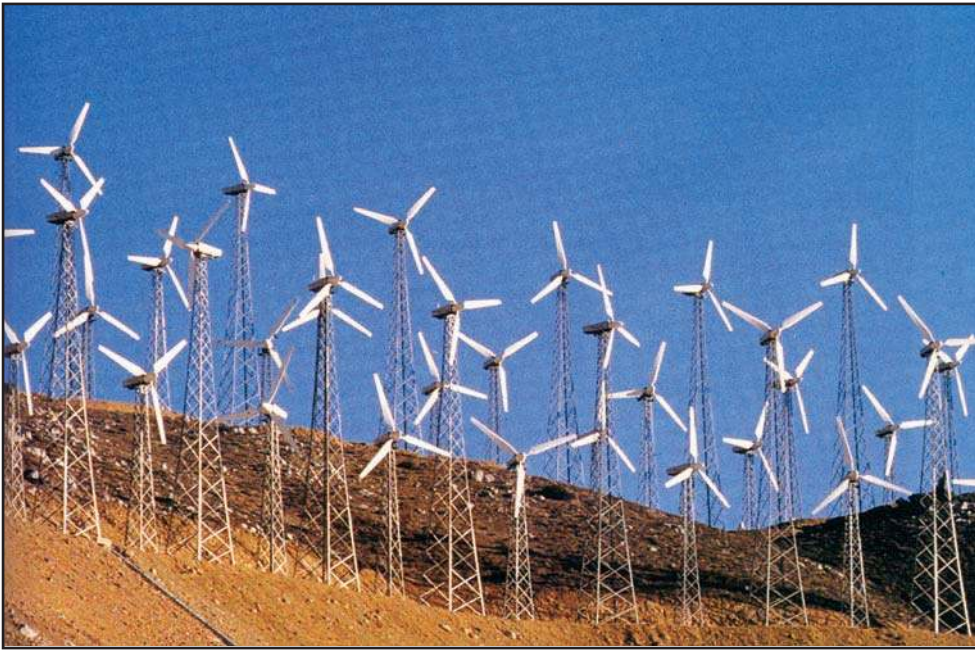


Fig. 20

LE DIPÔLE GENERATEUR



Champ d'éoliennes

Chaque éolienne est un convertisseur de l'énergie mécanique du vent en électricité ; c'est un générateur complet ; comment tous ces générateurs sont-ils associés pour alimenter par un seul câble un ensemble d'habitations ?

OBJECTIFS

- Identifier un dipôle générateur dans un montage ou sur un schéma électrique.
- Réaliser le montage d'étude du dipôle générateur.
- Tracer la caractéristique $U = f(I)$ du dipôle générateur.
- Déterminer graphiquement la f.e.m. et la résistance interne du dipôle générateur.
- Appliquer la loi d'Ohm relative à un dipôle générateur.
- Calculer la puissance utile d'un dipôle générateur.
- Calculer le rendement d'un dipôle générateur.
- Caractériser le générateur équivalent à une association de générateur en série et à une association en parallèle.

1. Définition

Activité 1

Faire l'inventaire des générateurs que l'on rencontre à la maison, dans le laboratoire du lycée ou autre ; donner pour chacun la tension que mesurerait un voltmètre branché à ses bornes en l'absence de tout autre circuit. Rappeler comment on qualifie un tel dipôle ; rappeler comment on appelle la tension «à vide» mesurée entre ses bornes.



Fig. 1

Dipôles générateurs

Activité 2

Quelle est la différence entre la génératrice de bicyclette et la pile d'une lampe de poche ? Utiliser un voltmètre à courant continu (multimètre avec commutateur sur DC) pour mesurer à vide la tension délivrée par la génératrice de bicyclette. Reprendre cette mesure avec une lampe en série avec la génératrice. Comment expliquer que le voltmètre n'indique rien ?

Les générateurs que nous rencontrons autour de nous sont de deux types principaux :

- les générateurs qui font circuler un **courant continu (CC)** dans un circuit : pile, batterie...
- les générateurs qui font circuler un **courant alternatif (AC)** dans un circuit : génératrice de bicyclette, les bornes d'une prise du secteur...

Dans ce qui va suivre nous allons nous intéresser uniquement aux générateurs de courant continu. Rappelons (Fig. 2) le symbole d'un générateur de courant continu.

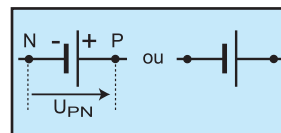


Fig. 2

Pourquoi doit-on souvent changer les piles d'un appareil électrique ? Comment une pile s'use-t-elle ? Quand la génératrice de la bicyclette cesse-t-elle de fournir de l'électricité ? Pourquoi la batterie de la voiture ne peut pas parfois faire démarrer le moteur ?

Ouvrons une pile plate épuisée.

On voit des cylindres de zinc tout rongés qui laissent échapper un liquide.



Fig. 3

Au cours de son fonctionnement la pile a consommé une bonne partie du zinc de ces cylindres dans des réactions chimiques ; il en est de même de la batterie d'accumulateurs où d'autres réactions ont lieu quand la batterie fournit un courant électrique.

Piles et accumulateurs ne sont pas des réservoirs d'énergie électrique mais des réservoirs d'**énergie chimique** qui est convertie en **énergie électrique**.

Pour faire tourner la génératrice de la bicyclette, le cycliste doit exercer des forces plus grandes sur les pédales pour maintenir la même vitesse ; une partie de l'**énergie mécanique** du cycliste est convertie par la génératrice en énergie électrique.

Une alimentation stabilisée ou un chargeur d'accumulateurs est un générateur particulier qui met en jeu la même forme d'énergie, l'énergie électrique, en entrée et en sortie ; seulement un courant alternatif circule en entrée et un courant continu est récupéré en sortie.



Fig. 4

Chargeur d'accumulateurs

Définition

Un **générateur électrique** est un convertisseur d'énergie qui transforme en énergie électrique une autre forme d'énergie.

En courant continu, on appelle **force électromotrice E (f.e.m.)** d'un générateur, la tension positive mesurée entre ses bornes lorsqu'il ne débite aucun courant.

Remarques

- 1- Quand une pile est utilisée, elle devient inutilisable. Elle n'est pas «rechargeable»; on ne doit pas la jeter pour éviter la pollution et se renseigner sur les dispositions locales prises pour leur récupération.
- 2- Les accumulateurs sont «électriquement rechargeables» : les réactions chimiques à la base de leur fonctionnement sont réversibles et on peut régénérer les réactifs consommés quand la pile débite.
- 3- «Rechargeable» ne veut pas dire susceptible d'être rempli de charges électriques mais d'énergie chimique.

2. Caractéristique $U = f(I)$ d'un générateur

2.1- Cas d'une alimentation stabilisée

On donne parfois la définition suivante d'un générateur : **on appelle générateur un dipôle qui maintient entre ses bornes une tension constante.**

Jusqu'à quel point cette définition est-elle vérifiée ?

Réalisons l'expérience de la figure 5 ; on utilise comme générateur une alimentation stabilisée (ou, à défaut, une batterie d'accumulateurs). La tension mesurée à ses bornes lorsque les interrupteurs K_1 et K_2 sont ouverts est égale à sa f.e.m. E .

Fermons l'interrupteur K_1 et laissons K_2 ouvert. (Fig. 6-a)

La lampe s'allume, l'ampèremètre indique une intensité I et le voltmètre la tension U_{PN} ; on constate que $U_{PN} = E$.

Fermons l'interrupteur K_2 et faisons varier la résistance du rhéostat.

Le courant I dans le circuit varie, l'éclat de la lampe est pratiquement le même et le voltmètre indique toujours une tension $U_{PN} = E$. (Fig. 6-b)

L'alimentation stabilisée ou la batterie d'accumulateurs peuvent être considérées comme des **générateurs de tension idéaux**.

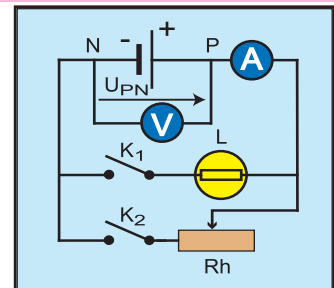


Fig. 5



Fig. 6-a



Fig. 6-b

Définition

Un générateur de tension idéal est un générateur dont la tension aux bornes reste constante et égale à sa f.e.m. E quelle que soit l'intensité qu'il débite.

L'expérience précédente permet de tracer la caractéristique (intensité-tension) du générateur de tension idéal dont l'équation est tout simplement :

$$U_{PN} = E \text{ (constante indépendamment de l'intensité } I)$$

C'est l'équation d'une droite parallèle à l'axe des intensités et qui passe par le point $(0, E)$. **Sa résistance interne est nulle, $r = 0$.**

Le symbole du générateur de tension idéal est représenté à la figure 8.

Il existe un autre type d'alimentations stabilisées que l'on trouve parfois dans les laboratoires, capables de fournir un courant d'intensité constante I_0 quel que soit le récepteur ; la caractéristique (tension-intensité) de ce type de générateur idéal, appelé générateur de courant est représentée ci-contre ; son équation est :

$$I = I_0 \text{ (constant indépendamment de la tension } U_{PN})$$

C'est l'équation d'une droite parallèle à l'axe des tensions et qui passe par le point $(0, I_0)$. **Sa résistance interne est infinie, $r = \infty$.**

Remarque

Le fonctionnement d'un générateur idéal tel que ceux décrits précédemment n'est en fait possible que dans un intervalle limité :

- par une intensité maximale $I_{\max}$ pour le générateur de tension.
- par une tension maximale disponible $U_{\max}$ pour le générateur de courant.

2.2- Cas d'une pile

Reprenons la même expérience en remplaçant l'alimentation stabilisée ou la batterie d'accumulateurs par une pile neuve du commerce : une pile plate de 4,5V par exemple.

- K_1 et K_2 ouverts, on mesure avec le voltmètre $E = 4,52 \text{ V}$.
- K_1 fermé, K_2 ouvert : la lampe brille avec un éclat normal ; on mesure $U_{PN} = 3,6\text{V}$. La tension aux bornes est inférieure à la f.e.m. E (Fig.11-a).
- K_1 et K_2 fermés : la lampe ne brille plus avec son éclat normal ; U_{PN} devient plus faible, et diminue encore davantage à mesure que I augmente (Fig.11-b).

On dit alors que la pile n'est pas un générateur idéal mais un **générateur réel**.

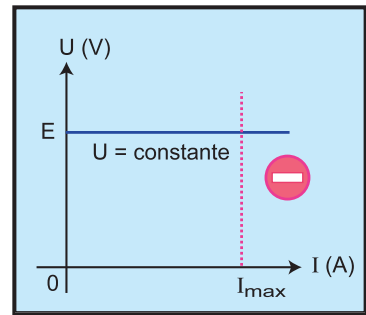


Fig. 7- Caractéristique du générateur idéal

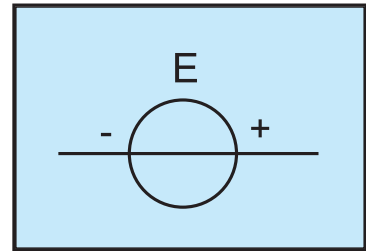


Fig. 8

Symbole du générateur idéal

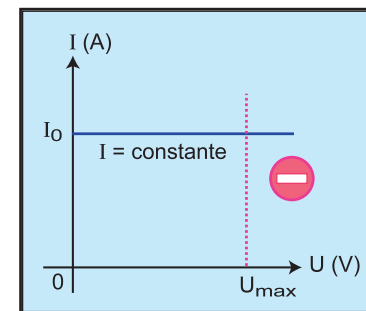


Fig. 9

Caractéristique du générateur de courant

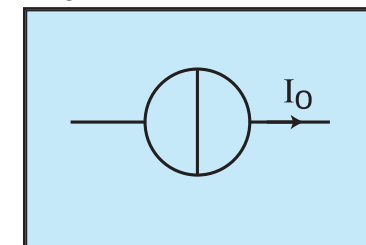


Fig. 10

Symbole du générateur de courant

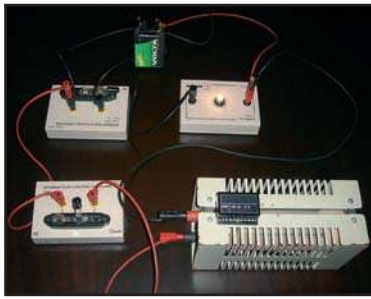


Fig. 11 a

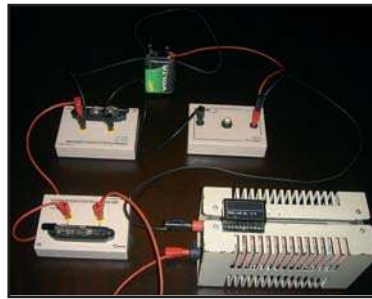


Fig. 11 b

Définition

Un générateur de tension réel est un générateur dont la tension disponible aux bornes U_{PN} est inférieure à la f.e.m. E et diminue quand l'intensité qu'il débite augmente.

Quelle loi régit les variations de la tension aux bornes du générateur réel quand il débite un courant ?

Pour tracer la caractéristique (intensité-tension) d'un générateur réel, nous utilisons le montage habituel déjà utilisé pour tracer la caractéristique du récepteur (fig.12).

Voir la fiche «Activité expérimentale»

Faisons varier l'intensité I , relevons les différentes valeurs de U_{PN} et remplissons le tableau de mesures suivant :

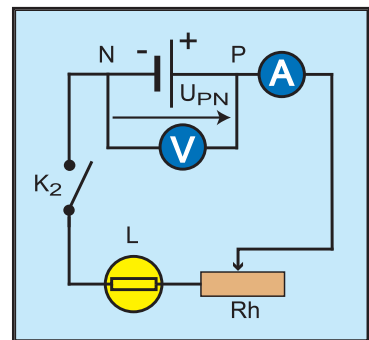


Fig. 12

I (A)									
U_{PN} (V)									

Les points reportés sur un repère (I, U_{PN}) donnent la caractéristique de la figure 13.

On constate que la caractéristique se compose de deux parties distinctes :

- La partie MN est rectiligne et admet comme support une droite affine passant par le point $U_{PN} = E$ et de pente négative $(-a)$.
- La partie NH où la caractéristique n'est plus linéaire et prend l'allure d'une courbe descendant vers $U_{PN} = 0$ V.

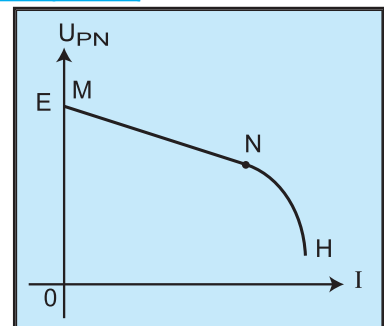


Fig. 13

Activité

Reprendre les mesures pour quelques points dans la partie MN puis dans la partie NH de la caractéristique. Que peut-on dire de la température de la pile quand elle débite pendant une minute dans chaque cas ?

Ecrivons l'équation de la partie **rectiligne** de la caractéristique sous la forme :

$$U_{PN} = -a \cdot I + E$$

a est une constante positive que l'on pourra déterminer graphiquement en utilisant les coordonnées

des points M et N soit : $M \begin{vmatrix} I_1 \\ U_1 \end{vmatrix}$ et $N \begin{vmatrix} I_2 \\ U_2 \end{vmatrix}$; on aura $a = \left| \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \right|$

r est bien homogène à une résistance ; c'est pour cela qu'on l'exprime en ohm et qu'on la note r . C'est la résistance interne du générateur.

La résistance interne des piles ordinaires est comprise entre 0,5 et 3 Ω ; celle d'une batterie d'accumulateurs est de l'ordre de 0,01 Ω . La résistance interne d'une alimentation stabilisée peut descendre à des valeurs encore plus faibles de l'ordre du millième d'ohm.

D'où la loi de variation de la tension aux bornes d'un générateur réel :

$$U_{PN} = E - r \cdot I \quad (1)$$

Un générateur de tension dont la caractéristique est une portion de droite affine est appelé **générateur linéaire**.

Un générateur linéaire est donc caractérisé par deux constantes, sa f.e.m. E et sa résistance interne r , soit (E, r) . On appelle «**chute de tension ohmique**» le produit $r \cdot I$.

Si on prolonge la partie MN de la caractéristique, elle coupe l'axe des intensités en un point de coordonnées $(I_{cc}, 0)$. I_{cc} est l'intensité maximale que le générateur peut débiter dans un circuit extérieur aux bornes duquel on mesure $U_{PN} = 0$. La résistance d'un tel circuit est donc nulle, c'est un **court-circuit** ; l'intensité I_{cc} est appelée : **intensité de court-circuit**.

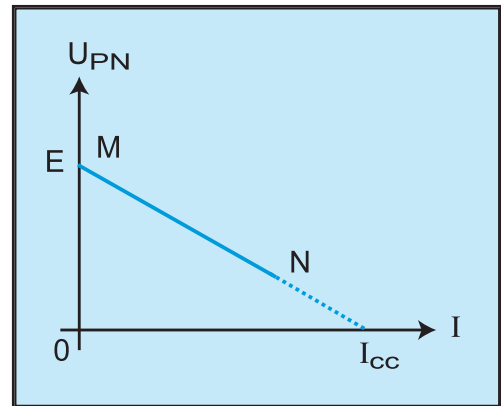


Fig. 14

On peut calculer l'intensité I_{cc} à partir de l'équation (1) en écrivant $U_{PN} = 0$, ce qui équivaut à mettre en court-circuit les bornes du générateur :

$$E - r \cdot I_{cc} = 0 \Rightarrow I_{cc} = \frac{E}{r}$$

⚠ Attention

Dans la pratique, l'intensité I_{cc} ne peut être déterminée que graphiquement (ou par le calcul) car il est **dangereux de court-circuiter un générateur avec un ampèremètre** (dipôle dont la résistance est pratiquement nulle) ; d'autre part, dans les piles ordinaires, si l'intensité débitée devient trop élevée, la caractéristique n'est plus linéaire et la pile chauffe excessivement. Dans ces conditions l'intensité réelle de court-circuit I_{max} est généralement inférieure à I_{cc} .

Application

La f.e.m. d'une batterie d'accumulateurs est $E = 12 \text{ V}$; sa résistance interne r est de l'ordre de 0,01 Ω . Calculer l'intensité du courant de court-circuit théorique ainsi que la tension fournie au démarreur sachant que celui-ci est traversé par une intensité de 80 A.

3. Loi d'Ohm relative à un générateur

Un générateur réel est donc caractérisé par sa force électromotrice (f.e.m.) E et sa résistance interne r ; on peut écrire la relation précédente (1) sous la forme :

$U_{PN} = E - r \cdot I$
(V) (V) (Ω) (A)

La relation précédente est l'expression de la loi d'Ohm relative à un générateur réel.

Enoncé de la loi d'Ohm pour le générateur réel :

La tension mesurée aux bornes d'un générateur réel qui débite une intensité I est égale à sa force électromotrice E diminuée de la chute de tension ohmique $r \cdot I$ dans sa résistance interne r .

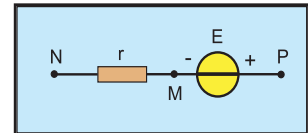


Fig. 15

Appliquée à un générateur idéal la loi d'Ohm devient

$U_{PN} = E$

Ce qui nous amène à considérer le générateur réel comme une association d'un générateur idéal de f.e.m. E en série avec un conducteur ohmique de résistance r ; cela donne le schéma équivalent de la figure ci-contre pour le générateur réel.

Appliquons les règles d'additivité des tensions à cette portion de circuit en utilisant la loi d'Ohm pour le conducteur ohmique ; on retrouve

$U_{PN} = E - r \cdot I$

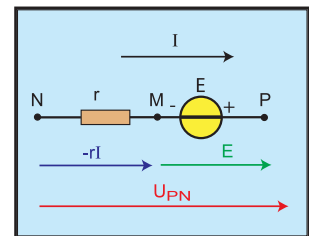


Fig. 16

4. Bilan énergétique d'un générateur réel

Considérons le montage ci-contre ; le générateur est une pile qui fait circuler un courant I dans ce circuit et fait fonctionner un certain nombre de récepteurs : moteur et lampe.

La puissance électrique fournie par le générateur au circuit extérieur est:

$$\mathcal{P}_u = U_{PN} \cdot I \Rightarrow \mathcal{P}_u = E \cdot I - r \cdot I^2$$

$$E \cdot I = \mathcal{P}_u + r \cdot I^2.$$

Durant l'intervalle de temps " Δt secondes", l'égalité précédente s'écrit :

$E \cdot I \cdot \Delta t = \mathcal{P}_u \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \cdot \Delta t$

Cette relation traduit en fait le principe de conservation de l'énergie ; en effet :

$E \cdot I \cdot \Delta t$ est l'énergie électrique totale engendrée par les transformations chimiques qui ont lieu dans la pile (ou par conversion de l'énergie mécanique dans la génératrice) ; cette énergie est égale à la somme de deux termes :

- Le terme $r \cdot I^2 \cdot \Delta t$: c'est l'énergie consommée par effet Joule dans la résistance interne de la pile et responsable de l'élévation de sa température.
- Le terme $\mathcal{P}_u \cdot \Delta t = U_{PN} \cdot I \cdot \Delta t$ correspond à l'énergie du générateur fournie au reste du circuit extérieur. C'est l'énergie utile et le terme $\mathcal{P}_u = U_{PN} \cdot I$ est la puissance utile disponible aux bornes du générateur.

Comme pour les récepteurs actifs, il est intéressant de définir un rendement ρ .

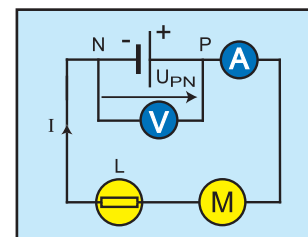


Fig. 17

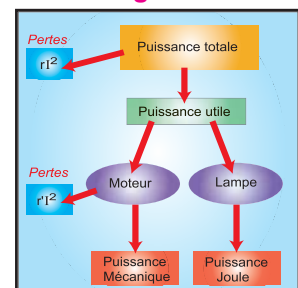


Fig. 18

Diagramme des énergies dans un circuit

Définition

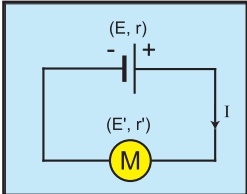
Le rendement ρ d'un générateur qui débite dans un circuit est le rapport de la puissance utile P_u à la puissance totale $E \cdot I$ générée.

$$\rho = \frac{P_u}{E \cdot I} \Rightarrow \rho = \frac{E \cdot I - r \cdot I^2}{E \cdot I} \quad \text{en divisant par } I$$

$$\rho = \frac{E - r \cdot I}{E} = 1 - \frac{r \cdot I}{E}; \quad r \text{ étant positif, on a : } r \cdot I < E \text{ et } \boxed{\rho < 1}$$

Le rendement ρ est un nombre sans unité et, pour le générateur réel, il est toujours inférieur à 1 ; c'est essentiellement la résistance interne qui fait chuter le rendement d'un générateur.

Exercice résolu

Enoncé	Solution
Un générateur (E, r) est branché aux bornes d'un moteur (E', r'). Faire un bilan énergétique et en déduire l'intensité I qui circule dans le circuit. Fig.19  On donne : $E = 12V$; $E' = 9V$; $r = 5\Omega$ et $r' = 10\Omega$.	La puissance fournie par le générateur au reste du circuit c'est-à-dire la puissance disponible est égale à : $P_u = U_{PN} \cdot I = E \cdot I - r \cdot I^2$ La puissance reçue par le moteur est $P_m = U_{AB} \cdot I = E' \cdot I + r' \cdot I^2$ Le principe de conservation de l'énergie impose que la puissance fournie est égale à celle qui est reçue, donc que : $P_u = P_m \text{ d'où : } E \cdot I - r \cdot I^2 = E' \cdot I + r' \cdot I^2 \quad \text{et, en divisant par } I \text{ de part et d'autre:}$ $E - E' = (r + r')I \quad \text{ce qui donne } I = \frac{E - E'}{r + r'}$ Application numérique $I = 0,2A$

5. Association de générateurs

Activité

Comparer une pile plate de f.e.m. 4,5V à une pile ronde de f.e.m. 1,5V. Comment a-t-on obtenu cette tension de 4,5V ? Enlever le carton protecteur d'une pile plate et observer sa structure : Combien y a-t-il d'éléments ? Quelle est la f.e.m. de chacun d'eux ?

Comment sont-ils reliés électriquement ?

Faire un schéma de la pile plate de f.e.m. 4,5V après avoir identifié les pôles positif et négatif de chaque élément.

La pile plate est un dipôle composé de trois dipôles identiques **en série**.

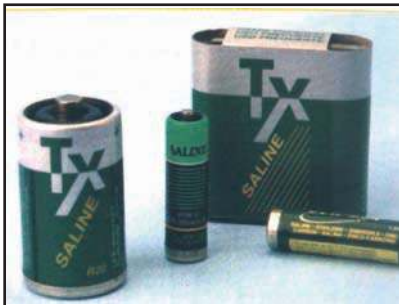


Fig. 20 a

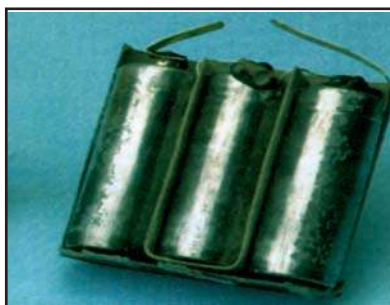


Fig. 20 b

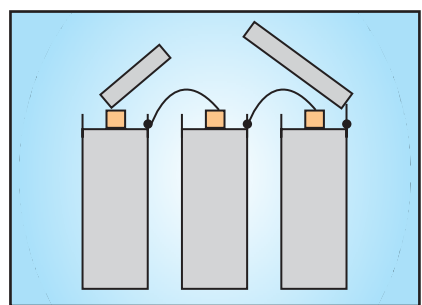


Fig. 20 c

5.1- Association en série

Utilisons deux piles plates dont on a déterminé au préalable les f.e.m. et les résistances internes respectives ; soient : (E_1, r_1) pour la première et (E_2, r_2) pour la deuxième.

Relions ces deux piles plates entre elles **en série** (c'est-à-dire que le pôle positif de la première est relié au pôle négatif de la deuxième). Traçons la caractéristique (intensité-tension) en utilisant le montage ci-contre. Voir la fiche «**Activité expérimentale**» en fin de chapitre.

L'ensemble est un dipôle qui a un seul pôle (+) et un seul pôle (-)

- Interrupteur K ouvert, le voltmètre indique une tension E telle que :

$$E = E_1 + E_2$$

- Interrupteur K fermé ; on fait varier I et on mesure U_{PN} . La caractéristique a la même allure que celle de l'une quelconque des deux piles.

C'est une portion de droite affine qui passe par le point $(0, E)$ avec une pente négative $(-r)$ que l'on peut déterminer graphiquement ; on trouve que :

$$r = r_1 + r_2$$

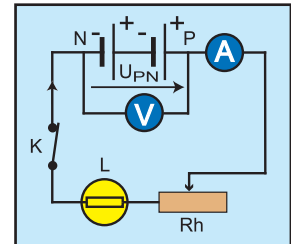


Fig. 21

L'association de deux générateurs (E_1, r_1) et (E_2, r_2) en série est équivalente à un générateur unique (E, r) tel que :

$$E = E_1 + E_2 \quad \text{et} \quad r = r_1 + r_2.$$

Appliquons la loi d'Ohm relative à un générateur à chacune des piles qui sont parcourues par le même courant d'intensité I :

$$U_{BA} = E_1 - r_1 \cdot I \quad \text{et} \quad U_{CB} = E_2 - r_2 \cdot I \Rightarrow U_{CA} = E_1 + E_2 - r_1 \cdot I - r_2 \cdot I$$

$$U_{CA} = (E_1 + E_2) - (r_1 + r_2) \cdot I \quad \text{qui est de la forme} \quad U_{CA} = E - r \cdot I \quad \text{en posant} \\ E = E_1 + E_2 \quad \text{et} \quad r = r_1 + r_2.$$

La puissance disponible aux bornes d'une association série est :

$$\mathcal{P}_u = U_{CA} \cdot I$$

Cette puissance est supérieure à celle fournie par un seul générateur.

On peut généraliser ce résultat au cas d'un nombre quelconque de générateurs montés en série.

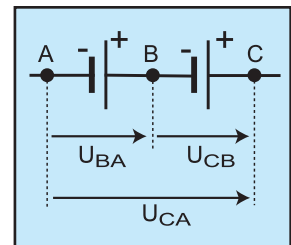


Fig. 22

Généralisation

n générateurs réels associés en série sont équivalents à un générateur unique de f.e.m. E et de résistance interne r tels que :

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \\ r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n$$

Application

Un élément d'accumulateur au plomb ne peut avoir qu'une f.e.m. de 2V environ. Pour obtenir une batterie de 12V, on utilise 6 éléments identiques montés en série. Pour une batterie de 24V (sur les poids lourds) on met en série 12 éléments identiques.

Beaucoup d'appareils électroniques utilisent des tensions d'alimentation multiples de 1,5V, la f.e.m. d'une pile ronde : 3V, 6V, 9V, ... Ces tensions sont obtenues en mettant le nombre correspondant de piles rondes montées en série.



Fig. 23

5.2 Association en parallèle

Considérons uniquement le cas simple où deux générateurs de même f.e.m. E sont branchés en parallèle et dans le même sens : les bornes (+) des deux générateurs sont reliées au même point A et leurs bornes (-) au même point B.

Un voltmètre branché entre A et B indique « à vide » une tension $U_{AB} = E$. A et B sont respectivement la borne (+) et la borne (-) du générateur équivalent à l'association.

Traçons la caractéristique (intensité-tension) de l'ensemble (Voir Activité expérimentale).

La f.e.m. du générateur équivalent est égale à celle commune aux deux générateurs. La caractéristique est une portion de droite affine dont la pente est $(-r)$ différente de $(-r_1)$ et de $(-r_2)$, pentes des caractéristiques des deux générateurs utilisés.

Appliquons la loi d'Ohm pour chaque générateur en supposant que les intensités des courants qui circulent dans chaque branche sont différentes :

$$U_{AB} = E - r_1 \cdot I_1 \quad \text{et} \quad U_{AB} = E - r_2 \cdot I_2$$

$$I_1 = \frac{E - U_{AB}}{r_1} \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{E - U_{AB}}{r_2}$$

La loi des noeuds appliquée en A :

$$I = I_1 + I_2 ; \quad \text{soit} \quad I = \frac{E - U_{AB}}{r_1} + \frac{E - U_{AB}}{r_2} = (E - U_{AB}) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

On pose : $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$ On aura tout calcul fait : $U_{AB} = E - r \cdot I$

En calculant r et en comparant $(-r)$ avec la pente de la caractéristique, on trouve qu'elles sont égales.

L'expression précédente est donc bien celle de la loi d'Ohm écrite pour le générateur équivalent dont les grandeurs caractéristiques sont (E, r) .

On peut généraliser ce résultat à n générateurs de même f.e.m. E branchés en parallèle.

Le dipôle équivalent à n générateurs de f.e.m. identiques E montés en parallèle est un dipôle générateur dont la f.e.m. est égale à E et la résistance interne r égale à la résistance équivalente à toutes les résistances internes branchées en parallèle.

Le principal intérêt de cette association est d'obtenir, à partir d'un ensemble de générateurs identiques, un générateur équivalent de même f.e.m. mais de résistance interne plus faible ; cela permet d'avoir des intensités plus élevées dans un circuit extérieur.

Activité

Montrer que pour une même intensité de courant débitée dans un circuit extérieur, le rendement énergétique de ce type d'association est supérieur à celui d'un seul générateur.

5.3 Générateurs en opposition

Activité

Observer comment une batterie de voiture est branchée aux bornes d'un chargeur de batterie ; est-elle placée en série dans le circuit ou en parallèle ? A quelle borne du chargeur est reliée la borne (+) de la batterie pour que la charge se déroule normalement ?

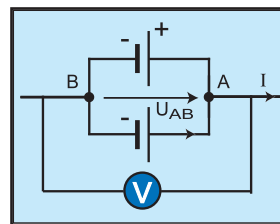


Fig. 24

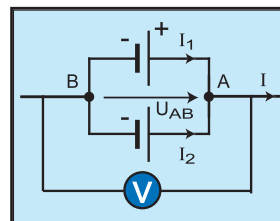


Fig. 25



Fig. 26

Station de charge de voiture électrique

Montons deux piles plates neuves de même f.e.m. $E = 4,5 \text{ V}$ comme indiqué sur la figure 27. Mesurons la tension «à vide» (entre les bornes laissées libres). Elle est pratiquement nulle.

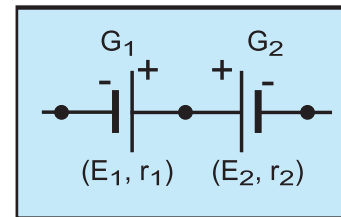


Fig. 27

Refaisons le même montage avec une pile plate neuve (G_1) de f.e.m. $E_1 = 4,5 \text{ V}$ et une pile plate usagée (G_2) dont la f.e.m. est plus faible ($E_2 = 3,5 \text{ V}$ par exemple). Mesurons la tension entre les bornes libres.

Le voltmètre indique une tension de l'ordre de 1 V . Si on ferme le circuit sur un rhéostat et un ampèremètre, celui-ci indique le passage d'un courant qui traverse (G_2) de sa borne (+) vers sa borne (-). C'est donc (G_1) qui a imposé le sens du courant dans le circuit.

Deux générateurs sont dits montés en opposition quand ils sont reliés entre eux en série par des pôles de même signe.

La f.e.m. E de l'association de deux générateurs (E_1, r_1) et (E_2, r_2) en opposition est :

$$E = |E_1 - E_2|$$

Le sens du courant dans le circuit extérieur est imposé par le générateur qui a la plus grande f.e.m.

Réalisons le circuit de la figure 28 en utilisant une alimentation stabilisée (G_1) et une «pile rechargeable» (G_2) de f.e.m. E et de résistance interne r .

Le rhéostat permet de protéger la pile contre les valeurs excessives de l'intensité. La diode D protège l'alimentation des inversions de courant.

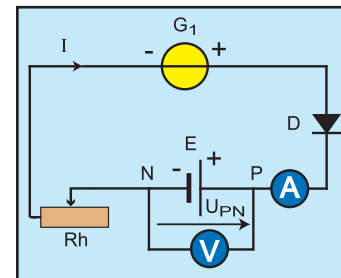


Fig. 28

Une intensité I ne peut circuler dans ce circuit que lorsque l'alimentation stabilisée délivre une tension $U_{PN} > E$.

Le relevé de quelques couples de valeurs (I, U_{PN}) permet de tracer la caractéristique du dipôle (G_2).

L'allure de cette caractéristique rappelle celle d'un récepteur actif : c'est une portion de droite affine d'équation $U_{PN} = E' + r' \cdot I$.

La détermination graphique de E' et de r' aboutit aux résultats suivants :

$$E' = E \quad \text{et} \quad r' = r.$$

Un générateur (E, r) , monté en opposition et traversé par un courant allant de sa borne (+) vers sa borne (-), se comporte comme un récepteur actif dont la f.c.e.m. est égale à E et dont la résistance interne est r .

Le bilan énergétique s'établit comme suit pour le générateur en opposition :

La puissance consommée par le générateur fonctionnant en récepteur est : $\mathcal{P} = U_{PN} \cdot I \Rightarrow \mathcal{P} = E \cdot I + r \cdot I^2$;
d'où l'énergie consommée durant Δt : $\mathcal{P} \Delta t = E \cdot I \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \Delta t$

C'est la somme de deux termes :

- l'énergie Joule ($r \cdot I^2 \Delta t$) qui élève la température du générateur en charge et se perd dans le milieu environnant ;
- le produit ($E \cdot I \Delta t$) qui correspond à l'énergie électrique transformée dans le générateur en énergie chimique par régénération des réactifs des réactions. C'est l'énergie de recharge de la batterie ou de la pile rechargeable ; elle s'exprime en joules (J).

Comme la f.e.m. est une constante pour la batterie (12V par exemple) la charge de la batterie est souvent donnée par le produit $(I \Delta t)$ exprimé en unité de quantité d'électricité : coulomb (C) ou ampère-heure(A.h). Cette dernière unité est la plus en usage.

Activité expérimentale

Objectifs

- Schématiser et réaliser le montage d'étude d'un générateur réel.
- Tracer la caractéristique intensité-tension d'un générateur réel.
- Déterminer graphiquement la f.e.m. E d'un générateur réel.
- Déterminer graphiquement la résistance interne r d'un générateur réel.
- Déterminer les grandeurs (r et E) du générateur équivalent à une association en série, en opposition et en parallèle.

Matériel

- Une pile usagée et deux piles neuves (type plate 4,5V)
- Un voltmètre ordinaire, un voltmètre numérique (résistance interne élevée), un ampèremètre, une alimentation stabilisée, un interrupteur, des fils de connexion et un rhéostat.
- Des feuilles de papier millimétré.

Manipulation

1. Mesurer «à vide» les forces électromotrices des piles et les comparer ; faire les mesures avec les deux voltmètres. Vérifier s'il y a des différences notables.
2. Schématiser et réaliser le montage d'étude (tracé de caractéristique) pour le dipôle générateur.
3. Utiliser comme dipôle générateur l'alimentation stabilisée réglée sur 4,5V. Déterminer la f.e.m. et la résistance interne de ce générateur.
4. Remplacer l'alimentation stabilisée par l'une des piles neuves ; déterminer graphiquement la f.e.m. , la résistance interne de ce générateur et l'intensité du courant de court-circuit I_{cc} .
5. Caractériser à partir d'un nombre limité de mesures (2 ou 3) et en appliquant la loi d'Ohm relative au générateur les deux autres piles. L'usure de la pile a-t-elle une influence sur sa f.e.m. seulement ?
6. Vérifier les lois d'associations en série et en parallèle des générateurs.
7. Déterminer au voltmètre la f.e.m. du générateur équivalent d'une association en série dans le cas où l'un des générateurs est en opposition par rapport aux autres ; réaliser au moins deux combinaisons possibles. Comment circulerait le courant dans chaque cas si on fermait le circuit sur un résistor (rhéostat) ? Vérifier la réponse en fermant très brièvement le circuit avec l'interrupteur.

Ces piles n'étant pas rechargeables, il n'est pas recommandé de les faire fonctionner en récepteur (donc les charger) pendant plusieurs minutes : il y a risque d'explosion par accumulation de gaz d'électrolyse.

Un générateur électrique est un convertisseur d'énergie qui transforme en énergie électrique une autre forme d'énergie.

On appelle **force électromotrice E (f.e.m.)** d'un générateur électrique, la tension positive mesurée entre ses bornes lorsqu'il ne débite aucun courant.

Un générateur idéal est un générateur dont la tension aux bornes reste constante et égale à sa f.e.m. E quelle que soit l'intensité qu'il débite.

Un générateur réel est un générateur dont la tension disponible aux bornes U_{PN} est inférieure à la f.e.m. E et diminue quand l'intensité qu'il débite augmente.

$$U_{PN} = E - r \cdot I$$

Un générateur réel est caractérisé par sa force électromotrice (f.e.m.) E et sa résistance interne r.

Enoncé de la loi d'Ohm pour le générateur réel :

La tension U_{PN} mesurée aux bornes d'un générateur réel qui débite une intensité I est égale à sa force électromotrice E diminuée de la chute de tension ohmique $r \cdot I$ dans sa résistance interne r.

$$\begin{array}{ccccc} U_{PN} & = & E & - & r \cdot I \\ (V) & & (V) & & (\Omega) (A) \end{array}$$

L'énergie électrique disponible $\mathcal{P}_u \cdot \Delta t$ entre les bornes d'un générateur durant un intervalle de temps Δt est égale à l'énergie électrique totale convertie $E \cdot I \cdot \Delta t$ diminuée des pertes par effet Joule dans la résistance interne $r \cdot I^2 \cdot \Delta t$ soit :

$$\mathcal{P}_u \cdot \Delta t = E \cdot I \cdot \Delta t - r \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

Lois d'association :

• n générateurs réels (E_i, r_i) associés en série sont équivalents à un générateur unique de f.e.m. E et de résistance interne r tels que :

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \\ r &= r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n \end{aligned}$$

Les pôles (+) et (-) du générateur équivalent correspondent aux pôles libres du premier et du dernier générateur de l'association.

• Le dipôle équivalent à n générateurs de f.e.m. identiques E montés en parallèle est un dipôle générateur dont la f.e.m. est égale à E et la résistance interne r égale à la résistance équivalente à toutes les résistances internes branchées en parallèle.

Le pôle (+) et le pôle (-) du générateur équivalent correspondent à ceux des générateurs.

• Un générateur (**E, r**) monté en opposition se comporte comme un **récepteur** actif dont la **f.c.é.m.** est égale à E et dont la résistance interne est r.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1. Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

- La puissance Joule perdue dans un générateur (E,r) est $r.I^2$
- Le rendement d'un générateur idéal de tension est 100%
- Le rendement d'un générateur réel est :

$$\rho = 1 - \frac{r.I}{E}$$

- La tension aux bornes d'un générateur réel de tension est égale à sa f.e.m. E quelle que soit l'intensité du courant qu'il fournit.
- L'association de plusieurs générateurs en série est toujours équivalente à un générateur.
- Pour associer en série deux générateurs on relie le pôle (+) de l'un au pôle (+) de l'autre.
- Quand deux générateurs sont montés en opposition, la f.e.m. du générateur équivalent est égale à la plus grande des deux f.e.m.
- Une pile ordinaire est un générateur rechargeable.
- Un accumulateur est un générateur rechargeable.
- La résistance interne du générateur équivalent à l'association en parallèle de 3 générateurs identiques est plus grande que celle de l'un d'eux.

Je sais appliquer le cours

2. Ecrire la loi d'Ohm pour le générateur réel en précisant la signification des constantes et leurs unités.
3. Sachant que lorsqu'une pile s'use, c'est surtout sa résistance interne qui augmente, peut-on faire un diagnostic correct sur l'état d'une pile à l'aide d'un voltmètre ? Justifier.
4. Quelle est la forme de l'énergie convertie en électricité par les générateurs suivants : une pile ; une batterie d'accumulateurs ; une génératrice de vélo ; un panneau photovoltaïque.
5. Schématiser le montage qui permet de tracer la caractéristique (intensité-tension) d'un générateur.
6. Indiquer sur un même graphique l'allure des caractéristiques des dipôles suivants : générateur de tension constante ; pile ; générateur de courant constant ; batterie en charge.
7. Indiquer dans chacun des cas suivants le dipôle actif possédant la plus grande f.e.m. et la plus grande résistance interne :

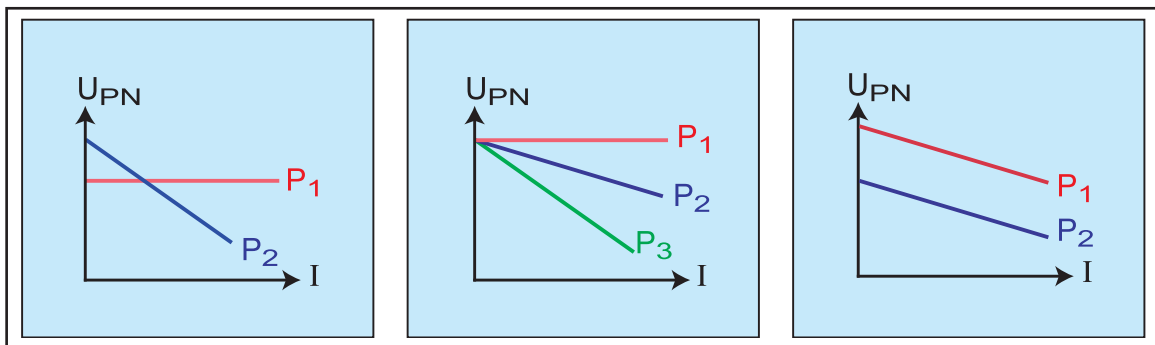


Fig. 29

8. La caractéristique d'une pile est $U_{PN} = 4,5 - 2,5 I$ (U_{PN} en V et I en A). Déterminer la f.e.m. E et la résistance interne r de cette pile. Calculer l'intensité de court-circuit. Donner l'allure de la caractéristique.

9. On a représenté ci-contre le tracé de la caractéristique d'une pile non utilisée depuis quelques mois.

9.1-Quelle est la tension aux bornes de cette pile lorsqu'elle ne débite pas ?

9.2-Pour $0,3A < I < 0,8A$, on peut considérer la pile comme un générateur linéaire. Déterminer l'équation de sa caractéristique, sa f.e.m. E et sa résistance interne r .

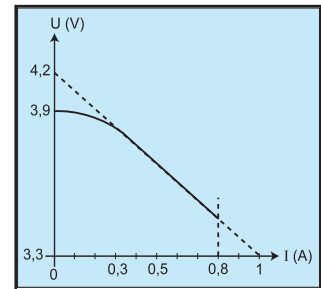


Fig. 30

10. L'étude expérimentale d'une pile a montré que sa caractéristique est rectiligne dans un certain domaine d'intensité. On a relevé dans ce domaine deux couples de valeurs : (100mA ;4,35V) et (500mA ;3,95V).

10.1-Tracer la caractéristique intensité-tension de cette pile.

10.2-Déterminer sa f.e.m. E , sa résistance interne r et l'intensité théorique de court-circuit I_{cc} .

11. Une pile fournit à un circuit extérieur branché entre ses bornes une puissance utile égale à 1,125W. La puissance dissipée par effet Joule dans la pile est 0,175W.

11.1- Calculer la puissance électrique convertie à partir de l'énergie chimique.

11.2- Quel est le rendement de cette pile ?

12. Une batterie d'accumulateurs au plomb a une f.e.m. $E = 12V$ et une résistance interne $r = 0,04\Omega$. Sur l'étiquette on lit «capacité 200 A.h» ; c'est la quantité d'électricité totale Q qu'elle peut débiter exprimée en ampère.heure (A.h).

12.1- Le conducteur a oublié ses phares allumés ; l'intensité débitée alors est $I = 10A$. Calculer la durée au bout de laquelle la « capacité » de la batterie n'est plus que de 90% de sa valeur initiale.

12.2- Calculer l'énergie chimique convertie pendant cette durée ainsi que l'énergie dissipée par effet joule dans la batterie.

12.3- Quel est le rendement de cette batterie ?

13. On associe en série cinq piles rechargeables identiques en vue de réaliser un générateur unique de f.e.m. de l'ordre de 6V. La mesure de la tension « à vide » de l'association avec un voltmètre numérique donne une f.e.m. de 3,78V seulement. Il s'est avéré que l'une des piles était mal branchée. Faire un schéma clair et donner une explication à ce résultat. Déterminer ensuite la f.e.m. de chacune de ces piles ainsi que celle de l'association correctement réalisée.

14. La batterie d'une voiture a une f.e.m. $E = 12V$. Sa capacité à pleine charge est $Q = 150A.h$. Pour faire démarrer le moteur la batterie fournit au démarreur une intensité $I=80 A$ durant 5 s (durée d'un coup de démarreur).

14.1 - On suppose négligeable la résistance interne de la batterie. Combien de coups de démarreur on peut effectuer sans recharger la batterie ?

14.2 - Quelle est la puissance reçue par le démarreur à chaque démarrage ?

14.3 - La résistance interne de la batterie est en réalité égale à $0,01\Omega$; la f.c.e.m. E' du démarreur est de l'ordre de 10,2V et sa résistance interne est $r = 0,015\Omega$. Montrer en appliquant la loi d'Ohm respectivement au générateur et au récepteur actif que l'on peut calculer l'intensité I fournie par la batterie.

14.4 - Quel est alors le rendement global de l'ensemble démarreur-batterie en considérant comme puissance utile celle mécanique fournie au moteur.

Les générateurs photovoltaïques

Ce sont des générateurs qui convertissent directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Un module photovoltaïque est généralement constitué d'un grand nombre de cellules fabriquées en silicium appelées chacune photopile. Une cellule se présente sous forme d'une petite plaquette circulaire le plus souvent de quelques centimètres carré et de faible épaisseur (0,2 à 0,3 mm).

Chaque cellule est métallisée sur sa face arrière et comporte une grille métallique sur sa face exposée au rayonnement : ce sont les deux pôles de la cellule. La coloration bleutée que l'on voit est due à une couche antiréfléchissante qui recouvre la face exposée au soleil pour augmenter le rendement de la cellule.

Une cellule de 5,7 cm de diamètre peut fournir par exemple 0,7A sous 0,4V.

Pour obtenir des générateurs photovoltaïques avec des tensions d'utilisation standard, on regroupe les cellules en panneaux de plusieurs mètres carré de surface comportant des centaines de cellules individuelles. Toutes ces cellules sont reliées entre elles en série (30 pour faire 12V par exemple) et les séries sont à leur tour mises en parallèle pour avoir un ampérage important (10 séries pour fournir 7A par exemple).

Comme on le voit, Fig.32 le rendement est encore très faible, il reste autour de 15% dans le meilleur des cas sans compter que le coût de production est très élevé.

Malgré le coût de ces panneaux, l'investissement est amorti au bout de quelques années d'utilisation du fait que l'énergie convertie en électricité est gratuite, non polluante et renouvelable.

C'est une technique appelée à se développer à l'avenir car les recherches de nouveaux matériaux et techniques de fabrication qui visent à améliorer le rendement de ces panneaux et à les rendre moins onéreux continuent dans beaucoup de laboratoires.

L'utilisation de ces panneaux solaires se justifie souvent lorsqu'il faut électrifier des sites isolés (désert, hautes montagnes, mer, île...) ou pour équiper les satellites et les stations spatiales. Citons un exemple de réalisation de station solaire puissante : le générateur solaire de l'hôpital de San au Mali dont la puissance électrique est de l'ordre de 9,5 kW.

Exemples :

- Le pompage de l'eau dans des zones arides subsahariennes avec des « pompes solaires »
- La réfrigération (en priorité dans les hôpitaux et dispensaires isolés pour la conservation des vaccins et médicaments) ;
- Les balises de signalisation maritime ancrées en haute mer
- Les téléphones de secours au bord de certaines autoroutes
- Les stations météorologiques entièrement automatiques basées en montagne, en mer ou en plein désert et qui émettent régulièrement les données recueillies aux satellites météo...

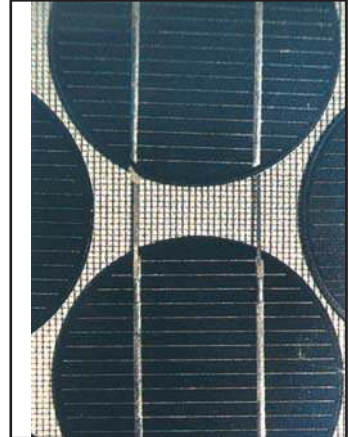


Fig. 31

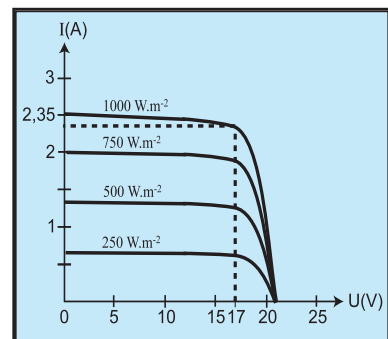


Fig. 32

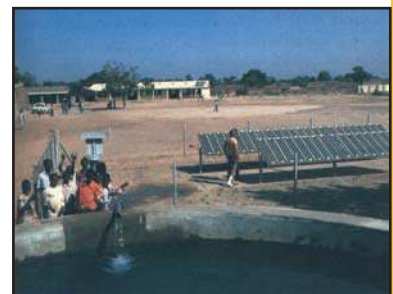


Fig. 33

Station de pompage d'eau en Afrique

ADAPTATION : LOI DE POUILLET

CHAPITRE

7



Chacune de ces lampes est un récepteur passif que l'on peut associer avec l'un de ces générateurs. Toutes les associations sont-elles possibles ? Toutes les associations possibles donnent-elles un fonctionnement satisfaisant de la lampe ?

OBJECTIFS

- Déterminer graphiquement le point de fonctionnement d'un circuit constitué d'un générateur et d'un récepteur.
- Appliquer la loi de Pouillet pour la détermination de l'intensité du courant qui circule dans un circuit comportant des générateurs et des récepteurs montés en série.
- Résoudre un problème d'adaptation entre un générateur et un récepteur par la méthode graphique.
- Résoudre un problème d'adaptation entre un générateur et un récepteur en appliquant la loi de Pouillet.

Situation

Le branchement d'un dipôle passif aux bornes d'un générateur est la première étape de la réalisation du circuit électrique le plus simple.

Est-il possible de prévoir la valeur de l'intensité I du courant quand on associe un générateur de grandeurs caractéristiques connues et un dipôle passif donné ? Cela présente-t-il un intérêt quelconque ?

Pour répondre à ces questions, est-il raisonnablement envisageable de recourir à l'expérience pour connaître I ?

En effet, comment être sûr que ce dipôle va fonctionner normalement quand il est branché aux bornes du générateur ? Au cas où il fonctionnerait, comment être sûr que, ni le générateur, ni le dipôle, ne courent le risque de « griller » dans les minutes qui suivent ?

1. Point de fonctionnement d'un circuit

Considérons le cas le plus simple de l'association d'un dipôle générateur (E, r) et d'un dipôle récepteur passif, une lampe à incandescence par exemple.

Au départ la situation est celle de la figure 1-a ; une fois les dipôles reliés électriquement on a la situation de la figure 1-b.

Les deux dipôles sont parcourus par un même courant d'intensité I ; si on admet que dans les fils de jonction les chutes de tensions sont négligeables, on peut également affirmer que les deux dipôles ont la même tension entre leurs bornes respectives.

$$U_{PN} = U_{AB} = U$$

Le couple de valeurs (I, U) correspond à un état de fonctionnement du générateur donc à un point de fonctionnement de ce dernier ; le même couple de valeurs correspond à un état de fonctionnement de la lampe et donc à un point de fonctionnement de cette dernière.

Les deux dipôles associés étant donnés, on n'obtient qu'un seul état de fonctionnement possible du circuit caractérisé par le couple de valeurs commun (I, U) appelé **point de fonctionnement du circuit**.

Le problème que l'on se pose est donc : par quelle méthode déterminer le point de fonctionnement d'un circuit ?

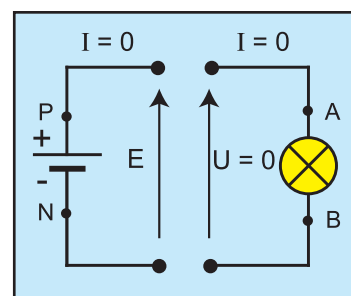


Fig. 1-a

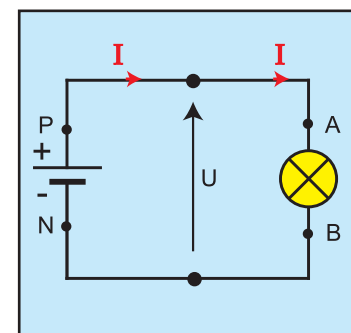


Fig. 1-b

2. Méthode graphique

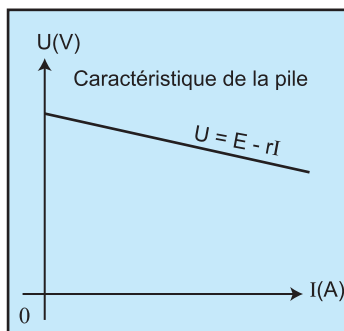


Fig. 2-a

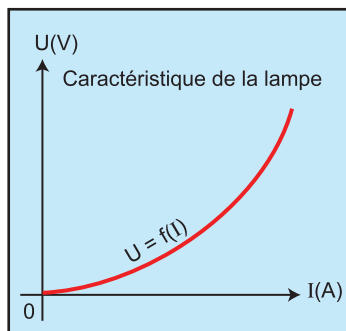


Fig. 2-b

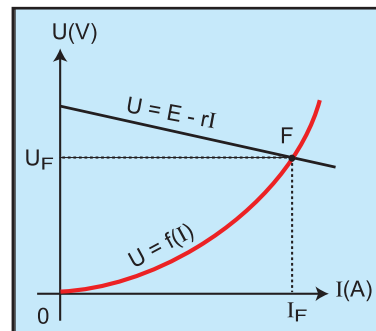


Fig. 2-c

On commence par tracer la caractéristique de chacun des dipôles (Fig 2a,b) précédents au cas où elles ne sont pas connues. Reportons-les dans le même repère cartésien (Fig2c).

Le point de fonctionnement du circuit F (I,U) est à la fois un point de fonctionnement du générateur et un point de fonctionnement de la lampe ; il appartient donc à chacune des caractéristiques donc à leur **intersection**.

La détermination des coordonnées du point F se fait par simple lecture ; si le tracé des courbes est fait avec soin cette détermination peut être très précise ; on trouve par exemple : $I = 0,25A$ et $U = 4,2V$

Il est possible maintenant de procéder à un branchement de la lampe sur le générateur puisque l'on s'est assuré que les valeurs de l'intensité et de la tension du point de fonctionnement se trouvent dans l'intervalle de fonctionnement normal à la fois pour la lampe et pour le générateur.

Vérifions expérimentalement les valeurs trouvées en réalisant le circuit dans lequel on a inséré les appareils de mesures (Fig.3).

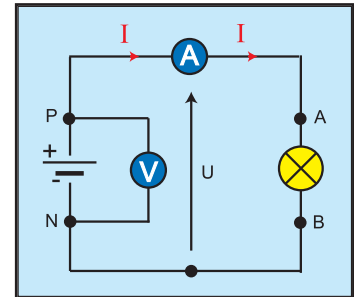


Fig. 3

3. Méthode analytique

Reprenons le circuit précédent et remplaçons la lampe par un conducteur ohmique de résistance R. On sait que la tension U_{AB} aux bornes d'un tel dipôle est telle que :

$$U_{AB} = R \cdot I_{AB} \text{ conformément à la Loi d'Ohm.}$$

3.1- Cas du générateur idéal

Le générateur idéal de tension est un générateur qui maintient entre ses bornes une tension constante égale à sa f.e.m. E. Relions le résistor à un générateur idéal de tension.

On aura donc : $U_{AB} = E$ d'où $E = R \cdot I_{AB}$; ce qui donne $I = I_{AB} = \frac{E}{R}$

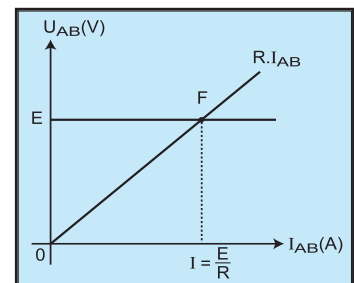


Fig. 4

Le couple de valeurs correspondant au point de fonctionnement du circuit sera donc $(\frac{E}{R}, E)$. La figure 4 montre l'intersection des caractéristiques correspondantes.

Il suffit donc de connaître la f.e.m. du générateur et la résistance du conducteur ohmique pour prévoir l'intensité I et la calculer. La tension est imposée par le générateur ; on peut réaliser pratiquement le circuit correspondant en utilisant une alimentation stabilisée. On choisit la tension et on calcule l'intensité.

Le **générateur de courant** est un générateur qui maintient dans un circuit extérieur un courant d'une intensité constante. On peut donc ici imposer une valeur de l'intensité I_0 et calculer la tension de fonctionnement en utilisant la loi d'Ohm. La figure 5 montre l'intersection des caractéristiques correspondantes.

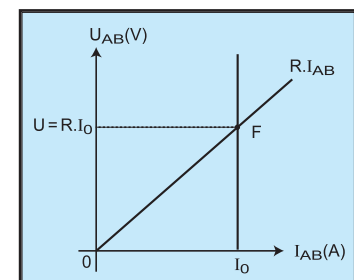


Fig. 5

$$I_{AB} = I_0 \quad \text{avec} \quad U_{AB} = R \cdot I_{AB} \quad \text{d'où} \quad U = R \cdot I_0$$

Le couple de valeurs correspondant au point de fonctionnement du circuit sera $(I_0, R \cdot I_0)$.

Activité

Comment procéder pour déterminer les coordonnées du point de fonctionnement F lorsque le dipôle utilisé ne suit pas la loi d'Ohm ?

3.2- Cas du générateur réel

Dans le cas du générateur réel, on suppose pour simplifier que ce dernier est linéaire dans le domaine de fonctionnement normal et que l'équation de sa caractéristique est de la forme

$$U_{PN} = E - r \cdot I_{NP}$$

Quand on relie les deux dipôles entre eux, on aura $U_{AB} = U_{PN} = U$

En écrivant la loi d'Ohm pour les deux dipôles on obtient :

$$R \cdot I_{AB} = E - r \cdot I_{NP} \quad \text{or} \quad I_{AB} = I_{NP} = I$$

$$\text{D'où } E = (r + R)I \Rightarrow \boxed{I = \frac{E}{r + R}} \quad \text{et } U = R \cdot I \text{ donne } \boxed{U = \frac{R}{R + r} E}$$

3.3- Bilan énergétique

Avec l'une ou l'autre méthode on aboutit à un couple de valeurs (I,U) unique commun aux dipôles associés.

Le générateur fournit de l'énergie électrique avec une puissance utile $\mathcal{P}_u = U \cdot I$

Le récepteur consomme de l'énergie électrique avec une puissance $\mathcal{P}_e = U \cdot I$

On a $\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_u$

Plusieurs situations peuvent alors se présenter selon la capacité de chaque dipôle de fournir cette puissance électrique ou de la consommer sans dommages.

En effet, le générateur peut très bien fournir une puissance électrique (U.I) sans dommages mais cette même puissance peut faire fondre le récepteur branché. Le récepteur se trouve en dehors de son domaine de fonctionnement normal.

Réciproquement, le récepteur peut être en mesure de consommer la puissance (U.I) sans dommages mais le générateur est incapable de la fournir. Le générateur se trouve alors en dehors de son domaine de fonctionnement normal.

Dans l'un ou l'autre cas, on dit que les dipôles associés ne sont pas adaptés.

4. Résoudre un problème d'adaptation

Une fois que le point de fonctionnement du circuit a été déterminé par l'une ou l'autre des deux méthodes, les questions qui se posent sont maintenant :

- Le couple de valeurs (I,U) trouvé correspond-il à un point de fonctionnement **normal** du générateur ?
- Le couple de valeurs (I,U) trouvé correspond-il à un point de fonctionnement **normal** du récepteur ?

Activité 1

Un générateur de f.e.m. $E = 12\text{V}$ et de résistance interne $r = 30\ \Omega$ est mis en série avec un résistor de résistance $470\ \Omega$. La puissance maximale pouvant être dissipée dans le résistor est $0,5\text{ W}$. Calculer le point de fonctionnement du circuit. Le fonctionnement de chacun des deux dipôles associés est-il normal ?

Activité 2

Un générateur ($E = 12\text{V}$; $r = 8\Omega$) est branché aux bornes d'une lampe à incandescence dont la caractéristique est donnée (Fig.6). Sur le culot de la lampe, le fabricant indique la puissance et l'intensité nominales : 21W- 2A. Déterminer le point de fonctionnement. Le fonctionnement de chacun des deux dipôles associés est-il normal ?

Lorsque le point de fonctionnement (I, U), d'un circuit constitué d'un générateur et d'un récepteur mis en série, appartient au domaine de fonctionnement **normal** respectivement de chacun des deux dipôles, on dit que les deux dipôles associés sont **adaptés** ou que l'**adaptation** entre eux est réalisée.

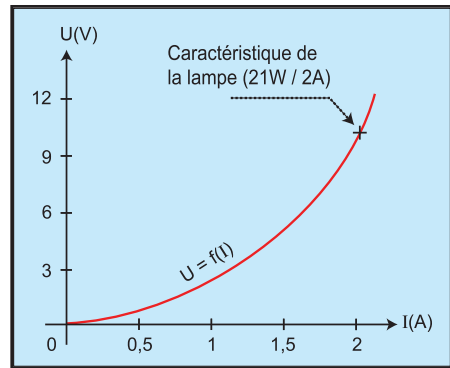


Fig. 6

La recherche du point de fonctionnement en utilisant la méthode analytique est possible seulement lorsque les deux dipôles associés sont de type linéaire. L'application des lois du courant continu aboutissent à un système de deux équations du premier degré à deux inconnues (I et U) que l'on peut résoudre sans difficulté.

Dans tous les autres cas, et en raison de la complexité des fonctions $U = f(I)$ caractéristiques des dipôles non linéaires, les équations obtenues en appliquant les lois du courant continu ne sont plus du premier degré et les calculs sont beaucoup plus difficiles ; seule la méthode graphique permet de déterminer facilement le point de fonctionnement et de vérifier que les deux dipôles associés sont adaptés.

Activité 3

Expliquer ce qui se passerait quand une lampe marquée 220V est branchée sur une prise de 110V. Expliquer ce qui se passerait quand une lampe marquée 110V est branchée sur une prise de 220V.

5. Loi de Pouillet

Réalisons le circuit de la figure 7 comprenant un générateur (E, r), un moteur (E', r') et un conducteur ohmique de résistance R .

Les tensions aux bornes des différents dipôles ne pouvant plus être les mêmes, il n'est plus possible de superposer leurs caractéristiques pour trouver un point d'intersection et connaître I .

La méthode analytique est la seule utilisable dans ce cas, les trois dipôles étant linéaires. L'exercice suivant en fournit un exemple d'application.

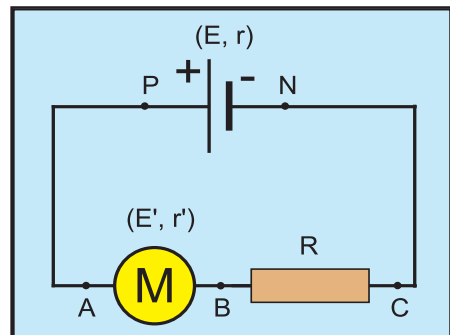


Fig. 7

Exercice résolu

Enoncé	Solution
Calculer l'intensité du courant qui circulerait dans le circuit de la figure 7 avec les données numériques suivantes : $E = 12V$; $r = 5\Omega$; $E' = 6V$; $r' = 2\Omega$; $R = 3\Omega$.	Soit I l'intensité du courant qui circulerait dans ce circuit une fois fermé. On applique la loi d'Ohm pour chacun des dipôles successivement : Pour un générateur on a : $U_{PN} = E - r \cdot I$ Pour le récepteur actif on a : $U_{AB} = E' + r' \cdot I$ Pour le récepteur passif on a : $U_{BC} = R \cdot I$ On applique la loi des mailles : $U_{PN} = U_{AB} + U_{BC}$ En remplaçant on aura : $E - r \cdot I = E' + r' \cdot I + R \cdot I$ En regroupant les termes : $E - E' = (r + r' + R)I$ d'où l'intensité $I = \frac{E - E'}{r + r' + R}$; A.N. $I = 0,6 A$

La relation $I = \frac{E - E'}{r + r' + R}$ est l'expression d'une loi, dite **Loi de Pouillet**, qui régit les circuits électriques constitués uniquement de dipôles linéaires associés en série.

Activité 1

Se donner un circuit comportant un certain nombre de générateurs associés en série, de récepteurs actifs et de récepteurs passifs (Fig.8) ; utiliser le même procédé de calcul pour déterminer l'expression de l'intensité du courant qui circulerait dans le circuit.

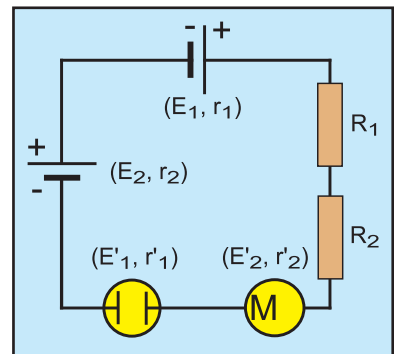


Fig. 8

Enoncé de la loi de Pouillet :

Dans un circuit série comportant (n) générateurs en série, (m) récepteurs actifs et (k) conducteurs ohmiques, l'intensité du courant est égale au quotient de la somme des f.e.m. des différents générateurs diminuée de la somme des f.c.e.m. des différents récepteurs actifs par la somme des résistances de tous les dipôles.

$$I = \frac{(E_1 - E_2 + \dots + E_n) - (E'_1 + E'_2 + \dots + E'_m)}{r_1 + r_2 + \dots + r_n + r'_1 + \dots + r'_m + R_1 + R_2 + \dots + R_k}$$

Remarque

Le courant ne peut circuler dans un circuit, comprenant un générateur de f.e.m. E et un récepteur actif de f.c.e.m. E' , que si $(E - E')$ est positif, autrement dit que si $E > E'$. Ce résultat peut être généralisé ici : le courant ne peut circuler que si la somme des f.e.m. des générateurs est supérieure à celle des f.c.e.m. des récepteurs.

Dans un circuit comportant plusieurs dipôles de différentes natures, la Loi de Pouillet n'est plus applicable si un seul de ces dipôles a une caractéristique non linéaire.

Activité 2

Retrouver les résultats précédents en faisant le bilan énergétique de l'ensemble du circuit en partant toujours du principe que l'énergie fournie par les générateurs est entièrement consommée par les récepteurs.

6. Résoudre un problème d'optimisation

Réalisons le montage de la figure 9 constitué d'un générateur dont les paramètres (E, r) sont connus, d'un rhéostat dont la résistance R est de l'ordre de $2r$, et d'un wattmètre. Fermons le circuit et faisons varier R de sa valeur la plus grande vers la plus petite sans atteindre le court-circuit ($R=0$).

On constate que la puissance $\mathcal{P}$ fournie par le générateur et consommée par le résistor varie en fonction de R et passe par un maximum pour une valeur déterminée R_m .

Débrancher le rhéostat quand $\mathcal{P}$ est maximum et mesurer R_m avec un ohmmètre. Comparer avec r .

On trouve qu'aux incertitudes près $R_m = r$.

Ainsi, lorsque la résistance du récepteur est égale à la résistance interne du générateur, le transfert d'énergie du générateur au récepteur s'effectue avec un débit (puissance) maximum ; on dit alors que l'adaptation des deux dipôles associés est **optimale**.

On peut retrouver ce résultat en appliquant la loi de Pouillet ; en effet :

La puissance consommée par le résistor est $\mathcal{P} = U \cdot I$ avec

$$I = \frac{E}{r + R} \quad \text{et} \quad U = \frac{R}{R + r} E \quad \text{ce qui donne}$$

$$\mathcal{P} = \frac{R}{(R + r)^2} E^2 \quad \text{que l'on peut écrire} \quad \mathcal{P} = \frac{R \cdot E^2}{(R^2 + r^2 + 2 \cdot r \cdot R)} = \frac{E^2}{R + \frac{r^2}{R} + 2r}$$

$\mathcal{P}$ est maximale lorsque les deux termes contenant la variable R ont une somme minimale.

$R + \frac{r^2}{R}$: somme de deux termes dont le produit est constant ; on montre en mathématiques

que cette somme est minimale quand les deux termes sont égaux, soit $R = \frac{r^2}{R}$ d'où $\boxed{R = r}$

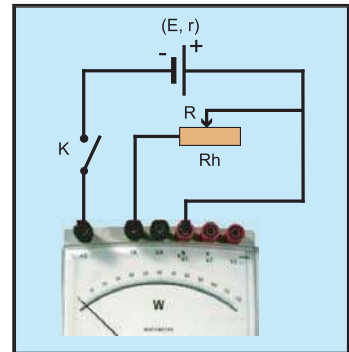


Fig. 9

Applications

- La pile plate de 4,5V a une résistance interne du même ordre de grandeur que celle de la lampe à incandescence de la lampe de poche qu'elle alimente.
- Au dos d'un haut-parleur qui est un récepteur, on lit toujours la valeur de sa résistance (ou impédance) en ohms : 4Ω , 8Ω , 16Ω , ... ; L'amplificateur sur lequel il doit être branché est équivalent à un générateur qui a une résistance interne ; on lit toujours sur la sortie sur laquelle on doit brancher le haut-parleur, la valeur de la résistance interne de l'amplificateur : 4Ω , 8Ω , ... Il est nécessaire de choisir la sortie qui correspond à la résistance du haut-parleur pour le brancher ; c'est à cette seule condition qu'il peut restituer la puissance maximale générée par l'amplificateur.

Activité expérimentale

Détermination du point de fonctionnement d'un circuit

Objectifs

- Déterminer graphiquement le point de fonctionnement d'un circuit constitué d'un générateur et d'un récepteur.
- Résoudre un problème d'adaptation entre un générateur et un récepteur par la méthode graphique.

Matériel

- Pile de 9V (2 piles plates neuves en série)
- Un rhéostat (8 ohm environ)
- Une lampe 6V- 3W, un moteur 3V
- Un ampèremètre, un voltmètre, un ohmmètre, des fils de connexion et du papier millimétré.

Manipulation

- Tracer les caractéristiques intensité-tension du générateur 9V et de la lampe.
- Utiliser la méthode graphique pour déterminer le point de fonctionnement du circuit série (pile, lampe)
- Utiliser la méthode graphique pour déterminer le point de fonctionnement du circuit série (pile, rhéostat)
- Vérifier les valeurs de U et de I trouvées par des mesures ; y a-t-il adaptation ?
- Mesurer avec l'ohmmètre une valeur de la résistance du rhéostat. Utiliser la méthode analytique (loi de Pouillet) pour déterminer le point de fonctionnement du circuit série (pile, rhéostat).
- Utiliser le rhéostat pour faire varier le point de fonctionnement du générateur et montrer que celui-ci délivre une puissance utile qui passe par un maximum. Utiliser l'éclat de la lampe pour suivre l'évolution de la puissance.
- Reprendre avec des circuits différents : moteur, moteur et lampe...

L'essentiel du cours

Lorsqu'on associe un générateur et un récepteur passif pour former un circuit fermé, un courant I circule dans ce circuit et une même tension U apparaît aux bornes de ces dipôles.

On appelle point de fonctionnement du circuit le couple de valeurs (I, U) .

On dit que deux dipôles associés sont adaptés lorsque le point de fonctionnement (I, U) correspond pour chacun des deux dipôles à un fonctionnement **normal**.

Détermination du point de fonctionnement :

Méthode graphique : En reportant dans un même repère les caractéristiques intensité-tension du générateur et du récepteur, on lit le couple de valeurs (I, U) à l'intersection des deux caractéristiques quand elle existe.

Méthode analytique : En appliquant la loi de Pouillet, lorsque les dipôles générateur et récepteur sont tous les deux linéaires, on peut déterminer l'intensité du courant qui circule dans le circuit formé par l'association des deux dipôles.

Enoncé de la loi de Pouillet :

Dans un circuit série comportant (n) générateurs en série, (m) récepteurs actifs et (k) conducteurs ohmiques, l'intensité du courant est égale au quotient de la somme des f.e.m. des différents générateurs diminuée de la somme des f.c.e.m. des différents récepteurs actifs par la somme des résistances de tous les dipôles.

$$I = \frac{(E_1 - E_2 + \dots + E_n) - (E'_1 + E'_2 + \dots + E'_m)}{(r_1 + r_2 + \dots + r_n) + (r'_1 + \dots + r'_m) + (R_1 + R_2 + \dots + R_k)}$$

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1. Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

- Le point de fonctionnement d'un circuit formé d'un générateur et d'un récepteur donnés est un point unique.
- On peut appliquer la loi de Pouillet dans un circuit comprenant un générateur et un récepteur de caractéristique (intensité-tension) quelconque.
- On ne peut appliquer la loi de Pouillet que pour les circuits série composés de dipôles qui suivent la loi d'Ohm.
- Lorsqu'on associe un générateur idéal de tension et un récepteur, on peut appliquer la loi de Pouillet pour calculer l'intensité du courant I .
- Lorsqu'on associe un générateur idéal de courant et un récepteur, on peut appliquer la loi de Pouillet pour calculer l'intensité du courant I .
- La loi de Pouillet ne s'applique pas quand le dipôle récepteur est une association de conducteurs ohmiques.

Je sais appliquer le cours

2. Un circuit comprend un générateur de f.e.m. $E = 3V$, de résistance interne $r = 5\Omega$, mis en série avec un conducteur ohmique de résistance 10Ω . Déterminer par la méthode graphique puis par la méthode analytique le point de fonctionnement du circuit.

3. Un générateur dont la f.e.m. est 14V débite un courant d'intensité 2,5A dans un conducteur ohmique de résistance R et un courant d'intensité 1,5A dans un conducteur ohmique de résistance 2R. Déterminer la résistance interne r du générateur et la valeur R de la résistance.

4. La caractéristique intensité-tension d'un générateur passe par trois points remarquables : A(0A ; 9V) ; B(1A ; 7,5V) ; C(2A ; 4,5V). Entre A et B le fonctionnement est linéaire, entre B et C la caractéristique est courbe et le fonctionnement sans risque de détérioration pour le générateur. Au delà de C le fonctionnement s'accompagne de dégâts irréversibles et la courbure est plus accentuée vers l'axe des intensités.

4.1 Dans un système d'axes dont on choisira les échelles, donner l'allure approximative de la caractéristique de ce générateur.

4.2 On désire associer ce générateur en série avec un résistor de résistance R. Déterminer graphiquement les domaines de valeurs de R pour lesquelles on aura respectivement une bonne ou une mauvaise adaptation.

4.3 Déterminer les domaines de valeurs de R pour lesquels l'application de la loi de Pouillet est possible.

5. Une lampe est marquée par le fabricant : 3,5 / 0,2A. On la branche aux bornes d'une pile plate de f.e.m. E = 4,5V et de résistance interne r. Quelle doit-être la valeur de r pour que la lampe soit bien adaptée à la pile ?

6. On a tracé la caractéristique intensité-tension d'un dipôle D symétrique.(Fig.10) Aux bornes de ce dipôle on branche un générateur linéaire de f.e.m. E = 6V et de résistance interne r = 5Ω.

6.1 Représenter la caractéristique du générateur dans le même système d'axes.

6.2 En déduire, graphiquement, le point de fonctionnement du circuit.

7. Sur la figure 11 on a représenté la caractéristique tension-intensité d'un dipôle (AB) symétrique. On associe ce dipôle avec un générateur de f.e.m. E = 24V et de résistance interne 8Ω.

7.1 Ecrire l'équation de la caractéristique (tension-intensité) du générateur $I = f(U)$. Tracer cette caractéristique dans le même système d'axes.

7.2 En déduire graphiquement les coordonnées du point de fonctionnement du circuit.

8. Le circuit de la figure 12 comporte un générateur linéaire et un réseau de conducteurs ohmiques. En expliquant la démarche utilisée, déterminer l'ensemble des intensités du courant qui parcourent les différentes branches.

9. Des générateurs linéaires et des conducteurs ohmiques sont associés en série conformément au schéma ci-contre (Fig. 13) Les extrémités du circuit sont reliées à une masse commune. Déterminer la tension entre le point A et la masse M.

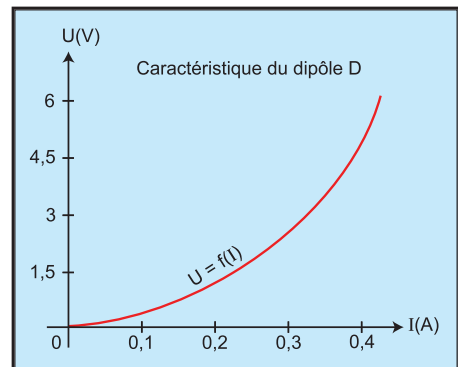


Fig. 10

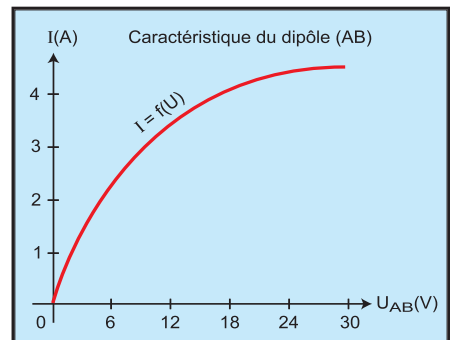


Fig. 11

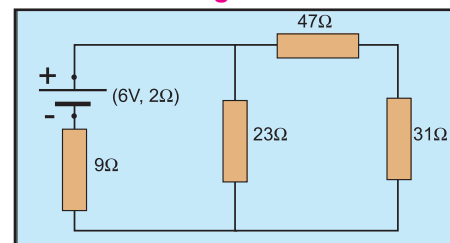


Fig. 12

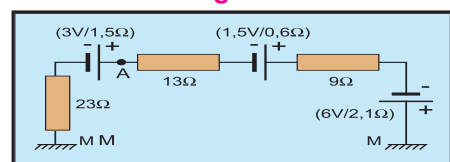


Fig. 13

10. On associe en série une batterie d'accumulateurs (de f.e.m. $E = 24V$ et de résistance interne 2Ω), un conducteur ohmique (de résistance $R = 5\Omega$), un moteur (de f.c.é.m. E' et de résistance r') et un ampèremètre de résistance négligeable.

10.1 Quand le moteur est bloqué, l'intensité du courant dans le circuit est $I = 2A$. Calculer r' .

10.2 Le moteur est libéré et il tourne en régime permanent ; l'intensité indiquée par l'ampèremètre devient alors $I = 1,2A$. Calculer E' .

10.3 Calculer la puissance électrique consommée par chaque dipôle du circuit ; déterminer le rendement global du circuit c'est-à-dire le rapport de la puissance mécanique développée à la puissance générée par les réactions chimiques dans les accumulateurs.

11. Le circuit ci-dessous comprend deux types de générateurs en parallèle deux à deux ; on a indiqué entre parenthèses sur le schéma les valeurs communes des grandeurs caractéristiques de chaque couple. Ils sont montés en série avec un moteur de f.c.e.m. $E'_1 = 3V$ et de résistance interne $r'_1 = 3\Omega$, un électrolyseur dont les grandeurs caractéristiques (E'_2 , r'_2) sont inconnues et deux conducteurs ohmiques de résistances respectives $R_1 = 2\Omega$ et $R_2 = 5\Omega$.

11.1 Refaire un schéma du circuit en remplaçant les associations de générateurs par le générateur équivalent dont on précisera la f.e.m. et la résistance interne.

11.2 Lorsque le moteur est bloqué l'ampèremètre indique $I = 0,4A$; lorsque le moteur tourne à sa vitesse de régime permanent, l'ampèremètre indique $I' = 0,2 A$. Déduire les grandeurs caractéristiques de l'électrolyseur. Interpréter la valeur de E' trouvée.

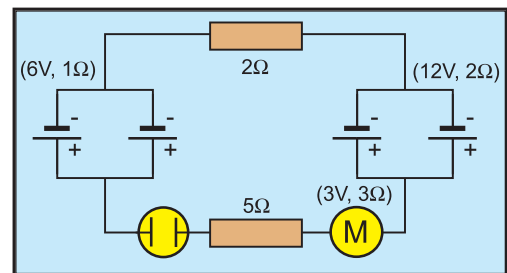


Fig. 14

Construire un ohmmètre analogique

Quand on commute un multimètre sur « ohmmètre » on associe en série entre les bornes A et B du schéma ci-contre une pile intérieure de f.e.m. E et de résistance interne r , un résistor de résistance R et un milliampèremètre très sensible de résistance R_A . Ce milliampèremètre est d'ailleurs l'appareil de mesure commun aux autres fonctions (voltmètre, ampèremètre). On suppose que le milliampèremètre comporte une échelle de lecture de 100 divisions et qu'il fonctionne sur le calibre $I_M = 1\text{mA}$.

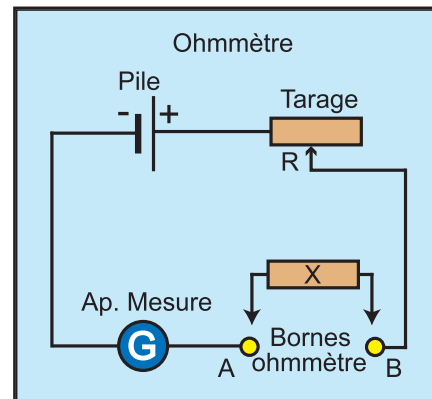


Fig. 15

Tarage de l'ohmmètre

On court-circuite les bornes A et B par un fil de connexion (résistance nulle) et on détermine R pour que le milliampèremètre dévie au maximum. On pose $R_0 = r + R + R_A$

Comme la f.e.m. de la pile intérieure varie en fonction du temps et de l'usage, il est nécessaire de reprendre cette opération de tarage à chaque utilisation de l'ohmmètre ; c'est pour cela que la résistance R n'est pas fixée une fois pour toutes mais est réglable par l'intermédiaire d'un potentiomètre à axe muni d'un bouton appelé justement « bouton de tarage ».



Fig. 16

Mesure de résistance

On enlève le court-circuit et on place entre les bornes A et B le conducteur ohmique de résistance inconnue X à déterminer. L'intensité qui circule devient $I < I_M$.

L'application de la loi de Pouillet permet de déterminer le rapport I / I_M en fonction de R_0 et X .

Graduation du cadran en Ω

On calcule la division n correspondant à I à partir de la relation $I = (n \cdot \text{calibre}) / 100$

On peut alors « écrire la valeur de la résistance X en fonction de n et R_0 .

Pour fixer les idées on peut prendre les valeurs numériques suivantes : $E = 1,5\text{V}$; $r = 1,5\Omega$; $R_A = 250\Omega$ et $R = 1250\Omega$.

Déterminer X pour différentes valeurs de n régulièrement échelonnées de 10 en 10 par exemple : 10, 20, 30, ... Les valeurs de X sont-elles régulièrement échelonnées ? A quelle valeur de X correspond la graduation 0 (zéro) de l'échelle ?

LE COURANT ALTERNATIF

CHAPITRE

8



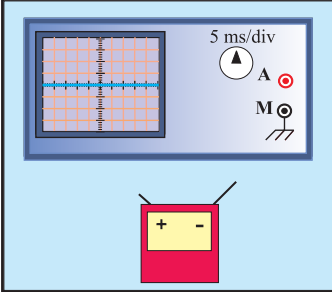
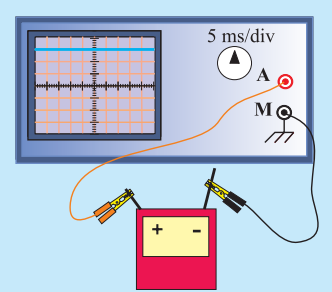
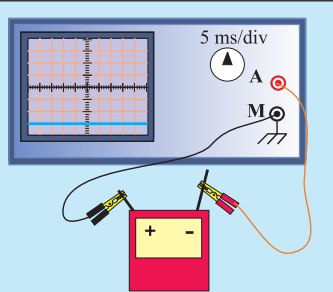
La production et la distribution du courant du secteur nécessite la construction de machines électriques très lourdes : leur principe de fonctionnement est-il différent des composants miniatures que nous utilisons quotidiennement ?

OBJECTIFS

- Reconnaître une tension variable.
- Reconnaître une tension variable périodique.
- Déterminer la période, la fréquence et l'amplitude d'une tension périodique.
- Reconnaître une tension alternative.
- Reconnaître une tension alternative sinusoïdale.
- Mesurer à l'aide d'un voltmètre une tension efficace.
- Mesurer à l'aide d'un ampèremètre une intensité efficace.
- Calculer le rapport en tension et celui en intensité d'un transformateur.
- Donner les caractéristiques de la tension du secteur.
- Reconnaître les dangers du courant du secteur et appliquer les règles de sécurité.
- Utiliser à bon escient un transformateur.
- Schématiser et réaliser un montage permettant de redresser un courant alternatif.

1. Tensions variables

Réalisons les expériences des figures (Fig.1-a , b et c), avec un oscilloscope et une pile plate. L'oscilloscope est réglé en mode balayage et ses entrées sur DC (courant continu). On repère ses bornes d'entrée A et M.

		
Fig.1-a	Fig.1-b	Fig.1-c
Le spot décrit une ligne droite confondue avec l'axe horizontal de l'écran	La ligne lumineuse est décalée de quelques divisions vers le haut	La ligne lumineuse est décalée vers le bas du même nombre de divisions

Dans les trois situations la tension U_{AM} est toujours constante : elle est nulle en (a), positive et égale à U_{PN} en (b) et négative et égale à U_{NP} en (c).

Réalisons le montage de la figure 2. Deux piles plates, reliées entre elles en série, alimentent un conducteur ohmique PN de résistance 100Ω au moins («résistance» de réchaud tendue sur une planche entre deux punaises). Relions le point O à la masse de l'oscilloscope. Plaçons la pointe de la sonde de l'oscilloscope au contact d'un point quelconque du conducteur PN, puis déplaçons-le vers P ou vers N.

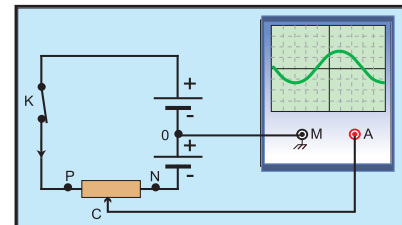


Fig 2

La ligne lumineuse se déplace sur l'écran de l'oscilloscope vers le haut ou vers le bas de manière continue en fonction de la position du curseur entre P et N. La lecture de la tension sur l'échelle choisie montre que en P : $U_{PO} = +4,5V$ et en N : $U_{NO} = -4,5V$; On peut vérifier ces valeurs avec un voltmètre.

Faisons coulisser rapidement à la main, entre P et N, la pointe de la sonde sur le fil résistant tout en essayant de ne pas perdre le contact électrique et en observant l'écran de l'oscilloscope.

La ligne lumineuse suit le mouvement et, si la vitesse de balayage à l'écran est suffisamment faible ($0,1 \text{ s/div}$ par exemple), on peut obtenir une trajectoire ondulée du spot qui a l'allure de la figure 3.

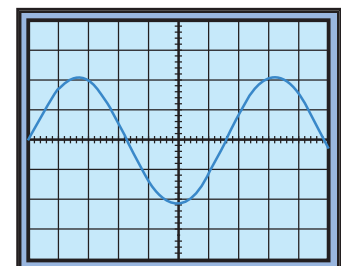


Fig 3

Chaque point sur cette ligne ondulée correspond à une valeur de la tension U_{co} mesurée entre C et O prise à un instant t bien déterminé (quand le curseur est sur un point déterminé du fil). U_{co} est une **tension variable** au cours du temps. L'oscilloscope permet de visualiser les variations d'une tension au cours du temps. On symbolise une tension variable par une lettre **minuscule** $u_{co}(t)$ ou u_{co} .

Définition

On appelle **tension variable** toute tension dont la valeur ne reste pas constante au cours du temps. Une tension variable est symbolisée par une lettre minuscule $u(t)$ ou u .

2. Tensions périodiques

Utilisons un **générateur de fonction** (que l'on désigne également par Générateur de basses fréquences ou en abrégé GBF, Fig.4 a et b) pour montrer quelques exemples de tensions variables visualisées à l'oscilloscope.

On obtient, selon la fonction sélectionnée, l'un des trois motifs suivants (Fig.5-a,b,c) ; les figures obtenues avec le GBF sont beaucoup plus stables sur l'écran de l'oscilloscope que celles obtenues avec le dispositif manuel précédent.



Fig. 4 a et b

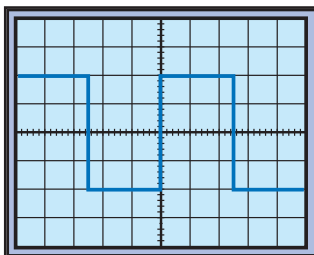


Fig. 5 a -

Tension carrée (en créneaux)

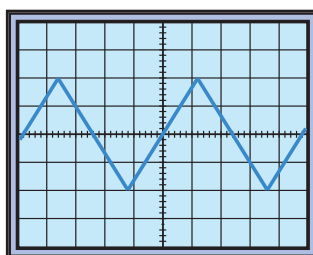


Fig. 5 b -

Tension triangulaire

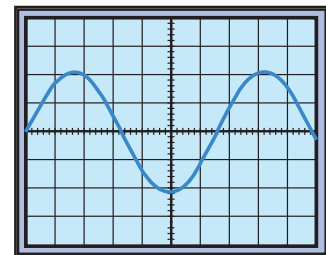


Fig. 5 c -

Tension sinusoïdale

Observons les boutons du GBF, l'un d'eux permet de ralentir les variations de la tension visualisée au point de pouvoir, avec un réglage adéquat du balayage de l'oscilloscope, suivre avec les yeux le mouvement du spot (donc les variations de tension) sur l'écran. Mesurons alors avec un chronomètre le temps que met le spot pour revenir à une position de tension maximale par exemple.

Cette durée reste constante même si on reprend la mesure en choisissant d'autres positions. Les retours à la même position sont donc **périodiques**. Le générateur de fonctions est donc un générateur de tensions variables périodiques.

Une **tension périodique** est une tension variable qui reprend les mêmes valeurs à intervalles de temps réguliers.

Définition

On appelle **période T** la plus petite durée au bout de laquelle la tension se reproduit identique à elle-même. Dans le **Système International** la période se mesure en seconde.

Faisons varier la période avec le même bouton du GBF en allant vers les variations les plus rapides.

L'utilisation du chronomètre devient impossible et seul l'oscilloscope nous permet d'effectuer des mesures. Avec un réglage judicieux du balayage, l'oscillogramme obtenu est stable et on peut :

- constater la répétition du même motif donc la périodicité de la fonction $u = f(t)$. (Fig.6)
- déterminer la période T en comptant sur l'écran le nombre de divisions entre deux passages consécutifs du trait lumineux par la même valeur et dans le même sens ; le bouton «base de temps» donne l'échelle de l'axe du temps (horizontal) en seconde(s), milliseconde (ms) ou microseconde (μs) par division (Fig.7-a,b,c).

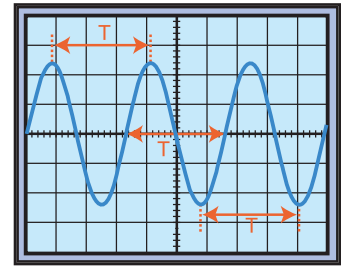


Fig 6

Activité 1

Déterminer les périodes des tensions visualisées sur les figures suivantes :

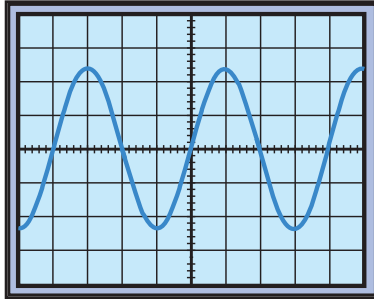


Fig 7-a : 1 div. = 5ms

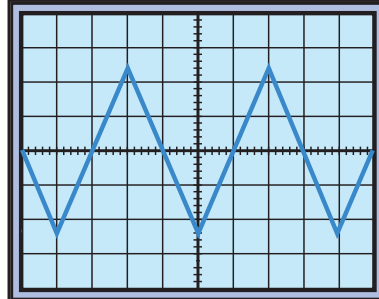


Fig 7-b : 1 div. = 0,1ms

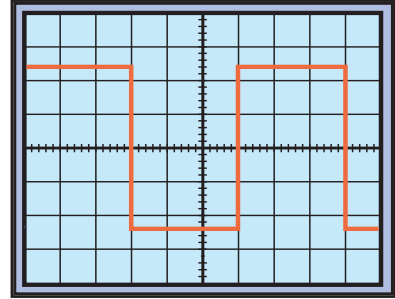


Fig 7-c : 1 div. = 20 μs

La période T d'une tension périodique est mesurée sur l'écran d'un oscilloscope muni d'une échelle de temps.

Remarque

Pour améliorer la précision sur la mesure de T , il est recommandé de déterminer la durée t d'un nombre n de périodes et de faire une division ensuite : $T = \frac{t}{n}$.

Le bouton qui permet de faire varier la rapidité de répétition du phénomène observé comporte une échelle graduée. Comparons les indications de réglage de ce bouton avec les valeurs de la période mesurées avec l'oscilloscope.

On trouve des valeurs très différentes ; par exemple : $T = 0,01s$ et sur le bouton on lit devant le repère du bouton la graduation $N = 100$.

Le bouton utilisé fait varier en fait le nombre N de périodes complètes de la tension pendant une seconde. Ce nombre N est appelé la fréquence de la tension.

Définition

La fréquence N d'une tension périodique est égale au nombre de périodes accomplies pendant un intervalle de temps d'une seconde. L'unité de fréquence dans le Système International est le hertz symbolisé par Hz.

On en déduit la relation entre la période et la fréquence : $1 = N \cdot T$ d'où :

$$N = \frac{1}{T}$$

N s'exprime en hertz (Hz) lorsque T est exprimée en seconde (s).

En remplaçant dans l'expression précédente T par 1s, on trouve $N = 1$ Hz.

Définition

Le hertz (Hz) est la fréquence d'un phénomène périodique (tension variable, mouvement ou autre) dont la période est une seconde.

Les multiples du hertz sont nommés en utilisant les préfixes multiplicateurs habituels : kilo (**k**) , méga (**M**), giga (**G**) ,...

$$10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$$

$$10^6 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$$

$$10^9 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz}$$

On n'utilise pas de sous-multiples du Hz pour décrire les variations très lentes de tension, on utilise le hertz ; on écrit par exemple : 0,05 Hz. On préfère en général utiliser les périodes plutôt que les fréquences pour rendre compte de ces variations : On imagine plus facilement une période de 20 s qu'une fréquence de 0,05 Hz.

Activité 2

Déterminer les fréquences correspondant aux oscillogrammes des figures 7-a,b,c.

Sur chacun des **oscillogrammes** représentés sur les figures 7, le spot atteint une valeur maximale de la tension et une valeur minimale. Elles sont symétriques par rapport à la ligne décrite par le spot lorsque $U_{AM} = 0$ avec certains GBF, mais ce n'est pas toujours le cas (Fig.8) ; une des deux valeurs est alors plus grande en valeur absolue : c'est l'**amplitude** de la tension U_m .

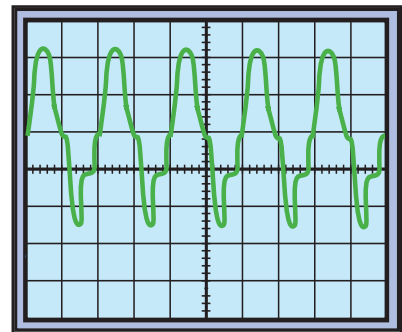


Fig 8

Définition

L'amplitude U_m d'une tension périodique est la valeur maximale des valeurs absolues de la tension. L'amplitude est symbolisée par une lettre majuscule.

Activité 3

Déterminer l'amplitude des tensions visualisées sur les figures 7 en utilisant les indications du bouton de **sensibilité verticale**.

3. Tensions alternatives

Les tensions de la figure 5 sont symétriques par rapport à l'axe des temps (horizontal) ; la tension est par définition positive quand la trace est au dessus de cet axe et négative quand elle est en dessous.

On constate que la tension passe deux fois par zéro au cours de chaque période ; la tension change de signe deux fois au cours d'une période. On dit qu'elle est **alternativement** positive et négative au cours d'une même période.

Définition

On appelle **alternance** les variations d'une tension périodique entre deux passages consécutifs par zéro. On a une alternance positive et une alternance négative dans une période.

Etudions plus particulièrement le cas de la tension carrée (Fig.5-a) : La tension est constante et positive durant $T/2$ et constante et négative durant $T/2$. Déterminons les aires comprises entre la courbe $u(t)$ et l'axe des temps en comptant simplement le nombre de carreaux sur l'écran (Fig.9-a).

Les aires sont les mêmes pour les deux alternances d'une même période. On dit alors que la tension $u(t)$ est une tension alternative.

Une tension périodique est dite alternative quand l'aire délimitée par la courbe $u(t)$ et l'axe des temps à chaque alternance est constante.

Ce résultat est général même si la courbe ne présente pas une symétrie évidente (Fig.9-b). Sur la figure (Fig.9-c,d) on a visualisé des exemples de tensions non alternatives.

Toutes les tensions périodiques ne sont donc pas alternatives.

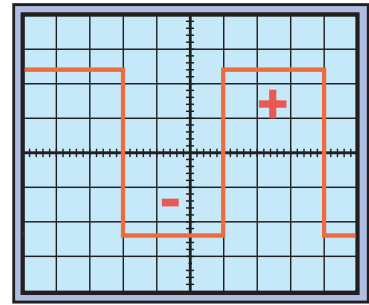


Fig 9-a

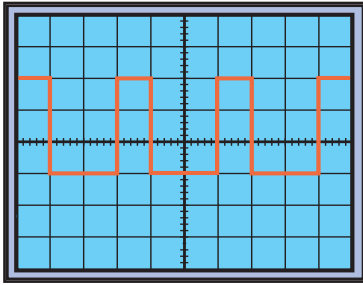


Fig 9-b

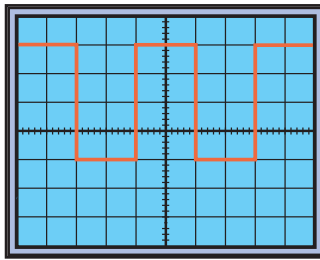


Fig 9-c

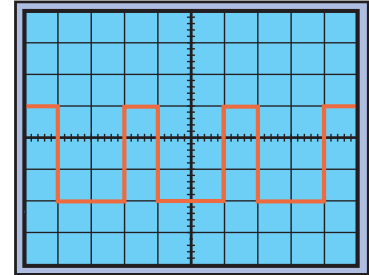


Fig 9-d

Activité 1

Se prononcer sur le caractère alternatif de la tension triangulaire et de la tension sinusoïdale des figures 5.

Activité 2

Mettons le GBF sur la fonction «sinus», réglons la fréquence sur une valeur très faible en vue d'obtenir une période de l'ordre de 10s ou plus et réglons la tension de sortie sur 10 V. Relions sa sortie à l'entrée A de l'oscilloscope. Fixons un transparent sur l'écran de l'oscilloscope et pointons avec un feutre les points où le spot, au cours de son mouvement très lent, coïncide avec les traits verticaux correspondant à 1s, 2s, 3s, ...à partir du bord gauche. Essayons de doubler le nombre de points relevés sur le transparent par des translations de la trace de l'écran et du transparent.

Les points trouvés dessinent sur le transparent une courbe qui a la même allure que celle d'une fonction sinusoïdale. Déterminons la valeur de la tension en chaque point avec son signe ; on obtient un tableau de valeurs que l'on peut compléter comme suit :

t(s)	0	1	2	2,5	3	4	5	6	7	7,5	8	9	10
u(t) (V)													
u(t)/U _m													

- Décrire les variations de $u(t)$ au cours du temps.
- Entre quelles limites varie le rapport $u(t)/U_m$?
- A quelle fonction mathématique vous fait penser ce qui précède ?

t(s)	0	1	2	2,5	3	4	5	6	7	7,5	8	9	10
sin (θ)													
θ (°)													

Le rapport $u(t)/U_m$ est égal au sinus d'un angle θ qui est proportionnel au temps. Au bout d'une période ($T = 10s$) cet angle θ a augmenté de 360° (ou 2π radians) (Fig.10).

$$u(t) = U_m \cdot \sin [\theta(t)] = U_m \cdot \sin (a \cdot t)$$

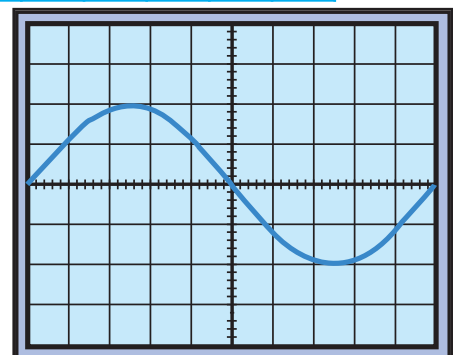


Fig 10

La tension sinusoïdale est une tension alternative (symétrique) caractérisée par son amplitude U_m et par sa fréquence (N) ou sa période (T).

4. Mesure d'une tension efficace

Utilisons un générateur (6V ou 12V) du laboratoire qui comporte une sortie marquée «=» et une sortie marquée «~». Branchons à tour de rôle chacune de ces deux sorties aux bornes de l'entrée A d'un oscilloscope.

La sortie marquée «=» donne un oscillogramme pratiquement plat : C'est l'oscillogramme d'une tension continue ; la sortie marquée «~» donne un oscillogramme sinusoïdal : c'est une tension alternative sinusoïdale ; sa fréquence est 50Hz et son amplitude est 8,5V environ (sortie marquée 6V).

Branchons un multimètre dont le sélecteur est placé sur ACV (volt, courant alternatif) sur la sortie 6V marquée «~».

On lit également environ 6V. Cette tension différente de la valeur de l'amplitude est la tension efficace.

Un voltmètre ne mesure pas en courant alternatif l'amplitude d'une tension mais sa valeur **efficace**.

Reprenons le générateur de fonctions délivrant une tension sinusoïdale réglée sur une fréquence de 50Hz. Branchons sa sortie sur un voltmètre numérique et sur un oscilloscope comme sur la figure 11. Faisons varier l'amplitude de la tension de sortie en lisant sa valeur U_m sur l'oscilloscope et lisons la valeur correspondante de la **tension efficace** U sur le voltmètre numérique. Dressons le tableau ci-contre et cherchons une relation entre U et U_m .

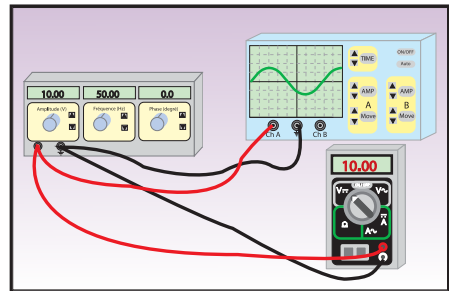


Fig 11

$U_m(V)$	2	4	6	8	10	12
$U (V)$						
$\frac{U_m}{U}$						

La tension efficace est dans un rapport $\frac{U_m}{U}$ constant avec l'amplitude de la tension.

Ce rapport est très proche de 1,41, c'est-à-dire $\sqrt{2}$.

La tension efficace s'exprime en volts (V) dans le Système International. On a donc :

$$\frac{U_m}{U} = \sqrt{2} \text{ ou } U_m = U \cdot \sqrt{2} \text{ ou } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Quelle est la signification physique d'une tension efficace ?

Branchons une lampe dont la tension nominale est 6V aux bornes d'un GBF dont la sortie est réglée sur une tension sinusoïdale de fréquence 50Hz. Un voltmètre numérique (sélecteur sur ACV) ainsi qu'un oscilloscope sont branchés comme sur le schéma (Fig.12). Réglons la tension de sortie avec le voltmètre sur la valeur efficace 6V.

La lampe brille normalement ; l'oscilloscope indique une amplitude de tension de 8,46V environ. Utilisons **un détecteur de lumière** placé à une distance d de la lampe et notons la déviation de l'aiguille de l'appareil.

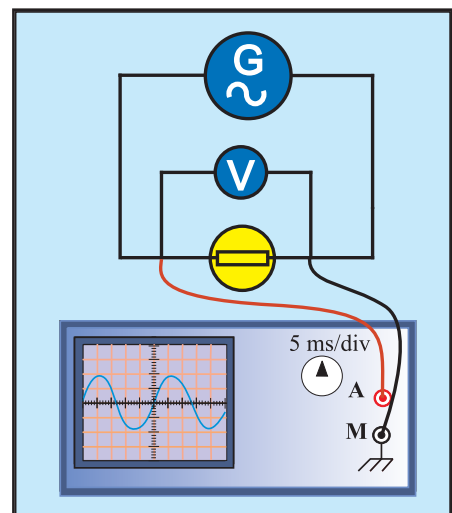


Fig 12

Remplaçons le GBF par une alimentation stabilisée, préparons le voltmètre numérique pour une mesure de tension continue (sélecteur sur DCV) et faisons la même chose pour l'oscilloscope (commutateur d'entrée sur DC). Réglons la tension mesurée par le voltmètre sur 6V et remettons le détecteur de lumière à la même distance de la lampe.

L'indication du détecteur de lumière est identique à la précédente : La lampe brille exactement de la même manière que précédemment. Le filament de la lampe est donc porté à la même température. La puissance Joule est donc identique.

Définition

La valeur efficace U d'une tension alternative est égale à la valeur de la tension continue qui produirait la même puissance Joule dans un même conducteur ohmique.

Activité

Reprendre les expériences de ce paragraphe en mettant le GBF sur la tension en «triangle» ou «carrée» sans modifier ni la fréquence ni les valeurs d'amplitude choisies dans le tableau. Les indications du voltmètre numérique sont-elles conformes à celles du tableau précédent ? Le rapport est-il également constant ? La lampe brille-t-elle de la même façon pour une même indication du voltmètre numérique pour les trois fonctions ?

Le rapport de l'amplitude à la valeur efficace d'une tension alternative n'est égal à $\sqrt{2}$ que dans le cas où la tension est sinusoïdale. Dans tous les autres cas c'est le voltmètre numérique ou analogique qui indique la valeur efficace d'une tension alternative et elle est généralement dans un rapport différent de $\sqrt{2}$ avec l'amplitude. Ce rapport vérifie toujours l'inégalité suivante : $U_m / U \geq 1$.

Exemple : Avec une tension en créneaux, on trouve un rapport égal à 1 et avec la tension triangulaire, on trouve un rapport égal à $\sqrt{3}$.

5. Produire une tension alternative

Utilisons un moteur et un système de transmission pour faire tourner le rotor d'une génératrice de bicyclette (Fig.13). Branchons la sortie de la génératrice sur l'entrée d'un oscilloscope.

La tension visualisée sur l'écran est alternative mais elle n'est pas sinusoïdale. Sa fréquence et son amplitude varient quand on fait varier la vitesse de rotation du rotor.

La génératrice de bicyclette est un générateur de tension alternative. C'est un **alternateur**.

Le symbole d'un générateur de tension alternative est visible sur la figure 14.

Situation :

Démonter un alternateur de bicyclette (Fig 15) ; identifier les éléments qui le constituent. A quoi est relié le rotor ? Comment sont reliées les bornes de sortie aux éléments intérieurs ? Comment la tension alternative est-elle engendrée ?

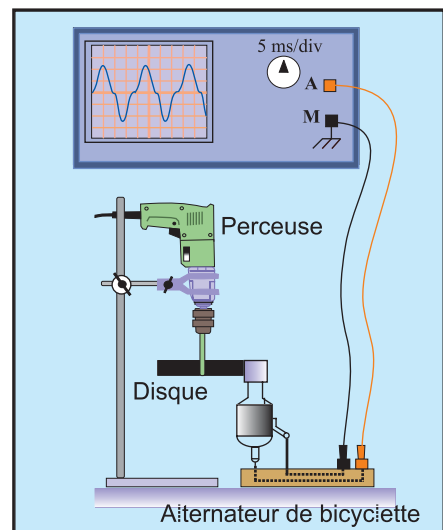


Fig 13

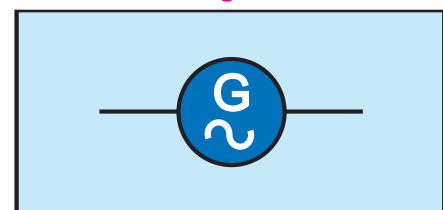


Fig 14

Fixons un aimant droit sur l'arbre d'un moteur (ou simplement à l'extrémité d'un fil de coton que l'on peut tordre de plusieurs tours). Faisons le tourner à proximité d'une bobine de fil de cuivre dont les bornes sont reliées à l'entrée d'un oscilloscope (Fig.16).

L'oscilloscope montre qu'une **tension alternative** apparaît aux bornes de la bobine. La fréquence et l'amplitude de cette tension alternative dépendent de la vitesse de rotation de l'aimant.

Quand un aimant est mis en rotation à proximité d'une bobine, une tension alternative apparaît aux bornes de celle-ci.

Remarque

On peut inverser les rôles de la bobine et de l'aimant dans l'expérience précédente, si on arrive à résoudre le problème de réalisation des contacts mobiles pour brancher la bobine sur l'oscilloscope ; une tension alternative apparaît aux bornes de cette bobine quand on la fait tourner devant un aimant fixe.

La conclusion précédente donne le principe de fonctionnement de tous les alternateurs : celui d'une voiture ou celui d'une centrale de production électrique. Dans les gros alternateurs industriels, on n'utilise pas des aimants permanents mais des électro-aimants, c'est-à-dire des bobines de fils de cuivre parcourues par un courant continu et munies d'un noyau de fer.

L'ensemble des bobines mobiles est appelé **rotor** et l'ensemble des bobines fixes dans lesquelles apparaît la tension alternative est appelé **stator**.

Les alternateurs industriels sont étudiés et construits de manière à générer des tensions alternatives dont la forme est la plus proche possible de la forme sinusoïdale idéale et la fréquence la plus stable possible.

Remarque

Dans le GBF il n'y a aucune pièce mécanique mobile, les tensions alternatives que nous avons utilisées sont produites par des circuits électroniques.

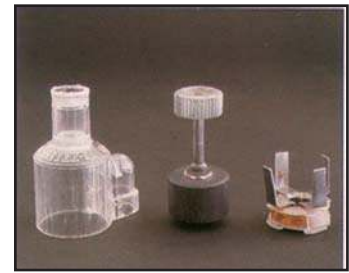


Fig 15

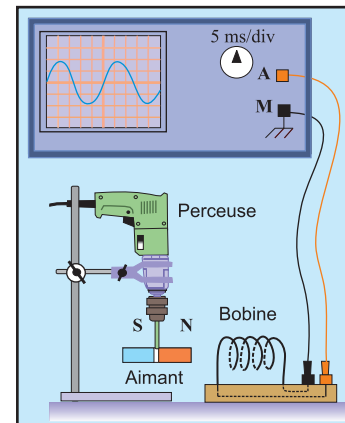


Fig 16

6. Le courant alternatif

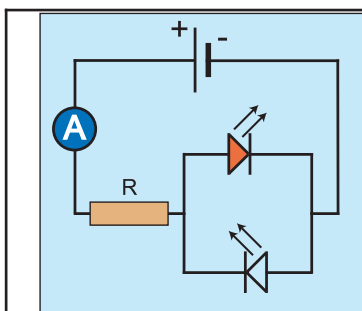


Fig. 17-a

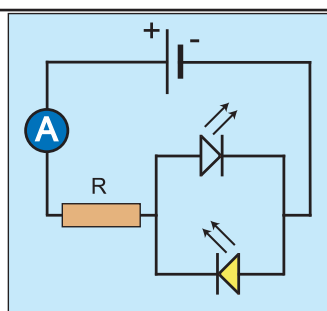


Fig. 17-b

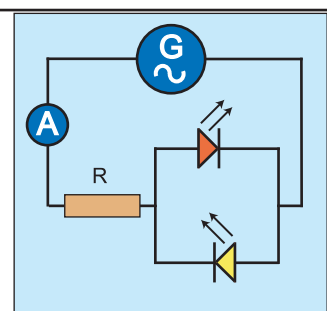


Fig. 17-c

Réalisons le montage de la figure 17 qui comporte deux diodes électroluminescentes (LED) de couleurs différentes montées tête-bêche en parallèle, un conducteur ohmique de résistance R (pour limiter l'intensité du courant dans les LED) et un ampèremètre à «zéro central». Un oscilloscope permet de suivre les variations de la tension appliquée au dipôle.

Avec une pile le courant ne circule dans chaque cas que dans un seul sens ; une seule diode s'illumine quand le circuit est fermé : celle qui correspond au sens passant de la diode.

Avec un générateur de tensions alternatives de très basses fréquences (GBF) réglé sur une fréquence de quelques hertz, les diodes s'illuminent à tour de rôle à chaque alternance : **le courant circule dans le circuit tantôt dans un sens tantôt dans l'autre**. Les électrons de conduction se déplacent donc tantôt dans un sens tantôt dans l'autre. Ils oscillent «sur place», c'est-à-dire que chacun effectue un mouvement de va et vient autour d'une position moyenne.

Dans un dipôle parcouru par un courant alternatif, les porteurs de charges responsables du transport du courant électrique ont donc un mouvement d'oscillation.

L'aiguille de l'ampèremètre suit le mouvement sur le cadran en oscillant également à la **même cadence** entre deux valeurs maximales (I_m et $-I_m$). Elle suit les mouvements du spot sur l'écran **sans aucun retard ou avance**. I_m est l'amplitude de l'intensité du courant.

On peut effectuer des mesures **simultanées** de l'intensité variable $i(t)$ et de la tension $u(t)$ aux bornes du conducteur ohmique en utilisant un **système d'acquisition sur ordinateur** et montrer qu'elles vérifient à chaque instant la relation : $u(t) = R.i(t)$ et en particulier $U_m = R.I_m$.

La loi d'Ohm (pour les récepteurs passifs) est vérifiée à chaque instant par la tension $u(t)$ et l'intensité $i(t)$ que l'on mesure aux bornes d'un conducteur ohmique parcouru par un courant alternatif.

Augmentons la fréquence du GBF (commuté sur fonction sinusoïdale) de manière à dépasser 15 ou 20 Hz .

Les diodes ne clignotent plus et semblent allumées en continu ; quand le sélecteur est placé sur ADC (courant continu) l'aiguille de l'ampèremètre est pratiquement **immobilisée** sur la graduation «0». Quand le sélecteur est placé sur ACA (courant alternatif), l'ampèremètre indique une intensité I , toujours positive. C'est la **valeur efficace** de l'intensité du courant alternatif sinusoïdal débité dans le circuit.

Un ampèremètre à courant alternatif est adapté pour mesurer l'intensité efficace I d'un courant alternatif.

Reprenons l'expérience avec la lampe du (§-4). Remplaçons le voltmètre par un ampèremètre branché en série avec la lampe. Alimentons la lampe avec un courant continu d'intensité I_c mesurée par l'ampèremètre réglé sur (ADC); le filament brille et le détecteur de lumière indique une certaine valeur.

Avec le GBF, alimentons la lampe avec une tension sinusoïdale ; faisons varier l'intensité débitée pour faire briller le filament jusqu'à ce que le détecteur de lumière redonne la même indication. Comparons alors l'intensité I_a de l'ampèremètre réglé sur (ACA) avec I_c .

$I_a = I_c$; I_c est la valeur efficace de l'intensité du courant alternatif qui traverse la lampe. C'est l'intensité du courant continu dont l'effet thermique est équivalent à celui du courant alternatif considéré.

La valeur efficace I de l'intensité d'un courant alternatif dans un circuit est égale à la valeur de l'intensité continue qui produirait la même puissance Joule dans un même conducteur ohmique. L'intensité efficace s'exprime en ampères (A) dans le Système International.

Remarque

Les grandeurs électriques efficaces (intensité et tension) sont symbolisées par des lettres majuscules, U et I , comme en courant continu.

Réalisons le montage de la figure 18 en utilisant un conducteur ohmique de résistance R et un générateur de tensions sinusoïdales. Les appareils de mesure sont réglés pour mesurer des tensions et des intensités alternatives.

Faisons varier la tension de sortie efficace U , relevons l'intensité efficace I sur l'ampèremètre et calculons à chaque fois le quotient U/I . Reprenons les mesures pour une autre fréquence.

Ce quotient est constant et toujours égal à R . La loi d'Ohm pour les conducteurs ohmiques est donc vérifiée par les valeurs efficaces des grandeurs alternatives. En particulier la résistance R est indépendante de la fréquence.

La tension efficace U mesurée aux bornes d'un conducteur ohmique parcouru par un courant alternatif est proportionnelle à l'intensité efficace de ce courant : $U = R.I$

$$\text{On peut écrire : } U = R.I \quad \text{et} \quad U_m = R.I_m \quad \text{d'où} \quad \frac{U_m}{U} = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}$$

$$\text{On en déduit que : } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

L'intensité efficace et la tension efficace d'un courant alternatif sinusoïdal sont ainsi dans le même rapport avec les amplitudes respectives :

$$\frac{I_m}{I} = \frac{U_m}{U} = \sqrt{2}$$

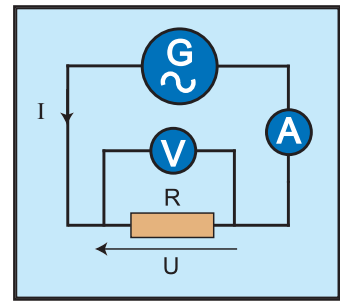


Fig 18

Application : Puissance dégagée par effet Joule

La puissance électrique consommée par une portion de circuit parcourue par un courant alternatif et ne comprenant que des conducteurs ohmiques de résistance équivalente R découle des définitions des valeurs efficaces de l'intensité et de la tension et s'écrit exactement comme en courant continu et avec les mêmes unités :

$$\mathcal{P} = U.I$$

7. Le transformateur

• Qu'est-ce que c'est ?

Dans le langage de tous les jours que désigne-t-on sous le vocable «transfo» ? Quelles sont les utilisations possibles du transfo ? Quel est le plus petit transfo que vous utilisez à la maison ? quel est le plus gros ? Qu'est-ce qui fait la différence entre eux du point de vue électrique ? Quels sont leurs usages ? Quels composants contient l'un de ces transfo quand on ouvre le couvercle ? De tous les composants quel est celui qui se connecte directement sur la prise du secteur ? Comment peut-on l'appeler ?

Beaucoup d'appareils électriques utilisent le courant électrique sous **basse tension** (6V, 12 V...) pour des raisons de sécurité faciles à comprendre : rasoir électrique, jouet pour enfant, sonnerie électrique, téléphone portable... La tension du secteur doit donc être abaissée par un **transformateur abaisseur de tension**. (Fig.19)

Dans d'autres appareils comme le poste de télévision, la formation des images sur l'écran nécessite une très **haute tension (THT)** de l'ordre de 25000 V. On l'obtient à partir de la tension du secteur par un transformateur spécial communément appelé THT. Celui-ci délivre en réalité une tension alternative de l'ordre de 5000V à 7000V qui est ensuite multipliée par un dispositif électronique. Le THT est un transformateur **élevateur de tension**. (Fig.20)



Fig. 19
«Transfo»
abaisseur de
tension



Fig. 20
Transformateur élévateur
de tension

Prenons un transformateur abaisseur (12 V par exemple) et étudions sa constitution. Examinons également un transformateur usagé récupéré qui a été démonté et dénudé (ou un transformateur démontable de laboratoire).

L'appareil comporte 2 paires de bornes ou de fil à souder de différentes couleurs ; une paire se branche sur le courant du secteur sous 220 V : c'est le **primaire**. L'autre paire est du côté utilisation sous 12V : c'est le **secondaire**. **Chaque paire de bornes est reliée à une bobine de fil de cuivre isolé très fin au primaire et de gros diamètre au secondaire**. On dénombre beaucoup plus de spires de cuivre au primaire qu'au secondaire.

Mesurons avec un ohmmètre les résistances entre les bornes du primaire, puis entre les bornes du secondaire, puis entre une borne du primaire et une borne du secondaire.

On trouve respectivement par exemple : 50 Ω puis 2,5 Ω puis une résistance pratiquement **infinie**. Le primaire et le secondaire sont donc deux bobinages différents superposés qui n'ont **aucune liaison électrique entre eux** ; on trouve entre eux plusieurs couches de papier ou plastique isolant.

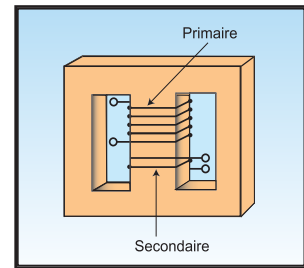


Fig. 21
Schéma du transformateur

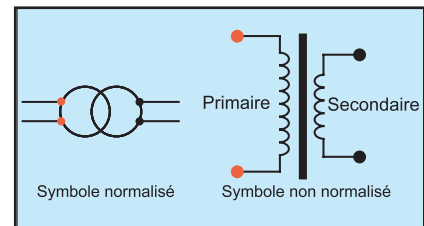


Fig. 22

Définition

Le transformateur est un quadripôle (appareil à 4 pôles) constitué de deux circuits électriques, le primaire et le secondaire électriquement isolés l'un de l'autre

• Comment ça marche ?

➤ Appliquons, avec une alimentation stabilisée, une tension continue quelconque comprise entre 0 et 30 V aux bornes du primaire et branchons aux bornes du secondaire un voltmètre (sélecteur sur DCV puis sur ACV).

Aucune tension (continue ou alternative) n'apparaît aux bornes du secondaire quelle que soit la tension appliquée ; on note seulement un échauffement anormal du transformateur.

Remarques

Un transformateur ne fonctionne pas en courant continu ; on risque même de l'endommager en le soumettant à des tensions continues durant longtemps.

Un transformateur est toujours construit pour fonctionner dans les meilleures conditions à une fréquence bien déterminée ; ses performances se dégradent énormément quand on le fait fonctionner à des fréquences très différentes ou avec des tensions alternatives autres que sinusoïdales.

➤ Remplaçons l'alimentation stabilisée par un générateur de basses fréquences (GBF) réglé sur une tension sinusoïdale de fréquence $N_1 = 50\text{ Hz}$. Faisons varier la tension efficace appliquée au primaire entre 0 et 20 V ; branchons le secondaire sur l'entrée d'un oscilloscope ou mieux sur un voltmètre numérique (fig 23).

L'oscilloscope (ou le voltmètre) met en évidence l'apparition d'une tension alternative **sinusoïdale de fréquence $N_2 = 50\text{ Hz}$** dont l'amplitude U_{2m} (valeur efficace U_2) varie quand la tension efficace U_1 appliquée au primaire varie. U_1 et U_2 sont différentes, mais N_2 est toujours égale à N_1 .

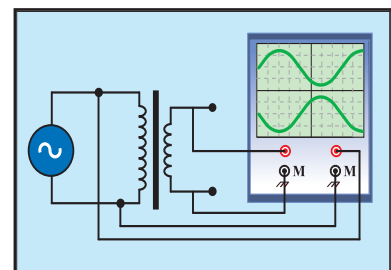


Fig. 23

Le primaire d'un transformateur étant soumis à une tension alternative sinusoïdale, une tension de même forme et fréquence, mais d'amplitude différente, apparaît aux bornes de son secondaire.

On peut établir le tableau de mesures suivant (sur **voltmètre numérique**).

U_1 (V)	0	4	8	12	16	20
U_2 (m V)						
$\frac{U_2}{U_1} \times 10^{-2}$						

On peut brancher le transformateur sur la tension 220 V du secteur et lire de même 12 V au secondaire: le rapport est le même.

Le rapport de la tension efficace qui apparaît au secondaire d'un transformateur à celle qui est appliquée au primaire est constant : **c'est le rapport de transformation** η . Le rapport de transformation d'un transformateur abaisseur de tension est inférieur à 1.

Attention

Ne jamais brancher le secondaire d'un transformateur directement sur la tension du secteur.

Retournons le transformateur et utilisons son secondaire comme un primaire auquel on va appliquer la tension sinusoïdale délivrée par le GBF. Mesurons la tension qui apparaît aux bornes du primaire (faisant fonction de secondaire). Veillons à ne pas dépasser une tension de 4 à 5 V efficaces avec le GBF. Etablissons un tableau de mesures comme le précédent.

U_1 (V)	0	0,5	1	1,5	2	3
U_2 (m V)						
$\frac{U_2}{U_1}$						

Le transformateur est une machine électrique entièrement **réversible**.

Le rapport de transformation η' est encore constant mais plus grand que 1. Le transformateur retourné est devenu un transformateur élévateur de tension.

Le transformateur est un dispositif réversible : le primaire et le secondaire sont interchangeables. Si le transformateur est élévateur de tension dans un sens ($\eta > 1$), il est abaisseur de tension dans l'autre sens ($\eta' < 1$ avec $\eta' = \frac{1}{\eta}$).

Remarque

Il est nécessaire cependant de respecter toujours les tensions nominales pour lesquelles les bobinages primaire et secondaire ont été conçus. Il est dangereux d'appliquer des tensions supérieures à 12 V par exemple à notre transformateur sous peine de l'endommager.

• Comment l'utiliser ?

Réalisons le montage de la figure 24 où des ampèremètres sont insérés en série avec le primaire et avec le secondaire du même transformateur. L'interrupteur K_2 est ouvert, K_1 est fermé.

Bien que le circuit primaire soit fermé, l'ampèremètre A_1 indique une intensité très faible presque nulle si le transformateur est de bonne qualité. Le transformateur fonctionne à **vide** ou **sans charge**.

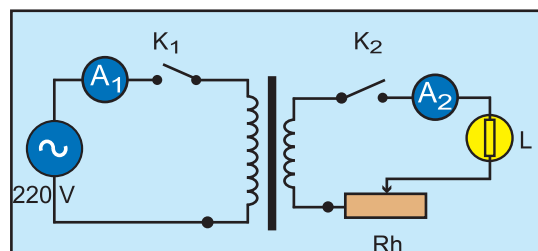


Fig 24

L'intensité du courant qui circule dans le primaire d'un transformateur dont le secondaire est en circuit ouvert est pratiquement nulle.

Fermons l'interrupteur K_2 sans ouvrir K_1 , faisons varier la résistance du rhéostat de charge au secondaire et notons à chaque fois les valeurs de l'intensité efficace au primaire et au secondaire dans un tableau de mesures.

Un courant d'intensité I_1 et un courant d'intensité I_2 circulent respectivement dans les circuits primaire et secondaire. L'intensité du courant au secondaire est plus élevée que celle au primaire. On dit que le transformateur fonctionne **en charge**.

I_1 (A)						
I_2 (A)						
$\frac{I_2}{I_1}$						

Le rapport de l'intensité dans le circuit secondaire à celle circulant dans le circuit primaire est constant quel que soit I_2 . Ce rapport est égal à l'inverse du rapport de transformation.

Les intensités efficaces au primaire et au secondaire dans un transformateur chargé par un conducteur ohmique, sont en rapport inverse de celui des tensions au primaire et au secondaire : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2}$. Un transformateur élévateur de tension est un abaisseur d'intensité et vice versa.

Remarque

Les résistances des bobinages introduisent des chutes de tension qui faussent légèrement (quelques pour cent) cette égalité et sont à l'origine d'une grande partie du dégagement de chaleur par effet Joule.

Le produit $(U_1 \cdot I_1)$ est la puissance $\mathcal{P}_1$ reçue par le transformateur à partir du réseau ; le produit $(U_2 \cdot I_2)$ est la puissance disponible $\mathcal{P}_2$ aux bornes du secondaire et consommée par le conducteur ohmique de charge. L'égalité précédente peut être écrite : $U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2$ d'où : $\boxed{\mathcal{P}_1 \approx \mathcal{P}_2}$

La puissance $\mathcal{P}_2$ est cependant toujours légèrement inférieure à $\mathcal{P}_1$ à cause essentiellement des pertes par effet Joule dans les fils de cuivre et de l'échauffement de l'armature en fer. Pour un transformateur donné, on peut définir un rendement :

Le rendement des transformateurs est rarement inférieur à 0,9.

$$\boxed{\rho = \frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1}}$$

• **Le transformateur transmet au circuit secondaire la puissance électrique reçue au primaire avec un excellent rendement.**

Remarques

.Ce rendement est d'ailleurs d'autant plus proche de 1 que le transformateur est **plus puissant** donc **plus gros**. En effet, la puissance transmise par un transformateur augmente comme la section S de son armature en fer doux.

• Le produit $U \cdot I$ des valeurs efficaces n'est égal à la puissance **réellement** consommée que dans le cas où le transformateur est chargé par des **conducteurs ohmiques**. Dans le cas général, la puissance réellement consommée est inférieure, $\mathcal{P} = k \cdot U \cdot I$ avec $k < 1$. On fait la distinction entre les deux en utilisant des unités différentes : **Le produit $U \cdot I$ s'exprime en volt-ampères (VA) et la puissance $\mathcal{P}$ en watt (W).**

• Quand on choisit un transformateur pour faire fonctionner un appareil électrique sous une tension donnée, l'adaptation correcte n'est réalisée que par le transformateur capable de transmettre la puissance consommée par cet appareil, bien sûr sous la bonne tension. On va acheter par exemple «un transfo 220V/12V * 10W».

L'excellent rendement des transformateurs explique la multiplication de leur usage dans l'acheminement et la distribution de l'énergie électrique (Fig 25).

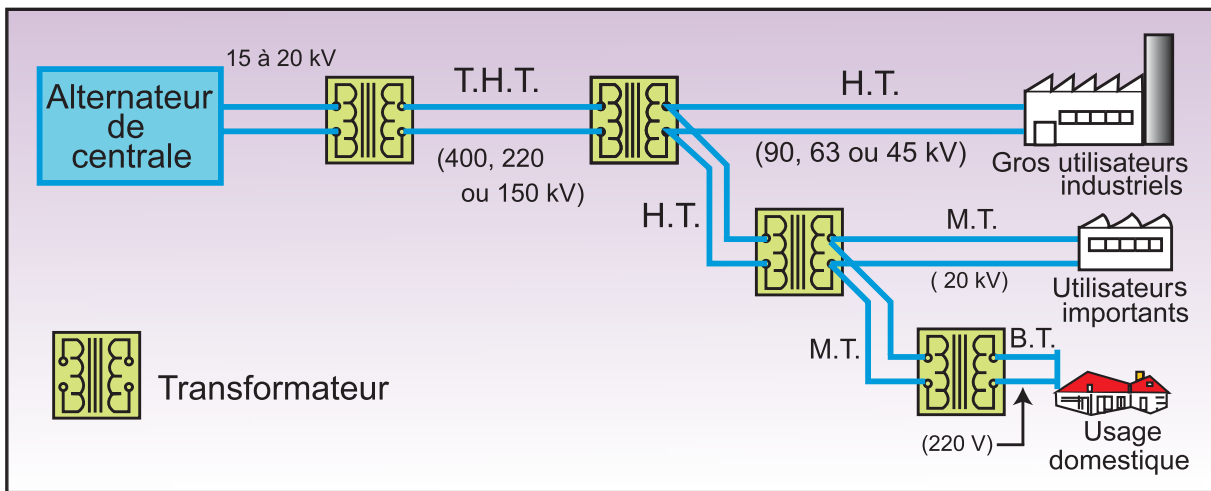


Fig 25

8. Le courant du secteur

La STEG délivre dans notre pays aux bornes des prises de courant une tension dite de «220V». C'est une tension assez élevée qu'il serait dangereux de manipuler directement. Pour étudier les caractéristiques de cette tension nous utiliserons un transformateur qui permet d'abaisser cette tension sans modifier ses autres caractéristiques : fréquence et forme.

Branchons les deux bornes du primaire d'un transformateur sur la prise du courant du secteur et relierons les deux bornes de son secondaire aux bornes d'entrée d'un oscilloscope (fig 26).

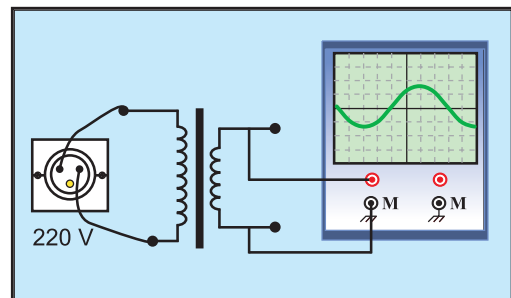


Fig 26

La tension visualisée est alternative et sinusoïdale. La mesure de la période sur l'écran de l'oscilloscope donne $T = 0,02 \text{ s}$, cela correspond à une fréquence de 50Hz.

La tension du secteur est une tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz.

Remarque

Dans certains pays la fréquence du courant du secteur et la tension standard sont différentes : 60 Hz et «110 V» aux USA par exemple .

Branchons un voltmètre numérique avec des cordons à fiches de sécurité directement sur les bornes d'une prise du secteur. Le voltmètre est commuté en AC.

On lit une tension **efficace** U de l'ordre de 220 V ; cette valeur peut varier légèrement, au même endroit, selon l'heure de la journée.

Activité

Déterminer l'amplitude de la tension du secteur au moment où un voltmètre branché sur une prise indique $U = 218\text{V}$.

Remarque

Dans les installations industrielles, la STEG livre parfois le courant du secteur sous des tensions différentes selon les besoins ; on rencontre fréquemment par exemple des installations donnant du «380 V».

8.1. Le réseau électrique

Le courant électrique du secteur est produit dans les centrales électriques par des **alternateurs** qui délivrent une tension alternative sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz et sous une tension efficace de 20 kV. Pour réduire le plus possible les pertes dans les lignes de transport, cette tension est élevée ensuite à 225 kV ou 400 kV par des transformateurs élévateurs de tension. Sur les lieux de distribution cette tension est de nouveau ramenée à 20 kV par des **transformateurs abaisseurs** de tension, puis enfin à 220V dans des postes de transformation successifs disséminés dans les zones urbaines et industrielles (Fig.25).

8.2. L'installation domestique

Une prise de courant du secteur comporte en général deux bornes femelles et une borne mâle, dite «terre» ou «prise de terre». Voyons si les deux bornes sont identiques ou différentes.

Pour cela prenons un tournevis-testeur que tous les électriciens utilisent et enfonçons-le successivement dans chacune des bornes femelles.

Dans l'une des bornes que nous appelons A, la lampe témoin du tournevis s'allume et dans l'autre, B, elle ne s'allume pas. (Fig.28-a, b)

Les deux bornes femelles de la prise du secteur ne sont pas identiques.

Utilisons un voltmètre (avec sélecteur sur ACV) pour mesurer les tensions entre les bornes d'une prise en prenant les précautions d'usage.

Entre les bornes A et B on mesure une tension efficace U de l'ordre de 220 V ; entre la borne A et la borne de terre, on mesure une tension très voisine de U ou égale ; entre la borne B et la borne de terre, le voltmètre indique zéro (Fig.29-a,b,c).

La borne A est reliée au **fil de phase** d'amenée du courant et la borne B au fil neutre de l'installation. **La tension du secteur est disponible entre la phase et le neutre.**

Enlevons le couvercle d'une prise de courant (après avoir coupé le courant) et observons les fils de connexion.

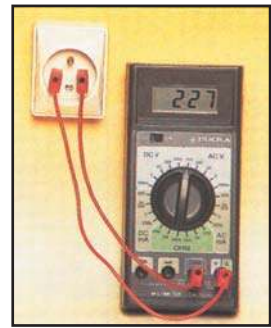


Fig. 27

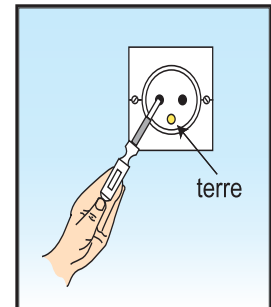


Fig. 28-a

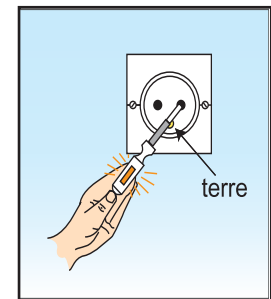


Fig. 28-b

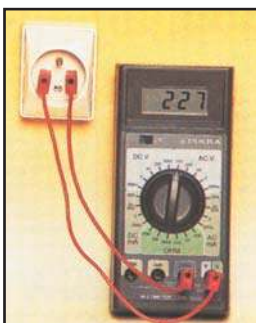


Fig. 29-a



Fig. 29-b



Fig. 29-c

La borne B est reliée à un fil **bleu** ; la borne A est reliée à un fil **noir, rouge**, ou autre ; la borne de «terre» est reliée à un fil **jaune** ou **jaune et vert**.

La borne de terre est reliée par des conducteurs à une barre métallique (en cuivre généralement) enfoncée profondément dans le sol. C'est en réalité cette barre enfoncée dans le sol que l'on appelle prise de terre dont le symbole est :



Le fil de neutre de la ligne STEG est, au niveau du dernier poste de transformation, relié à une prise de terre identique. Les deux prises de terre sont donc reliées électriquement par le sol dont la résistance même sur de grandes distances reste très faible.

Sur la figure 30, on voit le schéma d'une installation électrique et les liaisons de la prise.

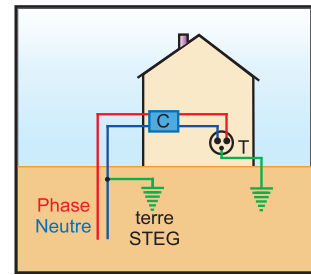


Fig 30

Remarque

Les cordons de branchement d'un appareil électrique au secteur, comportent 3 fils et leur fiche 3 bornes dont une femelle destinée à la prise de terre. Cette borne femelle est reliée par un fil (jaune généralement) à la carcasse métallique de l'appareil que l'on appelle **masse de l'appareil**. La carcasse métallique de l'appareil est ainsi constamment reliée à la Terre et ne risque pas d'être portée à une tension quelconque **par rapport au sol**. Ainsi, personne ne risque d'être accidentellement électrocuté en touchant la carcasse de l'appareil.

La masse d'un appareil électrique est symbolisée par : ou .

8.3. Les dangers du courant du secteur

a - Danger d'électrocution

Le corps humain est un conducteur du courant électrique surtout quand il est humide. Soumis à une tension continue ou alternative, il est traversé par un courant dont les effets dépendent de l'intensité. Sachons que quelques dizaines de mA (100mA maximum) peuvent entraîner la mort par électrocution, ce qui correspond à 25 ou 50V selon le degré d'humidité pour les tensions supportables sans danger.

La tension du secteur de valeur efficace 220 V est donc dangereuse et peut être mortelle.

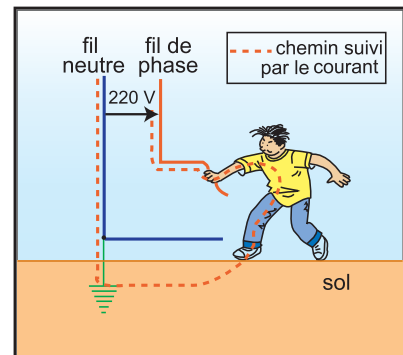


Fig 31

Quand risque-t-on d'être électrocuté ?

Essentiellement chaque fois qu'il y a risque de voir notre corps traversé par le courant alternatif :

- quand on touche à la fois le fil de phase et le fil de neutre (ou la borne de terre) : le courant traverse le corps entre les deux mains par exemple : c'est le corps uniquement qui ferme le circuit,
- quand on touche le fil de phase seulement : le courant traverse le corps entre la main et les pieds et le circuit se ferme par le sol. (Fig. 31).

b -Danger d'incendie

Les courts-circuits provoquent un échauffement excessif des conducteurs et des étincelles qui peuvent déclencher des incendies.

Quand y a-t-il risque d'incendie ?

- Quand il y a contact direct entre le fil de phase et le fil de neutre.
- Quand il y a contact entre le fil de phase et la terre.
- Lorsqu'un courant d'intensité excessive circule dans les conducteurs : c'est le cas lorsque plusieurs appareils de puissance sont branchés sur la même prise de courant.

8.4. Les mesures de sécurité

Pour prévenir les risques précédents certaines règles doivent être suivies lors de la conception et la réalisation des installations électriques et lors de l'utilisation du courant du secteur.

- Une installation électrique individuelle ou industrielle doit être conçue et réalisée conformément à des normes de sécurité (reconnues par les assurances en particulier en cas d'accident) et doit comporter :
 - des conducteurs bien isolés et de diamètre calculé avec des marges de sécurité pour supporter les intensités que les prises doivent fournir ;
 - des prises avec des caches-prises escamotables lors de l'insertion de la fiche ;
 - des fusibles ou des coupe-circuits de protection contre les courts-circuits pour chaque prise ou pour un groupe de prises et points d'éclairage ;
 - un disjoncteur qui fonctionne comme un interrupteur général pour faire des interventions sur l'installation en toute sécurité et comme une protection contre les surcharges d'intensité quand il y a trop d'appareils qui fonctionnent en même temps. Si ce disjoncteur est différentiel il permet de couper le courant général en cas de contact accidentel entre la phase et la terre (à travers le corps d'une personne par exemple) ;
- une prise de terre et un disjoncteur différentiel :



Fig. 32-a

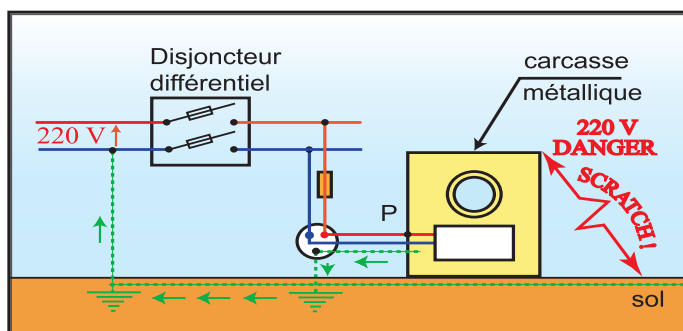


Fig. 32-b

quand il y a un contact accidentel entre le conducteur de phase et la carcasse métallique d'un appareil, un courant de fuite vers le sol apparaît et qui n'emprunte pas le chemin de retour par le neutre. Le disjoncteur différentiel est conçu pour détecter cette différence d'intensité entre les courants dans les deux conducteurs qui le traversent et déclencher la coupure (disjoncter).

La sensibilité du disjoncteur différentiel est un facteur important à prendre en considération.

Elle est déterminée par l'intensité efficace minimale qui déclenche la coupure. Pour prévenir le danger d'électrocution elle ne doit pas dépasser 30mA.

- Les mesures précédentes doivent être doublées d'une grande vigilance l'osque l'on manipule les appareillages électriques, citons quelques erreurs à éviter :
 - brancher plusieurs appareils de puissance sur une même prise.
 - laisser des fils ou des prises dénudées à la portée des enfants.
 - manipuler des barres de fer ou des supports d'antennes à proximité de lignes de tension extérieures.
 - intervenir sur des appareils électriques pour les dépanner sans les débrancher.
 - marcher sur un carrelage mouillé en laissant trainer un câble électrique branché.
 - manipuler les mains mouillées (et parfois pieds nus) toutes sortes d'appareillages électriques branchés (interrupteurs, sèche-cheveux, fer à repasser...).

Activité

Dans la liste ci-dessus étudier les situations décrites, si possible en faisant des schémas, et expliquer le genre de risques encourus dans chaque cas et les causes de ces risques.

9. Le Redressement du courant alternatif

Situation

- Peut-on charger une batterie de téléphone portable avec une génératrice de bicyclette ? Une batterie de voiture avec la tension du secteur, même en utilisant un transformateur abaisseur de tension ?
- Le lecteur radio-cassette ou le baladeur fonctionnent avec des piles mises en série (6V ou 9V). On peut les faire fonctionner avec un adaptateur secteur. Quelle différence y a-t-il entre un transformateur et un adaptateur ? Quels renseignements peut-on tirer de la lecture de la plaque signalétique d'un adaptateur ?

Branchons un adaptateur de radio-cassette sur le courant du secteur et relierons sa sortie à l'entrée d'un oscilloscope (il faut beaucoup d'attention pour éviter les courts-circuits entre ses bornes qui sont très rapprochées et souvent coaxiales).

L'oscillogramme obtenu (Fig. 33) est pratiquement plat ; un voltmètre (sélecteur sur DCV) indique une tension continue (de 7,5V ou 13,5V par exemple).

Un adaptateur transforme la tension sinusoïdale du secteur en une tension continue de faible valeur.

Réaliser un adaptateur

Réalisons le montage de la figure 34 avec un GBF. Le résistor a une résistance de l'ordre de 500Ω . branchons les bornes du résistor à l'entrée d'un oscilloscope. Le GBF est réglé pour délivrer une tension sinusoïdale de l'ordre de 10V efficace avec une fréquence de départ de 1Hz.

La diode LED s'illumine chaque fois que la tension est positive. On obtient un oscillogramme qui ne comporte que les alternances positives du courant. Si on met la diode LED dans l'autre sens, elle s'illumine chaque fois que la tension est négative ; on obtient uniquement les alternances négatives du courant. Le résistor est parcouru par un courant périodique **constamment de même sens** : c'est un **courant redressé monoalternance**. Ce n'est pas un courant continu, il est fortement **ondulé**.

Remplaçons la diode LED par une diode ordinaire et augmentons la fréquence du courant alternatif jusqu'à 50Hz.

On obtient un oscillogramme analogue au précédent : celui d'un courant redressé monoalternance. C'est pour cela que la diode est appelée diode de redressement ou redresseur.

Une diode insérée en série dans un circuit soumis à une tension alternative bloque la circulation du courant durant l'une des deux alternances. Le courant est périodique et ne circule que dans un seul sens. C'est un courant redressé monoalternance.

Remplaçons la diode simple par un montage de 4 diodes LED de deux couleurs différentes (jaunes [J] et rouges [R] par exemple) montées comme sur la figure 36. L'ensemble forme une structure à 4 bornes ABNP appelée «**pont de Graëtz**». Relions les points A et B aux bornes du GBF (tension sinus., $N = 2\text{Hz}$, $U = 10\text{V}$) et les points P et N à un résistor de résistance 500Ω en série avec un milliampèremètre.

Les diodes s'illuminent à tour de rôle par paire de même couleur. L'ampèremètre indique une intensité variable autour d'une valeur moyenne. Entre P et N, il y a passage d'un courant toujours dans le même sens, de P vers N.

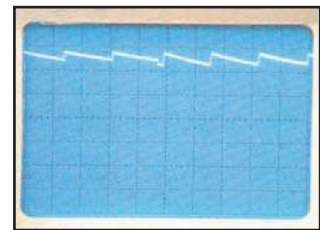


Fig. 33

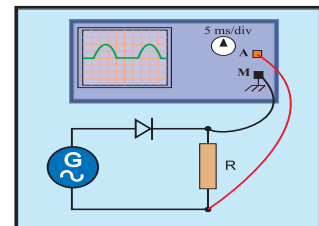


Fig. 34

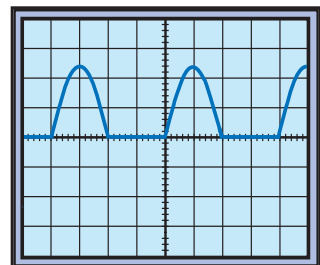


Fig. 35

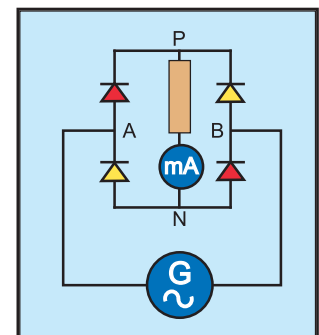


Fig. 36

Augmentons la fréquence et relions les points P et N à l'entrée d'un oscilloscope.

Au-dessus d'une fréquence de 20Hz environ, les diodes LED semblent toutes allumées de manière continue. On obtient l'oscillogramme d'une **tension redressée double alternance (Fig. 37)**. Le résistor R est traversé par le courant toujours de la borne P vers la borne N. Le GBF muni d'un pont redresseur est équivalent à un générateur dont le pôle (+) est en P et le pôle (-) en N.

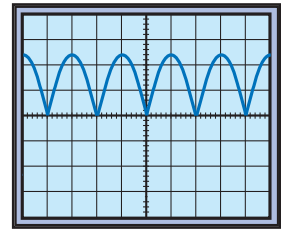


Fig. 37

Avec un pont de quatre diodes il est possible de redresser les deux alternances d'une tension alternative et d'obtenir un courant périodique de même sens.

⚠ Attention

Les diodes LED ne sont pas conçues et fabriquées pour le redressement du courant alternatif. Elles ne fonctionnent correctement que lorsqu'elles sont traversées par quelques dizaines de milliampères. Les diodes de redressement sont capables de débiter des intensités très élevées. Dans les installations de puissance industrielles, ces intensités peuvent atteindre plusieurs centaines d'ampères.

La figure 38 montre l'allure d'un pont redresseur du commerce qui renferme 4 diodes moulées ensemble dans le même boîtier. Sur le boîtier sont marquées les deux entrées du courant alternatif (symboles ~) et les deux sorties du courant redressé (+ et -).

Réalisons le montage des éléments de l'adaptateur : transformateur (220V/12V), pont de diodes et un résistor de charge R (ou une lampe à incandescence 12V). Relions les bornes de la lampe à l'entrée de l'oscilloscope.

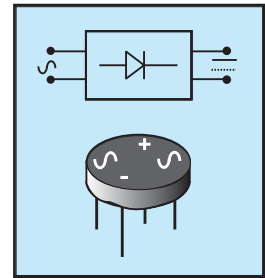


Fig. 38

La lampe est parcourue par un courant redressé double alternance. On n'a pas encore obtenu l'oscillogramme plat que donne l'adaptateur au début de ce paragraphe. Notre adaptateur peut faire fonctionner un poste de radio-cassette, mais on aurait, superposé au son normal, beaucoup de ronflement désagréable dû aux ondulations du courant redressé.

Activité

Quel composant manque-t-il à notre montage pour éliminer les ondulations du courant redressé ? Comment est-il monté dans le circuit ? Se renseigner sur les valeurs à utiliser et les précautions de montage.

Applications

Pour beaucoup d'autres applications il n'est pas nécessaire d'obtenir à partir du secteur un courant rigoureusement continu, il suffit que le courant soit de sens constant.

Les dispositifs de redressement sont toujours conformes au schéma suivant (Fig.39) :

- Un chargeur de batterie est un adaptateur simple comme celui que nous venons de voir capable de débiter une puissance suffisante pour charger une batterie en un temps raisonnable.

- Pour faire fonctionner les bacs à électrolyse de l'industrie on utilise des transformateurs abaisseurs et des ponts redresseurs pour avoir un courant traversant l'électrolyseur toujours dans le même sens.

- L'alternateur d'un véhicule à moteur est toujours muni d'un redresseur pour faire fonctionner tous les appareils électriques embarqués qui marchent au courant continu.

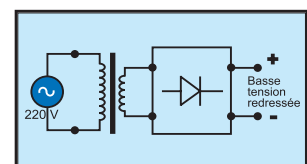


Fig. 39

Tension alternative

Une **tension périodique** est une tension variable qui reprend les mêmes valeurs à intervalles de temps réguliers. Les variations d'une tension périodique sont visualisées sur un **oscilloscope**.

On appelle **période T** la plus petite durée au bout de laquelle la tension se reproduit identique à elle-même. Dans le Système International la période se mesure en **seconde (s)**.

La **fréquence N** d'une tension périodique est égale au nombre de périodes accomplies pendant un intervalle de temps d'une seconde. L'unité de fréquence dans le Système International est

le hertz (Hz) :

$$N = \frac{1}{T}$$

Le hertz (Hz) est la fréquence d'une tension dont la période est une seconde.

L'**amplitude** U_m d'une tension périodique est la valeur maximale des valeurs absolues de la tension.

On appelle **alternance** les variations d'une tension périodique entre deux passages consécutifs par zéro. On a une alternance positive et une alternance négative dans une période.

Une tension périodique est dite alternative quand l'aire délimitée par la courbe $u(t)$ et l'axe des temps à chaque alternance est constante.

La tension sinusoïdale est une tension alternative (symétrique) caractérisée par son amplitude U_m et par sa fréquence N ou sa période T .

La **tension efficace** est dans un rapport $\frac{U_m}{U}$ constant avec l'amplitude de la tension. Ce rapport est très proche de 1,41, c'est-à-dire $\sqrt{2}$ pour une tension alternative sinusoïdale. La tension efficace s'exprime en volts (V) dans le Système International.

$$\frac{U_m}{U} = \sqrt{2} \quad \text{ou} \quad U_m = U \cdot \sqrt{2} \quad \text{ou} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

La valeur efficace U d'une tension alternative est égale à la valeur de la tension continue qui produirait le même effet thermique dans un même conducteur ohmique.

Les tensions alternatives sinusoïdales sont produites par des alternateurs.

Courant alternatif

Une tension alternative engendre dans un circuit un **courant alternatif** ; dans un circuit parcouru par un **courant alternatif**, les porteurs de charges responsables du transport du courant électrique ont un mouvement d'**oscillation**. La valeur maximale de l'intensité dans un sens ou dans l'autre est l'**amplitude** I_m de l'intensité.

La **valeur efficace I** de l'intensité d'un courant alternatif dans un circuit est égale à la valeur de l'intensité continue qui produirait le même effet thermique dans un même conducteur ohmique. L'**intensité efficace** s'exprime en **ampères (A)** dans le Système International.

L'amplitude et la valeur efficace de l'intensité d'un courant alternatif sinusoïdal sont dans le même rapport : $\frac{I_m}{I} = \sqrt{2}$ que les tensions.

La tension efficace U mesurée aux bornes d'un conducteur ohmique parcouru par un courant alternatif est proportionnelle à l'intensité efficace de ce courant : **$U = R \cdot I$**

L'essentiel du cours

Transformateur

Le transformateur transmet les tensions alternatives sinusoïdales en modifiant leur amplitude sans modifier ni leur forme ni leur fréquence. Le rapport des amplitudes au secondaire et au primaire est appelé : **rapport de transformation** η . Pour un transformateur abaisseur de tension : $\eta < 1$; pour un transformateur **élevateur** de tension : $\eta > 1$.

Dans un transformateur **chargé par un conducteur ohmique** le rapport des intensités est

inverse de celui des tensions
$$\frac{U_2}{U_1} = \eta \text{ et } \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\eta}$$

Le transformateur transmet au circuit secondaire la puissance électrique reçue au primaire avec un excellent rendement : $\mathcal{P}_1 \approx \mathcal{P}_2$

Courant du secteur

La tension du secteur est une tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz. Cette tension est disponible entre un **fil de neutre** et un **fil de phase**.

Cette tension dont la valeur efficace est 220V est dangereuse et peut être mortelle. Pour prévenir les dangers d'électrocution et d'incendie, il faut respecter les règles de sécurité et se protéger par des **fusibles** et un **disjoncteur différentiel avec prise de terre**.

Redressement du courant alternatif

Le **redressement monoalternance** d'un courant alternatif dans un circuit est réalisé par une diode unique insérée en série dans ce circuit. Le **redressement double alternance** est réalisé par quatre diodes montées en **pont**.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1. Choisir la bonne réponse

Une tension continue est (constante / variable) au cours du temps.

Une tension alternative est (constante / variable) au cours du temps.

Une tension sinusoïdale est une tension (continue / alternative).

Une tension alternative (est / n'est pas) toujours sinusoïdale.

2. Recopier et compléter les phrases suivantes par les mots (oscilloscope, ampèremètre ou voltmètre)

L'amplitude d'une tension sinusoïdale se mesure grâce à un ; la période d'une tension sinusoïdale se mesure grâce à un ; la valeur efficace d'une tension sinusoïdale se mesure grâce à un ; l'intensité efficace d'un courant alternatif se mesure grâce à un

3. Indiquer les relations correctes entre la période T et la fréquence N :

$$\frac{T}{N} = 1 ; \frac{N}{T} = 1 ; N \cdot T = 1 ; \frac{1}{N} = T ; \frac{1}{T} = N$$

4. Indiquer les relations correctes entre les amplitudes et les valeurs efficaces de la tension et de l'intensité d'un courant alternatif :

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} ; U_m = U \cdot \sqrt{2} ; I_m = I / 2 ; U_m = U \cdot \sqrt{2} ;$$

$$I = I_m \cdot \sqrt{2} ; U = U_m \cdot \sqrt{2} ; I = I_m / 2 ; U_m = 2 \cdot U$$

5. Recopier et compléter le texte suivant :

Les bornes femelles d'une prise du secteur sont reliées au et au..... ; la borne mâle est reliée à..... .

La tension du secteur est disponible entre les bornes et ; il est possible de s'électrocuter en touchant seulement la borne.....

6. Répondre par vrai ou faux

- Une personne en contact avec le sol risque de s'électrocuter si elle touche le fil de phase et la terre.
- Une personne en contact avec le sol risque l'électrocution si elle touche le fil neutre et la terre.
- Une personne en contact avec le sol risque de s'électrocuter si elle touche un seul fil.
- Un transformateur est utilisable en courant continu.
- Un transformateur est utilisable en courant alternatif.
- Dans un transformateur alimenté en alternatif, la tension aux bornes du secondaire est toujours plus faible que celle aux bornes du primaire.
- Si on insère une diode en série dans un circuit parcouru par un courant alternatif, on obtient un courant redressé monoalternance.
- Une tension redressée double alternance est parfois positive et parfois négative.
- Il est possible de charger une batterie avec un courant redressé.

Je sais appliquer le cours

7. Une tension sinusoïdale a une fréquence de 500Hz et une valeur efficace de 20V.

7.1. Sa période est-elle de 1, 2, 5, 10 ou 20 ms ?

7.2. Son amplitude est-elle égale à 10 ; 14,14 ; 28,2 ; 40 V ?

8. La fréquence d'un générateur de courant alternatif est 500 kHz. Calculer la valeur de sa période.

9. Pourquoi un petit oiseau peut-il se percher sans risque sur l'un ou l'autre des deux fils de cuivre dénudés d'une ligne de distribution de l'électricité. Que risque un oiseau de grande envergure, une cigogne par exemple ?

10. La période d'une tension alternatives sinusoïdale est 2s et son amplitude, mesurée entre les bornes d'un résistor de résistance 75Ω , est 500 mV.

10.1. Calculer la fréquence du courant alternatif qui circule dans le résistor et son intensité efficace.

10.2. Calculer l'énergie dissipée par effet Joule dans ce résistor pendant une période.

11. La sensibilité d'un oscilloscope est réglée sur 10V/cm (l'écran est gradué en cm) et sa base de temps sur 5 ms/cm ; l'oscillogramme de la photo ci-contre (Fig.40) est celui d'une tension délivrée par un alternateur. Déterminer l'amplitude, la valeur efficace et la fréquence de cette tension.

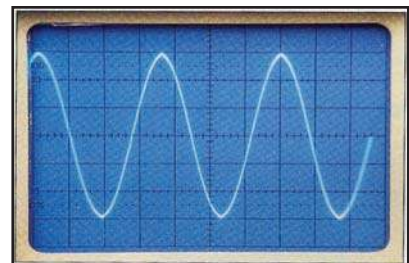


Fig.40

12. On règle un oscilloscope pour que le spot décrive la ligne centrale de l'écran en l'absence d'une tension à ses bornes d'entrée. On branche divers générateurs sur l'entrée de cet oscilloscope et l'on obtient les figures 41-a, b, c, d,e,f.

12.1. Désigner le (ou les) cas où la tension est variable.

12.2. Désigner le (ou les) cas où la tension est alternative.

12.3. Désigner le (ou les) cas où la tension ne change pas de signe.

12.4. Désigner le (ou les) cas où la tension est sinusoïdale.

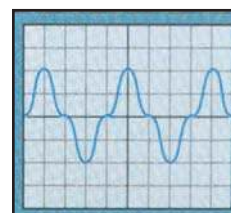


Fig.41-a

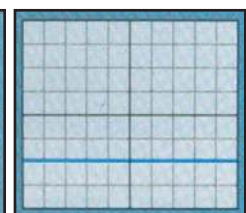


Fig.41-b

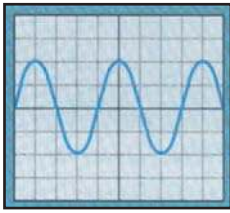


Fig.41-c

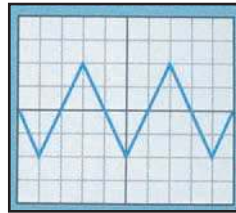


Fig.41-d

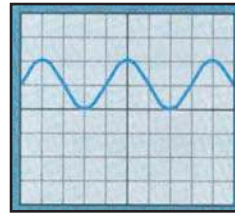


Fig.41-e

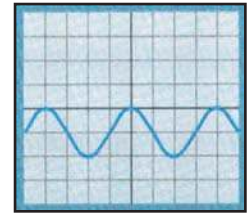


Fig.41-f

13. Un transformateur du commerce porte les indications suivantes (220/24V-100 VA).

13.1. Calculer le rapport de transformation.

13.2. Calculer l'intensité efficace dans l'enroulement primaire.

13.3. Calculer l'intensité dans l'enroulement secondaire dans l'hypothèse d'un transformateur sans pertes.

14. Un oscilloscope à double trace permet de visualiser, à la fois, sur la voie A, la tension primaire (tracé rouge sur la figure 42) et sur la voie B (tracé bleu) la tension secondaire d'un transformateur sous tension. Sachant que la sensibilité verticale est réglée sur la voie A à 5V/cm et sur la voie B à 50V/cm :

14.1. Déterminer les amplitudes des tensions au primaire et au secondaire.

14.2. Dire s'il s'agit d'un transformateur élévateur ou abaisseur de tension.

14.3. Schématiser un circuit dans lequel le secondaire de ce transformateur est fermé sur un conducteur ohmique de résistance 100 Ω .

14.4. Calculer alors les intensités maximales qui circulent dans le circuit primaire et dans le circuit secondaire sachant que le rendement de ce transformateur est de 0,95 (ou 95%) ?

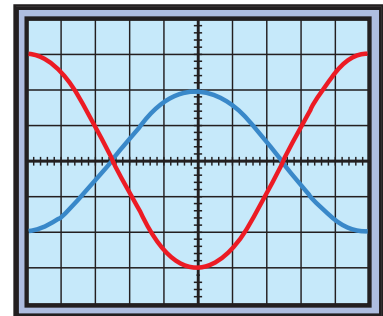


Fig.42

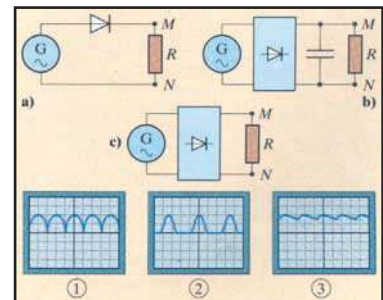


Fig.43

15. On considère les trois montages (a,b,c) et les oscillogrammes (1), (2), (3) de la figure 43. Etablir la correspondance entre eux sachant que l'oscilloscope est branché de manière à visualiser $u_{MN}(t)$.

16. Sur les figures ci-dessous on a représenté, sur une demi période, les variations d'une tension sinusoïdale en fonction du temps (Fig.44-a) et la caractéristique d'une diode de redressement ordinaire (Fig.44-b). Utiliser la méthode graphique pour tracer point par point les variations en fonction du temps de l'intensité qui circule dans la diode.

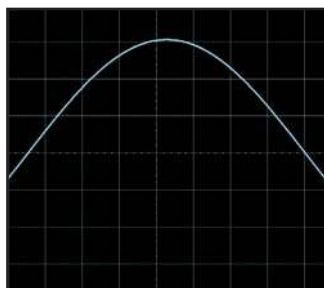


Fig.44-a

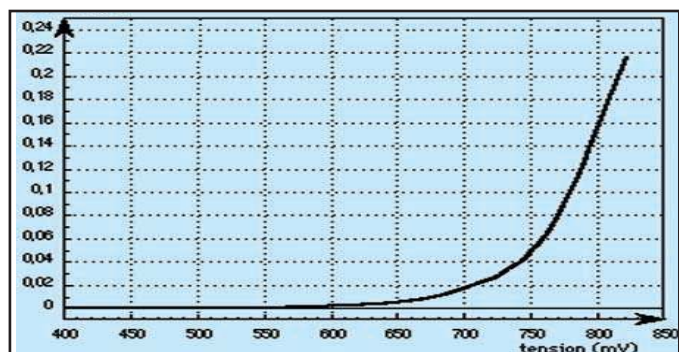


Fig.44-b

FORCES MOUVEMENTS PRESSION

PARTIE 2



Danse artistique dans l'eau

Maîtrise du corps et sens de l'équilibre dans un milieu inhabituel nécessitent de la force musculaire et une utilisation intelligente de l'action de l'eau sur les corps immergés pour vaincre la pesanteur.

Par quel jeu de forces tout cela est-il possible ?

CHAPITRE 9 SYSTÈMES ET INTERACTIONS MÉCANIQUES



L'atome est un grain de matière de l'ordre de l'infiniment petit à notre échelle, l'étoile est un grain de matière dans l'Univers ; comment appliquer les lois de la Mécanique avec une telle étendue de l'échelle, des dimensions ?

OBJECTIFS

- Distinguer un système déformable d'un système indéformable ou solide
- Identifier les interactions intérieures au système matériel
- Identifier les interactions du système avec le milieu extérieur
- Établir un bilan des forces intérieures qui agissent sur un système matériel
- Déterminer le centre d'inertie d'un solide de forme simple

136 Chapitre 9 : Systèmes et interactions mécaniques

Page : 136

ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE SOUMIS À TROIS FORCES

CHAPITRE 10



Pourquoi le funambule doit-il utiliser une longue perche pour assurer son équilibre sur le fil ?

OBJECTIFS

- Établir expérimentalement la relation entre 3 forces non parallèles auxquelles est soumis un solide en équilibre.
- Énoncer les conditions d'équilibre d'un solide soumis à 3 forces.
- Appliquer les conditions d'équilibre d'un solide soumis à 3 forces coplanaires à la détermination des forces de frottement.
- Résoudre un problème d'équilibre d'un solide soumis à 3 forces.

141 Chapitre 10 : Équilibre d'un solide soumis à 3 forces

Page : 149

ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE ASSUJÉTI À TOURNER AUTOUR D'UN AXE FIXE

CHAPITRE 11



Engrènement du mécanisme d'une ancienne horloge

Des rouages pour transmettre des mouvements : pourquoi des diamètres différents ? Comment le grain de sable sur la plus petite roue peut-il bloquer toute la machine ?

OBJECTIFS

- Reconnaitre un solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe
- Calculer le moment d'une force orthogonale à un axe
- Calculer le moment d'un couple de forces
- Appliquer la théorie des moments au solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe
- Expliquer la principe de fonctionnement d'une machine simple

162 Chapitre 11 : Équilibre d'un solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe

Page : 163

CHAPITRE 12

MOUVEMENT DU POINT MATÉRIEL



Chronophotographie d'un joueur de golf en action

Les moyens actuels d'analyse et de décomposition des mouvements (caméras rapides, pellicules sensibles...) couplés à l'ordinateur permettent une étude visuelle détaillée des trajectoires et des vitesses.

OBJECTIFS

- Reconnaitre un mobile en mouvement rectiligne uniformément varié.
- Reconnaitre un mobile en mouvement circulaire uniforme.
- Déterminer la vitesse angulaire d'un mobile en mouvement circulaire uniforme ainsi que sa période.

181 Chapitre 12 : Mouvement du point matériel

Page : 182

PRESSION EN UN POINT D'UN LIQUIDE

CHAPITRE 13



L'épaisseur de la coque et celle des vitrages sont remarquables. Jusqu'à quelles profondeurs sont-elles efficaces ?

OBJECTIFS

- Mettre en évidence l'existence de la pression en un point d'un liquide au repos.
- Reconnaitre expérimentalement les facteurs dont dépend la différence de pression entre deux points d'un liquide en équilibre (principe fondamental de l'hydrostatique).
- Appliquer le principe fondamental de l'hydrostatique.
- Reconnaitre que les liquides, au repos, transmettent les pressions.

200 Chapitre 13 : Pression en un point d'un liquide

Page : 201

POUSSEE D'ARCHIMEDE

CHAPITRE 14



Iceberg : un danger pour la navigation dans certaines régions du globe. La catastrophe du Titanic en 1912 en est un exemple tragique. Ce que l'on ne voit pas sous la surface de la mer est encore plus énorme que la montagne de glace que l'on voit au-dessus. Y a-t-il une explication ?

OBJECTIFS

- Déterminer expérimentalement les caractéristiques de la poussée d'Archimède
- Montrer expérimentalement que la valeur de la poussée d'Archimède est égale à la valeur du poids du liquide déplacé.

213 Chapitre 14 : Poussée d'Archimède

Page : 213

Prérequis

SAVOIRS

- Je sais reconnaître un état de mouvement ou de repos d'un objet par rapport à un autre objet pris comme solide de référence.
- Je sais qu'un mouvement a lieu sur une trajectoire qui peut être rectiligne ou curviligne.
- Je sais distinguer un mouvement rectiligne d'un mouvement curviligne.
- Je sais reconnaître un mouvement accéléré, freiné et uniforme.
- Je sais définir une vitesse moyenne et une vitesse instantanée.
- Je connais l'unité du Système International de la vitesse.
- Je connais la relation entre poids et masse : $\vec{P} = m \vec{g}$
- Je connais l'unité du Système International de la force : le newton (N).
- Je connais la 1^{ère} Loi de Newton.
- Je connais la condition d'équilibre d'un solide soumis à deux forces.
- Je connais la 3^{ème} Loi de Newton.
- Je sais que les solides transmettent les forces.
- Je sais définir une pression et citer les facteurs dont elle dépend.

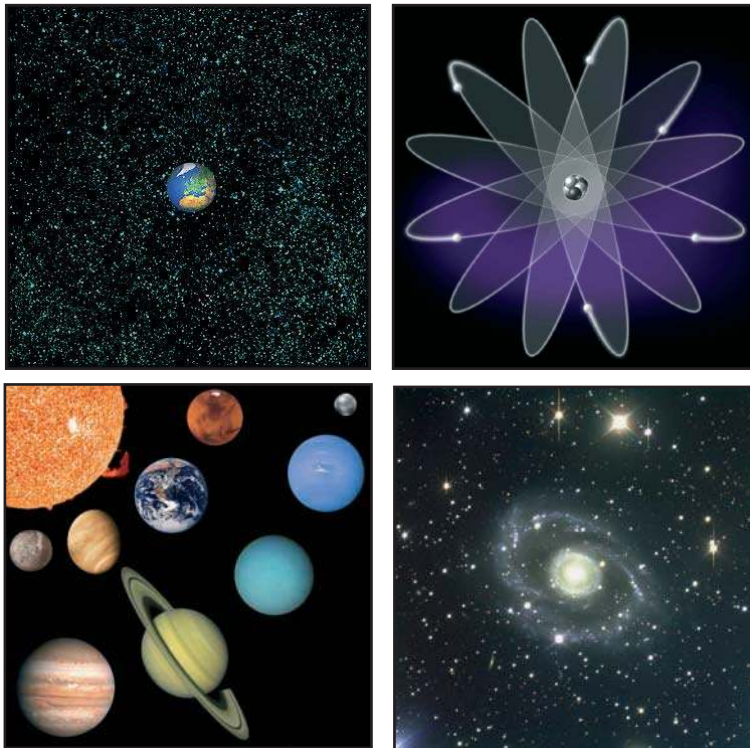
SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX

- Je sais déterminer la nature d'un mouvement en exploitant un ensemble de positions associées à des dates sur une trajectoire.
- Je sais mesurer l'intensité d'une force et l'exprimer en newton (N).
- Je sais déterminer expérimentalement la position du centre de gravité d'un corps.

SAVOIR-FAIRE THEORIQUES

- Je sais calculer une vitesse en mètres par seconde et en kilomètres par heure.
- Je sais exploiter la relation entre le poids d'un corps et sa masse.
- Je sais représenter le poids d'un corps ou une force quelconque par un vecteur.
- Je sais appliquer la condition d'équilibre d'un corps soumis à deux forces.
- Je sais appliquer la 3^{ème} Loi de Newton.
- Je sais calculer une pression.
- Je sais expliquer le fonctionnement d'outils simples comme les outils coupants ou pointus.

SYSTÈMES ET INTERACTIONS MÉCANIQUES



L'atome est un grain de matière de l'ordre de l'infiniment petit à notre échelle, l'étoile est un grain de matière dans l'Univers ; comment appliquer les lois de la Mécanique avec une telle étendue de l'échelle des dimensions ?

OBJECTIFS

- Distinguer un système déformable d'un système indéformable ou solide
- Identifier les interactions intérieures au système matériel
- Identifier les interactions du système avec le milieu extérieur
- Etablir un bilan des forces extérieures qui agissent sur un système matériel
- Déterminer le centre d'inertie d'un solide de forme simple

1. Objets et corps autour de nous

Une bille d'acier, un caillou, une bouteille de verre (Fig.1), sont des objets courants caractérisés chacun par une forme déterminée, un volume, des propriétés physiques en général comme la masse, la rigidité... Est-il facile avec des moyens simples de modifier leur forme ?

La matière qui constitue ces objets se trouve à l'état solide . Ce sont des corps indéformables. Ces objets sont appelés des **corps solides** ou **solides** tout court.

Un ressort (Fig. 2a), un élastique, le tremplin du plongeur d'une piscine, une balle de tennis, un tas de sable (Fig. 2b), un bloc de pâte à modeler...sont également constitués de matière à l'état solide ; cependant ils peuvent être déformés.

Ces objets ne sont pas des corps solides au sens mécanique du terme car ils peuvent changer de forme sous l'effet d'actions extérieures . Ce sont des **corps déformables**.



Fig.1



Fig. 2 a

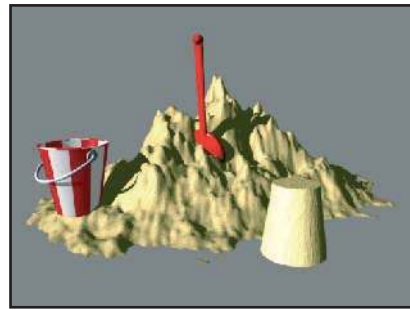


Fig.2 b

Activité 1

Dans quelle catégorie peut-on mettre une quantité de liquide ou de gaz contenue dans un vase ?

Activité 2

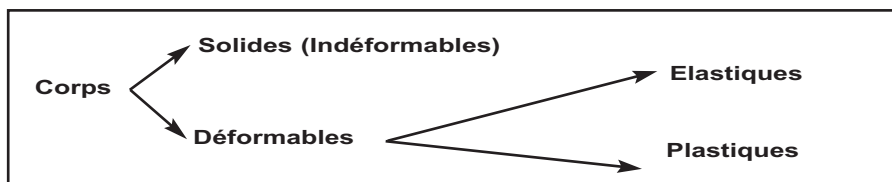
Extraire de la liste précédente les corps élastiques et en rechercher d'autres.

Certains parmi les corps précédents peuvent reprendre leur forme initiale lorsque les forces déformantes disparaissent : ce sont des **corps élastiques**.

D'autres corps ne reprennent pas leur forme initiale quand cessent les causes de leur déformation; on dit que ces corps sont **plastiques**.

Activité 3

Extraire de la liste précédente les corps plastiques et en rechercher d'autres.



Définition

Un corps est tout objet matériel, solide, liquide ou gazeux, caractérisé par ses propriétés physiques.

2. Point matériel

Pulvérisons dans un pilon un morceau de sucre.

On obtient une poudre blanche formée de particules très fines.

Chaque grain de cette poudre est considéré à son tour comme un corps; mais ses dimensions sont très petites **par rapport** au corps de départ (le morceau de sucre). Sur un schéma à l'échelle de notre vision à l'oeil nu, ce grain de sucre va être représenté par un **point géométrique**.

Vu sous le microscope ce grain de matière paraît gros et prend l'aspect d'un assemblage de plusieurs cubes transparents.

Le morceau de sucre de départ est un assemblage d'un grand nombre de ces grains minuscules de matière (Fig. 3).



Fig.3

Activité 1

Représentons sur un schéma (à l'échelle de 1cm pour 6000km, par exemple) la planète Terre avec un satellite d'émission de télévision en orbite à 36000 km d'altitude ; le satellite a une envergure de l'ordre de 12 m (Fig.4). Quel serait le diamètre du dessin représentant le satellite à l'échelle de la figure ? est-ce visible sous un microscope ?

La trace que laisserait la pointe du crayon sur le schéma symbolise le satellite sur sa trajectoire. Toutes les informations sur sa forme, ses dimensions, son orientation par rapport à la Terre , au Soleil, sa rotation sur lui-même...ne sont plus prises en considération. Le satellite est réduit à un corps ponctuel de même masse confondu avec son centre d'inertie G.

Le satellite est modélisé par un **point matériel** sur sa trajectoire autour de la Terre.



Fig.4

Définition

On appelle **point matériel**, un corps dont les dimensions sont suffisamment petites par rapport à celles des espaces dans lesquels il évolue, pour le considérer comme un point géométrique sans dimensions confondu avec son centre d'inertie et doué de la masse de ce corps.

La seule propriété du point matériel prise en compte en Mécanique est donc sa masse m .

Activité 2

Peut-on considérer la Terre sur sa trajectoire dans le Système Solaire, la Lune autour de la Terre, l'électron autour du noyau, l'athlète sur sa trajectoire lors d'un saut à la perche ou en hauteur... comme des points matériels ?

Remarque

Un point matériel a un poids $\vec{P} = m\vec{g}$; le poids $\vec{P}$ est une force appliquée au centre d'inertie du corps confondu avec le point lui-même.

3. Systèmes matériels

3.1. Définition

Le morceau de sucre que l'on a pulvérisé est fabriqué en usine en agglomérant, dans un moule parallélépipédique, du sucre en poudre.

Le morceau de sucre est un solide constitué d'un grand nombre de points matériels.

Un morceau de cuivre pur est également constitué d'un agglomérat d'un nombre énorme d'atomes de cuivre (Fig.5) ; chacun de ces atomes peut, à notre échelle, être considéré comme un point matériel.

Il en est de même pour un nuage formé d'une multitude de gouttelettes d'eau...ou de notre galaxie, la Voie Lactée, avec ses milliards d'étoiles (Fig.6-a), le Système Solaire (Fig.6-b)...

Chacun de ces ensembles de points matériels (morceau de sucre, morceau de cuivre, nuage, Voie Lactée...) est appelé **système matériel** ou **système mécanique**. En réalité chacun de ces points matériels modélise un corps (une étoile, une planète, une gouttelette d'eau, un grain de sucre,...); le système matériel est donc un ensemble de corps.

Définition

On appelle **système matériel** (ou **système mécanique**) tout ensemble de points matériels ou de corps parfaitement bien délimité.

On symbolise un système par la lettre $S = \{ \text{éléments de } S \}$; sur un schéma S est représenté comme sur la figure 7.

Activité

L'atome de sodium, l'image de la galaxie d'Andromède projetée sur un écran, une bicyclette, un volume de dioxygène pur dans un flacon, un oiseau en vol et son ombre au sol...Quels sont parmi tous ces exemples ceux que l'on peut considérer comme des systèmes matériels ? Comment fait-on la distinction entre les uns et les autres ?

3.2. Systèmes déformables et systèmes indéformables

On a vu au paragraphe 1 beaucoup d'exemples de corps solides et de corps déformables ; on dit également et respectivement systèmes matériels indéformables et systèmes matériels déformables.

Dans le cas général, un ensemble de corps peut constituer un système matériel déformable ou indéformable. Le système matériel indéformable est également appelé **solide**.

Une bille d'acier, le cadre d'un vélo, sont des systèmes matériels indéformables formés d'un seul corps ; le satellite géostationnaire HotBird (Fig.8) est vu par nos paraboles de réception toujours dans la même position par rapport à la Terre ; le système matériel {HotBird, Terre} est un système matériel indéformable formé de deux corps.

Définition

Un système matériel est dit **indéformable** si la distance entre deux quelconques des points matériels qui le constituent est invariable durant son observation.



Fig. 5

Atomes de cuivre vus au microscope électronique



Fig. 6-a



Fig .6-b

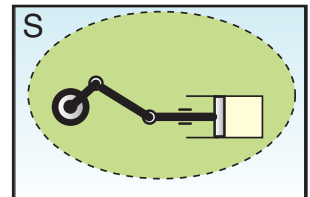


Fig.7



Fig. 8

Activité

Chercher d'autres exemples de systèmes indéformables à plusieurs corps.

Le ressort, le Système solaire, la bicyclette (Fig.9), l'atome, sont des systèmes matériels dont les différentes parties ne sont pas fixes les unes par rapport aux autres. De tels systèmes sont dits systèmes matériels déformables.

Définition

Un système matériel déformable est un système qui contient au moins deux points matériels dont la distance est variable ou susceptible de varier durant son observation.

Remarque

La roue d'une bicyclette a une jante, à priori, rigide et parfaitement circulaire ; elle peut être considérée au repos comme un solide. La jante subit en réalité des flexions élastiques qui la rendent souvent momentanément légèrement ovale (Fig. 10).

La bille d'acier qui repose sur un plan d'acier ne garde pas non plus sa forme sphérique supposée parfaite au départ, la bille s'aplatit et le plan s'enfonce localement. Le contact n'est ainsi jamais ponctuel mais selon une surface (Fig.11).

Le solide au sens mécanique du terme n'existe pas dans la réalité; c'est une approximation du système déformable dans laquelle on néglige les faibles déplacements de ses parties autour de leur position moyenne par rapport à ses dimensions.

Exemple : La molécule d'eau est considérée en première approximation comme un solide de forme triangulaire (Fig.12). En réalité, les atomes d'hydrogène ne sont pas dans des positions fixes par rapport à l'oxygène ; ils vibrent autour de leur position moyenne comme s'ils étaient reliés entre eux par des ressorts (Fig.13). Il en est ainsi de toutes les molécules polyatomiques.

3.3. Masse et poids d'un système matériel

Les constructeurs de voitures fournissent aux douaniers des catalogues des pièces des voitures avec leur masse (de la plus petite vis au châssis) pour chaque modèle mis en circulation (Fig.14).

Comment détectent-ils la présence de caches dans une voiture en douane remplies de marchandise prohibée avant de décider de la démonter ?

La masse M d'un système matériel est égale à la somme des masses m_i des n points matériels (ou parties) qui le constituent.

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$$

Ce que l'on peut écrire plus succinctement ainsi $M = \sum_{i=1}^n m_i$
en lisant «somme de $i=1$ à n de m_i »

Le poids d'un système matériel est égal à la somme des poids des n points matériels (ou parties) qui le constituent.

On suppose pour simplifier que les systèmes que l'on va étudier ont des dimensions telles que le vecteur $\vec{g}$ soit constant en tous ses points.

M est la masse totale du système.



Fig. 9

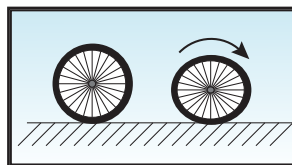


Fig. 10

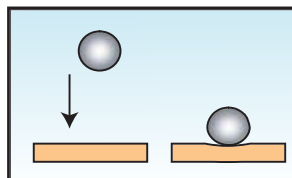


Fig. 11

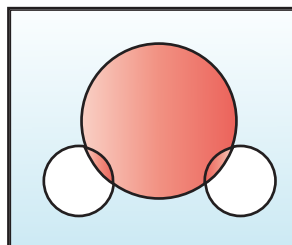


Fig. 12

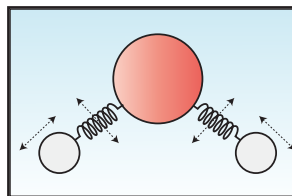


Fig. 13



Fig. 14

$$\vec{P} = m_1 \vec{g} + m_2 \vec{g} + m_i \vec{g} \dots + m_n \vec{g}$$

On peut écrire :

$$\vec{P} = (m_1 + m_2 + \dots + m_i \dots + m_n) \vec{g} = M \vec{g} \Rightarrow \boxed{\vec{P} = M \vec{g}}$$

On représente le poids d'un système matériel par un vecteur d'origine **G**, **centre d'inertie** ou **centre de gravité** du système matériel considéré et de valeur $||\vec{P}|| = M \cdot ||\vec{g}||$ (Fig.15).

Comment déterminer la position du centre d'inertie d'un système matériel ?

4. Centre d'inertie d'un système matériel

4.1. Position du centre d'inertie

Fixons deux boules identiques de la boîte de modèles moléculaires aux extrémités d'une tige rigide et légère (bâtonnet ou paille en plastique) de 10 cm de longueur. Passons un fil sous la paille et soulevons le système matériel ainsi constitué.

Il faut faire beaucoup d'essais avant de constater que la seule position du fil pour laquelle le système se soulève en bloc est le milieu C de la tige (Fig.16).

En C la tension du fil $\vec{T}$ et le poids $\vec{P}$ forment un système de forces directement opposées ; le milieu C est donc confondu avec le centre d'inertie G du système étudié. G étant le point d'application du poids.

Reprenons avec deux boules différentes (oxygène et hydrogène par exemple) de masses respectives m_1 et m_2 (Fig.17). Cherchons là encore la position du centre d'inertie de l'ensemble sur la paille entre les centres A et B des deux boules.

On constate que G est plus proche de la boule de plus grande masse ; mesurons AG et BG. On constate que, quelles que soient m_1 et m_2 , on a :

$$m_1 \cdot AG = m_2 \cdot GB \quad \text{ou} \quad m_1 \cdot \vec{AG} = m_2 \cdot \vec{GB}$$

ce que l'on peut écrire $m_1 \cdot \vec{GA} + m_2 \cdot \vec{GB} = \vec{0} \Rightarrow$ le point G, centre de gravité (ou d'inertie) de deux boules, est le barycentre des deux points A et B affectés chacun de la masse de la boule correspondante.

Définition

Le centre d'inertie G d'un système matériel est le barycentre des points matériels qui le constituent pondérés chacun de sa masse m_i .

4.2. Centre d'inertie de corps homogènes de forme géométrique simple

Exemple : Considérons une barre homogène de section constante ; on peut décomposer cette barre en un ensemble de paires de points matériels A_i et B_i de masses identiques et symétriques par rapport à la médiatrice de la barre (Fig.18). Le centre O de la barre est le barycentre de toutes les paires et donc de tous les points matériels qui constituent la barre. G est confondu avec O.

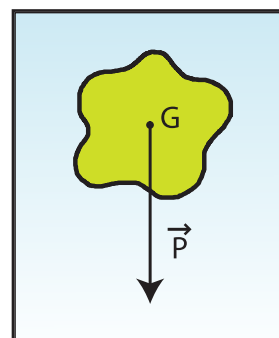


Fig. 15

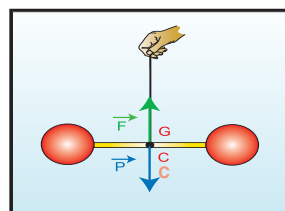


Fig. 16

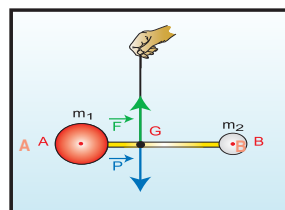


Fig. 17

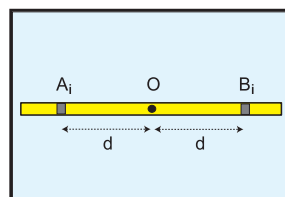


Fig.18

Ce raisonnement peut être généralisé et étendu à tous les systèmes matériels dont la répartition de masse présente un élément de symétrie : axe de symétrie, plan de symétrie, centre de symétrie :

• G appartient toujours à l'élément de symétrie ou à leur intersection s'il y en a plus d'un.

Exemples : Anneau circulaire, Triangle équilatéral, Boule pleine (ou creuse) homogène, Cube homogène,... (Fig. 19)

Rappel : Un solide est dit homogène lorsque en tout point la masse volumique est constante.

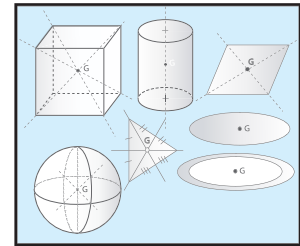


Fig.19

Ces quelques propriétés permettent de déterminer le centre d'inertie de solides ou de systèmes de formes plus complexes ; il suffit de les décomposer en un certain nombre de solides de formes géométriques simples pour lesquels on connaît la position du centre d'inertie ; on travaille ensuite de proche en proche en appliquant la relation barycentrique à ces solides pris deux à deux.

Exercice résolu

Enoncé

Un solide homogène a la forme d'un trapèze représenté sur la figure 20. Il a été découpé dans une plaque plane d'épaisseur négligeable dont la masse par unité de surface est 1g.cm^{-2} . Déterminer les coordonnées de son centre d'inertie dans le repère (O, x, y) choisi, dont les axes sont gradués en centimètres.

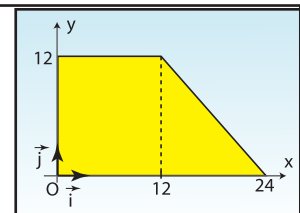


Fig. 20

Solution

- Décomposons le trapèze en deux solides accolés : le carré OABC de masse m_1 et le triangle BCD de masse m_2 (Fig.21);

on a $m_1 = 144\text{g}$ et $m_2 = 72\text{g}$

- Déterminons les coordonnées des centres d'inertie G_1 et G_2 respectifs de ces deux solides ;

- G_1 est au centre du carré soit (6,6) et G_2 au tiers d'une médiane quelconque du triangle soit (16,4);

- Le centre d'inertie du trapèze est situé sur le segment G_1G_2 , sûrement plus proche de G_1 que de G_2 et tel que : $m_1 \overrightarrow{GG_1} + m_2 \overrightarrow{GG_2} = \vec{0}$; si on introduit l'origine O du repère, on aura :

$$m_1(\overrightarrow{GO} + \overrightarrow{OG_1}) + m_2(\overrightarrow{GO} + \overrightarrow{OG_2}) = \vec{0} \text{ d'où :}$$

$$\overrightarrow{OG} = \frac{m_1 \overrightarrow{OG_1} + m_2 \overrightarrow{OG_2}}{m_1 + m_2} \quad \text{avec } \overrightarrow{OG_1} \begin{cases} x_1 = 6 \\ y_1 = 6 \end{cases} \quad \text{et } \overrightarrow{OG_2} \begin{cases} x_2 = 16 \\ y_2 = 4 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{OG} \begin{cases} x = \frac{1}{m_1 + m_2} [m_1 x_1 + m_2 x_2] \\ y = \frac{1}{m_1 + m_2} [m_1 y_1 + m_2 y_2] \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OG} \begin{cases} 9,33 \\ 5,33 \end{cases}$$

On peut vérifier sur un papier millimétré que le point G se trouve effectivement sur G_1G_2 .

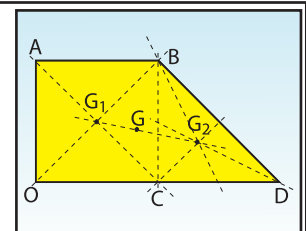


Fig. 21

5. Actions mécaniques et systèmes

Considérons le système $(S) = \{\text{vélo, cycliste}\}$ représenté sur la figure 22 et faisons l'inventaire des actions mécaniques que subissent ses différentes parties :

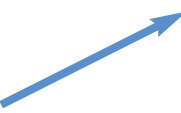
- Action du cycliste sur la pédale
- Action du cycliste sur le guidon
- Action de la chaîne sur le pignon arrière
- Poids du cycliste....



Fig.22

Activité

Continuer à enrichir cette liste en cherchant d'autres actions s'exerçant sur ce système.
Répartir ces actions sur les deux lignes du tableau suivant :

Actions exercées par un élément de (S) sur un autre élément de (S)	Action N°1... Action N°2... • • •	Modéliser sur un schéma par des vecteurs force bleus 
Actions exercées par un élément hors du système (S) sur un élément de (S)	Action N°1... Action N°2... • • •	Modéliser sur un schéma par des vecteurs force rouges 

Toutes les forces représentées par un vecteur bleu sont des **forces intérieures**

Toutes les forces représentées par un vecteur rouge sont des **forces extérieures**

Définition

On appelle **force extérieure** agissant sur un système matériel (S) toute force résultant de l'action d'un élément extérieur à (S) sur un ou plusieurs des points matériels ou corps qui le constituent.

On appelle **force intérieure** au système (S) toute force résultant de l'action d'un élément appartenant à (S) sur tout autre élément ou corps de (S).

6. Démarche à suivre

Enoncé

Considérons le cycliste précédent dont le vélo est muni d'un attelage tirant sur une voiturette (Fig.23) ; on peut considérer le tout comme un seul système matériel $(S) = \{\text{voiturette, cycliste, vélo}\}$ ou bien décomposer l'ensemble en deux systèmes matériels :

$(S_1) = \{\text{voiturette}\}$, $(S_2) = \{\text{cycliste, vélo}\}$. Faire le bilan des forces (intérieures et extérieures) qui s'exercent sur le système (S_2) pris isolément.

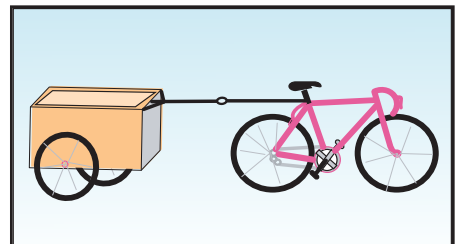


Fig. 23

Démarche

- Représenter tous les éléments en présence sur une figure sans oublier la Terre et le sol .
- Représenter par des flèches à double sens en pointillé les interactions à distance entre les différents éléments : poids, forces de gravitation, forces électriques...
- Représenter par des flèches à double sens en trait plein les interactions de contact entre les différents éléments : tension d'un fil, réaction du plan...
- Délimiter par une ligne en pointillé (frontière) le système à étudier.

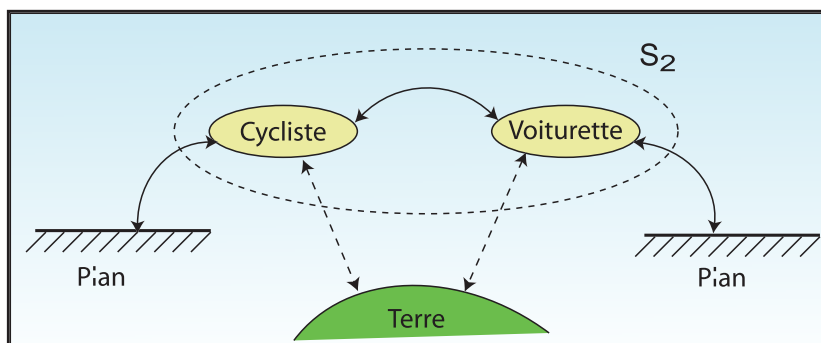


Fig. 24

- Faire l'inventaire des flèches qui traversent la frontière pour dénombrer les **forces extérieures** et les mettre dans le tableau dans la colonne adéquate en les décrivant : (exemple : action de la Terre sur le cycliste soit son poids $\vec{P}$).
- Faire l'inventaire des **forces intérieures** en repérant les flèches qui ne traversent pas la frontière.

Activité 1

Continuer l'exercice précédent en appliquant cette démarche successivement aux systèmes (S_1), (S_2), (S) ou d'autres que l'on pourra éventuellement choisir.

- Si on considère le système matériel (S_2), la force exercée par la voiturette sur la bicyclette $\vec{F}_{V/B}$ est une **force extérieure**.
- Si on considère le système (S_1), la force exercée par la bicyclette sur la voiturette $\vec{F}_{B/V}$ est une **force extérieure**.
- Si on considère le système matériel (S), $\vec{F}_{V/B}$ et $\vec{F}_{B/V}$ deviennent des **forces intérieures** et disparaissent toutes les deux de l'inventaire des forces extérieures (Fig.25).
D'après la 3ème loi de Newton, on a $\vec{F}_{V/B} = -\vec{F}_{B/V}$ et donc $\vec{F}_{V/B} + \vec{F}_{B/V} = \vec{0}$

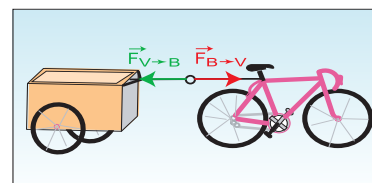


Fig. 25

Ce résultat est général : Dans un système quelconque les forces intérieures sont ,deux à deux directement opposées.

Activité 2

Chercher dans le système (S) d'autres forces intérieures que l'on peut regrouper en paires équivalentes à la force nulle.

Dans un système matériel quelconque , l'ensemble des forces intérieures est équivalent à la force nulle.

Les forces intérieures ne peuvent en particulier pas modifier la position ou la vitesse du centre d'inertie d'un système matériel déformable ou indéformable.

Dans un solide les forces intérieures sont les interactions entre les différents points matériels qui le constituent. Elles assurent sa cohésion et sa rigidité.

Activité expérimentale

Objectifs

- Déterminer la position du centre d'inertie d'un solide homogène en forme de plaque en utilisant les propriétés barycentriques du centre d'inertie.
- Vérifier expérimentalement la position trouvée.

Matériel

- Des plaques de matière plastique plane de 1 à 2 mm d'épaisseur, de formes géométriques simples (12 à 15 cm maximum pour la plus grande dimension) avec deux ou trois petits trous sur leur périphérie (Fig.26).
- Balance électronique ou ordinaire avec des masses marquées.
- Double décimètre et papier millimétré.
- Support d'aiguille aimantée ou tout autre pointe verticale.
- Un support avec fil à plomb et un fil terminé par un crochet de suspension

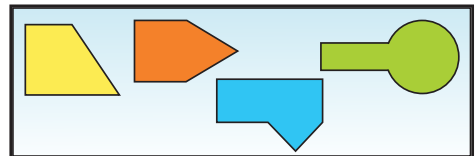


Fig.26

Manipulation

1. Effectuer le calcul de détermination du centre d'inertie G d'une plaque (après avoir reproduit sa forme sur papier millimétré) et le marquer sur le papier millimétré.
2. Pointer G sur la plaque par superposition du papier millimétré.
3. Vérifier la position trouvée en essayant de mettre la plaque en équilibre horizontal sur la pointe verticale fournie. S'il n'y a pas coïncidence déterminer l'écart et chercher les causes d'erreurs.
4. Vérifier également la position de G en accrochant la plaque successivement par les trous et en cherchant l'intersection des traces de passage de la verticale sur la plaque.

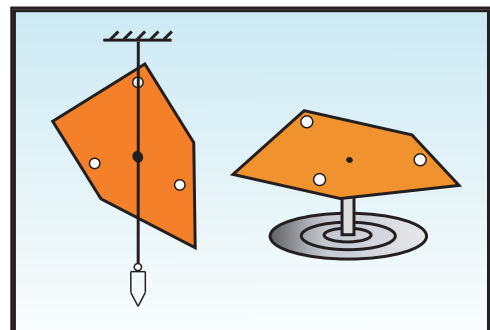


Fig. 27

L'essentiel du cours

- Un corps est tout objet matériel caractérisé par ses propriétés physiques.
- Un point matériel est un corps dont les dimensions sont suffisamment petites par rapport aux espaces dans lesquels il évolue pour qu'on le considère comme un point géométrique où la masse du corps est concentrée.
- Le point matériel est caractérisé en Mécanique uniquement par sa masse.
- On appelle système matériel (S) tout ensemble défini de points matériels (M_i), corps (C_i) ou autres systèmes matériels (S_i) ; son symbole est $S = \{M_1, M_2, \dots, C_1, C_2, \dots, S_1, S_2, \dots\}$.
- La masse d'un système matériel est égale à la somme des masses de ses éléments.
- Le poids d'un système matériel est égal à la somme des poids de ses éléments
- Tout système matériel possède un centre d'inertie ou centre de gravité G dont la position est déterminée par la répartition des masses dans l'espace.
- Pour un solide homogène, G est à l'intersection des éléments de symétrie du solide étudié.
- Un système matériel est dit indéformable quand les positions relatives de tous ses éléments les uns par rapport aux autres sont invariables au cours du temps d'observation ; un tel système est appelé également un **solide**.
- Tous les systèmes matériels qui ne vérifient pas la définition précédente sont des systèmes déformables.
- On appelle **force extérieure** s'exerçant sur (S) toute force résultant de l'action d'un élément extérieur à (S) sur un ou plusieurs éléments de (S).
- On appelle **force intérieure** au système (S) toute force $\vec{F}_{ij}$ résultant de l'action d'un élément M_i de (S) sur tout autre élément M_j de (S) ; l'ensemble des forces intérieures d'un système matériel quelconque est équivalent à la force nulle.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1. *Recopier et barrer ce qui est superflu dans la parenthèse ou compléter par le terme adéquat:*
 - Un solide ponctuel est appelé (système, point) matériel.
 - La masse d'un système matériel est égale à des masses de ses éléments.
 - Le poids d'un système matériel est égal à des poids de tous ses éléments.
 - Le poids d'un système matériel est appliqué en son appelé également
 - Le centre d'inertie d'un système matériel est toujours (éloigné, proche) des éléments (les plus lourds, les plus légers) du système considéré.
2. *Répondre par vrai ou faux aux propositions suivantes :*
 - Le centre d'inertie d'un solide peut se trouver en dehors de la matière qui le constitue.
 - Le nombre des forces intérieures à un système matériel peut être impair et l'ensemble de ces forces n'est plus équivalent à la force nulle.
 - Un système matériel indéformable peut être constitué de plusieurs solides séparés.
 - Le poids d'un système matériel est égal au poids de son centre d'inertie
 - Si je modifie la frontière d'un système matériel, certaines forces intérieures deviennent des forces extérieures et l'ensemble des forces intérieures n'est plus équivalent à la force nulle.

Je sais appliquer le cours

3. Soit le système constitué du parachutiste et de son parachute ouvert en chute vers le sol (fig.28). Faire l'inventaire des interactions et le bilan des forces intérieures et extérieures en utilisant le diagramme des interactions.

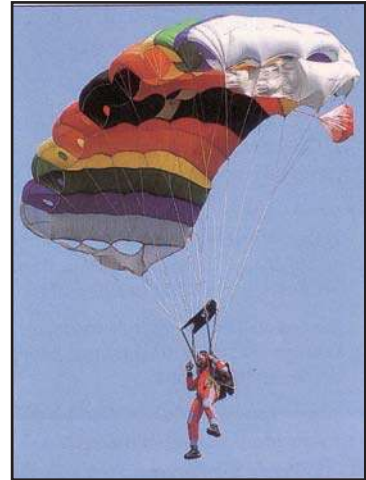


Fig. 28

4. Une personne âgée marche sur un sol horizontal en s'appuyant sur une canne.

a) Faire l'inventaire de tous les systèmes matériels que l'on peut choisir en précisant leur caractère déformable ou indéformable.

b) Faire dans chaque cas le diagramme des interactions et en déduire le bilan des forces extérieures qui s'exercent sur chaque système.

5. Soit un poisson rouge dans un aquarium posé sur une table horizontale.

a) Faire le diagramme des interactions pour les systèmes suivants : {poisson} ; {poisson, aquarium, eau}.

b) Faire le bilan des forces extérieures qui s'exercent sur chacun de ces systèmes matériels.

6. Citer trois exemples de solides constitués de différentes parties pleines dont le centre d'inertie est situé à l'extérieur de la matière qui les constitue.

7. Une équerre de menuisier est constituée de deux règles homogènes de mêmes dimensions formant un angle droit. L'une de ces règles a une masse deux fois plus grande que l'autre. Faire un schéma et déterminer la position du centre d'inertie de l'équerre.

8. La roue d'une voiture est «déséquilibrée» lorsque son centre d'inertie ne coïncide plus avec son axe de rotation. Pour l'équilibrer, on ajoute sur le pourtour de la jante une masselotte en plomb de masse m . Sachant que le centre d'inertie de la roue se trouve à 1,5 mm de son axe de rotation :

a) Faire un schéma sur lequel on précisera la position de la masselotte d'équilibrage. Justifier la réponse.

b) Calculer la masse d'équilibrage m ; on donne la masse de la roue $M = 12$ kg et le rayon de la jante $r = 28$ cm.

9. Centre d'inertie de quelques molécules :

On donne $M_N = 14$ g.mol⁻¹ ; $M_H = 1$ g.mol⁻¹ ; $M_O = 16$ g.mol⁻¹ ; les noyaux des atomes sont supposés ponctuels.

a) Le centre d'inertie de la molécule de dioxyde de carbone coïncide avec le noyau de l'atome de carbone. Quelle peut être la structure de la molécule ?

b) Dans une molécule d'eau les noyaux d'hydrogène sont chacun à 100 pm du noyau d'oxygène. L'écart angulaire entre les deux directions de liaison OH est voisin de 105°. Déterminer la position du centre d'inertie de la molécule dans un repère que l'on précisera.

c) Même question avec la molécule de dioxyde d'azote NO₂ sachant que la distance NO = 150 pm et que l'angle ONO = 134°.

10. Dans un disque plat homogène de rayon R , on découpe une rondelle circulaire de rayon $r = R/2$ (Fig.29).

- Faire un raisonnement qualitatif pour placer approximativement le centre d'inertie du solide en forme de croissant obtenu.
- Calculer la position exacte du centre d'inertie du solide.
- Quelle surcharge m ponctuelle faudrait-il placer en P pour ramener le centre d'inertie de l'ensemble au centre O ? On donne la masse du disque de départ $M = 250 \text{ g}$.

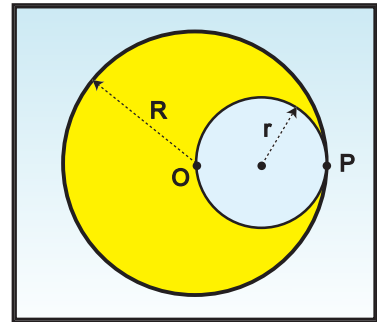


Fig.29

11. Un solide (S_1) de masse $m_1 = 20\text{g}$ est suspendu en un point fixe O par un ressort (R_1), (Fig.30). Un second ressort (R_2) est fixé, d'une part, au solide (S_1) et d'autre part, à un solide (S_2) de masse $m_2 = 30\text{g}$.

- Déterminer pour les systèmes suivants les forces intérieures et les forces extérieures : $\{(S_1), (R_1)\}$; $\{(S_2), (R_2)\}$; $\{(S_1), (S_2), (R_2)\}$.
- Sachant que la raideur du ressort (R_1) est de 100 N.m^{-1} et que celle du ressort (R_2) est de 150 N.m^{-1} , calculer les allongements respectifs des deux ressorts. $\|\vec{g}\| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$

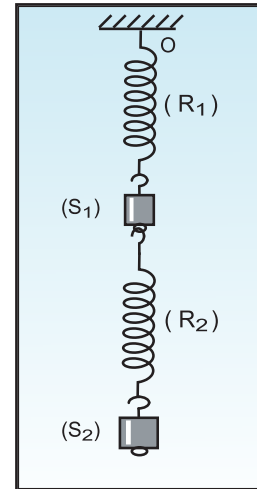


Fig.30

12. Une automobile tracte une caravane sur une route horizontale. Les forces de contact exercées par la chaussée sur les quatre roues motrices de l'automobile sont inclinées vers l'avant, les forces de contact exercées par la chaussée sur les roues de la caravane sont orientées vers l'arrière ; on modélisera par deux forces horizontales les actions de l'air sur l'automobile et sur la caravane.

1- Soit le système {caravane}

- Quels sont les corps avec lesquels le système est en interaction ?
- Schématiser la caravane et représenter sans considération d'échelle, les forces qui s'exercent sur le système choisi.

2- Choisir le système {automobile} et répondre aux mêmes questions.

3- Choisir le système {caravane, automobile} et répondre aux mêmes questions.

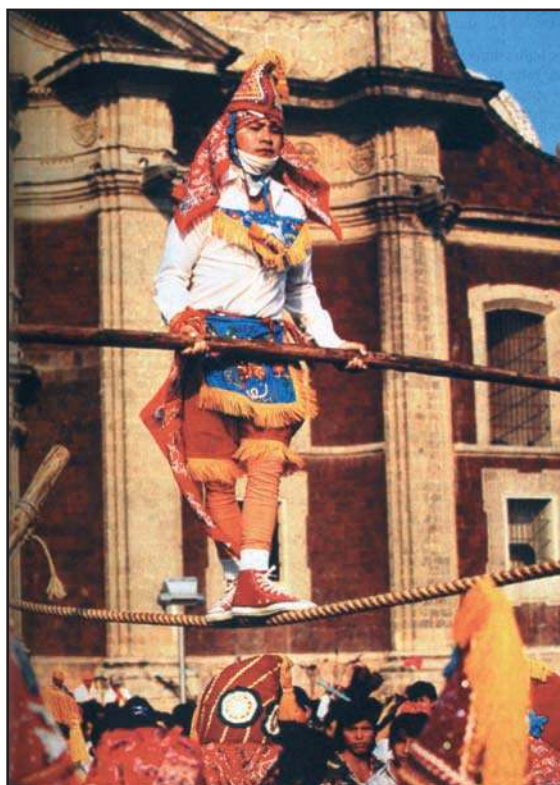
13. Un nageur plonge de l'arrière d'une barque. La barque part alors en sens opposé.

- Faire un bilan des forces en prenant comme système : {le plongeur} ; {la barque} ; {la barque, le plongeur}. Pour chaque système faire un schéma sur lequel on représentera les forces.
- Expliquer le mouvement de la barque lorsque le personnage plonge.

ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE SOUMIS À TROIS FORCES

CHAPITRE

10



Pourquoi le funambule doit-il utiliser une longue perche pour assurer son équilibre sur le fil ?

OBJECTIFS

- Etablir expérimentalement la relation entre trois forces non parallèles auxquelles est soumis un solide en équilibre.
- Enoncer les conditions d'équilibre d'un solide soumis à trois forces.
- Appliquer les conditions d'équilibre d'un solide soumis à trois forces coplanaires à la détermination des forces de frottement.
- Résoudre un problème d'équilibre d'un solide soumis à trois forces.

Activité

- Rappeler la définition d'un solide de référence.
- Qu'appelle-t-on repère terrestre ? Quel rôle joue la Terre dans un repère terrestre ? Choisir et représenter des repères plans orthonormés terrestres.
- Qu'est ce qu'un état d'équilibre en Mécanique ? Quand dit-on qu'un corps est en mouvement ?
- Quel sens donner à l'expression suivante : «l'état de mouvement ou d'équilibre d'un corps sont toujours relatifs» ?
- Proposer une opinion (appuyée par des arguments et des exemples) concernant les deux affirmations suivantes :
 - «Un système matériel dont le centre d'inertie G est immobile dans un repère terrestre a tous ses points immobiles dans ce repère.»
 - «si tous les points matériels d'un système sont immobiles dans un repère terrestre, son centre d'inertie G l'est également dans ce repère.»

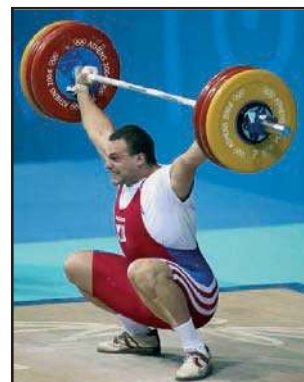


Fig. 1

1. Exemples d'observation

Un couffin chargé transporté à deux, un athlète aux anneaux, un athlète haltérophile en plein effort (Fig.1), un tableau accroché au mur par un fil (Fig.2), un corps solide accroché à un fil tendu entre deux points, un cintre avec une chemise mouillée accroché à un fil tendu, un sac à dos...

Dans toutes ces situations, essayons d'isoler un système ou un corps solide et étudions son état.

Haltère, couffin, tableau,... : chacun de ces corps est maintenu en deux points par contact avec d'autres corps.

Le couffin est immobile tant que les deux personnes sont à l'arrêt. Il est donc parfois immobile et d'autre fois en mouvement par rapport à la Terre.

- L'athlète aux anneaux doit cesser de se balancer durant quelques secondes dans cette position pour valider l'épreuve en compétition.
- Il en est de même pour l'haltérophile.
- La cadre est immobile parce qu'il est fixé à un clou planté dans le mur.

Quand ils sont à l'arrêt ou immobiles, on dit que ces corps sont en équilibre. C'est le sens commun du terme.

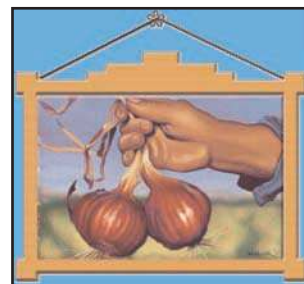


Fig. 2

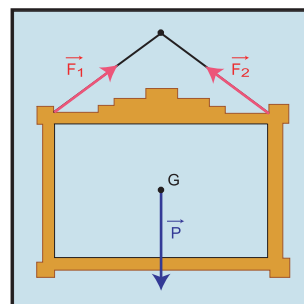


Fig. 3

Activité

Dans la majorité des exemples cités au début, on constate que le solide est toujours maintenu en équilibre sous l'effet de trois forces dont l'une est le poids (Fig.3).

Mettre en évidence dans tous les exemples cités l'existence de trois forces extérieures et les représenter sur un schéma. Que peut-on dire de leurs droites d'action dans chaque cas ?

2. Etude expérimentale

Le principe est le même que l'on utilise le dispositif vertical (2 dynamomètres et une masse marquée, Fig.4) ou le dispositif horizontal (3 dynamomètres ou 3 masses marquées Fig.5) ; ce dernier est plus pratique pour l'exploitation des résultats.

- On fixe les crochets de deux dynamomètres à cadran dont les fils sont tendus à un objet léger : un bouton de vêtement à deux ou quatre trous, un fragment de polystyrène, un petit anneau de plastique...

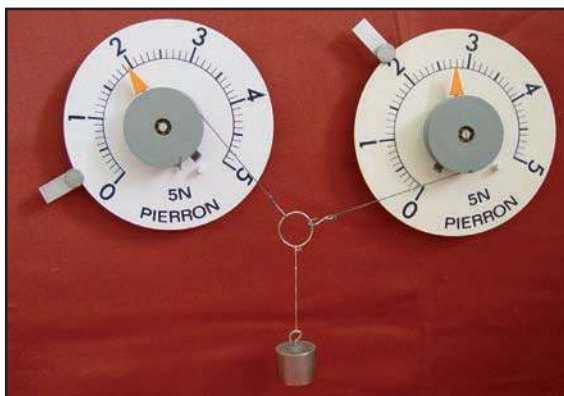


Fig. 4



Fig. 5

On constate que les deux fils sont colinéaires. Le solide au départ est en équilibre sous l'action de deux forces opposées dont on peut lire l'intensité sur les cadrans.

- Fixons un 3^{ème} dynamomètre au solide et tirons dans une direction quelconque.

Les indications des dynamomètres changent et les trois fils forment entre eux deux à deux des angles quelconques ;

Ecartons le solide de sa position d'équilibre et abandonnons-le à lui-même.

Il revient à sa position initiale..

Mettons-nous de profil par rapport au montage au niveau du plan formé par les deux premiers fils tendus.

Le troisième fil est contenu dans ce même plan.

Glissons une feuille de papier sous le dispositif, reportons avec beaucoup de soins les directions Δ_1 , Δ_2 et Δ_3 des trois fils et notons l'intensité de la force lue sur le dynamomètre correspondant à sa ligne d'action.

• Reprenons plusieurs fois cette séquence en modifiant la position des dynamomètres ou leur tension.

• On obtient à chaque fois un schéma comme celui de la figure 6 sur laquelle on reporte l'intensité de la force dans chaque direction.

Exemple : $\|\vec{F}_1\| = 3,2 \text{ N}$; $\|\vec{F}_2\| = 3,8 \text{ N}$ et $\|\vec{F}_3\| = 5 \text{ N}$.

Sur chaque feuille prolongeons les droites Δ_1 , Δ_2 et Δ_3 du côté du solide.

Les trois droites se coupent en un point O (Fig.6). Elles sont concourantes puisqu'elles appartiennent déjà à un même plan.

A partir du point O, traçons le vecteur représentatif de la force $\vec{F}_1$ puis celui de la force $\vec{F}_2$ puis celui de la force $\vec{F}_3$. (Voir figure 7).

Translatons $\vec{F}_2$ à l'extrémité de $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_3$ à l'extrémité de $\vec{F}_2$.

On constate que l'on obtient un triangle pratiquement fermé aux erreurs de tracés près (Fig.8):

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$$

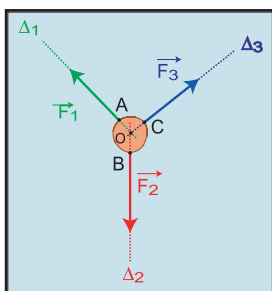


Fig.6

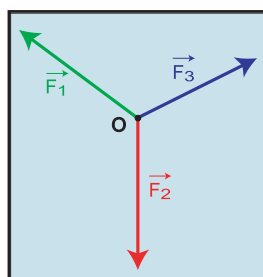


Fig.7

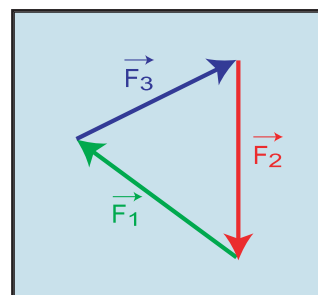


Fig.8

Si dans un repère terrestre, un solide, soumis à l'action de trois forces non parallèles $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$, est en équilibre, ces forces satisfont aux conditions suivantes :

a) leurs droites d'actions sont coplanaires.

b) leurs droites d'actions sont concourantes.

c) leur somme vectorielle est nulle : $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$

La réciproque est-elle vraie ?

Si le solide possède une vitesse initiale dans le repère d'étude et s'il est soumis à trois forces extérieures qui satisfont à la condition $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$, son centre d'inertie G garde cette vitesse (Principe de l'inertie ou 1^{ère} loi de Newton).

Le solide n'est en équilibre que si sa vitesse initiale est nulle.

Les conditions d'équilibre (a), (b), (c) sont donc **nécessaires** mais pas **suffisantes**.

Remarque 1

Si la condition (b) seulement n'est pas satisfaite, le centre d'inertie G du solide peut rester au repos dans le repère d'étude, mais le solide peut avoir un mouvement de rotation autour de G ; on saura le justifier dans le chapitre suivant.

Remarque 2

La condition (a) est en fait une conséquence de la 3^{ème} condition (c)

3. Comment appliquer la condition d'équilibre ?

Pour appliquer la condition d'équilibre à la résolution de problèmes de statique, il faut procéder méthodiquement :

• Nommer le solide étudié • Faire le diagramme des interactions et en déduire les forces extérieures de contact et à distance.	Schéma de situation
• Représenter le solide S seul. • Représenter les forces extérieures qui agissent sur lui. • Tracer le repère terrestre (x'x, O, y'y) dans le plan des forces en choisissant l'orientation des axes qui facilite le mieux le calcul des projections. • Ecrire dans ce repère les coordonnées des vecteurs forces : $\vec{F}_1 (F_{1x}, F_{1y})$; $\vec{F}_2 (F_{2x}, F_{2y})$; $\vec{F}_3 (F_{3x}, F_{3y})$.	Schéma d'analyse
• Appliquer la condition d'équilibre $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$ en la projetant sur chacun des axes ; ce qui donne un système $F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = 0$ sur (x'ox) et $F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 0$ sur (y'oy) • Déduire les inconnues du problème posé à partir de ces équations.	Résolution mathématique.

Exercice résolu

Enoncé

Un solide (S) de poids $\vec{P}$ est suspendu à l'aide de deux fils. Le premier fil (f_1) relie un point A du solide à un point fixe C d'un support et fait un angle $\alpha = 30^\circ$ avec la verticale ; le deuxième fil (f_2) attaché au point B du solide est tiré horizontalement à la main. Déterminer toutes les forces qui agissent sur le solide (S). Préciser la position exacte du point B, A étant supposé donné.

On donne : $\|\vec{P}\| = 12 \text{ N}$.

Solution

- Faire un schéma de situation (Fig.9).
- Système matériel choisi : le solide (S).
- Faire le diagramme des interactions (Fig.10).
- Le solide (S) est soumis aux forces extérieures suivantes :
 - Tension du fil (f_1) : action de contact.
 - Tension du fil (f_2) : action de contact.
 - Poids de (S) : action à distance.
- Faire un schéma d'analyse (Fig.11) en plaçant les trois forces extérieures : $\vec{P}$, $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$
- Le repère terrestre dans lequel on étudie l'équilibre est tel que :
 - Origine : le point O confondu avec G.
 - $x'ox$: axe horizontal, orienté vers la droite.
 - $y'oy$: axe vertical, orienté vers le bas

- Les coordonnées des forces dans le repère choisi :

$$\vec{T}_1 = \begin{pmatrix} -\|\vec{T}_1\|\sin\alpha \\ -\|\vec{T}_1\|\cos\alpha \end{pmatrix} ; \quad \vec{T}_2 = \begin{pmatrix} \|\vec{T}_2\| \\ 0 \end{pmatrix} ; \quad \vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ \|\vec{P}\| \end{pmatrix}$$

Appliquons la condition d'équilibre : $\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{P} = \vec{0}$

Sur Ox : $-\|\vec{T}_1\|\sin\alpha + \|\vec{T}_2\| = 0$. (1)

Sur Oy : $-\|\vec{T}_1\|\cos\alpha + \|\vec{P}\| = 0$. (2)

Système de deux équations à deux inconnues $\|\vec{T}_1\|$ et $\|\vec{T}_2\|$

$$(2) \Rightarrow \|\vec{T}_1\|\cos\alpha = \|\vec{P}\| \Rightarrow \|\vec{T}_1\| = \frac{\|\vec{P}\|}{\cos\alpha}$$

$$(1) \Rightarrow \|\vec{T}_2\| = \|\vec{T}_1\|\sin\alpha \Rightarrow \|\vec{T}_2\| = \frac{\|\vec{P}\|}{\cos\alpha} \sin\alpha = \|\vec{P}\| \cdot \tan\alpha$$

Application numérique :

$$\|\vec{T}_1\| = 12 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 8 \cdot \sqrt{3} = 13,85 \text{ N}$$

$$\|\vec{T}_2\| = 12 \cdot \tan 30^\circ = \frac{12}{\sqrt{3}} = 4 \cdot \sqrt{3} = 6,92 \text{ N}$$

Appliquer la condition que les 3 forces $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{P}$ sont concourantes:

On fixe A et on trace AC, puis la verticale passant par G. L'horizontale passant par leur intersection est le support de $\vec{T}_2$; d'où la position du point B. (Fig.12)

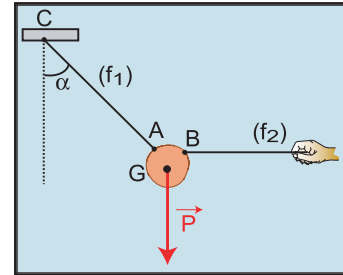


Fig.9 - Schéma de situation

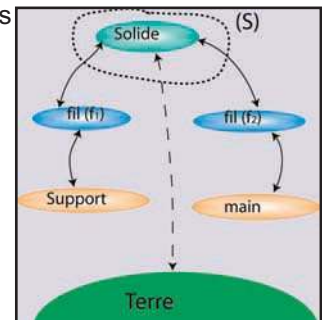


Fig.10 - Diagramme des interactions

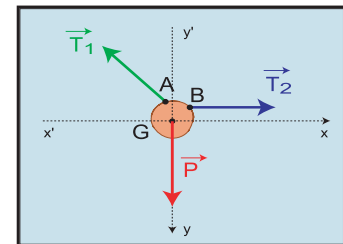


Fig.11 - Schéma d'analyse

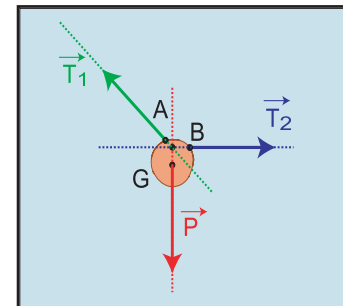


Fig.12 - Construction géométrique de B

4. Application

Activité

- Essayer, à la maison, de déplacer un lave-linge ou un meuble lourd en le faisant glisser sur le carrelage supposé horizontal (Fig.13). Qu'est-ce qui rend leur mouvement si difficile ?

• C'est un peu plus facile sur un carrelage **lisse** que sur un carrelage **rugueux**. Quelle est la raison de cette différence ?

- Sur le même carrelage, est-il plus facile de faire glisser une chaise ou quatre chaises identiques empilées ? Comment le poids, force **verticale**, peut-il modifier la valeur de la force déployée et qui est dirigée **horizontalement** ?

• Comment utiliser les conditions d'équilibre précédentes pour schématiser les forces agissant sur un objet **en équilibre** sur un plan horizontal, puis les forces agissant sur le même objet lors d'une tentative de mise en mouvement de glissement horizontal. La réaction du plan reste-t-elle toujours verticale et opposée au poids ?

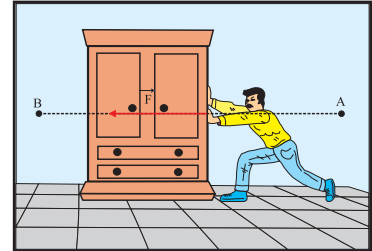


Fig.13

4.1. Etude expérimentale

Plaçons à plat, sur un plan horizontal que l'on peut incliner d'un angle α , un objet qui possède au moins une face plane. Inclignons le plan.(Fig.14)

L'objet reste en équilibre sur le plan. Le diagramme des interactions met en évidence les interactions de contact solide-plan qui sont réparties sur la surface de contact. L'action du plan sur le solide est modélisable par une force unique $\vec{R}$, que nous appelons réaction, appliquée en un point particulier de la surface de contact. $\vec{P}$ est une force constante toujours verticale.

A l'équilibre dans le repère terrestre du laboratoire :

$$\text{On a } \vec{R} + \vec{P} = \vec{0} \Rightarrow \vec{R} = -\vec{P}$$

La réaction $\vec{R}$ et le poids $\vec{P}$ forment un système de forces directement opposées (Fig.15). En particulier, $\vec{R}$ est une force verticale comme le poids. De ce fait elle est inclinée de l'angle α par rapport à la normale (ou perpendiculaire) au plan.

Dans le repère choisi sur la figure 16, on peut écrire les coordonnées de $\vec{R}$ et de $\vec{P}$.

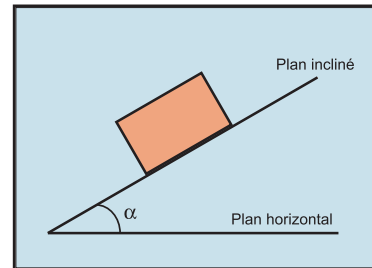


Fig.14

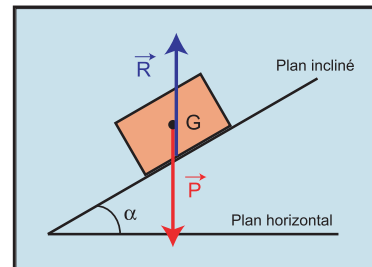


Fig.15

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} ||\vec{f}|| \\ ||\vec{N}|| \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{P} = \begin{pmatrix} -||\vec{P}||\sin\alpha \\ -||\vec{P}||\cos\alpha \end{pmatrix} \quad \text{On applique la condition d'équilibre } \vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$$

$$\text{Sur } o_x, \text{ on aura : } ||\vec{f}|| - ||\vec{P}|| \sin\alpha = 0$$

$$\text{Sur } o_y, \text{ on aura : } ||\vec{N}|| - ||\vec{P}|| \cos\alpha = 0$$

La composante $\|\vec{f}\|$ parallèle au plan (Fig.16), représente l'ensemble des forces de frottement réparties sur la surface de contact. La force de frottement, cause du maintien en équilibre du solide, est fonction de α .

On a $\|\vec{f}\| = \|\vec{P}\| \sin \alpha$

La composante de $\vec{R}$ parallèle au plan qui apparaît, est opposée au sens du mouvement attendu. Cette force qui s'oppose au mouvement est due aux forces de frottement entre le solide et le plan incliné.

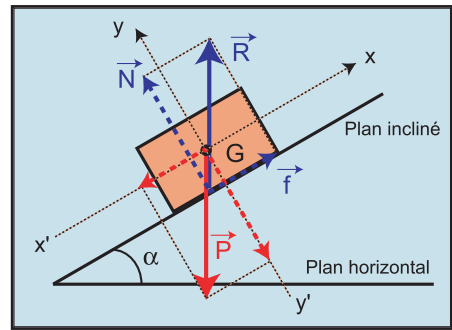


Fig. 16

Plaçons à plat sur une table horizontale le même objet. Fixons un fil en un point de sa surface et tirons soit à l'aide d'un dynamomètre soit à l'aide d'une charge de masse m comme sur le dispositif schématisé sur la figure 17.

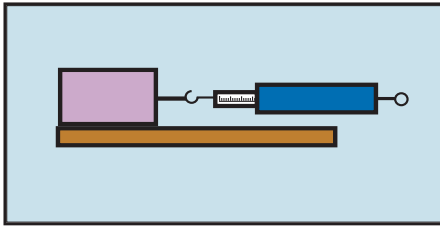


Fig.1 - a

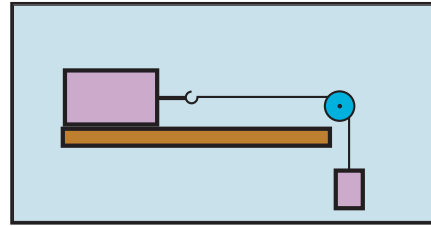


Fig. 17-b

On constate que le dynamomètre commence à s'allonger ou bien la charge commence à agir avec son poids alors que le solide reste en équilibre (Fig.18).

$\vec{P}$ est une force constante toujours verticale.

$\vec{F}$ est une force variable et horizontale.

A l'équilibre dans le repère terrestre du laboratoire :

On a $\vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \Rightarrow \vec{R} = -(\vec{F} + \vec{P})$

$\vec{R}$: la réaction du plan n'est pas perpendiculaire au plan de la table mais inclinée dans le sens opposé à celui de la force de traction $\vec{F}$.

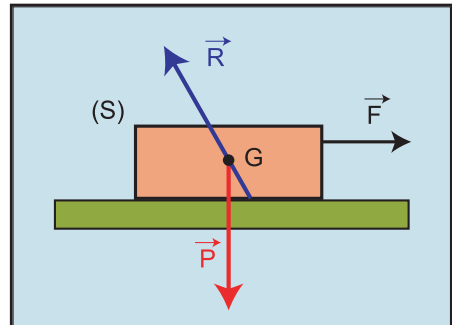


Fig. 18



Attention

Représentation de la réaction $\vec{R}$ sur un schéma .

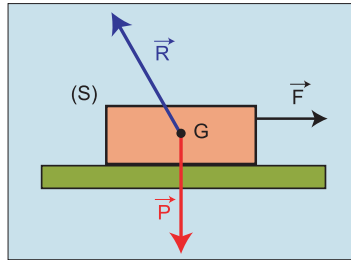
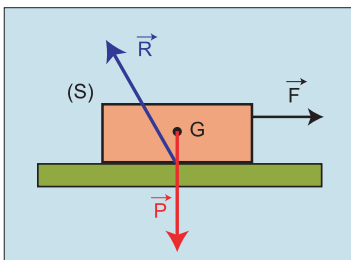


Fig. 19

SCHÉMAS INCORRECTS

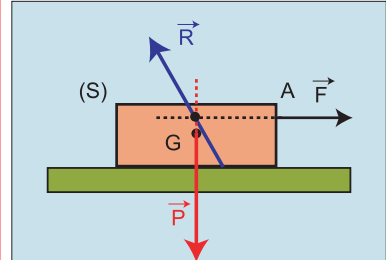
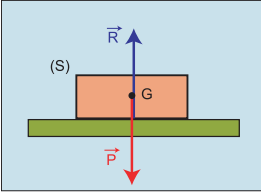
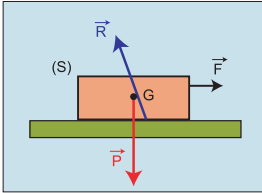
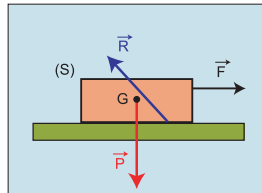
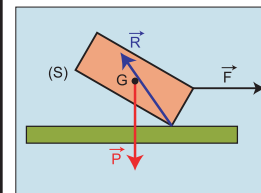


Fig. 20

SCHÉMA CORRECT

On a représenté ci-dessous des cas de figures **d'équilibre** (Fig.21-a,b,c) et de non-équilibre (Fig.21-d) avec des valeurs de $\vec{F}$ différentes :

 $\vec{F} = 0$	 $\vec{F} = \frac{\ \vec{P}\ }{10}$	 $\vec{F} = \frac{\ \vec{P}\ }{2}$	 $\vec{F} > \frac{\ \vec{P}\ }{2}$
Fig.21-a	Fig.21-b	Fig.21-c	Fig.21-d

La réaction $\vec{R}$ s'incline davantage à mesure que $\|\vec{F}\|$ augmente. Jusqu'à quel angle cette inclinaison de la réaction par rapport à la verticale est-elle possible ?

Continuons à augmenter m ou à tirer sur le dynamomètre jusqu'à ce que le solide se mette en mouvement de glissement ; notons la valeur de $\vec{F}$. Reprenons en intercalant successivement entre le solide et la table :

- des plaques minces de matériaux divers (verre , bois , acier , ...)
- du sable sec en couche mince, des gouttes d'huile , des billes...

Juste au moment où le solide se met en mouvement, la force $\vec{F}$ atteint une intensité limite $\|\vec{F}_{lim}\|$ qu'elle ne dépasse plus ; $\|\vec{F}_{lim}\|$ varie en fonction de la nature et de l'état de la surface de contact.

L'application des conditions d'équilibre montre que l'inclinaison θ de $\vec{R}$ atteint à ce moment là une valeur limite θ_0 qu'elle ne peut dépasser.

L'angle θ_0 ne dépend que de la nature des surfaces en contact et de leur état actuel :

- Avec des surfaces rugueuses en contact : θ_0 est élevé ainsi que $\|\vec{F}_{lim}\|$
- Avec des surfaces lisses en contact : θ_0 est faible ainsi que $\|\vec{F}_{lim}\|$
- Avec des lubrifiants ou des billes de roulement : θ_0 et $\|\vec{F}_{lim}\|$ sont pratiquement nuls.

La résistance au mouvement de glissement des uns par rapport aux autres des solides lorsque leurs surfaces sont en contact direct est due au **frottement**.

Tout contact solide-solide donne naissance à des forces de frottement qui tendent à s'opposer à leur glissement l'un par rapport à l'autre.

Les forces de frottement dépendent de la nature des surfaces en contact et de leur état de rugosité.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la valeur limite de la force de frottement $\|\vec{f}_{lim}\|$ ne dépend pas de l'aire de la surface de contact entre les deux solides mais seulement de la force pressante (le poids du solide dans notre cas). On peut le montrer en utilisant dans l'expérience précédente un solide parallélépipédique placé successivement sur chaque face sur la table.

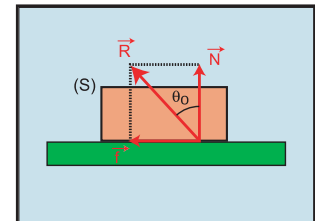


Fig. 21-e

Définition

On appelle **force de frottement** $\vec{f}$ ou $\vec{R}_T$ la composante, tangente à la surface de contact, de la réaction $\vec{R}$ lorsqu'elle est inclinée d'un angle θ par rapport à la normale à cette surface :

$$\|\vec{f}\| = \|\vec{R}\| \cdot \sin \theta \quad \text{ou} \quad \|\vec{R}_T\| = \|\vec{R}\| \cdot \sin \theta$$

On appelle **θ_0 angle limite de frottement** et $\vec{f}_{lim}$ la force de frottement maximale telle que sa valeur soit $\|\vec{f}_{lim}\| = \|\vec{R}\| \cdot \sin \theta_0$.

Activité

Montrer que dans l'expérience précédente, $\|\vec{f}_{lim}\|$ est proportionnelle à la valeur du poids du solide.

Remarque

Dans l'expérience précédente, juste après le décrochage du solide et si on arrive à le maintenir en mouvement rectiligne uniforme, on constate que l'indication du dynamomètre (ou la valeur du poids de la masse m) est légèrement inférieure à $\|\vec{f}_{lim}\|$ et ne dépend pratiquement pas de la vitesse du solide ; il lui correspond une force de frottement $\vec{f}'$ constante, opposée à la vitesse, avec $\|\vec{f}'\|$ légèrement inférieure $\|\vec{f}_{lim}\|$. Mais en statique, on étudie seulement les situations d'équilibre et on n'aura donc pas à tenir compte de ces petites différences.

En résumé, deux cas peuvent se présenter dans les situations courantes où une force $\vec{F}$ agit sur un solide parallèlement à la surface de contact avec frottement avec un support solide :

$\ \vec{F}\ \leq \ \vec{R}\ \cdot \sin \theta_0$.	$\ \vec{f}'\ > \ \vec{R}\ \cdot \sin \theta_0$.
La force de frottement $\vec{f} = -\vec{F}$	La force de frottement $\vec{f}'$ est constante et $\ \vec{f}'\ \approx \ \vec{f}_{lim}\ = \ \vec{R}\ \cdot \sin \theta_0$.
Equilibre possible	Equilibre impossible = le solide se met en mouvement de translation dans la direction et le sens de $\vec{F}$

Dans chacune de ces situations il est toujours possible en mesurant $\|\vec{F}\|$ avec un dynamomètre de déterminer en même temps la force de frottement solide-solide qui agit sur le corps étudié.

4.2. Equilibre sur un plan incliné :

a) Avec frottement :

Un solide (S) est en équilibre sur un plan incliné d'un angle α par rapport au plan horizontal (Fig.22).

Les seules actions extérieures de contact sont celles du plan incliné représentées par la réaction $\vec{R}$. On est en présence d'un équilibre sous l'action de deux forces $\vec{R}$ et $\vec{P}$ qui doivent être telles que $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

Ces deux forces ont en particulier la même droite d'action . Quand on augmente α , il arrive un moment, pour $\alpha = \alpha_0$, où le solide «décroche» et descend la pente. La réaction $\vec{R}$ et le poids $\vec{P}$ ne sont plus alors des forces opposées car $\vec{R}$ a atteint l'inclinaison limite θ_0 qu'elle ne peut dépasser avec $\alpha_0 \approx \theta_0$.

Le plan incliné est un moyen très simple pour déterminer l'angle limite caractérisant les frottements solide-solide et pour déterminer directement une force de frottement.

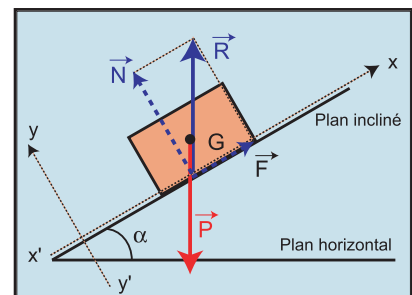


Fig.22

b) Sans frottement

Si on utilise une table ou un banc à coussin d'air, inclinés (Fig. 23), ou un chariot monté sur des roues à roulement à bille (Fig. 24), l'équilibre devient impossible même pour des angles α très proches de zéro.



Fig. 23



Fig. 24

On en conclut, qu'en absence de frottement et quel que soit l'angle, α la réaction $\vec{R}$ est perpendiculaire au plan.

Pour maintenir le chariot de la figure 25 en équilibre, une troisième force $\vec{F}$ est nécessaire (Fig. 26). Si sa direction est parallèle au plan incliné, elle doit être telle que : $\|\vec{F}\| = \|\vec{P}\| \cdot \sin \alpha$.

Comme $\sin \alpha < 1$, $\|\vec{F}\| < \|\vec{P}\|$

Il est ainsi possible, avec une force donnée $\vec{F}$, de hisser à une certaine hauteur un corps de poids $\|\vec{P}\|$ supérieur à $\|\vec{F}\|$. Le plan incliné est donc une machine simple qui permet de faciliter certaines tâches.

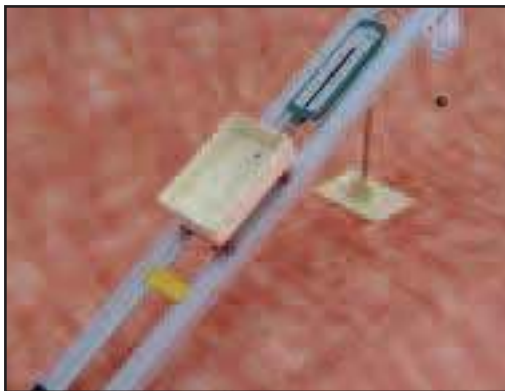


Fig. 25

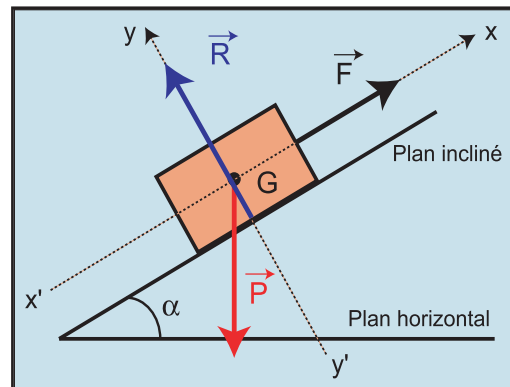


Fig. 26

Exemples :

- Rampe de chargement à l'arrière des camions (Fig.27)
- Routes en lacets en montagne (Fig.28).



Fig. 27



Fig. 28

L'essentiel du cours

- * Si dans un repère terrestre, un solide, soumis à l'action de trois forces non parallèles $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, est en équilibre, ces forces satisfont aux conditions suivantes :
- Leurs droites d'actions sont coplanaires.
 - Leurs droites d'actions sont concourantes.
 - Leur somme vectorielle est nulle : $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$.

L'ensemble de ces propriétés est une condition nécessaire mais pas suffisante de l'équilibre du solide dans le repère d'étude.

- * Lorsqu'un solide a une surface de contact avec un support solide, l'ensemble des actions exercées par celui-ci, réparties sur la surface de contact solide-solide, sont modélisables par une force unique $\vec{R}$ appelée réaction du support appliquée en un point particulier de cette surface et telle que:
- En l'absence de frottements, $\vec{R}$ est toujours perpendiculaire à la surface de contact.
 - En présence de frottements, $\vec{R}$ est inclinée et admet une composante $\vec{R}_T$, parallèle à la surface de contact, appelée **force de frottement qui s'oppose au glissement du solide**.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

- La relation $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$ est une condition nécessaire de l'équilibre d'un solide.
- La relation $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$ est une condition suffisante de l'équilibre d'un solide.
- La relation $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$ exprime que le centre d'inertie G du solide est soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme.
- La somme $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$ ne peut être nulle que si le solide soumis à ces forces est au repos.

2- Recopier et compléter les phrases par le terme adéquat à trouver ou à choisir dans la parenthèse :

L'ensemble des actions de contact entre un solide et un support est modélisé par une seule force appelée..... du support ; cette force est à la surface de contact avec le support en (présence / absence) de frottement. Elle a une composante (perpendiculaire / parallèle) au support en présence de frottement qui est appelée.....

Je sais appliquer le cours

3- Est-il possible qu'un solide (S) soit en équilibre sous l'action de trois forces non parallèles de même intensité ? Si oui, préciser ce qu'elles ont de particulier.

4- Un solide est en équilibre sous l'effet de trois forces concourantes. Les deux premières ont respectivement les intensités $||\vec{F}_1|| = 15 \text{ N}$ et $||\vec{F}_2|| = 25 \text{ N}$. Entre quelles limites doit être comprise l'intensité de la troisième force ?

5- Une branche d'arbre de masse $m = 50 \text{ kg}$, arrachée par le vent est venue s'accrocher à un câble à mi-chemin entre deux poteaux (Fig.29).

Déterminer la tension de chaque brin du câble.

Donnée : On prendra $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

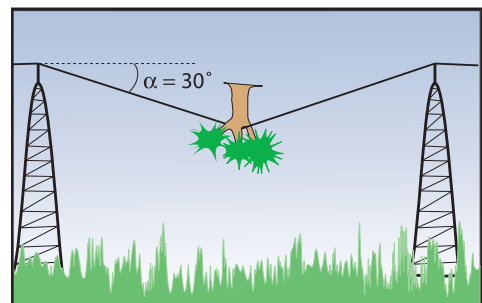


Fig. 29

6. Une barre homogène (AB) de masse $m = 10 \text{ kg}$ est maintenue par un fil horizontal BC dans une position d'équilibre formant un angle $\alpha = 60^\circ$ avec l'horizontale (Fig.30). Le fil BC et la barre (AB) sont dans un même plan vertical. Déterminer graphiquement les forces qui s'exercent sur la barre. On prendra : $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$ et une échelle adéquate : 2 cm pour 20 N par exemple.

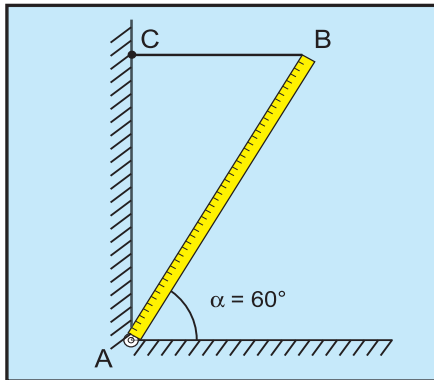


Fig. 30

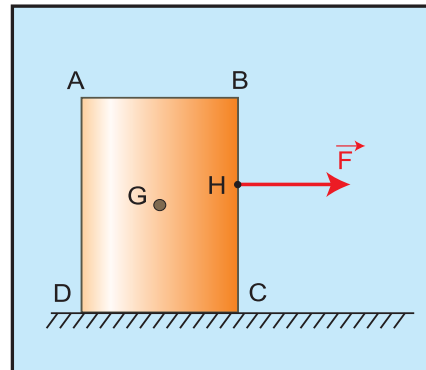


Fig. 31

7. Un bloc parallélépipédique ABCD homogène de poids $||\vec{P}|| = 10 \text{ N}$ est posé sur une table (Fig. 31). Sa hauteur est $h = 50 \text{ cm}$, sa largeur $l = 20 \text{ cm}$.

On exerce en H une force $\vec{F}$ telle que $||\vec{F}|| = 2,5 \text{ N}$. Sachant que $CH = 30 \text{ cm}$, on demande de déterminer si le bloc va glisser, basculer ou rester en équilibre.

L'angle limite de frottement du bloc sur la table est $\theta_0 = 40^\circ$.

8. Une boule (A) assimilée à un point matériel de masse $m = 100 \text{ g}$ est suspendue (Fig.32) par l'intermédiaire de deux fils (AB) et (AC) faisant avec la verticale respectivement les angles $\alpha = 60^\circ$ et $\beta = 40^\circ$.

On prendra : $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$

Déterminer complètement les forces qui s'exercent sur la boule (A) en utilisant la méthode graphique et la méthode analytique. Comparer les résultats.

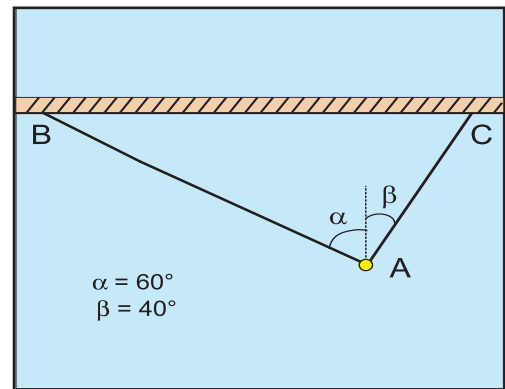


Fig. 32

9. Deux plans parfaitement lisses (P_1) et (P_2) forment entre eux un angle de 90° . Une règle homogène (AB) de longueur $l = 20 \text{ cm}$, en contact sans frottement avec les deux plans, est en équilibre (Fig.33).

Dans quelle position faut-il placer la règle ?

On indiquera en particulier la position de son centre d'inertie.

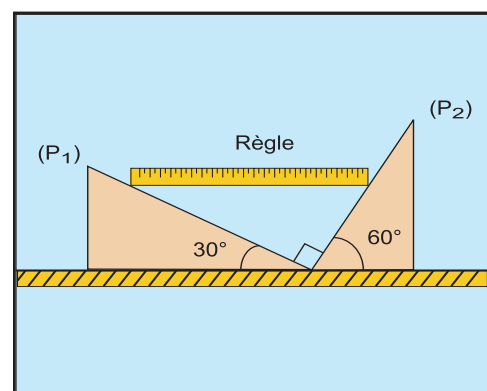


Fig. 33

10. Un cube est posé sur un plan sans frottement, incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (Fig.34). On peut fixer au solide soit en A soit en A', un fil maintenu parallèle à la ligne de plus grande pente du plan.

a) Montrer que l'équilibre n'est possible que si l'angle α est inférieur à un angle α_m que l'on précisera.

b) Que se passe-t-il pour $\alpha > \alpha_m$ lorsque :

- ✓ Le fil est en A ?
- ✓ Le fil est en A' ?

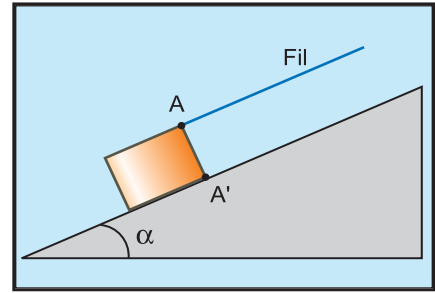


Fig. 34

11. Les masses des fils et de l'anneau (A) (Fig.35) sont négligeables. A l'équilibre, le fil (OA) fait un angle $\alpha = 40^\circ$ avec la verticale. (P) est une poulie à axe fixe sans frottement.

On donne : $m_1 = 10 \text{ kg}$ et $\|\vec{g}\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

a) Calculer la masse m_2 nécessaire pour réaliser cet équilibre.

b) Calculer la tension $\|\vec{T}\|$ du fil (OA).

c) Cet équilibre dépend-il de la valeur de $\|\vec{g}\|$?

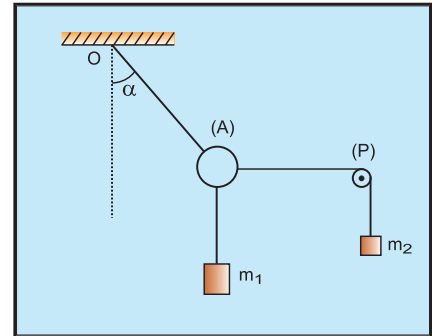


Fig. 35

12. Un solide (S) de masse $m = 10 \text{ kg}$ est posé sur un plan incliné d'un angle $\alpha = 60^\circ$. Ce solide doit être retenu par un ressort de raideur $k = 1000 \text{ N.m}^{-1}$, (Fig.36) $\|\vec{g}\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

a) Calculer l'allongement x_t théorique du ressort quand le contact solide-plan est supposé sans frottement.

b) On vérifie que le solide est bien en équilibre quand le ressort a cet allongement ; mais on constate que si on tire à partir de cette position sur le point A, le ressort s'allonge encore de 20 mm avant que (S) ne décroche et doucement remonte le plan ; de même il faut déplacer A vers le bas de 20 mm avant que l'équilibre ne soit rompu.

Interpréter ces résultats et en déduire les caractéristiques du contact solide-plan.

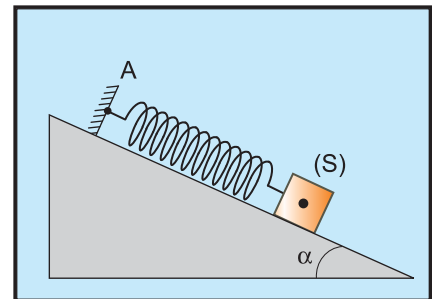


Fig. 36

Les égyptiens de l'ère pharaonique ont construit les temples gigantesques et les pyramides de Gizeh que l'on connaît, en utilisant principalement comme machine simple, le plan incliné ; ils recouraient à des rampes de sable (ce qui ne manque pas dans le désert), longues de plusieurs kilomètres pour hisser les énormes blocs de pierre jusqu'aux hauteurs où elles sont encore de nos jours.

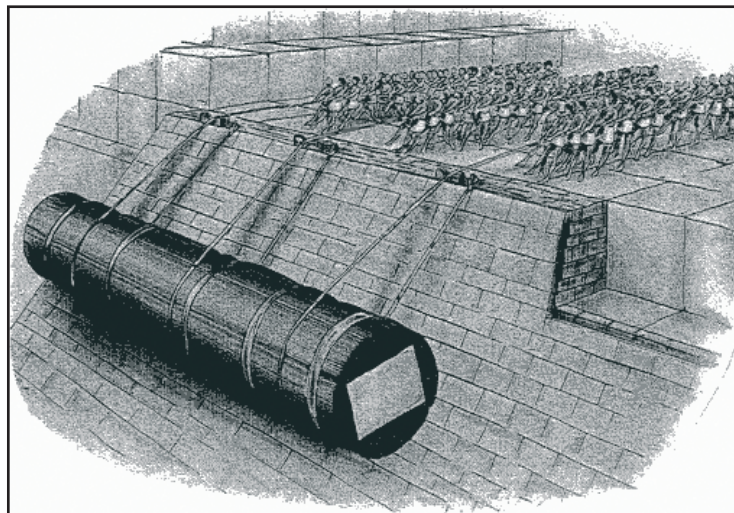


Fig. 37

*Dessin d'artiste
montrant la construction d'un temple au temps des pharaons*

ÉQUILIBRE D'UN SOLIDE ASSUJETTI À TOURNER AUTOUR D'UN AXE FIXE

CHAPITRE

11



Engrenages du mécanisme d'une ancienne horloge

Des roues pour transmettre des mouvements : pourquoi des diamètres différents ? Comment le grain de sable sur la plus petite roue peut-il bloquer toute la machine ?

OBJECTIFS

- Reconnaître un solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe.
- Calculer le moment d'une force orthogonale à un axe.
- Calculer le moment d'un couple de forces.
- Appliquer le théorème des moments au solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe.
- Expliquer le principe de fonctionnement d'une machine simple.

1. Exemples de solides en rotation

Activité

Citer des exemples de mouvements de translation, de rotation ou autres.

Un solide peut être :

- en mouvement de translation : **charrue** tirée par un tracteur
- en mouvement de rotation : **porte** qui s'ouvre ou se ferme (Fig.1).
- en mouvement quelconque : **bâton** lancé dans l'air.



Fig.1

2. Axe de rotation d'un solide

Etudions le mouvement d'une porte que l'on ouvre. Déterminons la trajectoire d'un point quelconque de la porte, le trou de la serrure par exemple.

C'est un arc de cercle contenu dans un plan horizontal. Il en est de même d'un grand nombre d'autres points pris au hasard ; cependant quelques uns des points de la porte restent sur place quand la porte tourne : ils sont sur les gonds (ou charnières). Ces dernières matérialisent une droite (Δ) autour de laquelle tournent tous les points de la porte quand on la met en mouvement (Fig.2).

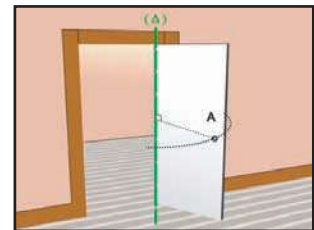


Fig. 2

Cette droite est l'axe de **rotation de la porte**. Sur cette droite sont alignés tous les centres des trajectoires circulaires des points matériels qui constituent la porte.

Activité

Recenser sur une photographie de bicyclette, ou directement, toutes les parties mobiles par rapport à un axe et identifier l'axe de rotation dans chaque cas (Fig.3).

Etudions maintenant le mouvement de la valve d'une roue du vélo lorsqu'elle roule sur une route rectiligne. Déterminons la forme de la trajectoire de la valve dans différents repères choisis.

Dans un repère lié au cadre du vélo : l'axe de rotation de la roue est fixe et la valve a un mouvement circulaire.

Dans un repère terrestre l'axe de rotation de la roue est mobile et la trajectoire de la valve est une cycloïde (Fig.4).



Fig. 3

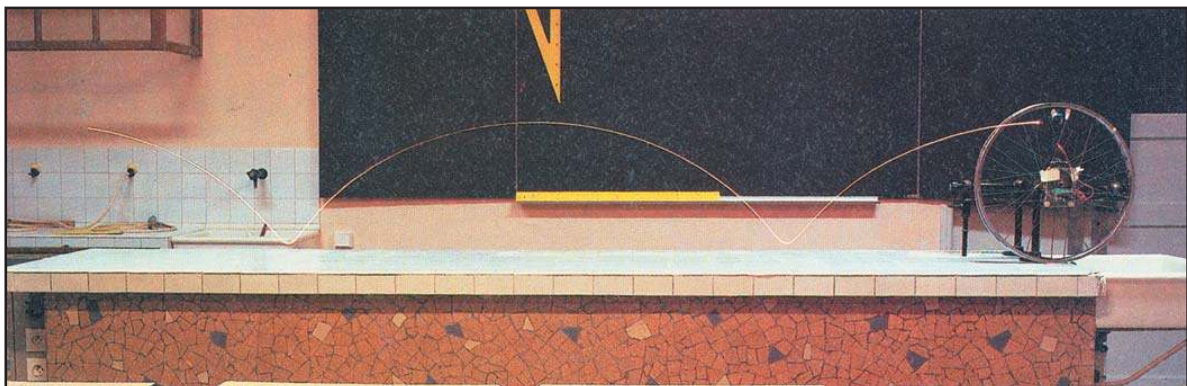


Fig. 4

Nous n'allons étudier que les solides assujettis à tourner autour d'un axe fixe par rapport à un repère terrestre.

Exemple : La porte est un solide mobile autour d'un axe fixe vertical matérialisé par la ligne joignant les centres des charnières.

3. Effet de rotation d'une force

Pour ouvrir une porte on exerce une force appliquée à l'endroit de la poignée ; la force exercée produit une rotation du solide autour de son axe.

Observons diverses portes autour de nous et repérons la position de la poignée par rapport aux gonds.

Sur certaines portes la poignée est très loin des charnières et du coté de la serrure (Fig.5) ; sur d'autres la poignée est à mi-chemin entre l'axe de rotation et la serrure.

Activité

A masses et dimensions égales, quelle est la porte que l'on peut manipuler normalement avec la force la moins intense ?

Dans une série de clefs de différentes longueurs, quelle est celle qui permet de desserrer le même écrou avec la force la moins intense ? (Fig.6)

Des expériences courantes montrent que pour produire la rotation attendue pour un solide mobile autour d'un axe fixe, ce n'est pas seulement l'intensité de la force qui est déterminante, mais, également, la distance de sa droite d'action à l'axe de rotation.

Appliquons successivement des forces dans des directions diverses et notons l'effet de rotation obtenu.



Fig.5



Fig.6

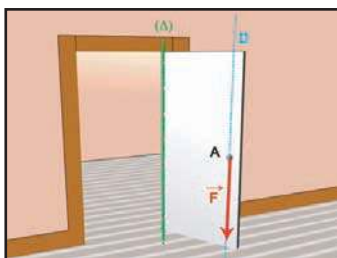


Fig.7-a

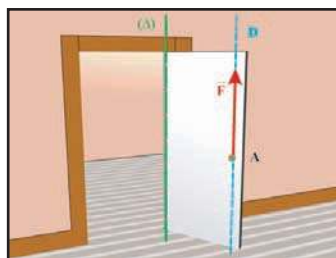


Fig.7-b

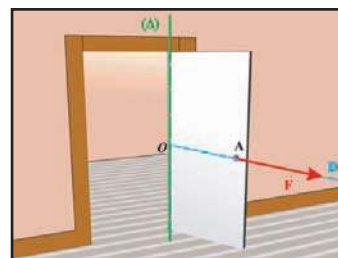


Fig.7-c

Les constatations sont réunies dans le tableau suivant :

Force	Observation	Effet de rotation	Autre effet possible
Verticale vers le bas (Fig.7-a)	La porte ne tourne pas	Effet de rotation nul	Glissement le long de l'axe vers le bas.
Verticale vers le haut (Fig.7-b)	La porte ne tourne pas	Effet de rotation nul	Glissement le long de l'axe vers le haut
Passant par l'axe de rotation (Fig.7-c)	La porte ne tourne pas	Effet de rotation nul	Arrachement des paumelles
Quelconque ne passant pas par l'axe	La porte tourne	Effet de rotation	Aucun

- Une force dont la droite d'action est parallèle à l'axe de rotation d'un solide a un effet de rotation nul sur ce solide.
- Une force dont la droite d'action coupe l'axe de rotation d'un solide a un effet de rotation nul sur ce solide.

Pour produire un effet de rotation, la droite d'action de la force doit faire un angle non nul avec le plan de la porte qui contient l'axe de rotation. On peut alors la décomposer en une force **perpendiculaire** au plan de la porte (donc **orthogonale à l'axe**) et une autre contenue dans ce plan (donc **sécante à l'axe**). Seule la composante orthogonale à l'axe peut produire un effet de rotation. C'est pour cela que l'on se contentera dans cette étude de considérer uniquement les forces **orthogonales** ($\vec{F}_\perp$) à l'axe de rotation (Fig.8).

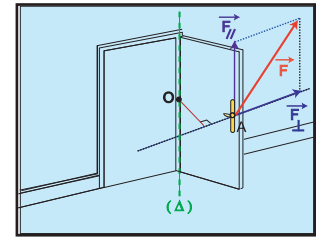


Fig.8

Agissons sur la porte avec des forces orthogonales à l'axe et essayons d'obtenir le même effet de rotation en faisant varier la distance à l'axe de rotation.

Avec des forces de même intensité et orthogonales à l'axe de rotation l'effet de rotation produit est d'autant plus important que le point d'application est plus éloigné de l'axe de rotation.

Autrement dit : l'intensité de la force nécessaire pour obtenir un même effet de rotation du solide est d'autant plus faible qu'elle s'exerce plus loin de l'axe de rotation (Fig.9).

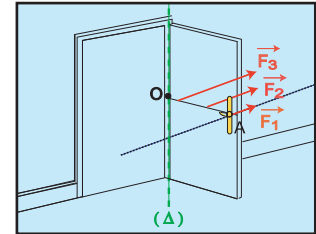


Fig.9

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

Choisissons un dispositif qui permet de repérer avec précision un effet de rotation bien déterminé produit par une force sur un solide mobile autour d'un axe fixe.

Exemples de dispositifs : Sur les figures 10 et 11, l'axe de rotation du solide est horizontal et la droite d'action de la force appliquée au solide ($\vec{F}_1$ ou $\vec{F}_2$) est située dans un plan vertical : la force est donc bien **orthogonale à l'axe**.

Faisons varier la distance d (soit en modifiant la position du point A, soit en modifiant la direction de la force appliquée au même point A) et cherchons l'intensité $\|\vec{F}\|$ de la force appliquée qui permet d'obtenir toujours le même effet de rotation, c'est-à-dire ramener le solide en équilibre dans la même position.

Dressons le tableau suivant avec les diverses valeurs obtenues pour chaque équilibre :

Position (A,B,...) Direction de $\vec{F}$ ($\alpha, \beta, \dots$)	Exemple : A, β				
$\ \vec{F}\ $					
d					

- Bien que les forces appliquées aient des intensités différentes, elles ont le même effet de rotation

- A chaque direction d'une force appliquée en un point donné, correspond une intensité déterminée permettant d'obtenir l'effet de rotation fixé.

- Le produit $\|\vec{F}\| \cdot d$ reste constant pour un effet de rotation déterminé.

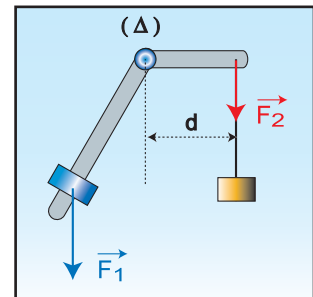


Fig.10

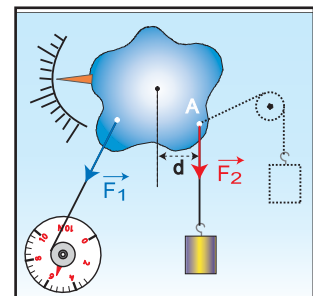


Fig.11

Nous dirons que toutes les forces que nous avons utilisées ont le même moment par rapport à l'axe de rotation.

Le moment d'une force par rapport à un axe Δ est noté $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F})$ avec : $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = \|\vec{F}\| \cdot d$

La distance d , entre l'axe de rotation (Δ) et la droite d'action de $\vec{F}$, est appelée **bras de levier** de la force appliquée. $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F})$ s'exprime en newton.mètre (N.m) quand l'intensité de la force s'exprime en newton (N) et le bras de levier d en mètre (m).

Comment déterminer d ?

Le bras de levier d dépend de la position de la droite d'action de la force par rapport à l'axe de rotation (Δ) ; sur la figure 12 on voit que d est la **distance** (au sens géométrique) entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force.

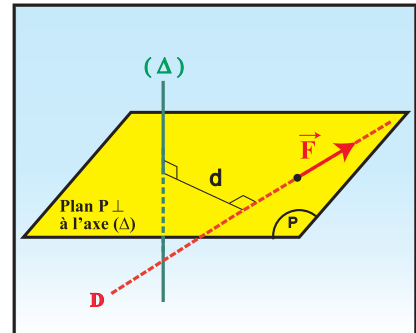


Fig.12

5. Le moment, grandeur algébrique

Utilisons le même dispositif que précédemment et agissons avec une force $\vec{F}$ de moment quelconque pour faire tourner le solide dans le sens des aiguilles d'une montre d'un angle que l'on mesurera; cherchons ensuite à ramener le solide dans sa position initiale avec une force orthogonale à l'axe appliquée en un autre point.

La deuxième force $\vec{F}'$ doit donc produire un effet de rotation d'un même angle mais dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

A l'équilibre dans la position initiale, le solide n'a subi aucun effet de rotation et il est soumis à deux forces dont les moments ne sont pas nuls et tels que :

$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F})$ est **contrebalancé exactement** par $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}')$

Pour rendre compte de la différence entre les effets de rotation produits par chacune des deux forces, on associe un signe au moment de la force (Fig13) ; pour cela on choisit arbitrairement un sens positif, celui des aiguilles d'une montre par exemple :

- Le moment d'une force qui tend à faire tourner le solide dans le sens positif sera compté positif.
- Le moment d'une force qui tend à faire tourner le solide dans le sens contraire sera compté négatif.

Le moment d'une force par rapport à un axe de rotation fixe est une grandeur algébrique dont le signe dépend du sens positif arbitraire choisi.

On peut alors écrire $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = \|\vec{F}\| \cdot d$ et $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}') = -\|\vec{F}'\| \cdot d'$

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}') = 0$$

Les effets de rotation de ces deux forces se superposent et s'ajoutent algébriquement. L'effet **résultant** est nul : le moment **résultant** est également nul.

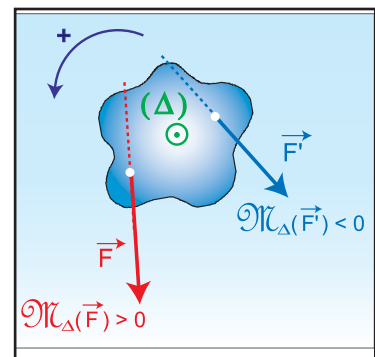


Fig.13

6. Effet de rotation d'une force sur un solide libre

Sur une plaque légère de polystyrène ou en bois, repérons le centre d'inertie G et enfonçons à sa périphérie un clou A . Faisons flotter la plaque sur un plan d'eau assez spacieux. La plaque est un solide libre de se déplacer dans le plan horizontal.

Approchons un aimant d'axe SN du clou A en veillant à ce que la droite SNA ne passe pas par G (Fig.14).

La plaque prend un mouvement de rotation autour de G qui, lui aussi, change de position .La plaque tourne donc et se translate à la fois.

Si la droite SNA passe par G, la plaque se met en translation sans tourner autour de G. L'effet de rotation autour de G est nul (Fig.15).

Une force $\vec{F}$ unique appliquée à un solide libre produit en général un effet de rotation par rapport à un axe orthogonal passant par G et une translation de G.

Pour maintenir G immobile, il est nécessaire d'agir en G avec une force antagoniste $\vec{F}' = -\vec{F}$.

Ce résultat est général : pour faire tourner la plaque avec une force donnée $\vec{F}$ autour d'un axe fixe orthogonal passant par un point quelconque on doit appliquer une force $\vec{F}'$ opposée à $\vec{F}$ en un point de cet axe (Fig.16).

Ainsi il est impossible de faire tourner un solide autour d'un axe fixe sans recourir à deux forces opposées.

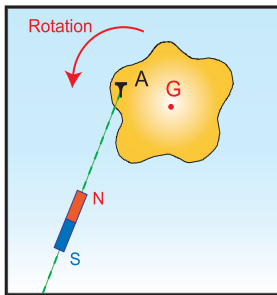


Fig.14

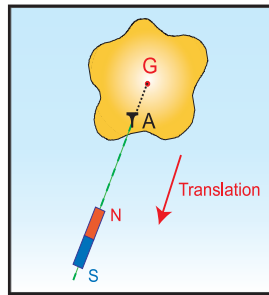


Fig.15

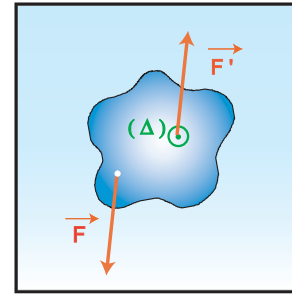


Fig.16

Remarque

Ces deux forces ne sont pas **directement** opposées, elles n'ont pas la même droite d'action.

Dans les exemples que l'on a étudiés dans les paragraphes précédents tout cela reste vrai même si l'existence de la deuxième force n'est pas évidente ; en effet la deuxième force est la réaction des support des axes de rotation des solides que l'on manipule.

Exemples : pour la porte ce sont les paumelles fixées au cadre qui exercent les réactions qui s'opposent à la force appliquée (Fig.17).

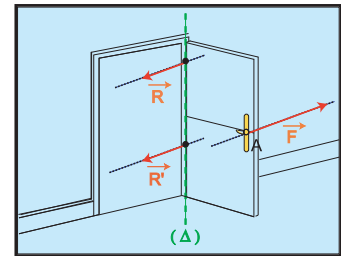


Fig.17

7. Couple de forces

7.1. Notion de couple



Fig.18-a



Fig.18-b

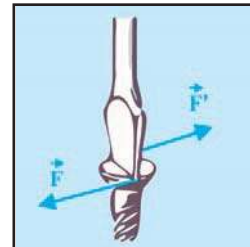


Fig.18-c

Les solides et les outils que l'on voit sur les photos (Fig.18) sont tous conçus pour être mis en rotation par l'utilisateur ou pour aider à mettre en rotation d'autres solides : guidon du vélo, roue de gouverne du voilier, le tournevis...

Activité

Trouver d'autres outils ou accessoires que l'on fait tourner habituellement à deux mains ou par deux personnes.

Le tire-bouchon de la photo (Fig.19) est actionné par deux doigts : il est mis en rotation par deux forces de sens contraires $\vec{F}$ et $\vec{F}'$ qui produisent un mouvement de rotation sans translation de l'axe de rotation du solide.

$\vec{F}$ et $\vec{F}'$ sont parallèles et de sens contraires ; elles forment un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Ce sont donc deux forces orthogonales à l'axe de rotation.

$\vec{F}$ et $\vec{F}'$ ont la même intensité $\|\vec{F}\| = \|\vec{F}'\|$; $\vec{F} + \vec{F}' = \vec{0}$ c'est la condition d'équilibre pour la translation.

Cet ensemble de deux forces ($\vec{F}$, $\vec{F}'$) est appelé couple de forces noté $\mathcal{C}$.

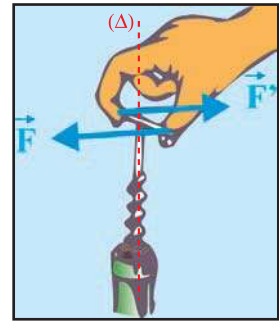


Fig.19

Définition

On appelle couple $\mathcal{C}$ un système de deux forces parallèles de même intensité, de sens contraires et n'ayant pas la même droite d'action.

$$\mathcal{C} = \{\vec{F}, \vec{F}'\}$$

Les droites d'action des deux forces définissent un plan, appelé **plan du couple**.

Seuls les couples dont les plans sont perpendiculaires à l'axe de rotation des solides seront étudiés dans ce cours.

En appliquant une seule force $\vec{F}$ à un solide mobile autour d'un axe fixe, on soumet en fait ce solide à un couple de forces $\{\vec{F}, \vec{F}'\}$, la force $\vec{F}'$ étant exercée par l'axe (Fig.20). Ce couple est appelé couple associé à la force $\vec{F}$.

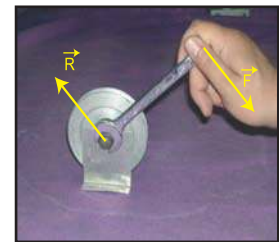


Fig.20

7.2. Moment d'un couple de forces

Considérons un couple de forces appliqué à un solide mobile autour d'un axe (Fig.21). On supposera que $\vec{F}_1$ appliquée au point A et $\vec{F}_2$ appliquée au point B sont orthogonales à l'axe de rotation Δ ; la trace de l'axe Δ dans le plan de la figure est O. On constate que $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ tendent à faire tourner le solide dans le même sens.

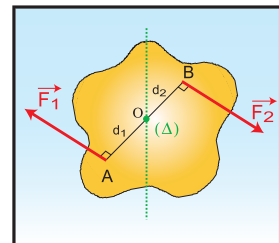


Fig.21

Calculons le moment résultant des forces appliquées à ce solide par rapport à l'axe de rotation ?

- On se donne un sens arbitraire positif (par exemple, celui dans lequel le couple tend à faire tourner le solide).
- On détermine les bras de levier d_1 et d_2 pour chaque force.
- On aura $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = \|\vec{F}_1\| \cdot d_1$ et $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = \|\vec{F}_2\| \cdot d_2$
- $\mathcal{M} = \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2)$; on aura : $\mathcal{M} = \|\vec{F}_1\| \cdot d_1 + \|\vec{F}_2\| \cdot d_2 = \|\vec{F}_1\| \cdot (d_1 + d_2)$
Or $(d_1 + d_2) = d$; d est la distance des droites d'action des deux forces.

$\mathcal{M}$ est le moment résultant ou tout simplement le moment du couple $\mathcal{C}$ par rapport à l'axe Δ . On le note $\mathcal{M}_\Delta(\mathcal{C}) = \|\vec{F}_1\| \cdot d$

Si on inverse le choix du sens positif, on obtiendrait : $\mathcal{M}_\Delta(\mathcal{C}) = -\|\vec{F}_1\| \cdot d$

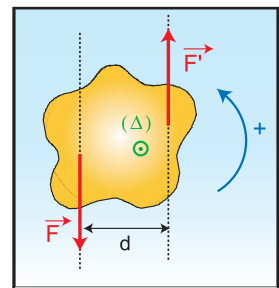


Fig.22

Le moment d'un couple de force $\mathcal{C}$ par rapport à un axe Δ perpendiculaire à son plan est égal au produit de l'intensité commune des deux forces par la distance d entre leurs droites d'action.

$$\mathcal{M}(\mathcal{C}) = \|\vec{F}_1\| \cdot d$$

(N.m) (N) (m)

Son signe dépend du sens positif choisi.

Il est important de remarquer ici que le moment d'un couple est indépendant de la position de l'axe de rotation et ne dépend que de la distance d (Fig.22). Le moment d'un couple est donc une caractéristique de ce couple et il n'est pas nécessaire de préciser l'axe de rotation ; c'est pour cela que l'on dit simplement moment du couple et on le note $\mathcal{M}(\mathcal{C})$.

Le moment d'une force $\vec{F}$ appliquée à un solide mobile autour d'un axe fixe est en fait le moment du couple associé à cette force ; la distance d est alors le bras de levier de la force $\vec{F}$.

7.3. Cas général

Activité

Chercher à mettre en évidence dans les exemples suivants les forces qui mettent en rotation les solides cités : tournevis tenu à pleine main, éolienne tournant au vent (Fig.23), disque entraîné par l'arbre d'un moteur, embrayage à disque...



Fig.23

Il n'est plus possible dans ces exemples de mettre en évidence des paires de forces parallèles, de sens contraires et de supports différents à chaque fois ; les forces qui agissent sont réparties sur des surfaces et contribuent chacune avec un moment par rapport à l'axe à l'effet de rotation global. L'action de toutes ces forces est équivalente cependant à celle d'un couple dont le moment est égal au moment résultant de toutes les forces élémentaires.

Le moment de ce couple est toujours mesurable avec un dispositif approprié (Voir Infoscience «Frein de Prony»).

Le résultat précédent peut être étendu au cas d'un ensemble discret de forces orthogonales agissant sur un même solide mobile autour d'un axe fixe.

Un système de forces orthogonales à un axe, agissant sur un solide assujéti à tourner autour de cet axe, est équivalent à un couple dont le moment par rapport à cet axe est égal à la somme algébrique des moments par rapport à cet axe de toutes les forces appliquées.

Remarque

Si l'une des forces constituant un couple $(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$ est exercée par l'axe de rotation $(\vec{F}_2)$, par exemple) le moment du couple s'écrit : $\mathcal{M}(\mathcal{C}) = \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1)$

8. Equilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe

8.1. Etude expérimentale

Utilisons le dispositif de la figure 24 : le solide est un disque ou une plaque comportant des trous régulièrement espacés pour accrocher des fils ; il est monté sur un axe à roulement à billes de très bonne qualité pour minimiser les frottements.

En montage vertical, le centre d'inertie G est par construction sur l'axe de rotation ce qui élimine l'effet du poids du solide ; en montage horizontal, G peut se trouver en dehors de l'axe de rotation.

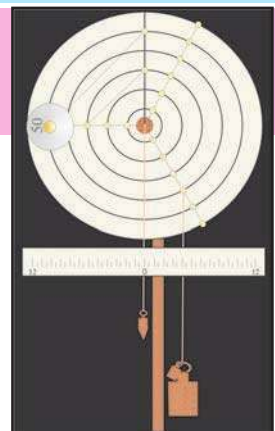


Fig.24

Faisons agir des forces (3 ou 4 à chaque équilibre) sur le solide par l'intermédiaire de fils accrochés aux trous et tendus par des dynamomètres ou des poids. Lorsque le système est en équilibre, lisons l'intensité de chaque force, mesurons le bras de levier correspondant et notons le sens de rotation (positif ou négatif) qu'elle tend à communiquer au solide. Résumer les observations dans un tableau comme suit :

	Equilibre 1				Equilibre 2				Equilibre 3				Equilibre 4			
	Sens	$\ \vec{F}\ $	d	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$	Sens	$\ \vec{F}\ $	d	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$	Sens	$\ \vec{F}\ $	d	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$	Sens	$\ \vec{F}\ $	d	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F})$
$\vec{F}_1$																
$\vec{F}_2$																
$\vec{F}_3$																
	Moment résultant =				Moment résultant =				Moment résultant =				Moment résultant =			

Quel que soit l'équilibre réalisé le moment résultant est à chaque fois nul.

8.2. Théorème des moments

Le résultat expérimental précédent constitue une **condition nécessaire de non rotation** du solide autour de son axe ; c'est un théorème de la statique des solides connu sous le nom de «**théorème des moments**».

Enoncé : Si un solide S, mobile autour d'un axe Δ fixe par rapport à la Terre, est en équilibre, la somme algébrique des moments par rapport à cet axe de toutes les forces appliquées à ce solide est nulle:

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0 \quad (1)$$

La condition (1) n'est pas **suffisante** pour obtenir un équilibre ; en effet, le solide peut très bien avoir un mouvement de rotation autour de son axe avec une certaine vitesse à l'instant où se réalise la condition (1). Comme le principe d'inertie reste valable, le solide garde une vitesse de rotation constante même si cette condition est réalisée.

Exercice résolu

Enoncé

Une tige homogène AB de masse m et de longueur ℓ est libre de tourner sans frottement autour d'un clou, planté horizontalement dans le mur, qui la traverse en A (Fig. 25). On exerce à l'aide d'un fil accroché en B une force $\vec{F}$ horizontale orthogonale au clou ; la tige s'écarte de sa position initiale et se met en équilibre en faisant un angle α avec la verticale passant par A.

a. Faire un schéma sur lequel on représentera les forces extérieures appliquées à la barre.

b. Exprimer l'intensité de la force $\vec{F}$ en fonction de α . La calculer pour $\alpha = 30^\circ$.

On donne $m = 2,5 \text{ kg}$ et on prendra $\|\vec{g}\| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

c. Déterminer la réaction de l'axe $\vec{R}$.

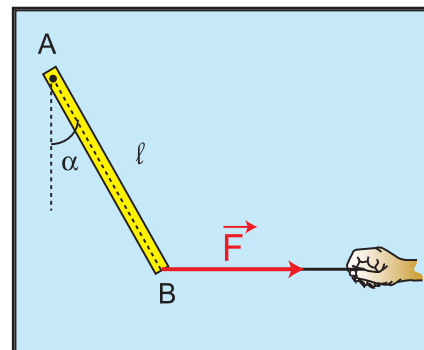


Fig. 25

Solution

a- Faisons un diagramme des interactions (Fig.26) et traçons les vecteurs représentatifs des forces extérieures appliquées à la tige; soit $\vec{P}$, $\vec{F}$ et $\vec{R}$. (Fig.27)

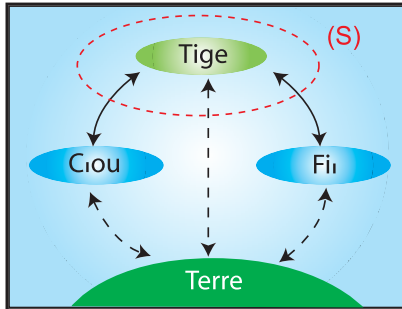


Fig. 26

b- La barre est soumise à l'action de trois forces ; à l'équilibre ces forces doivent vérifier la condition:

$$\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0} \quad (1)$$

Peut-on résoudre la question avec cette seule relation ?

La réponse est négative, car sur les trois forces deux sont inconnues. Il faut donc chercher une deuxième relation entre les 3 forces. C'est l'application du théorème des moments qui donne généralement la deuxième équation.

On se donne un sens positif arbitraire pour la rotation, le sens trigonométrique par exemple ; on calcule les moments des trois forces par rapport à l'axe de rotation (A, Δ), et on applique le théorème des moments :

$\mathcal{M}_A(\vec{P}) + \mathcal{M}_A(\vec{F}) = 0$; le moment de la force $\vec{R}$ passant par A est nul.

$$\mathcal{M}_A(\vec{P}) = -\|\vec{P}\| \cdot AH ; \quad \mathcal{M}_A(\vec{F}) = +\|\vec{F}\| \cdot AH' \quad \text{et} \quad \|\vec{P}\| = m\|\vec{g}\|$$

Avec $AH = 0,5 \cdot \ell \cdot \sin\alpha$ et $AH' = \ell \cdot \cos\alpha$; en remplaçant, on obtient :

$$-0,5 \cdot m \cdot \|\vec{g}\| \cdot \ell \cdot \sin\alpha + \|\vec{F}\| \cdot \ell \cdot \cos\alpha = 0 \quad \text{d'où} \quad \|\vec{F}\| = 0,5 \cdot m \cdot \|\vec{g}\| \cdot \tan\alpha.$$

Application numérique: $\|\vec{F}\| = 7,217 \text{ N}$

c- On se donne un repère orthonormé d'origine A : $(A, \vec{i}, \vec{j})$: $x'x$ (horizontal vers la droite) et $y'y$ (vertical vers le haut) et on projette l'équation (1) sur les deux axes :

$$\text{On a } \vec{R} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} ; \quad \vec{F} = \|\vec{F}\| \cdot \vec{i} \quad \text{et} \quad \vec{P} = -m\|\vec{g}\| \cdot \vec{j}$$

$$\text{Sur } x'x \text{ on aura : } R_x + \|\vec{F}\| = 0 \quad \text{et} \quad R_x = -\|\vec{F}\|$$

$$\text{Sur } y'y \text{ on aura : } R_y - m\|\vec{g}\| = 0 \quad \text{et} \quad R_y = m\|\vec{g}\|$$

Remarquons que R est opposée à la somme des deux autres forces.

$$\|\vec{R}\| = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = 26,02 \text{ N et } \vec{R} \text{ fait avec l'axe } y'y \text{ l'angle } \theta$$

$$\text{tel que } \tan\theta = \frac{|R_x|}{R_y} = \frac{7,217}{25} \quad \text{d'où} \quad \theta = 16,1^\circ$$

On peut vérifier graphiquement que les trois forces $\vec{P}$, $\vec{F}$ et $\vec{R}$ sont concourantes.

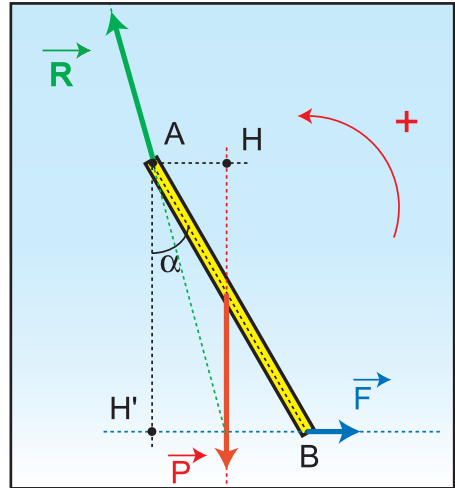


Fig. 27

9. Applications

9.1. Les machines simples

Beaucoup parmi les machines simples représentées ci-contre (Fig.28) sont connues des hommes depuis l'Antiquité et utilisées dans leur activité quotidienne ; ces machines simples ont permis aux hommes de réaliser ce que la force musculaire seule n'aurait pu réaliser. Archimède le disait si bien: «Donnez-moi un **point d'appui** et je soulèverai le monde». Il parlait des **leviers**.

• LE LEVIER

Un levier est un solide de forme allongée rectiligne ou non mobile autour d'un axe fixe qui lui est perpendiculaire en un point appelé **point d'appui**.

Exemple : le pied-de-biche ou l'arrache-clou (Fig.29).

Appuyons en A sur un pied-de-biche avec une **force motrice** $\vec{F}$ pour vaincre en B une **résistance** $\vec{R}$ (forces qui retiennent le clou dans le bois) .

L'outil tourne très lentement autour d'un axe passant par le point d'appui O et perpendiculaire au plan de figure. A chaque instant on peut considérer le système pratiquement en équilibre. On peut appliquer le théorème des moments :

$$||\vec{F}|| \cdot OA - ||\vec{R}|| \cdot OB = 0 \Rightarrow ||\vec{F}|| \cdot OA = ||\vec{R}|| \cdot OB$$

$$||\vec{F}|| = \frac{OB}{OA} \cdot ||\vec{R}|| \quad ; \quad \text{la force } ||\vec{F}|| \text{ dépend du rapport } \frac{OB}{OA}$$

On voit tout de suite que plus ce rapport est faible , plus il sera facile avec une faible force motrice $||\vec{F}||$ d'arracher de gros clous qui opposent une résistance $||\vec{R}||$ élevée.

Remarque

On constate que l'endroit où le pied de biche s'appuie sur le bois (point O), le bois s'écrase et se creuse plus ou moins profondément ; le point d'appui est soumis à des forces d'intensité très élevée et doit donc être capable de fournir la réaction $\vec{R}'$ nécessaire à l'équilibre de l'ensemble et telle que $\vec{F} + \vec{R} + \vec{R}' = \vec{0}$.

Activité 1

Nous utilisons tous les jours des outils, à la maison, chez le menuisier,... dans lesquels on retrouve le principe du levier décrit plus haut. Citer au moins 5 exemples. Identifier pour chaque exemple, le point d'appui, le point d'application de la force motrice et de la force résistante.

L'inventaire précédent montre qu'il y a une grande variété de leviers : simples, doubles (pinces), coudés, droits... On constate également que le point d'appui n'est pas toujours situé entre les forces. Il y a trois types de leviers selon la position du point d'appui (Fig. 30) :

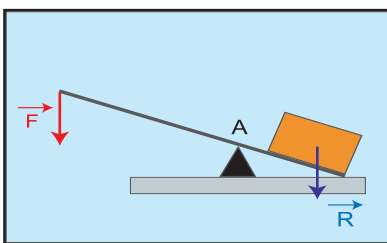


Fig. 30-a
levier inter-appui

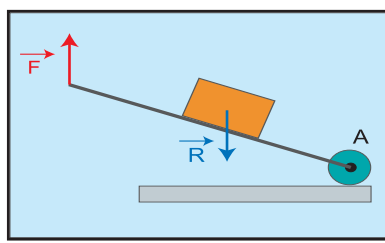


Fig. 30-b
levier inter-résistant

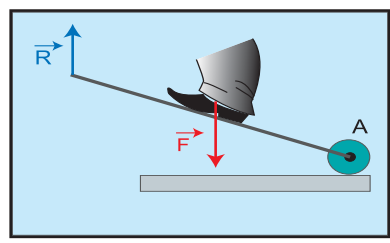


Fig. 30-c
Levier inter-moteur

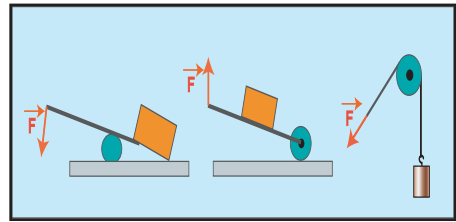


Fig. 28-a

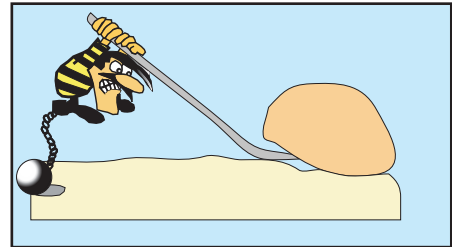


Fig. 28-b

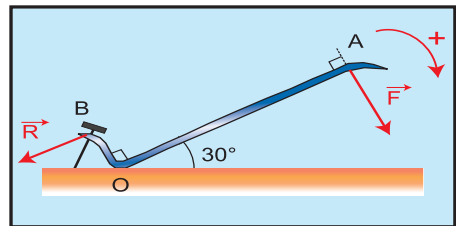


Fig. 29

Activité 2

Etudier les exemples des figures ci-dessus et en rechercher d'autres ; établir la condition d'équilibre dans chaque cas ; comparer les avantages et les inconvénients de ces trois types de leviers.

• LA POULIE SIMPLE

La poulie à axe fixe est un disque assez épais avec une gorge sur sa périphérie pour le passage d'une corde ou un fil. Le disque est mobile autour d'un axe perpendiculaire au disque fixé sur un support ou retenu par une chape et un crochet (Fig.31).

On agit sur une extrémité du fil avec une force motrice $\vec{F}$ pour soulever par exemple une charge de poids $\vec{P}$ fixée à l'autre extrémité du fil ; si le mouvement est suffisamment lent on peut considérer la poulie comme un solide mobile autour d'un axe en équilibre sous l'action de deux forces.

A chaque instant le moment de la force $\vec{F}$ par rapport à l'axe de rotation de la poulie est opposé à celui de $\vec{P}$ par rapport au même axe ; comme les bras de levier dans les deux cas sont les mêmes (le rayon de la poulie), on en déduit que $||\vec{F}|| = ||\vec{P}||$ (Fig. 32)

La poulie permet de vaincre une résistance donnée avec un force motrice de même intensité mais de direction différente.

C'est plus facile et moins dangereux pour un ouvrier sur une terrasse de tirer vers le bas pour remonter la charge que de se pencher au bord et tirer vers le haut.

• LE TREUIL

C'est habituellement un cylindre sur lequel s'enroule un câble fixé à une extrémité au cylindre et à l'autre extrémité à la charge à soulever ou à tracter (Fig.33). Sur l'axe du cylindre est fixée :

- Soit une manivelle si l'utilisation du treuil est manuelle ;
- Soit une roue dentée ou une poulie avec courroie si on utilise un moteur.

Soit L la longueur de la manivelle et r le rayon du cylindre ; Avec la force motrice $\vec{P}$, on remonte très lentement la charge $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$. Le mouvement est suffisamment lent pour considérer que l'on a un équilibre à chaque instant ; l'application du théorème des moments aboutit à :

$$||\vec{F}|| \cdot L = m ||\vec{g}|| \cdot r \quad \text{d'où} \quad ||\vec{F}|| = m \cdot ||\vec{g}|| \cdot \frac{r}{L}$$

Si $L > r$, la force motrice est plus petite que le poids de la charge, d'où l'intérêt du treuil.

Le treuil est l'organe essentiel des grues de chantiers ou portuaires où il est mû par des moteurs électriques puissants (Fig.34) ; c'est encore le treuil associé au moteur électrique qui fait monter et descendre tous les ascenseurs, les téléphériques, remonte-pistes des stations de ski....

9.2. La balance Roberval

La balance Roberval (Fig. 35) est une balance à bras égaux avec la particularité d'avoir des plateaux situés au-dessus du fléau, donc aisément accessibles et plus pratiques d'utilisation. Pour assurer la stabilité des plateaux, une barre appelée **contre-fléau**, forme avec le fléau et le supports des plateaux un parallélogramme articulé qui peut se déformer sans modification de l'horizontalité des plateaux (Fig. 36).

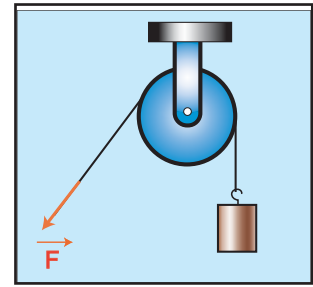


Fig. 31

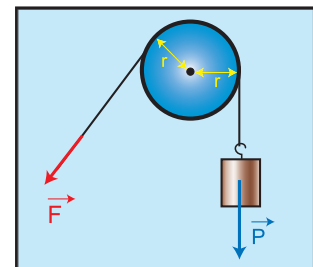


Fig. 32

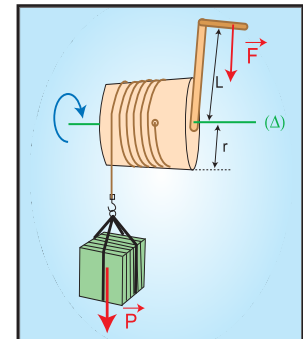


Fig. 33



Fig. 34

Le fléau est une pièce rigide dans laquelle ont été encastrés avec une très grande précision le couteau central C et les deux couteaux latéraux G et D. L'arête du couteau central matérialise l'axe de rotation horizontal du fléau. Le poids des objets mis dans un plateau se transmet par la tige à l'arête du couteau latéral correspondant.

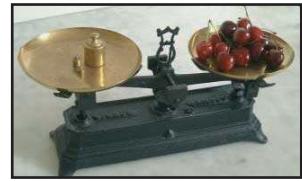


Fig. 35

En fonctionnement le fléau est un solide mobile autour d'un axe horizontal fixe (arête du couteau central) soumis à l'action de deux forces verticales (poids) appliquées chacune sur l'arête d'un couteau latéral. A l'équilibre le fléau doit être « horizontal » ; en réalité, les arêtes des trois couteaux sont alors dans un même plan horizontal (Fig.37).

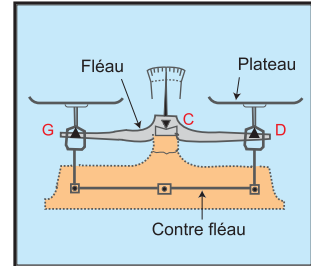


Fig. 36

• Simple pesée :

Soit M la masse du corps à peser placé dans le plateau G ; et m la somme des masses marquées placées dans le plateau D pour réaliser l'équilibre. L'application du théorème des moments permet de trouver la condition d'équilibre de la balance dans le cas d'une simple pesée ou pesée ordinaire .

On a $\vec{P} = M \cdot \vec{g}$ le poids du corps et $\vec{P}' = m \cdot \vec{g}$ le poids des masses marquées

$\sum M_c(F) = 0 \Rightarrow M \cdot \|\vec{g}\| \cdot CG - m_1 \cdot \|\vec{g}\| \cdot C.D = 0$ avec CD et CG les longueurs des deux bras de fléau supposés égaux, on aura après simplification

$$M = m$$

La simple pesée est utilisée lorsque la précision exigée n'est pas trop élevée : transactions commerciales par exemple. Mais en laboratoire on se rend très rapidement compte que la précision d'une telle mesure est très limitée .En effet, la condition essentielle $CD = CG$ est impossible à réaliser en usine exactement ; elle est toujours approximative. On recourt à d'autres types de pesée qui éliminent cet inconvénient.

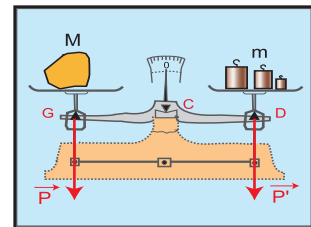


Fig. 37

• Double pesée de Borda

Les schémas de la figure 38 résument les différentes opérations qui montrent essentiellement que l'on procède par remplacement en travaillant toujours sur le même plateau. On applique pour chaque équilibre le théorème des moments :

-1er équilibre

$$(1) \quad m_1 \cdot \|\vec{g}\| \cdot CG - M \cdot \|\vec{g}\| \cdot CD = 0 ;$$

avec M masse de la tare (T)

-2ème équilibre

$$(2) \quad (m_2 + X) \cdot \|\vec{g}\| \cdot CG - M \cdot \|\vec{g}\| \cdot CD = 0 ;$$

avec X masse à déterminer

$$(2) - (1) \text{ donne après division par } \|\vec{g}\| \cdot CG \Rightarrow (m_2 + X - m_1) = 0$$

$$X = m_1 - m_2$$

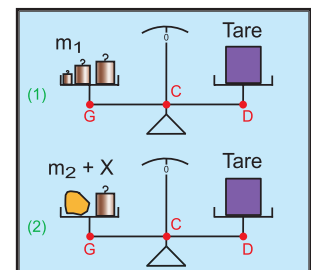


Fig. 38

La double pesée de Borda permet de s'affranchir du défaut de construction de la balance et de réaliser des mesures de masse avec une précision suffisante pour les expériences de laboratoire.

Actuellement, les balances électroniques ont gagné suffisamment en sensibilité et précision pour supplanter, dans les laboratoires, les balances de type Roberval ou à fléau.

Activité expérimentale

Objectifs

- Déterminer le moment d'une force par rapport à un axe
- Déterminer le moment d'un couple
- Vérifier expérimentalement le théorème des moments

Matériel

- Plaque comportant plusieurs trous mobile sans frottement autour d'un axe perpendiculaire à son plan.
- 3 ou 4 dynamomètres avec fils et crochets pouvant se fixer dans le plan de la plaque
- Double décimètre pour la mesure des longueurs et équerres
- Masse de 50 à 100g pour lester la plaque en position verticale.

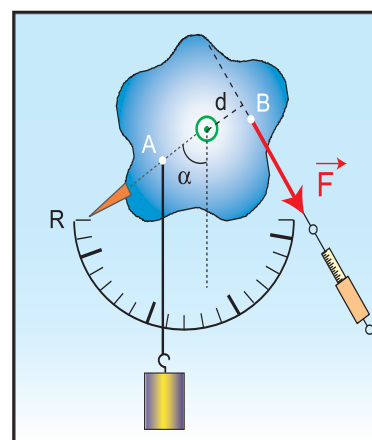


Fig.39

Manipulation

- 1- Fixer le crochet de l'un des dynamomètres à un trou de la plaque et tirer avec une force $\vec{F}$ en vue d'obtenir un effet de rotation donné à l'avance. Lire l'intensité de F et déterminer la distance d .
- 2- Refaire les mesures plusieurs fois en changeant de trou et en modifiant la direction de la force et résumer les observations dans le tableau suivant

$\ \vec{F}\ (\text{N})$						
$d \text{ (m)}$						
$\ \vec{F}\ .d$						

- 3- Utiliser tous les dynamomètres pour soumettre le solide à un système de plusieurs forces orthogonales à l'axe ; à l'équilibre, noter le sens de rotation que tend à donner chaque force, son intensité et le bras de levier correspondant dans un tableau analogue à celui du (§ 8.1) du cours. Reprendre au moins 3 fois les mesures.
- 4- Faire les sommes algébriques des moments à chaque fois et conclure quant à la validité du théorème des moments.
- 5- Discuter des écarts constatés et proposer des explications sur les causes probables.

L'essentiel du cours

L'effet de rotation d'une force sur un solide mobile autour d'un axe fixe ne dépend que de son moment par rapport à cet axe.

On appelle moment d'une force $\vec{F}$ orthogonale à un axe Δ par rapport à cet axe la quantité algébrique :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = \pm \|\vec{F}\| \cdot d$$

(N.m) (N) (m)

d , la distance entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force est appelée **bras de levier** de la force ; le signe du moment est positif si la force a tendance à faire tourner le solide dans le sens positif arbitraire choisi et négatif si elle a tendance à le faire tourner en sens contraire.

Un ensemble de deux forces opposées $\{\vec{F}_1, \vec{F}_2\}$, de droites d'action parallèles constitue un **couple** $\mathcal{C}$ capable de mettre le solide sur lequel il agit en rotation.

Les droites d'actions des deux forces définissent un plan appelé plan du couple.

Le moment d'un couple de forces $\mathcal{C} = \{\vec{F}_1, \vec{F}_2\}$ par rapport à un axe orthogonal à ces forces est indépendant de la position de cet axe ; il est égal au produit de l'intensité commune des deux forces par la distance de leurs droites d'action d et son signe dépend du sens arbitraire positif de rotation choisi.

$$\mathcal{M}(\mathcal{C}) = \pm \|\vec{F}_1\| \cdot d$$

Théorème de moments

Si un solide S , mobile autour d'un axe Δ fixe par rapport à la Terre, est en équilibre, la somme des moments par rapport à cet axe de toutes les forces appliquées à ce solide est nulle:

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_i) = 0.$$

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par vrai ou faux :

- Le moment d'une force par rapport à un axe est une grandeur vectorielle.
- Le moment d'un couple de forces est une grandeur algébrique dont le signe dépend du sens de mouvement du solide.
- La valeur absolue du moment d'une force $\vec{F}$ appliquée en un point A par rapport à un axe Δ est égale au produit de l'intensité de la force par la distance d entre l'axe Δ et le point A.
- Quand on applique une force à un solide mobile autour d'un axe fixe, la réaction de cet axe sur le solide est modifiée.
- La valeur absolue du moment d'un couple de forces est égale au produit de l'intensité commune aux deux forces par la distance séparant leurs droites d'action.
- Le moment d'un couple de forces par rapport à un axe perpendiculaire au plan des deux forces dépend de la position de cet axe.
- Un solide mobile autour d'un axe fixe Δ est en équilibre quand la somme des valeurs absolues des moments par rapport à Δ de toutes les forces qui tendent à le faire tourner dans un sens est égale à celle des valeurs absolues des moments par rapport à Δ de toutes les forces qui tendent à le faire tourner dans l'autre sens.
- La condition précédente est une condition suffisante d'équilibre.

- 2- Un solide {S}, mobile autour d'un axe fixe (O, Δ), est soumis à l'action d'une force $\vec{F}$ orthogonale à cet axe, appliquée en A, (Fig.40). Choisir parmi les cinq affirmations suivantes celle (celles) qui est (sont) correcte(s).

Le moment de la force $\vec{F}$ par rapport à l'axe Δ est égal à:

$\|\vec{F}\|.OA$; $-\|\vec{F}\|.OA$; $\|\vec{F}\|.OH$; $-\|\vec{F}\|.OH$; $-\|\vec{F}\|.HA$

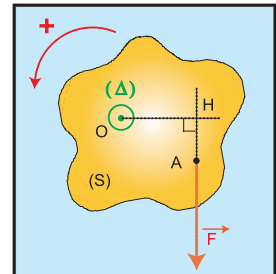


Fig.40

- 3- Indiquer, dans chacun des cas suivants, le sens de rotation de la barre et le signe du moment du couple de forces représentés.

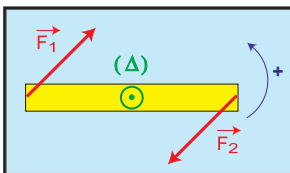


Fig.41-a

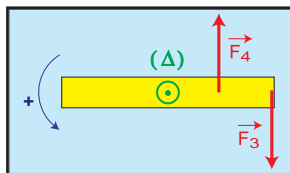


Fig.41-b

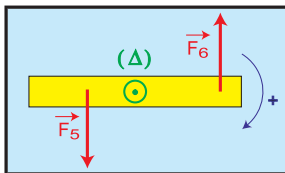


Fig.41-c

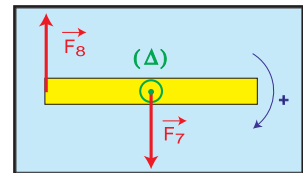


Fig.41-d

- 4- Un solide est soumis à l'action d'un couple de forces $C = (\vec{F}, \vec{F}')$, (Fig.42) ; choisir parmi les expressions suivantes celle (ou celles) qui est (sont) correcte(s) :

a) $\mathcal{M}(C) = \|\vec{F}\|.A'A$;

b) $\mathcal{M}(C) = 2\|\vec{F}\|.AA'$;

c) $\mathcal{M}(C) = \|\vec{F}\|.AH$;

d) $\mathcal{M}(C) = \|\vec{F}\|.A'H$;

e) $\mathcal{M}(C) = 2\|\vec{F}\|.AH$

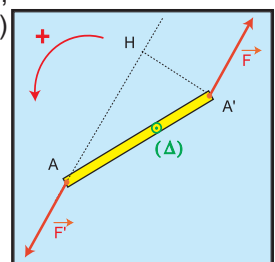


Fig.42

Je sais appliquer le cours

- 5- Sur les schémas ci-dessous (Fig.43-a,b,c), les solides sont en équilibre. Identifier les couples associés aux forces appliquées et représenter la deuxième force de chaque couple par un vecteur de la même couleur.

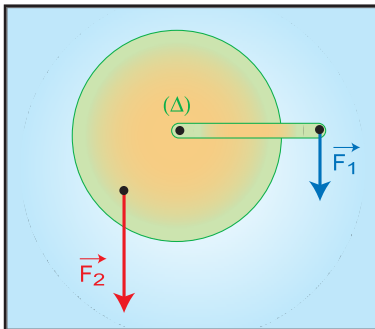


Fig.43-a

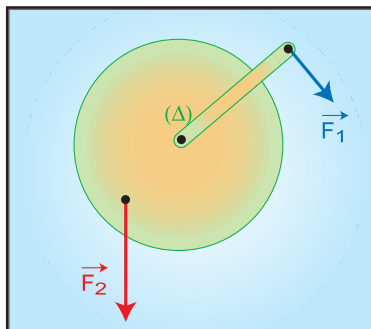


Fig.43-b

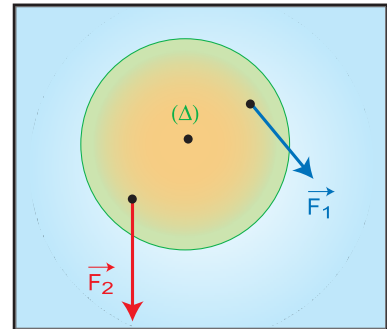


Fig.43-c

- 6- Une personne tient dans sa main une bouteille d'eau. L'os de l'avant-bras est modélisé par une barre horizontale sur laquelle on a représenté les forces appliquées (Fig.44) : $\vec{P}$ le poids de la bouteille ; $\vec{P}'$ le poids de l'avant-bras appliqué en son centre d'inertie ; $\vec{T}$, la tension du biceps ; $\vec{R}$, la réaction de l'articulation du coude. On suppose que l'articulation du coude correspond à un axe (Δ) perpendiculaire en O à la figure (Fig. 44).

a- Ecrire la condition d'équilibre de l'avant-bras autour de l'axe (Δ) .

b- Calculer l'intensité de la tension du biceps .

Données : $d_1 = 5 \text{ cm}$; $d_2 = 15 \text{ cm}$; $d_3 = 25 \text{ cm}$;

$\|\vec{P}\| = 15 \text{ N}$ et $\|\vec{P}'\| = 12 \text{ N}$

c- Représenter pour les forces appliquées, les forces complémentaires correspondant aux couples associés . En déduire l'intensité de la réaction $\vec{R}$ de l'articulation du coude.

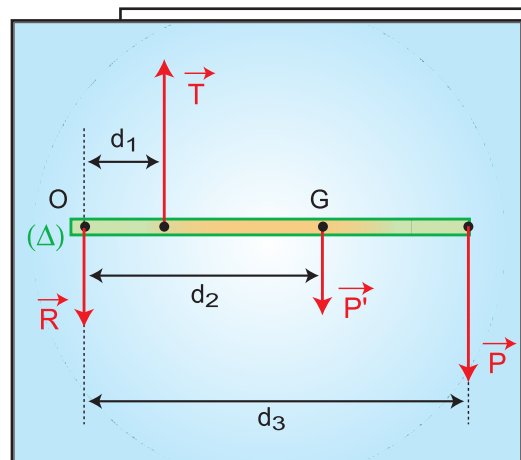


Fig.44

- 7- Un treuil est constitué de deux cylindre solidaires et coaxiaux de rayons $r_1 = 10 \text{ cm}$ et $r_2 = 20 \text{ cm}$ sur lesquels s'enroulent des cordes (Fig.45). On soulève avec ce treuil une charge de masse $m = 50 \text{ kg}$. On supposera que le mouvement est suffisamment lent pour considérer que le treuil est en équilibre à chaque instant.

Calculer l'intensité de la force de traction $\vec{F}$.

$\|\vec{g}\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$

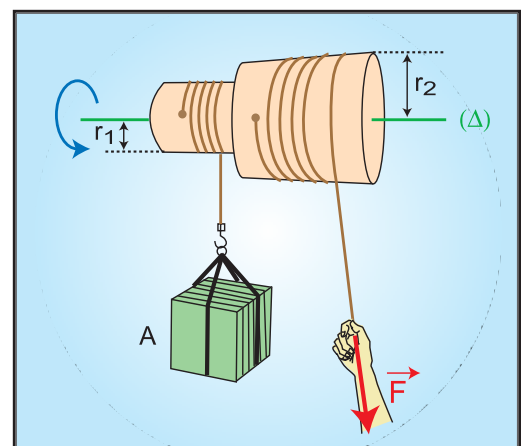


Fig.45

- 8- Une barre rigide de masse négligeable mobile autour d'un axe vertical sans frottement est en équilibre sous l'action d'un ensemble de forces horizontales $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ représentées sur la figure 46.
- On donne : $OA = 40 \text{ cm}$; $OB = 60 \text{ cm}$; $BC = 30 \text{ cm}$.
- a- Ecrire les coordonnées de ces forces dans le repère d'origine O et d'axe x'x confondu avec AC.
- b- Ecrire les moments des forces appliquées par rapport à l'axe.
- c- Déterminer l'intensité de la force $\vec{F}_3$.
- d- Déterminer la réaction de l'axe $\vec{R}$ sur la barre.

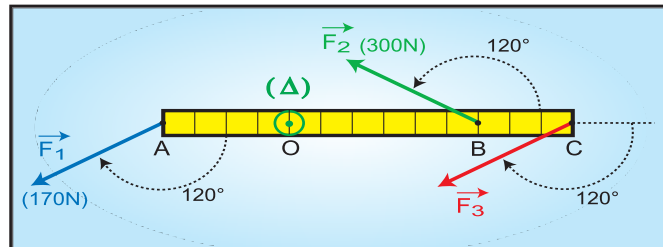


Fig.46

- 9- Pour remonter le ressort spiral d'un jouet mécanique, on utilise une petite clé (remontoir) en forme de T enfichée sur l'arbre carré soudé à l'extrémité intérieure du ressort (Fig.47); l'autre extrémité du ressort est fixée au boîtier moteur immobile. On mesure après n tours de clé l'intensité de la force appliquée $\vec{F}$ en A. On trouve les résultats consignés dans le tableau suivant.

n	1	2	3	4	5	6	7
$\ \vec{F}\ \text{ (N)}$	2,5	5,1	7,4	10	12,7	14,9	17,5

- a- Montrer que $\|\vec{F}\|$ est proportionnelle à n ; en déduire la relation entre $\|\vec{F}\|$ et n , soit $\|\vec{F}\| = f(n)$.
- b- Représenter sur un schéma un état d'équilibre de la clé après n tours en précisant les couples auxquels elle est soumise et leur sens.
- c- Calculer le moment du couple du ressort spiral après n tours de clé, sachant que $OA = 1,5 \text{ cm}$
- d- Sachant qu'il a fallu 20 tours de clé pour le remonter au maximum ,avec quelle force $\|\vec{F}\|$ le boîtier du ressort va-t-il , au départ,commencer à transmettre, par l'intermédiaire de sa roue dentée, le mouvement au reste du mécanisme ? Le rayon du boîtier est 5 cm.

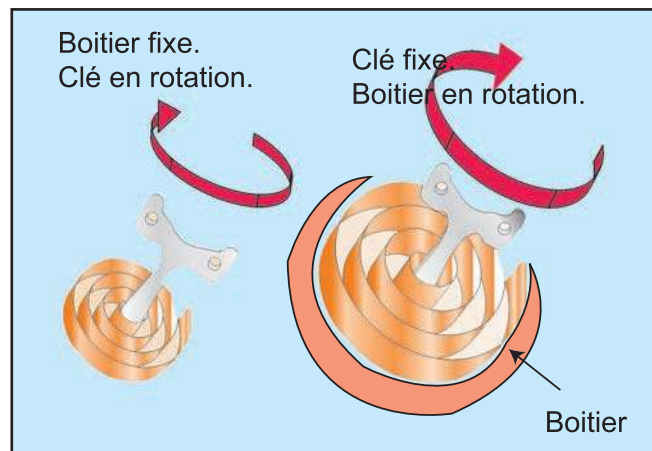


Fig.47

Mesure du couple d'un moteur (Frein de Prony)

Pour mesurer le couple d'un moteur électrique ou d'automobile, on utilise un dispositif appelé frein de Prony. Le frein est un système constitué de deux mâchoires M et M' que l'on peut serrer sur une poulie de centre O solidaire de l'arbre du moteur.

A la mâchoire M est fixée d'un côté une tige rigide munie d'un plateau et de l'autre un contrepoids Q dont la position est réglable. On fait coulisser le contrepoids de manière à ramener le centre d'inertie de l'ensemble en coïncidence avec le centre O. Deux butées B et B' limitent les mouvements de l'extrémité de la tige.

- Quand on met le moteur en marche selon le sens indiqué sur la figure, l'ensemble est entraîné par la poulie et vient se bloquer contre la butée B' ; ce sont les forces de frottement qui entraînent le solide en rotation.
- On serre les mâchoires M et M' du frein jusqu'à ce que l'arbre du moteur prenne une vitesse de rotation constante : à cet instant là le moment du **couple moteur** $\mathcal{M}(\mathcal{C})$ est égal au moment résultant de l'ensemble des forces de frottement que l'on appelle le **couple résistant** ; c'est le principe d'inertie appliqué au mouvement de rotation.
- On place sur le plateau une masse m telle qu'elle ramène la tige en équilibre horizontal entre les deux butées sans contact ni avec l'une ni avec l'autre. Le système (S) = {M, M', Q, m} est un solide mobile autour d'un axe (Δ) perpendiculaire au plan de la figure en O. (S) est soumis à l'action du couple moteur transmis par le frottement de la poulie, à son poids $\vec{P}$ et au poids de la masse m.
- Le moment du poids $\vec{P}$ est nul puisque le centre d'inertie se trouve sur l'axe. (S) étant en équilibre, le moment du couple moteur est donc égal à la valeur absolue du moment du poids de la masse m connue.
- Le bras de levier d étant connu par construction, on peut écrire :

$$\mathcal{M}(\mathcal{C}) = m \cdot \|\vec{g}\| \cdot d$$

m et d étant connu, on peut déterminer le moment du couple moteur sur l'arbre d'une machine quelconque en ramenant cette détermination à une simple mesure de masse. On verra dans un chapitre ultérieur que la connaissance de la vitesse de rotation et du moment du couple moteur permet par leur produit de connaître la **puissance** de la machine à une vitesse donnée.



Fig.48

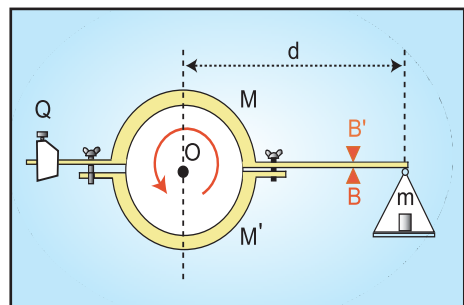
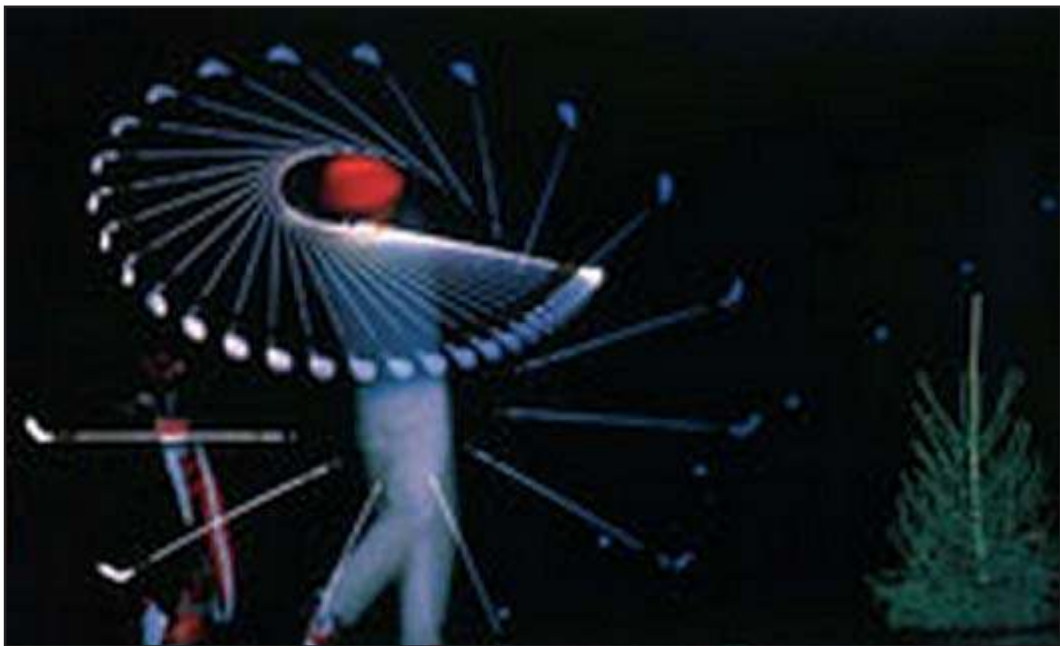


Fig.49- Schéma du frein de Prony



Chronophotographie d'un joueur de golf en action

Les moyens actuels d'analyse et de décomposition des mouvements (caméras rapides, pellicules sensibles...) couplés à l'ordinateur permettent une étude visuelle détaillée des trajectoires et des vitesses.

OBJECTIFS

- Reconnaître un mobile en mouvement rectiligne uniformément varié.
- Reconnaître un mobile en mouvement circulaire uniforme.
- Déterminer la vitesse angulaire d'un mobile en mouvement circulaire uniforme ainsi que sa période.

1. Généralités et rappels

Qu'est ce que la cinématique ?

La cinématique (du grec kinêma : « mouvement ») a pour objet de décrire les mouvements des corps au cours du temps, sans se préoccuper de leurs causes, c'est-à-dire des forces.

Différents types de mouvement

Observer les figures ci-dessous et attribuer les différents types de mouvements (rectiligne ou curviligne, plan ou spatial)



Fig.1 Manège



Fig.2 Echangeur

On se limitera dans ce cours à l'étude cinématique :

- des mouvements **rectilignes** (dont la trajectoire est portée par une droite) et **circulaires** (dont la trajectoire est portée par un cercle) ;
- des mouvements des solides supposés ponctuels (points matériels) appelés mobiles ponctuels ;
- des mouvements d'un point matériel particulier appartenant à un système matériel (indéformable ou non).

On peut étudier le mouvement du centre d'inertie d'un solide, par exemple, et ce mouvement peut être soit rectiligne, soit circulaire.

Référentiel et repères

Pour étudier un mouvement au cours du temps, trois éléments essentiels sont à préciser clairement :

- l'objet à étudier, lequel est assimilé à un point matériel,
- le **repère d'espace** : la description d'un mouvement dépend du **référentiel** choisi, c'est-à-dire du **solide de référence** ; le choix du solide de référence est arbitraire mais nous utiliserons le plus souvent le référentiel terrestre. Pour situer la position d'un point dans l'espace, on choisit un repère $\mathcal{R} (O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ orthonormal lié au **référentiel terrestre**. On peut associer au même référentiel des repères d'espace différents adaptés à chaque situation.
- le **repère temps** : chronomètres, horloges et calendriers fournissent des repères de temps (**dates**) qui permettent de situer l'**instant** d'un événement. Ces instruments peuvent mesurer également une **durée**, c'est-à-dire l'intervalle de temps séparant deux instants ou deux événements qui leur sont associés. Le repère temps est caractérisé par une **origine des dates** ($t=0$) et une **unité de temps** (la **seconde** de symbole s dans le Système International).

Les repères d'espace utilisés dans ce cours sont choisis en fonction du type de mouvement étudié.

Exemples : Pour le mouvement rectiligne, le point matériel est repéré :

- soit par son abscisse x dans un repère $\mathcal{R} (O, \vec{i})$, le support de la trajectoire étant alors confondu avec l'axe du repère (Fig.3).
- soit par ses coordonnées (x, y) dans un repère $\mathcal{R} (O, \vec{i}, \vec{j})$, le support de la trajectoire appartenant au plan du repère choisi (Fig.4).

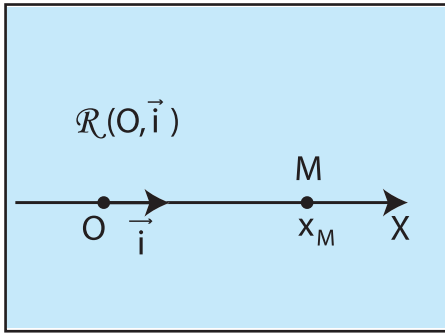


Fig.3

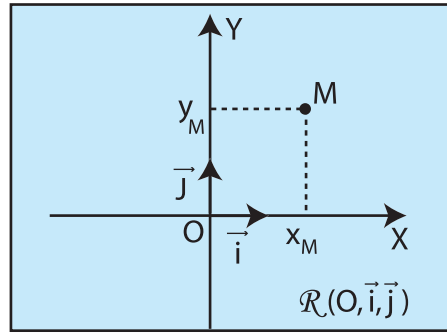


Fig.4

2. Mouvement rectiligne uniformément varié

2.1. Activités de rappel

Un mobile M, supposé ponctuel, est en mouvement dans un repère $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j})$. Ses coordonnées dans ce repère à cinq dates différentes sont regroupées dans le tableau suivant :

t (s)	0	0,5	1	1,5	2
x (cm)	0	1	2	3	4
y (cm)	1	2,5	4	5,5	7

- Placer ces positions sur un système d'axes $(O, \vec{i}, \vec{j})$
 - Quelle remarque peut-on faire quant à la trajectoire du mobile ?
 - Les espaces parcourus par le mobile en 0,5 s sont-ils croissants, décroissants ou égaux ?
- Déterminer la vitesse moyenne V_{moy} du mobile entre 0 s et 1 s puis entre 1,5 s et 2 s.
- En déduire la nature du mouvement.

Un mobile dont la trajectoire a pour support une droite, a un mouvement **rectiligne**. Si au cours de ce mouvement :

- la valeur de sa vitesse reste **constante** : le mouvement est dit **uniforme**,
- la valeur de sa vitesse **augmente** : le mouvement est dit **accélééré**,
- la valeur de sa vitesse **décroît** : le mouvement est dit **retardé** ou **décéléré**.

2.2. Mouvement sur un plan incliné

Etudions la vitesse d'un point appartenant à un solide abandonné à lui-même sur un plan incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (banc à coussin d'air ou chariot avec frottement faible). Plaçons le long du banc 4 capteurs de vitesse (mesureurs de vitesse) en 4 points M_1, M_2, M_3 et M_4 et relevons leurs positions.

Positions	M_1	M_2	M_3	M_4
Abscisses x (m)	0,2	0,6	1,0	1,4
Dates t (s)	1	2,5	4	5,5
Vitesse v (m.s^{-1})				

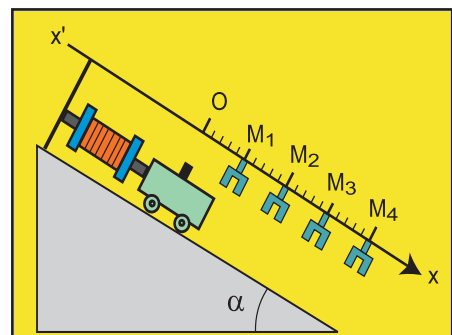


Fig.5

« Abandonnons le chariot sans vitesse initiale, grâce à l'électroaimant, à partir d'un point M_0 , confondu avec l'origine du repère $\mathcal{R}(O, \vec{i})$ (Fig.5). Relevons les dates de passage aux points considérés et les valeurs des vitesses correspondantes.

« Le chariot a un mouvement de translation sur le plan incliné.

Sa vitesse est en augmentation continue tout au long du mouvement. Un tel mouvement est dit rectiligne **accélééré**. Plaçons les couples de valeurs (t, v) dans un repère avec t en abscisses et v en ordonnées. Les points obtenus sont **alignés** sur une droite qui passe par l'origine; ce résultat se confirme si nous calculons le rapport $(a = v/t)$ dans chaque colonne du tableau précédent : il est pratiquement **constant**.

« Un mouvement rectiligne **sans vitesse initiale** est dit **uniformément accélééré** lorsque sa vitesse est **proportionnelle** au temps : $v = a \cdot t$.

« Reprenons l'expérience avec le même matériel :

A l'aide d'un lanceur, communiquons au chariot une vitesse initiale lui permettant de s'élever le long du banc à coussin d'air. Le mouvement s'effectue à partir d'un point N_0 , confondu avec l'origine d'un repère $\mathcal{R}'(O', \vec{i}')$ situé au bas du plan incliné du même angle α avec l'horizontale. Les capteurs de vitesse sont disposés dans le même ordre à partir du bas et régulièrement espacés jusqu'en haut du banc à coussin d'air. Relevons les valeurs des vitesses grâce aux 4 capteurs disposés en 4 points N_1, N_2, N_3 et N_4 (Fig.6).

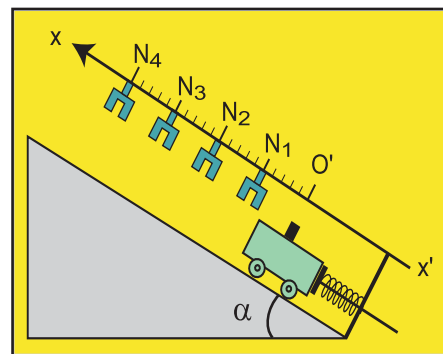


Fig.6

Position	N_1	N_2	N_3	N_4
Abscisse x (m)				
Date t (s)				
Vitesse v ($m \cdot s^{-1}$)				

« La vitesse **diminue** tout au long du mouvement jusqu'à l'**arrêt** en un point proche du sommet du plan incliné ; le solide retombe ensuite en mouvement accélééré. Dans sa première phase, un tel mouvement est dit rectiligne **retardé** ou **décélééré** ; on dit parfois **freiné**. Plaçons les couples de valeurs (t, v) dans un repère avec t en abscisses et v en ordonnées. Les points obtenus sont **alignés** sur une droite qui ne passe pas par l'origine. La vitesse n'est plus proportionnelle au temps mais ses **variations** entre deux instants quelconques sont **proportionnelles** aux durées entre ces instants.

Quels que soient les couples (t_1, v_1) et (t_2, v_2) on aura : $\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = a'$ (constante négative, la vitesse étant décroissante) avec $a' = -a$.

« Un mouvement rectiligne avec vitesse initiale est dit **uniformément retardé** lorsque les **variations** de sa vitesse sont **proportionnelles** au temps. Soit : $v = a' \cdot t + v_0$; v_0 étant la vitesse initiale (à $t = 0$).

Définition

Le mouvement d'un point matériel est rectiligne **uniformément varié** lorsque la **vitesse** de ce point matériel est une **fonction affine** du temps : $v = a \cdot t + v_0$

v_0 est la valeur initiale de la vitesse du mobile (à $t=0$) et a est une constante soit positive soit négative.

- Si la valeur de la vitesse **augmente** au cours du temps le mouvement est dit uniformément **accélééré** ($a > 0$).
- Si elle **décroît**, le mouvement est dit **uniformément retardé** ou **décélééré** ($a < 0$).

Les photos suivantes (Fig.7 et Fig.8) sont des **chronophotographies** ; une chronophotographie est obtenue lorsque, sur une même pellicule, l'appareil photo (qui est **fixe**) enregistre le sujet en **mouvement** à des intervalles de temps **régulièrement** espacés.

- Observer les deux chronophotographies suivantes d'une moto télécommandée.
- Comment varie la distance parcourue par la moto pendant des durées égales ?



Fig.7 Chronophotographie d'une moto en mouvement accéléré



Fig.8 Chronophotographie d'une moto en mouvement retardé

- Pour un solide supposé ponctuel animé d'un mouvement rectiligne **accéléré**, la distance parcourue, pendant des intervalles de temps successifs et égaux, est **croissante**.
- Pour un solide supposé ponctuel animé d'un mouvement rectiligne **retardé**, la distance parcourue, pendant des intervalles de temps successifs et égaux, est **décroissante**.

Ces propriétés sont importantes parce qu'elles nous donnent un moyen rapide pour reconnaître un mouvement accéléré ou un mouvement retardé.



Attention

Si la distance parcourue par un mobile pendant des durées égales est de plus en plus grande, on ne peut pas avoir la certitude que le mouvement est rectiligne **uniformément** accéléré. Le seul renseignement qu'on peut en tirer est que le mouvement est **accéléré**. Pour qu'il soit **uniformément accéléré**, il faut que la vitesse varie **proportionnellement au temps**.

2.3. Chute libre

Tous les corps n'ont pas le même mouvement de chute dans l'air : une feuille morte ou une plume ne tombent pas de la même manière qu'une bille en acier ou en plomb (Fig.9). L'influence de la **résistance de l'air** perturbe en général d'autant plus le mouvement engendré par les forces de pesanteur que la surface de contact du corps avec l'air est grande, et ceci pour une même masse en mouvement. Cette influence peut être rendue négligeable si on utilise des corps **denses** (métaux) et de forme appropriée (sphérique ou **aérodynamique**). C'est ainsi qu'une bille en acier ou en plomb a pratiquement un **même mouvement** de chute dans les expériences de laboratoire réalisées sur une hauteur ne dépassant pas les deux mètres dans l'air. Ce mouvement est très proche de celui, appelé **chute libre**, qu'elle pourrait avoir dans le **vide** où elle n'est seulement soumise qu'à son **poids**.

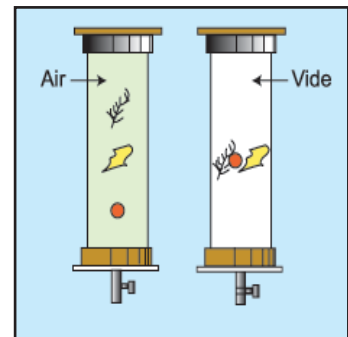


Fig.9

Définition

On appelle chute libre, le mouvement d'un corps soumis uniquement à l'action de son poids.

Exploitions la chronophotographie de la chute d'une bille pour déterminer les lois du mouvement de chute d'un corps à la surface de la terre (Voir activité expérimentale en fin de chapitre). La bille est supposée lâchée sans vitesse initiale d'une certaine hauteur (Fig.10). L'intervalle de temps entre deux positions de la bille est $\Delta t = 66,7\text{ms}$.



Fig.10

Le mouvement est indépendant de la masse des corps qui tombent, donc de leur poids. Repérons sur la chronophotographie les dates de passage de la bille et les positions correspondantes ; on obtient des couples de valeurs (t, x) où x représente la distance parcourue par la bille depuis le début du mouvement à $t = 0$. Remplissons le tableau suivant :

t (s)							
x (m)							
v (m.s⁻¹)							

Traçons la courbe $x = f(t^2)$. Le tracé permet-il de déduire une relation entre v et t ?

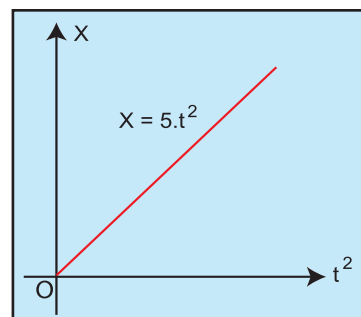


Fig.11

Avec les valeurs de la vitesse correspondant aux mêmes dates, on peut tracer la courbe $v = h(t)$; on obtient un segment de droite de pente positive qui passe par l'origine (Fig.12), d'où : $v = a.t$.

Au cours de la chute libre d'un corps lâché sans vitesse initiale à la date $t = 0$, les espaces x parcourus à une date ultérieure t sont proportionnels à t^2 , ce qui permet d'écrire : $x = b . t^2$; b est une constante positive.

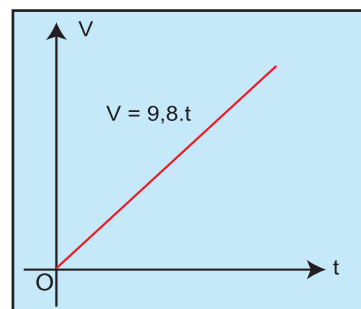


Fig.12

On constate qu'entre a et b on peut établir la relation simple : $a = 2.b$ avec $a = ||\vec{g}||$. $||\vec{g}||$ est l'intensité de la pesanteur dont la valeur vaut $9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

La chute libre sans vitesse initiale d'un corps dans un repère terrestre est un mouvement rectiligne vertical uniformément accéléré :

- La valeur de sa vitesse v est proportionnelle à la durée t de son mouvement, soit $v = ||\vec{g}|| . t$
- la distance parcourue x est proportionnelle au carré de la durée t de son mouvement, soit $x = \frac{1}{2} . ||\vec{g}|| . t^2$

Elevons au carré l'expression de la vitesse d'une chute libre sans vitesse initiale : $v^2 = ||\vec{g}||^2 . t^2$
En comparant avec l'expression des espaces parcourus, on aura $v^2 = 2 . ||\vec{g}|| . x$.

Dans le cas d'une chute libre d'un corps sans vitesse initiale, le carré de sa vitesse est à chaque instant proportionnel à son abscisse : $v^2 = 2 . ||\vec{g}|| . x$.

Activité

Montrer que si on a sur une **chronophotographie** 3 photos **successives** d'un mobile en mouvement rectiligne **uniformément varié** aux dates t_1 , t_2 et t_3 , la vitesse $V(t_2)$ est égale à la vitesse moyenne sur l'intervalle de temps $\Delta t = t_3 - t_1$.

Utiliser cette propriété pour vérifier sur l'une des chronophotographies de cette leçon la loi de variation de la vitesse d'un mouvement rectiligne uniformément varié.

3. Mouvement circulaire uniforme

3.1. Trajectoire et période

Activités de mises en situation :

Donner des exemples de solides en mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Indiquer les axes de rotation. Peut-on parler de rotation quand le solide n'effectue pas une ou plusieurs **révolutions** ? Citer des exemples de solides qui effectuent un mouvement de rotation sans révolution.

Faisons tourner un plateau autour d'un axe maintenu fixe et observons deux points différents de ce plateau que l'on a repérés par deux marques de couleurs différentes. (Fig.13).

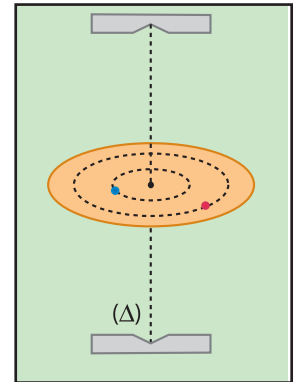


Fig.13

Ces deux points décrivent chacun un cercle centré sur l'axe de rotation. Cet axe de rotation est perpendiculaire au plan des cercles.

Chaque point d'un solide en mouvement de rotation par rapport à un axe fixe, décrit une trajectoire circulaire dont le centre est situé sur cet axe. Cette trajectoire est contenue dans un plan perpendiculaire à cet axe.

Il suffit seulement que deux points liés au solide soient immobiles pour que celui-ci puisse avoir un mouvement de rotation. La droite définie par ces deux points fixes est alors l'axe de rotation.

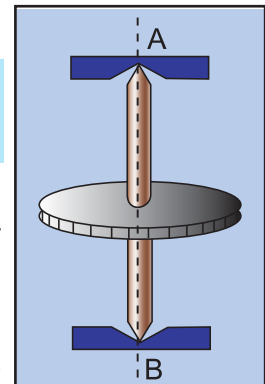


Fig.14

Exemples : Les arbres des roues dentées d'une montre sont pointus aux extrémités et montés sur des pivots en rubis (Fig.14).

Un solide peut n'avoir aucun point commun avec son axe de rotation : Dans un échangeur routier, une voiture sur une boucle circulaire n'a aucun point commun avec l'axe de rotation.

Le solide le plus simple dont on peut étudier le mouvement de rotation est **un point matériel** assujéti à tourner à une distance constante d'un axe fixe.

Modélisons ce solide avec le montage schématisé sur la figure 15 : un moteur électrique fait tourner une tige verticale à laquelle on a soudé perpendiculairement en O une tige horizontale OM de longueur r . A l'extrémité M on a fixé une petite boule que l'on peut assimiler à un mobile ponctuel. Faisons tourner le moteur avec une vitesse modérée.

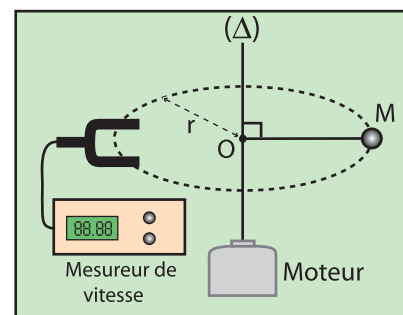


Fig.15

Quand le moteur atteint son allure de régime permanent, le mobile M décrit d'un mouvement **régulier**, une trajectoire circulaire dont le centre est situé en O et le rayon est r . La tige verticale matérialise l'axe de rotation du solide.

Plaçons sur le chemin du mobile la fourche d'un dispositif à cellule photoélectrique pour la mesure des vitesses. Mesurons plusieurs fois de suite la vitesse du mobile en différents endroits de la trajectoire.

La vitesse du mobile est constante en tout point de la trajectoire et ne varie pas au cours du temps. Le mouvement du solide ponctuel est **circulaire uniforme** de vitesse V constante.

Un point matériel est animé d'un mouvement circulaire uniforme lorsque, dans le repère considéré, sa trajectoire est un cercle et sa vitesse V est constante.

Modifions le dispositif de chronométrage de façon à déterminer la durée de n tours du mobile sur sa trajectoire (Fig.16). Si le mouvement est suffisamment lent on peut utiliser un chronomètre manuel. Remplissons le tableau de mesures suivant :

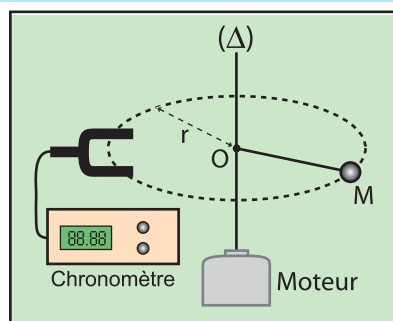


Fig.16

n (tours)	1	2	3	4	5	6
t (s)						
$\frac{t}{n}$						

Dans la dernière ligne du tableau on trouve dans toutes les colonnes, une valeur identique à celle de la première. C'est la durée d'une **révolution complète** du mobile sur sa trajectoire. En se plaçant en un point quelconque de la trajectoire et en chronométrant entre deux passages consécutifs du mobile en ce point, on trouve une durée **constante T** : le mobile repasse **périodiquement** en chaque point de sa trajectoire.

Le mouvement circulaire uniforme d'un point matériel est périodique et sa période T est l'intervalle de temps séparant deux passages consécutifs du mobile en un même point de sa trajectoire.

En courant alternatif, on a défini également une autre grandeur que la période pour mieux rendre compte des variations **rapides** des tensions alternatives. C'est la **fréquence N**.

Il en est de même pour les mouvements périodiques en général et le mouvement circulaire uniforme en particulier. Une période correspond ici à un tour du mobile sur sa trajectoire. La **fréquence N** du mouvement est par définition le nombre de périodes par seconde, c'est-à-dire le nombre de tours par seconde.

Définition

La fréquence N d'un mouvement circulaire uniforme est égale au nombre de tours effectués par le mobile en une seconde.

$$N = \frac{1}{T}$$

N s'exprime en hertz (Hz) quand T est exprimée en seconde.

Autres unités :

On utilise souvent, pour les mouvements de rotation, une autre unité que le hertz, le **tour par seconde** de symbole **tr.s⁻¹**.

On utilise également le **tour par minute** de symbole **tr.min⁻¹**.

$$1 \text{ tr.min}^{-1} = 1/60 \text{ tr.s}^{-1}$$

$$1 \text{ tr.s}^{-1} = 1 \text{ Hz}$$

Le tableau de bord de voiture comprend, outre le compteur de vitesse, un compte-tours indiquant en tr.min⁻¹ la fréquence de rotation du moteur de la voiture (Fig.17).



Fig.17

3.2. Repérage du mobile sur sa trajectoire

La description du mouvement circulaire du mobile, nécessite comme pour le mouvement rectiligne, de pouvoir établir une correspondance entre ses coordonnées dans l'espace et le temps indiqué par une horloge. La trajectoire du mouvement étant curviligne et contenue dans un plan, nous choisissons ce dernier comme plan de figure.

Sur la figure 18, on a représenté le repère orthonormé $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j})$. La description du mouvement du mobile nécessite de connaître à chaque instant les valeurs de deux fonctions du temps : $x(t)$ et $y(t)$. Cette description étant compliquée, cherchons une description plus simple du mouvement.

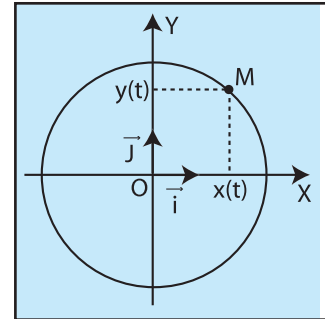


Fig.18

Choisissons un point de la trajectoire que nous appellerons M_0 et un sens positif de circulation sur cette trajectoire (Fig.19). Tout autre point M de la trajectoire peut alors être repéré par la longueur de l'arc qui le sépare du point M_0 , soit $\widehat{M_0M}$ avec la convention suivante : $\widehat{M_0M}$ sera compté positif s'il est mesuré dans le sens positif et négatif dans le sens contraire.

La grandeur algébrique $s = \widehat{M_0M}$ est appelée l'**abscisse curviligne** du mobile sur sa trajectoire.

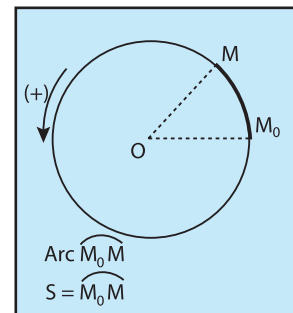


Fig.19

Définition

On appelle abscisse curviligne s la valeur algébrique de l'arc $\widehat{M_0M}$ mesurée sur la trajectoire orientée et munie d'une origine M_0 . s s'exprime en mètre (m).

Le point M étant en mouvement, l'abscisse curviligne est une fonction du temps : $s(t)$.

Soit t_0 la date de passage du mobile par l'origine M_0 et t sa date de passage par le point M.

$\Delta t = (t - t_0)$ est la durée du mouvement sur l'arc $\widehat{M_0M}$. Le mouvement étant uniforme de vitesse

V , on peut écrire $\widehat{M_0M} = V \cdot (t - t_0)$ ou $s(t) = V \cdot (t - t_0)$ (1)

- Si le sens positif choisi coïncide avec celui du mouvement, l'abscisse curviligne est toujours positive et son expression est conforme à (1) (Fig.20-a).

- Si le sens positif choisi est différent de celui du mouvement, l'abscisse curviligne sera négative et son expression sera (Fig.20-b) : $s(t) = -V \cdot (t - t_0)$ (2)

- Si l'origine des dates coïncide avec le passage du mobile par le point M_0 :

$t_0 = 0$ et les expressions (1) et (2) s'écrivent respectivement, (Fig.20-c,d) :

$$s(t) = V \cdot t$$

et

$$s(t) = -V \cdot t$$

- $s(t)$ s'exprime en mètre (m) quand V s'exprime en mètre par seconde (m.s⁻¹) et t en seconde (s).

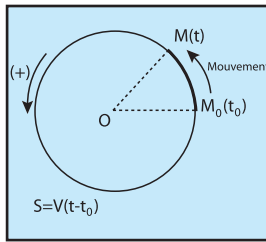


Fig.20-a

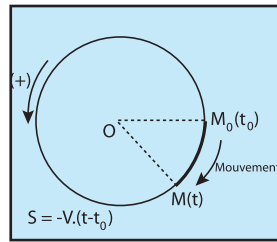


Fig.20-b

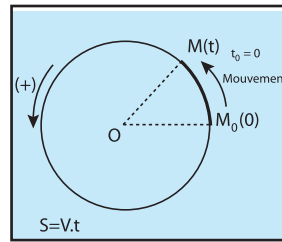


Fig.20-c

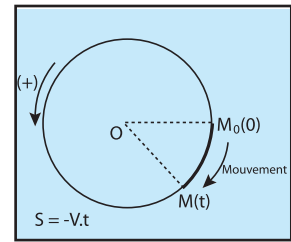


Fig.20-d

Peignons en blanc la tige horizontale de notre dispositif ainsi que la boule M. Arrangeons-nous pour que le dispositif soit placé sur un fond noir. Mettons le moteur en marche. Prenons une photographie du dispositif avec un appareil positionné à la verticale de l'axe de rotation et un temps de pose de l'ordre de **un dixième** de la période de rotation **T** du mobile.

Sur la photo développée (le négatif est suffisant) ou l'image numérique apparaît un secteur angulaire dont le sommet coïncide avec le centre de la trajectoire, (Fig.21). Durant la pose le rayon OM a balayé ce secteur en tournant d'un angle $\alpha = \widehat{M_0OM}$. Ce secteur découpe sur la trajectoire un arc $\widehat{M_0M}$ représentant l'ensemble des positions du mobile durant la pose.

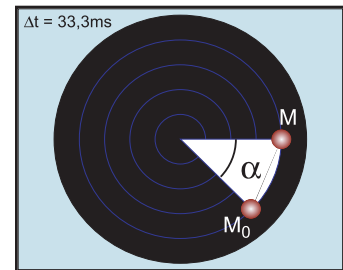


Fig.21

On peut établir une relation entre l'abscisse curviligne et l'angle α en écrivant :

$$\widehat{M_0M} = r . \alpha$$

α est exprimé en radian (rad) quand les longueurs de l'arc et du rayon sont exprimées en mètre.

En adoptant pour l'angle α les mêmes conventions de signes que pour l'abscisse curviligne, on peut écrire une relation entre eux :

$$\Delta(t)_x = r . \alpha(t)$$

et

$$\alpha(t) = \frac{\Delta(t)}{r} \quad (3)$$

La valeur algébrique $\alpha(t)$ de l'angle $\widehat{M_0OM}$ est appelée **abscisse angulaire** et s'exprime en radian (rad).

Remplaçons dans une des deux relations (3), **S(t)** par son expression la plus simple en fonction du temps

$$\text{on aura : } \begin{cases} \alpha(t) = \frac{\Delta(t)}{r} = \frac{V.t}{r} & \text{que l'on peut écrire } \alpha(t) = \frac{V}{r}.t \\ \text{Posons } \frac{V}{r} = \omega & \text{alors } \alpha(t) = \omega.t \text{ et } \omega = \frac{\alpha(t)}{t} \end{cases}$$

L'abscisse angulaire, comme l'abscisse curviligne, est une fonction linéaire du temps. ω est une constante qui s'exprime en (rad.s⁻¹). Par analogie avec la vitesse linéaire V, on l'appelle **vitesse angulaire** du mouvement.

Définition

La vitesse angulaire ω du mouvement circulaire uniforme d'un point matériel M sur une trajectoire de centre O est numériquement égale à l'angle balayé par le rayon OM en une seconde.

Entre la valeur de la vitesse d'un point en mouvement circulaire uniforme et sa vitesse angulaire, on a la relation :

$$\mathbf{V} = \mathbf{r} \cdot \omega$$

où r désigne le rayon de sa trajectoire.

ω s'exprime en $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ quand V s'exprime en $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ et r en (m) .

Collons à la surface d'un plateau des pastilles de différentes couleurs et à des distances diverses de l'axe de rotation. Faisons tourner ce plateau d'un mouvement de rotation uniforme et éclairons les pastilles avec un stroboscope (ou observons en éclairage au « néon ») (Fig.22).

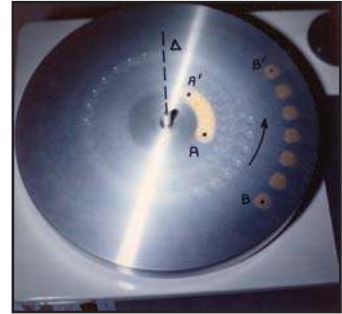


Fig.22

Nous voyons un ensemble d'images de chaque pastille réparties sur sa trajectoire circulaire séparées par des arcs de cercle de même longueur. Ces arcs de cercle ont des longueurs croissantes en fonction du rayon de la trajectoire mais ils correspondent à des secteurs angulaires identiques. En effet, comme le stroboscope délivre des éclairs **périodiques**, chaque tache sur le plateau tourne d'un même angle entre deux éclairs. Deux pastilles situées à des distances différentes de l'axe de rotation ont donc une même vitesse angulaire mais des vitesses linéaires (sur la trajectoire) différentes.

A vitesse angulaire ω constante, la valeur de la vitesse V d'un mobile en mouvement circulaire uniforme sur sa trajectoire est une fonction croissante du rayon de celle-ci.

Activité

A chaque tour le mobile repasse par la même position avec la même vitesse et la durée de chaque tour est la période T . Trouver une relation entre la vitesse angulaire ω et la période T . Trouver une relation entre la vitesse angulaire et le nombre de tours N effectués en une seconde.

Solide en mouvement de rotation uniforme.

Un solide mobile autour d'un axe fixe est un système matériel indéformable constitué d'un grand nombre de points matériels M_i situés chacun à une distance déterminée r_i de l'axe de rotation, (Fig.23).

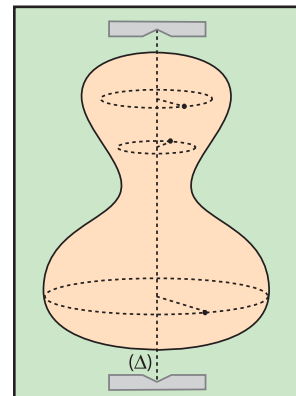


Fig.23

- Quand le solide est en mouvement de rotation uniforme autour de son axe, chacun des points matériels effectue un mouvement circulaire centré sur l'axe de rotation.
- Pendant une même durée Δt , tous les points M_i tournent d'un même angle $\Delta\alpha$ (c'est un solide) : tous les points ont donc une vitesse angulaire $\omega = \Delta\alpha / \Delta t$ identique : **vitesse angulaire du solide**.
- Mais chaque point matériel a une vitesse linéaire $\mathbf{V}_i = \omega \cdot \mathbf{r}_i$ qui dépend de sa position par rapport à l'axe. Plus on se rapproche de l'axe de rotation du solide plus le mouvement des points est lent. Les points situés sur l'axe de rotation ($r_i = 0$) sont **immobiles**.

Exercice résolu

Enoncé

Sur un treuil constitué de deux cylindres coaxiaux de rayons R_1 et R_2 sont enroulés en sens contraire deux fils inextensibles et de masse négligeable. Ils supportent à leurs extrémités respectivement un corps (A) de masse m_1 et un corps (B) de masse m_2 . (Fig 24)

On donne :

$$R_1 = 10 \text{ cm et } R_2 = 2 R_1.$$

- 1-Etablir la relation que doivent vérifier les masses des deux corps pour obtenir l'équilibre du système.
- 2-Lorsque le système est mis en mouvement de rotation uniforme les fils s'enroulent en sens contraire ; le corps (A) descend d'une hauteur $h = 3,14\text{m}$ en $2,5\text{s}$.
 - a.Montrer que (A) et (B) ont chacun un mouvement rectiligne uniforme dont on déterminera le sens et la vitesse.
 - b.Calculer la période du mouvement de rotation de chacun des points de fixation des fils sur les cylindres.

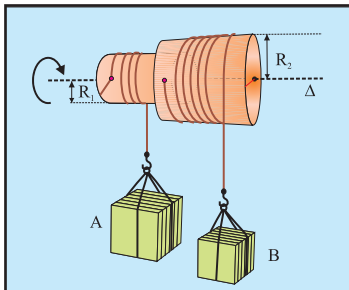


Fig.24

Solution

1- Les fils étant enroulés en sens contraire les moments des tensions des fils sont antagonistes :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{T}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{T}_2) = 0 \text{ or } \vec{T}_1 = \vec{P}_1 \text{ et } \vec{T}_2 = \vec{P}_2$$

$$\text{d'où } m_1 \cdot \|\vec{g}\| \cdot R_1 - m_2 \cdot \|\vec{g}\| \cdot R_2 = 0.$$

$$\text{Soit } m_1 \cdot R_1 = m_2 \cdot R_2$$

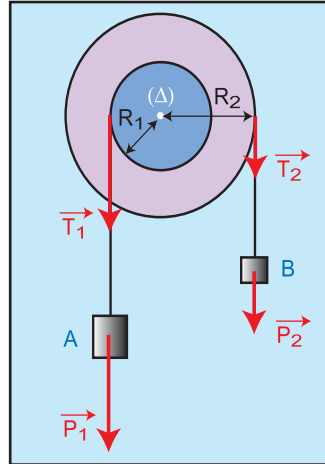


Fig.25

2.a- La rotation du solide étant uniforme chaque point de sa périphérie effectue un mouvement de rotation uniforme ; en particulier chaque point des fils en contact avec le cylindre a un mouvement circulaire uniforme. les fils étant inextensibles, tous les points qui les constituent sont en mouvement uniforme, y compris l'extrémité liée à chacun des corps. (A) et (B) ont chacun un mouvement rectiligne (vertical) uniforme.

$V_{(A)}$ et $V_{(B)}$ sont égales aux vitesses périphériques des cylindres correspondants. Ces derniers forment un solide unique de vitesse angulaire ω . On peut écrire :

$$V_{(A)} = \omega \cdot R_1 \text{ et } V_{(B)} = \omega \cdot R_2 ; \text{ comme } R_2 = 2 \cdot R_1 \text{ on aura } V_{(B)} = 2 V_{(A)}$$

$$V_{(A)} = h / t \text{ d'où } V_{(A)} = 1,26 \text{ m.s}^{-1} \text{ et } V_{(B)} = 2,51 \text{ m.s}^{-1}$$

$V_{(A)}$ est une vitesse descendante et $V_{(B)}$ est une vitesse ascendante.

b- La période de rotation est la même pour tous les points du solide :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ avec } \omega = \frac{V_{(A)}}{R_1} = \frac{V_{(B)}}{R_2} \Rightarrow T = \frac{2\pi R_2}{V_{(B)}}$$

ce qui donne $T = 0,5 \text{ s}$ ce qui correspond à :

$$N = 1 / T = 2 \text{ tr.s}^{-1} \text{ ou à une fréquence } N = 2 \text{ Hz avec } \omega = 4\pi \text{ rad.s}^{-1}$$

Activité expérimentale

Objectif

Etudier, expérimentalement, un mouvement de chute libre, sans vitesse initiale, par chronophotographie.

Matériel

- Une Web Cam.
- Un objet, assimilé à un point matériel.
- Une règle graduée.
- Un ordinateur.
- Un logiciel approprié.

A défaut de ce matériel, il est possible d'exploiter une chronophotographie de la chute libre d'une bille dont l'échelle des espaces et la période des éclairs sont connues.

Manipulation

- * Faire l'acquisition du mouvement de chute libre du mobile par la Web Cam.
- * Traiter les images obtenues par le Logiciel.
- * Préciser la nature du mouvement en utilisant la chronophotographie.
- * Déterminer la vitesse pour quelques positions de la bille et tracer la courbe $v = f_1(t)$
- * Tracer dans un système d'axes orthonormés avec une échelle adéquate.
la courbe $v^2 = f_2(h)$; h étant la hauteur de chute.
- * En déduire par comparaison des deux relations trouvées la loi de variation de la hauteur de chute de la bille lâchée sans vitesse initiale, soit $h = f_3(t)$.
- * Comment peut-on confirmer ce résultat à partir des données de la chronophotographie ?
- * Quelles relations peut-on établir entre les différentes constantes qui apparaissent dans les fonctions $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$?

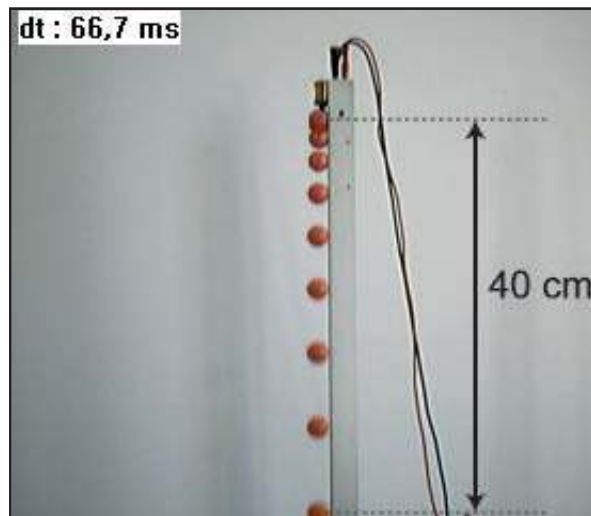


Fig 26

Mouvement rectiligne uniformément varié

Le mouvement d'un point matériel est rectiligne **uniformément varié** lorsque :

- la trajectoire a pour support une droite
- la **vitesse** de ce point matériel est une **fonction affine** du temps : $v = a t + v_0$
 v_0 est la valeur initiale de la vitesse du mobile (à $t=0$) et a une constante positive ou négative.
- Si la vitesse **augmente** au cours du temps, le mouvement est dit **uniformément accéléré** ($a > 0$)
- Si elle **décroît**, le mouvement est dit **uniformément retardé** ou **décéléré** ($a < 0$).
 On appelle **chute libre** le mouvement d'un corps soumis uniquement à l'action de son poids.
 Dans un mouvement de chute libre sans vitesse initiale :
 - les abscisses parcourues sont proportionnelles au carré du temps : $x = (1/2) \cdot \|\vec{g}\| \cdot t^2$
 - les vitesses sont proportionnelles au temps : $v = \|\vec{g}\| \cdot t$
 - les carrés des vitesses sont proportionnels aux abscisses parcourues : $v^2 = 2 \cdot \|\vec{g}\| \cdot x$

Mouvement circulaire uniforme

- Un point matériel est animé d'un **mouvement circulaire uniforme** lorsque, dans le repère considéré, sa trajectoire est un **cercle** et sa **vitesse V constante**.
- Le mouvement circulaire uniforme d'un point matériel est **périodique** et sa **période T** est l'intervalle de temps séparant deux passages **consécutifs** du mobile en un même point de sa trajectoire. T s'exprime en seconde (s).

La **fréquence N** d'un mouvement circulaire uniforme est égale au nombre de tours effectués par le mobile en **une seconde**. $N = \frac{1}{T}$ **N s'exprime en hertz (Hz) quand T est exprimé en seconde.**

On appelle **abscisse curviligne Δ** la valeur **algébrique** de l'arc $\widehat{MoM}$ mesurée sur la trajectoire **orientée** et munie d'une **origine M_0** . Δ s'exprime en **mètre (m)**. Selon le sens du mouvement par rapport à l'orientation de la trajectoire on a : $\Delta(t)_x = V \cdot t$ ou $\Delta(t)_x = -V \cdot t$

La valeur algébrique $\alpha(t)$ de l'angle $\widehat{MoOM}$ est appelée **abscisse angulaire** et s'exprime en radian (rad). $\Delta(t)_x = r \cdot \alpha(t)$ ou $\alpha(t) = \frac{\Delta(t)}{r}$

La vitesse angulaire ω du mouvement circulaire uniforme d'un point matériel M sur une trajectoire de centre O est numériquement égale à l'angle balayé par le rayon OM en 1 seconde.

Entre la valeur de la vitesse d'un point en mouvement circulaire uniforme et sa vitesse angulaire, on a la relation :

$$V = r \cdot \omega$$

où r désigne le rayon de sa trajectoire.

ω s'exprime en rad.s^{-1} quand V s'exprime en m.s^{-1} et r en m.

Solide en rotation uniforme

- Tous les points matériels d'un solide en mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe ont des mouvements circulaires uniformes sur des trajectoires centrées sur l'axe de rotation.
- La vitesse angulaire des mouvements de tous les points du solide est la même : c'est la vitesse angulaire du solide.
- La vitesse linéaire de chaque point du solide dépend de sa distance par rapport à l'axe de rotation : $V_i = \omega \cdot r_i$

EXERCICES :

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par VRAI ou FAUX aux propositions suivantes :

- Le mouvement d'un point matériel est uniformément varié lorsque sa trajectoire est une droite.
- La valeur de la vitesse d'un mouvement uniformément accéléré augmente au cours du temps.
- Un mouvement de chute libre est toujours accéléré.
- La valeur de la vitesse d'un mouvement de chute libre sans vitesse initiale est proportionnelle au temps.
- Lancé verticalement vers le haut, un mobile commence par avoir un mouvement rectiligne uniformément retardé.
- La valeur de la vitesse d'un mouvement circulaire uniforme est constante.
- Dans un solide en rotation, tous les points qui le constituent ont la même vitesse.
- L'abscisse angulaire des points matériels d'un solide en rotation dépend de la position de chacun d'entre eux par rapport à l'axe de rotation.

2- Compléter les phrases suivantes par le terme adéquat éventuellement choisi entre les parenthèses :

Tous les corps tombent dans le vide avec la même Dans un mouvement rectiligne la vitesse augmente au cours du temps. Dans un mouvement rectiligne uniformément retardé la variation de la vitesse du mobile à chaque seconde est (décroissante / constante). Entre la vitesse linéaire..... et la vitesse angulaire..... d'un mouvement circulaire uniforme on a la relation Entre l'abscisse curviligne..... et l'abscisse angulaire d'un mouvement circulaire uniforme, on peut écrire la relation..... La durée entre deux passages consécutifs d'un mobile, en mouvement circulaire uniforme, en un point de sa trajectoire est La..... est le nombre de révolutions effectuées par le mobile en rotation uniforme en une seconde.

Je sais appliquer le cours

- 3.** La figure 27 représente la chronophotographie d'un solide en mouvement de gauche à droite. Quelle est la nature du mouvement étudié ? Justifier.
- 4.** Une petite bille d'acier est lâchée d'une hauteur de 1,5 m sans vitesse initiale. Combien de temps dure sa chute ? Calculer sa vitesse d'arrivée au sol. On donne $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.
- 5.** Un cylindre, lâché sans vitesse initiale du sommet d'un plan incliné, se met à rouler vers le bas de la pente. Son centre d'inertie G effectue un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Sachant qu'il met 1,5 s pour parcourir une distance de 2m :
- a. Etablir l'expression $x = f(t)$ donnant l'abscisse du point G en fonction du temps.
 - b. En déduire l'expression $V = h(t)$ de la vitesse de G en fonction du temps.
 - c. Calculer la valeur de la vitesse de G quand il a parcouru 1 m.

6. Sur la chronophotographie ci-contre, (Fig.27), la durée séparant deux photos successives est 0,02s. L'échelle du document est 1/4. On admettra que la vitesse instantanée dans une position n est égale à la vitesse moyenne entre les positions $(n+1)$ et $(n-1)$.

- Calculer la vitesse instantanée lors du passage par la 3^{ème} et la 6^{ème} position.
- Proposer une expression donnant les variations de V en fonction du temps.

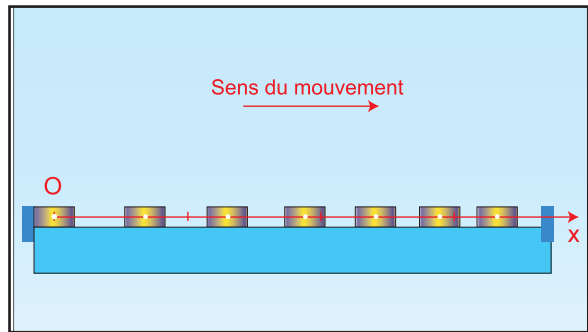


Fig.27

- Deux poulies de rayon R_1 et R_2 sont reliées par une courroie qui ne glisse pas.
 - Quelle relation peut-il exister entre les vitesses linéaires des points de la surface des deux poulies ?
 - Quel est le rapport de leur vitesse angulaire ?
- Le pédalier d'un vélo a 52 dents et le pignon arrière 16 dents. Ils sont reliés par une chaîne.
 - Quelle est la fréquence de rotation du pignon arrière quand celle du pédalier est de 1Hz ?
 - Calculer la vitesse du cycliste sachant que le rayon de la roue arrière est de 35cm.
- Sur le cadran d'une montre-bracelet traditionnelle, il y a la grande aiguille, la petite aiguille et la trotteuse. On supposera que les mouvements de ces trois aiguilles sont uniformes. Calculer les vitesses angulaires des aiguilles et établir les rapports qui existent entre elles en les prenant deux à deux.
- Un disque de meule est en rotation autour d'un axe. Un de ses points situé à la distance $r = 10$ cm de l'axe décrit une trajectoire circulaire avec une vitesse angulaire constante égale à $2\pi \text{ rad.s}^{-1}$.
 - Calculer la fréquence de rotation du disque, en tour par minute.
 - Calculer la vitesse du point mobile en une position quelconque de sa trajectoire.
 - Représenter la trajectoire de ce mobile à l'échelle 1/2. Représenter sur la trajectoire deux positions du mobile séparées par un intervalle de temps de 0,125s. Calculer la longueur du chemin parcouru par le mobile en utilisant la vitesse angulaire.
- La Terre est approximativement une sphère de 6400 km de rayon. Elle effectue un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe passant par les Pôles (mouvement diurne).
 - Calculer la vitesse angulaire de son mouvement diurne.
 - Calculer la valeur de la vitesse de rotation d'un point de la surface de la Terre situé aux latitudes suivantes : 0° (Equateur) ; 36° Nord (Tunis) ; 45° Nord (Paris) ; 90° Nord (Pôle).
 - Pourquoi croyez-vous que le centre spatial européen de lancement des fusées "Ariane" a été placé à Kourou en Guyane ? Chercher sur un Atlas la latitude de Kourou.
- Un enfant lance avec une fronde, une bille en acier en mouvement circulaire uniforme dont la trajectoire est située dans un plan vertical. Il lâche la ficelle de sa fronde au moment où la vitesse de la bille V_0 est verticale ascendante. Sachant que la longueur de la fronde est de 60 cm et que la fronde effectue, avant le lâcher, 5 tours par seconde :
 - Calculer la vitesse initiale V_0 avec laquelle la bille est lâchée.
 - Au cours de son mouvement ascendant la vitesse de la bille est donnée par l'équation : $V(t) = -10 t + \text{cste}$. Que représente la cste ? Après combien de temps la vitesse devient-elle nulle ? La bille reste-t-elle immobile ? Sinon décrire son mouvement ultérieur.
 - Jusqu'à quelle hauteur la bille peut-elle s'élever, sachant qu'elle repasse à son point de départ avec la même vitesse ?

La stroboscopie

Un stroboscope est un appareil de laboratoire mais aussi un appareil très utilisé dans les spectacles et les concerts de musique. C'est essentiellement un projecteur qui délivre des éclairs très brefs et très puissants (flash) de manière périodique. La rétine de l'oeil humain est très sensible à la lumière et douée d'une mémoire à très courte échéance : ce que l'on appelle **la persistance des images** sur la rétine. Cette persistance des images a une durée moyenne de l'ordre de 0,1s. Des objets placés dans le noir éclairé par un éclair très bref (1ms) laissent sur la rétine de l'observateur une image pendant 0,1s environ. Si un objet est en mouvement dans le noir et est éclairé par le stroboscope, son mouvement est décomposé en plusieurs images sur la rétine de l'observateur correspondant aux différentes positions de l'objet. C'est cet effet de décomposition des mouvements qui est utilisée dans les spectacles de danse surtout pour « figer » les mouvements des danseurs dans différentes positions artistiques.

Au laboratoire et dans l'industrie, le stroboscope a un tout autre usage pour lequel il a été inventé. Il permet essentiellement d'étudier les mouvements périodiques très rapides que l'oeil humain ne peut pas appréhender et étudier.

Principe :

Sur un disque noir, on colle une pastille blanche en un point de sa périphérie. Mettons le disque en mouvement de rotation uniforme. En éclairage continu (lampe à incandescence ou lumière de jour), la tache peut être suivie avec les yeux tant que son mouvement est lent. A grande vitesse (20 tours par seconde par exemple) l'oeil voit simplement, à l'endroit de la tache, une couronne grise.

L'immobilité stroboscopique

Faisons l'obscurité et éclairons le disque avec le stroboscope réglé sur une fréquence des éclairs égale à 20 Hz. L'oeil voit un disque avec une tache immobile dans une position quelconque.

L'illusion de l'immobilité est parfaite si le stroboscope et le moteur qui entraîne le disque ont des fonctionnements stables.

C'est la persistance des images sur la rétine qui rend possible cette illusion : à chaque flash, l'oeil voit la tache dans la même position mais entre deux éclairs la tache a fait un tour complet ; le deuxième flash vient donc rafraîchir sur la rétine une image identique à la première qui n'a pas encore disparu.

Si la fréquence des éclairs était de 10 Hz l'illusion serait la même mais la tache a simplement effectué 2 tours entre deux éclairs.



Fig.28-a



Fig.28-b

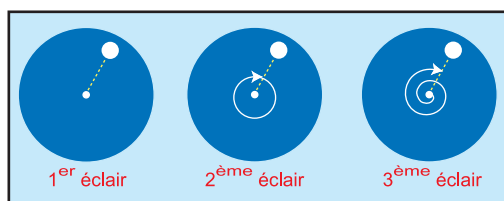


Fig.29

Le ralenti stroboscopique

Si on diminue très légèrement la fréquence des éclairs du stroboscope (19,5Hz par exemple), on voit que le disque et la tache prennent un mouvement ralenti dont la fréquence est 0,5Hz dans le même sens que le mouvement réel : c'est le **ralenti stroboscopique**. Le ralenti s'explique encore par la persistance des images sur la rétine: entre deux éclairs du stroboscope la tache fait un peu plus qu'un tour ; à chaque éclair elle semble donc avancer d'un petit angle, d'où l'impression de mouvement ralenti.

Si on descend au-dessous de 10 éclairs par seconde, l'oeil commence à distinguer les éclairs un par un parce que l'image a le temps de disparaître entre deux éclairs.

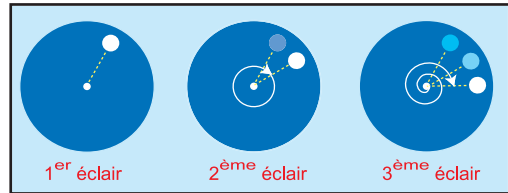


Fig.30

Utilisation :

- La stroboscopie permet de mesurer la fréquence des mouvements périodiques rapides. Ce qui précède montre que la fréquence d'un mouvement périodique est égale à la plus grande des fréquences des éclairs qui permet d'obtenir l'immobilité apparente.
- Pour étudier les solides en mouvement de rotation très rapide (hélices d'avions par exemple) et les déformations éventuelles qu'ils subissent, on utilise le stroboscope qui permet comme par magie de les « immobiliser » à n'importe quelle vitesse et de les photographier.
- C'est encore avec le ralenti stroboscopique que l'on arrive à observer le mouvement des soupapes d'un moteur de voiture et à le régler correctement ...

Dangers :

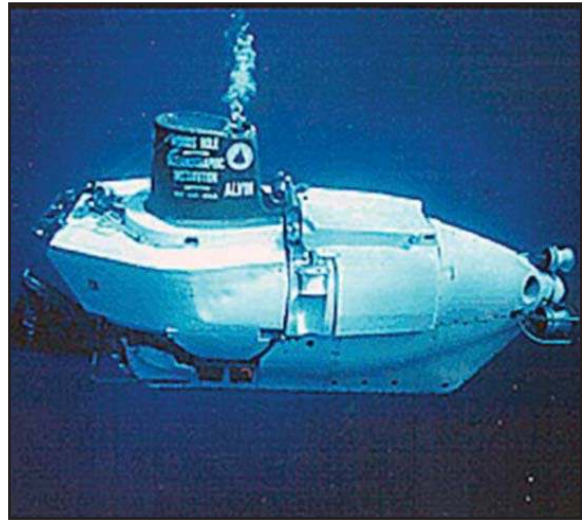
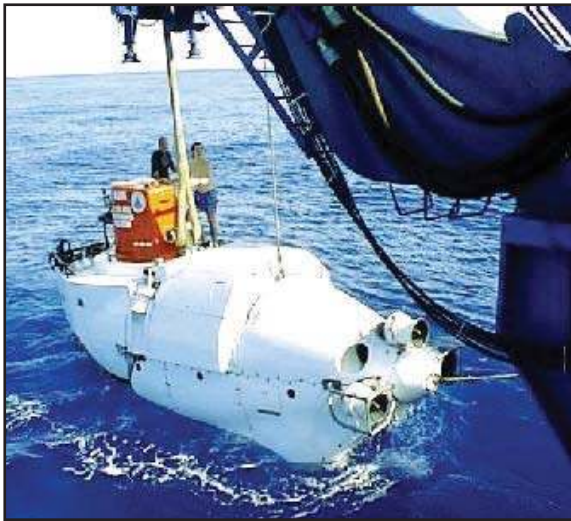
L'éclairage stroboscopique malgré tous les avantages cités présente un danger dans les ateliers industriels. L'éclairage stroboscopique d'une machine-outil (tour, fraiseuse ou scie circulaire) peut induire en erreur et faire croire que la machine est immobile s'il y a coïncidence entre la fréquence d'éclairage et celle de rotation de la machine. C'est en particulier le cas en éclairage par les tubes au néon : un éclair par alternance du courant alternatif industriel ce qui donne des **éclairs à 100Hz**.

Pour cette raison, parmi les consignes de sécurité dans les ateliers industriels, figure l'**interdiction de l'éclairage au néon**.

Curiosité de la stroboscopie

La stroboscopie se manifeste souvent au cinéma en rendant bizarre certaines scènes où sont filmées des roues de véhicules en mouvement (les roues de la diligence dans un western qui tournent paradoxalement en sens inverse du mouvement du véhicule). C'est la caméra de prise de vue qui joue ici le rôle de stroboscope puisqu'elle prend les images à une cadence bien déterminée 25 images par seconde.

PRESSION EN UN POINT D'UN LIQUIDE



Bathyscaphe = submersible d'exploration sous-marine.
L'épaisseur de la coque et celle des vitrages sont remarquables. Jusqu'à
quelles profondeurs sont-elles efficaces ?

OBJECTIFS

- Mettre en évidence l'existence de la pression en un point d'un liquide au repos.
- Reconnaître expérimentalement les facteurs dont dépend la différence de pression entre deux points d'un liquide en équilibre (principe fondamental de l'hydrostatique).
- Appliquer le principe fondamental de l'hydrostatique.
- Reconnaître que les liquides, au repos, transmettent les pressions.

1. Forces pressantes exercées par un liquide

1.1. Forces pressantes sur les parois d'un récipient

Remplissons d'eau un ballon de baudruche (Fig.1).

Sa paroi élastique se déforme dans toutes les directions. L'eau contenue dans le ballon exerce des forces réparties sur toute la paroi : ce sont des forces pressantes.

Remplissons d'eau un ballon de baudruche dont la paroi est percée de quelques trous fins.

Des jets d'eau se forment et l'eau jaillit de chaque trou perpendiculairement à la paroi quelle que soit l'orientation de celle-ci (Fig.2).

Cela prouve qu'une goutte du liquide considérée au moment où elle franchit le trou est soumise à une force pressante orientée du liquide vers l'extérieur dont la direction est perpendiculaire à la portion de la paroi voisine du trou.

On en déduit qu'avant sa disparition par perçage, la portion de paroi correspondant au trou subissait une force pressante qui lui était perpendiculaire et orientée vers l'extérieur.

Remarque

L'expérience de la figure (Fig.3) montre que même si le récipient ne se déforme pas quand on le remplit d'un liquide quelconque, toutes les parois en contact avec le liquide sont soumises à des forces pressantes perpendiculaires et orientées vers l'extérieur.

Ainsi, toute paroi en contact avec un liquide au repos est soumise de la part du liquide, à des forces pressantes perpendiculaires en chaque point à la paroi et orientées vers l'extérieur du liquide.

1.2. Forces pressantes sur une surface immergée dans un liquide

Un disque en métal ou en verre (qui ne flotte pas en principe dans l'eau) est attaché en son centre par une ficelle, il est appliqué contre l'extrémité inférieure d'un long tube de verre en tirant sur la ficelle dans une direction perpendiculaire au plan du disque. La base du tube est rodée pour assurer une bonne étanchéité (Fig.4).



Fig.1

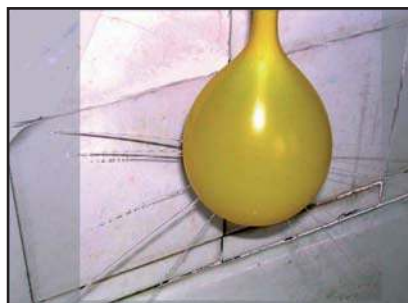


Fig.2

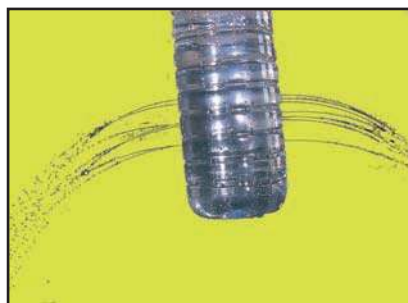


Fig.3



Fig.4

Enfonçons l'ensemble dans l'eau d'abord verticalement puis obliquement tout en lâchant la ficelle.

Le disque reste collé au tube et ne glisse pas (Fig.5).

On peut dire qu'il subit une force qui lui est perpendiculaire, qui est orientée du liquide vers l'extérieur et dont l'action est répartie sur toute la surface du disque. C'est une force pressante exercée par le liquide sur le disque.

Remarque

Cette force exercée par le liquide est capable de maintenir le disque appliqué contre le tube même quand on met une masse marquée sur le disque (Fig.6).

Un liquide au repos exerce sur toute surface en contact avec lui des forces pressantes normales à la surface pressée en chaque point et orientées du liquide vers l'extérieur.

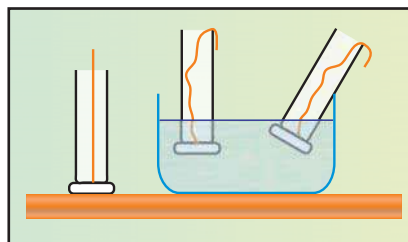


Fig.5

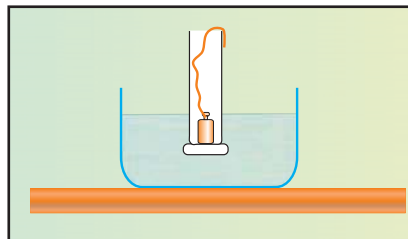


Fig.6

2. La pression en un point d'un liquide au repos

Poursuivons l'étude expérimentale des liquides au repos au moyen d'une capsule manométrique(Fig.7-a, b).

La capsule manométrique (appelée aussi manoscope) est une petite boîte fermée par une membrane en caoutchouc très mince (baudruche) et tendue ; l'intérieur de la boîte est en communication, par un tube rigide puis par un tube en caoutchouc souple, avec un tube en U contenant un liquide coloré, appelé manomètre. En l'absence d'une action extérieure, les deux niveaux du liquide dans le tube en U sont dans le même plan horizontal.



Fig.7-a

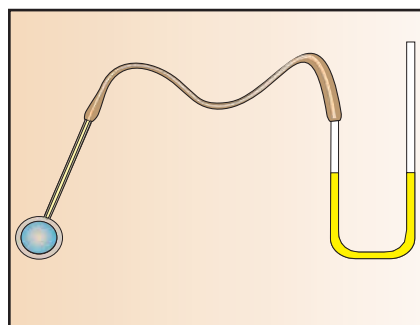


Fig.7-b

Mettons une petite rondelle d'aluminium (pièce de 5 millimes) sur la membrane placée horizontalement et appuyons verticalement avec le doigt ou mettons une petite masse marquée sur la pièce (Fig.8).

La membrane se déforme sous l'effet de la force pressante et on observe une dénivellation entre les deux surfaces libres du liquide coloré dans les deux branches du tube en U.

La dénivellation croît quand la valeur de la force pressante augmente.

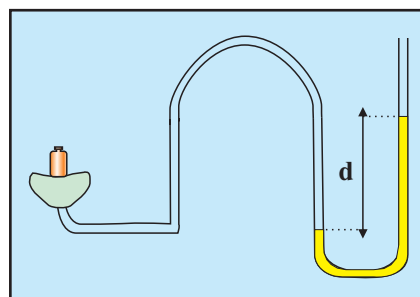


Fig.8

Remplaçons la pièce de 5 millimes par une pièce de 10 millimes et appuyons avec une force de même valeur que précédemment ou mettons dessus la même masse marquée. La surface pressée est ainsi plus réduite et soumise à la même force pressante.

La déformation de la membrane ainsi que la dénivellation du liquide coloré deviennent plus importantes.

La dénivellation du liquide dans le tube en U dépend de la pression exercée sur la membrane. La capsule manométrique est un **capteur de pression** et le manomètre permet de mesurer directement des pressions.

Il est ainsi possible d'étalonner le manomètre en utilisant des valeurs connues de forces pressantes et de surfaces pressées en vue d'établir une correspondance entre les valeurs de la pression subie par la membrane et la dénivellation du liquide.

Introduisons la capsule manométrique dans un liquide au repos.

On observe une dénivellation du liquide coloré dans le manomètre quand la capsule est au point M.

La membrane est déformée presque de la même façon que précédemment.

Cette dénivellation reste constante quelle que soit l'orientation de la capsule pourvu que son centre soit toujours au même point M ou dans le même plan horizontal que M (Fig.9).

La déformation de la membrane reste identique quelle que soit son orientation pourvu qu'elle reste dans le même plan horizontal.

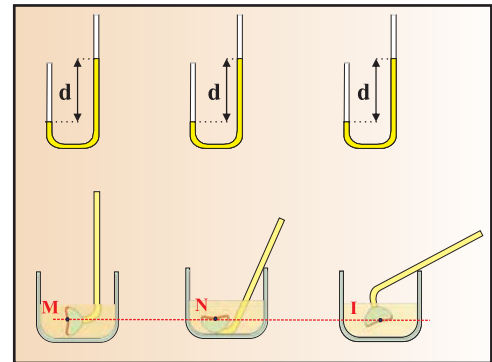


Fig.9

Le liquide exerce sur la membrane élastique des forces pressantes **normales en chaque point** de sa surface S. La valeur de la somme $\vec{F}$ de ces forces est indépendante de l'orientation de la capsule. Au point M du liquide où on a placé le centre de la capsule, il existe par conséquent une pression appelée **pression hydrostatique** p qui est la même dans toutes les directions.

Remarque

La capsule renseigne en fait sur une pression moyenne autour de son centre placé au point M. C'est pour cela que plus on réduit le diamètre de la capsule plus on augmente la précision sur la pression au point M. Mais d'un autre côté, plus on réduit le diamètre et plus on réduit la sensibilité de ce détecteur de pression.

La mesure de la pression p en un point M d'un liquide au repos permet d'évaluer la valeur $\|\vec{F}\|$ de la force pressante subie normalement par un élément de surface s en contact avec le liquide au point considéré ou en tout point du même plan horizontal ; c'est en particulier le cas d'un élément de surface s de la paroi du vase qui contient le liquide. On a : $\|\vec{F}\| = p.s$

3. Principe fondamental de l'hydrostatique

Activité

Pourquoi est-il dangereux pour un être humain de plonger à de grandes profondeurs sous marines sans protection ?

3.1. Etude expérimentale

Expérience 1 :

Déplaçons la capsule manométrique verticalement de façon à faire varier la profondeur h de son centre sous la surface libre de l'eau (Fig.10).

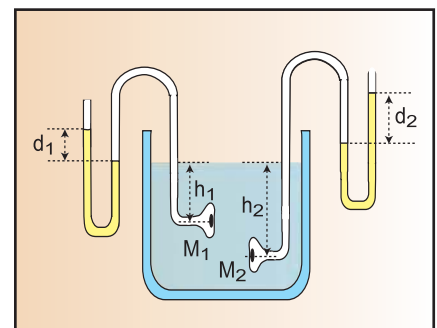


Fig.10

On constate que la dénivellation varie : elle est d'autant plus grande que la capsule est plus profondément immergée. Soit h_1 et h_2 respectivement les profondeurs d'immersion aux points M_1 et M_2 . On constate que pour $h_2 > h_1$ on a $d_2 > d_1$.

Dans un liquide homogène et au repos, la pression est la même en tout point d'un même plan horizontal ; elle augmente avec la profondeur d'immersion.

Expérience 2 :

Introduisons une capsule manométrique dans une cuve pleine d'eau de robinet de masse volumique ρ_1 à une profondeur h .

La dénivellation dans le manomètre est d_1 .

Introduisons cette même capsule dans une cuve pleine d'eau salée de masse volumique ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$) à la même profondeur h .

La dénivellation du liquide dans le manomètre est d_2 .

On constate que la dénivellation d_2 est supérieure à la dénivellation d_1 (Fig.11).

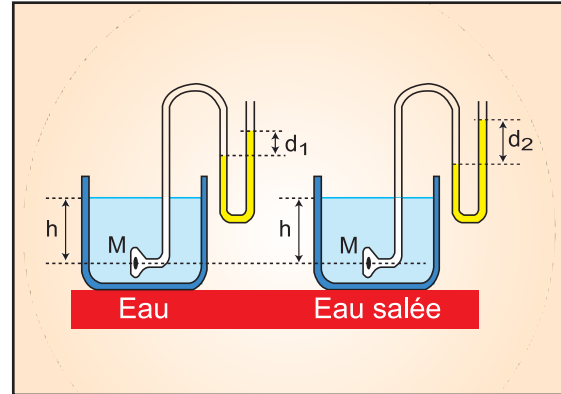


Fig.11

Dans un liquide homogène et au repos, la pression est d'autant plus importante, à une profondeur donnée, que la masse volumique est plus grande.

3.2. Enoncé du principe fondamental de l'hydrostatique

Les expériences précédentes montrent qu'entre deux points d'un liquide homogène au repos, il existe une différence de pression qui dépend de la différence de niveau entre les deux points et de la masse volumique du liquide (Fig.12).

Ces résultats constituent une vérification expérimentale du **principe fondamental de l'hydrostatique**.

Enoncé du principe :

La différence de pression entre deux points A et B d'un liquide homogène au repos (A plus profond que B) est égale au produit du poids volumique du liquide $\rho \cdot \|\vec{g}\|$ par la distance h séparant les plans horizontaux passant par A et B.

Cela est exprimé par la relation fondamentale de l'hydrostatique.

$$p_A - p_B = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h$$

Dans le Système International, on exprime :

- La masse volumique ρ en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- L'intensité de la pesanteur $\|\vec{g}\|$ en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- La hauteur h en mètre (m).
- Les pressions en pascal (Pa).

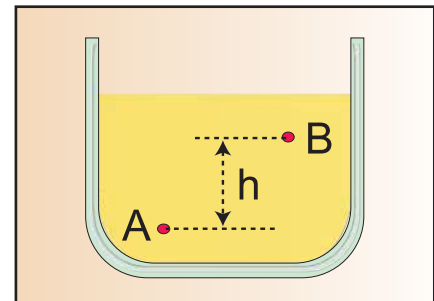


Fig.12

Remarque

Le produit $\rho \cdot \|\vec{g}\|$ (poids volumique) s'exprime en $[\text{N} \cdot \text{m}^{-3}]$ et le produit $\rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h$ s'exprime en $[\text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}]$ ou en $[\text{N} \cdot \text{m}^{-2}]$, c'est-à-dire les mêmes unités qu'une pression. Le produit $\rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h$ est bien homogène à une pression.

Activité

Calculer la différence de pression que subit un plongeur entre la surface libre et une profondeur sous marine de 45 m. On supposera que l'eau de mer contient 30 g de sel par litre.

4. Applications

4.1. Surface libre d'un liquide homogène au repos dans un vase

Déplaçons la capsule manométrique en maintenant sa membrane au contact de la surface libre d'un liquide homogène au repos (Fig.13).

On constate qu'il n'y a pas de dénivellation dans le manomètre ; l'air dans la capsule et l'air extérieur sont à la même pression puisque le niveau du liquide dans les deux branches du manomètre sont dans un même plan horizontal.

En tout point de la surface libre du liquide la pression reste constante et identique à celle de l'air ambiant.

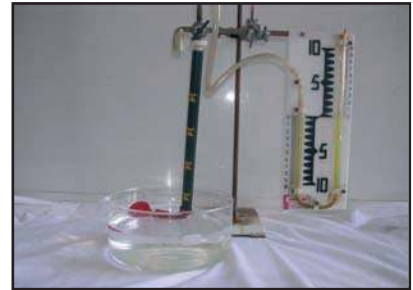


Fig.13

Appliquons la relation fondamentale de l'hydrostatique au calcul de la pression entre deux points A et B appartenant à la surface libre du liquide :

$$\begin{aligned} p_A - p_B &= \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h \\ \text{comme } p_A &= p_B \quad \text{alors} \quad p_A - p_B = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h = 0. \\ \text{Puisque } \rho \cdot \|\vec{g}\| &\neq 0, \text{ alors } h = 0. \end{aligned}$$

Ces points A et B de la surface libre du liquide appartiennent au même plan horizontal. Comme A et B sont quelconques, on peut affirmer que tous les points de la surface libre d'un liquide homogène et au repos sont dans le même plan horizontal.

La surface libre d'un liquide homogène au repos est plane et horizontale.

L'absence de dénivellation du manomètre quand la membrane est au contact du liquide en un point de la surface libre ne signifie pas que la pression soit nulle en ce point.

Débranchons la capsule du manomètre et aspirons l'air qu'elle contient directement ou avec une pompe (Fig.14).

La membrane subit une grande déformation vers l'intérieur, preuve de l'existence d'une pression exercée par l'air ambiant. C'est la pression atmosphérique p_{atm} .

La pression en un point quelconque de la surface libre d'un liquide au repos est égale à la **pression atmosphérique** p_{atm} au moment de l'expérience.

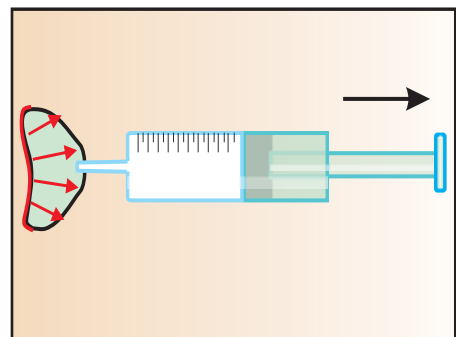


Fig.14

Remarque

La membrane est plane lorsque l'air intérieur et l'air extérieur sont à la même pression.

4.2. Surface libre d'un liquide homogène au repos dans des vases communicants

Versons un liquide homogène dans un vase qui communique à sa base avec plusieurs autres vases de formes diverses (Fig.15).

Nous remarquons qu'au repos les surfaces libres du liquide dans ces différents vases sont planes et situées dans le même plan horizontal quelle que soit leur forme.

Le résultat de cette expérience trouve son application chaque fois que des compartiments contenant un liquide homogène au repos communiquent entre eux : on peut passer d'un vase à l'autre sans sortir du liquide **et les surfaces libres sont en contact avec la même atmosphère (ou gaz)**.



Fig.15

Remarque

Quand le diamètre des vases utilisés devient très faible, les phénomènes capillaires entrent en jeu et viennent fausser les résultats précédents ; les phénomènes capillaires font par exemple que les surfaces ne sont pas planes mais en forme de ménisque dans un tube ; les mêmes phénomènes expliquent la montée des liquides dans un arbre du sol jusqu'à de très grandes hauteurs.

a.L'indicateur de niveau (Fig.16)

Le tube de verre T et le récipient opaque R sont des vases communicants. Les surfaces libres du liquide sont dans un même plan horizontal. Cela permet de « voir » le niveau du liquide dans le récipient opaque.

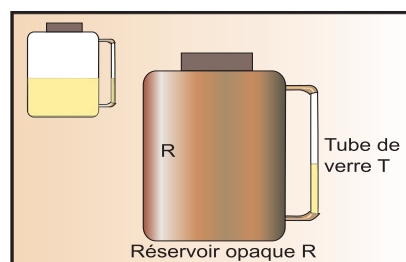


Fig.16

b.Le siphon (Fig.17)

Les deux vases A et B communiquent par l'intermédiaire du siphon. L'écoulement du liquide A vers B cesse lorsque le niveau est le même dans les deux vases.

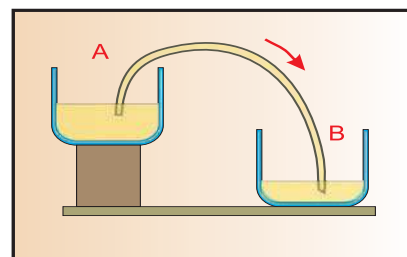


Fig.17

c.La distribution de l'eau potable

L'eau est emmagasinée dans un réservoir (château d'eau) construit en un point élevé de la ville. L'eau est amenée par des canalisations jusqu'aux robinets situés dans les habitations. Pour que les robinets soient alimentés en eau, il faut qu'ils soient placés au dessous du niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation.

5. Transmission des pressions par les liquides

Activité

Les freins de votre vélo sont actionnés par des câbles ; lors d'un freinage, que peut-on dire des forces avec lesquelles un de ces câbles agit d'un côté sur la mâchoire du frein et de l'autre sur le levier (poignée) du frein ? Les freins d'une voiture, d'un camion... utilisent-ils le même principe ? Que contiennent les canalisations des organes de freinage ?

Les engins de travaux publics (pelle mécanique, bulldozer, nivelleuse (ou grader)...) ont des organes articulés et mobiles ; ils sont actionnés par des vérins hydrauliques dont on voit sortir de longs pistons brillants.

Comment fonctionne un vérin hydraulique ? A quoi servent tous les tuyaux auxquels sont raccordés tous ces vérins ? (Fig. 18)

Considérons un récipient fermé, indéformable et rempli d'un liquide en équilibre de masse volumique ρ (Fig.19). La différence de pression entre deux points A et B, situés dans deux plans horizontaux quelconques séparés par une hauteur h est :

$$p_B - p_A = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h$$

Supposons que la pression au point A augmente de Δp et devienne :

$$p'_A = p_A + \Delta p.$$

Le liquide étant par définition incompressible, sa masse volumique ne change pas. La différence de pression entre les mêmes points ne varie pas et s'écrit :

$$p'_B - p'_A = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot h \quad \text{donc} \quad p'_B - p'_A = p_B - p_A$$

$$\text{d'où } p'_B = p_B + p'_A - p_A \quad \text{soit } p'_B = p_B + \Delta p$$

La variation de pression au point B est la même qu'en A.

Ce résultat important que l'on déduit directement du principe fondamental de l'hydrostatique est connu sous le nom de « **théorème de Pascal** ».

Enoncé du théorème de Pascal :

Toute variation de pression en un point d'un liquide en équilibre est intégralement transmise en tout point de ce liquide.



Fig.18

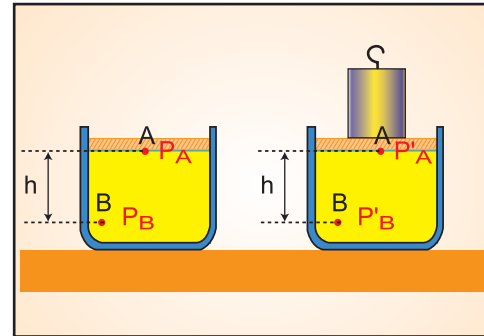


Fig.19

Applications

La presse hydraulique (Fig.20) : Le principe de la presse hydraulique est contenu dans ces lignes de B.Pascal : « Si un vaisseau (récipient) plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, dont l'une soit centuple de l'autre, en mettant à chacune un piston qui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large ».

Activité

Lire le texte de Blaise Pascal et essayer de montrer comment cela est possible. Soit s la section du petit piston A et S la section du grand piston B. Calculer la variation de pression que subit le liquide lorsqu'on appuie avec une force d'intensité $\|\vec{F}\|$ sur le piston A et la force avec laquelle le solide C est comprimé par le piston B. On supposera que $S = 100 s$. (Fig. 20)

De combien monte le piston B quand le piston A descend d'une hauteur d ?

Comment améliorer le système pour pouvoir déplacer le grand piston sur une plus grande distance sans allonger la course du petit piston mais en répétant les coups de piston ?

Remarque

Le théorème de Pascal n'est pas valable en toute rigueur pour les gaz ; comme ils sont compressibles leur masse volumique ne reste pas constante ; cependant toute variation de pression à un endroit d'une enceinte remplie de gaz se transmet à tous les autres points, à condition de ne considérer que des enceintes de faibles dimensions où les différences de pression dues aux différences de hauteur entre les points sont négligeables par rapport aux pressions utilisées ; c'est comme cela que l'on peut gonfler la roue de son vélo avec une pompe.

C'est pour cela également que les circuits « hydrauliques » des véhicules poids lourds utilisent l'air comprimé à la place des liquides pour le freinage et d'autres usages.

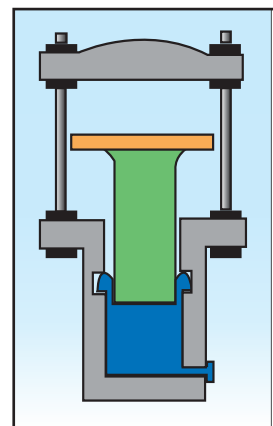


Fig.20

L'essentiel du cours

- Un liquide au repos exerce sur toute surface en contact avec lui des forces pressantes normales à la surface pressée en chaque point et orientée du liquide vers l'extérieur.
- La mesure de la pression p en un point M d'un liquide au repos permet d'évaluer la valeur $||\vec{F}||$ de la force pressante subie **normalement** par un élément de surface s en contact avec le liquide au point considéré ou en tout point du même plan horizontal ; c'est en particulier le cas d'un élément de surface de la paroi du vase qui contient le liquide.

On a :

$$||\vec{F}|| = p \cdot s$$

- Dans un liquide homogène et au repos, la pression est la même en tout point d'un même plan horizontal ; elle augmente avec la profondeur.
- Dans un liquide homogène et au repos, la pression est d'autant plus importante, à une profondeur donnée, que la masse volumique est plus grande.

Enoncé du principe du principe fondamental de l'hydrostatique :

La différence de pression entre deux points **A** et **B** d'un liquide homogène au repos (**A** plus profond que **B**) est égale au produit du poids volumique du liquide $\rho \cdot ||\vec{g}||$ par la distance h séparant les plans horizontaux passant par **A** et **B**.

Cela est exprimé par la relation fondamentale de l'hydrostatique.

$$p_A - p_B = \rho \cdot ||\vec{g}|| \cdot h$$

- La surface libre des liquides au repos est toujours soumise à la pression de l'air ou du gaz qui la surmonte.
- Les liquides, au repos, transmettent les pressions ; cela est exprimé par le théorème de Pascal.

Enoncé du théorème de Pascal :

Toute variation de pression en un point d'un liquide en équilibre est intégralement transmise en tout point de ce liquide.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par VRAI ou FAUX et justifier la réponse :

- Les forces pressantes qui s'exercent en tous les points d'une sphère plongée dans un liquide homogène au repos se coupent au centre de la sphère.
- Les forces pressantes qui s'exercent en tous les points d'une sphère plongée dans un liquide homogène au repos ont même valeur.
- La surface libre d'un liquide homogène au repos dans un vase posé sur un plan incliné est parallèle à ce plan.
- La différence de pression entre deux points d'un liquide homogène au repos dépend de la distance entre ces deux points.
- La différence de pression entre deux points d'un liquide homogène au repos dépend de la distance entre les deux plans horizontaux passant par ces deux points.

Je sais appliquer le cours

On prendra pour toutes les applications numériques des exercices suivants $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

- 2- La valeur de la pression de l'eau au niveau d'un robinet est $2,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Quelle est la hauteur de la surface libre de l'eau au dessus du robinet, sachant que la pression en un point de la surface libre de l'eau est 10^5 Pa ?
- 3- Deux vases communicants verticaux et cylindriques posés sur une table horizontale ont respectivement pour section $S_1 = 25 \text{ cm}^2$ et $S_2 = 50 \text{ cm}^2$; ils communiquent par un tube de raccordement de capacité négligeable. On verse 3 litres d'eau.

3.1-Calculer la hauteur à laquelle s'élèvera l'eau dans chaque vase.

3.2-Quel est le volume d'eau contenu dans chacun des vases ?

- 4- Un flacon contient du mercure jusqu'à une hauteur de 10cm. Calculer la hauteur d'eau qui donnerait la même différence de pression entre un point du fond et un point de la surface libre du liquide. On donne $\rho_{\text{mer}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

- 5- Une capsule manométrique reliée à un tube en U contenant de l'eau est plongée dans un récipient contenant un liquide :

5.1. La dénivellation dans le tube en U représenté sur le schéma (Fig.21) vaut $h = 5 \text{ cm}$. Calculer la pression p_A au point A sachant que $p_B = p_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}$. Cette pression est celle qui règne également au point M.

5.2. On déplace la capsule manométrique au point M' situé dans le même plan horizontal que le point M. Comparer les pressions aux points M et M'. Justifier.

5.3. On déplace la capsule manométrique au point P. Comparer les pressions aux points M et P. Justifier.

On donne : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$; $p_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}$.

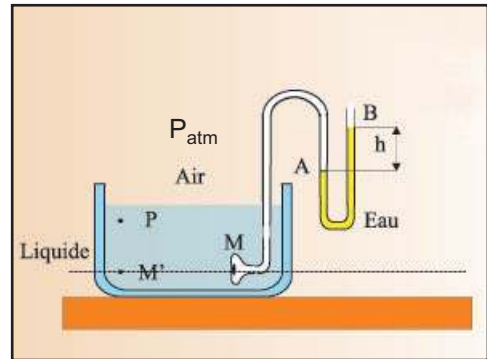


Fig.21

- 6- On remplit un réservoir cylindrique ouvert à l'air par de l'eau jusqu'à une hauteur $H = 4 \text{ m}$.
- 6.1. Calculer l'augmentation de la pression subie par un point du fond du réservoir.
- 6.2. Calculer la valeur de la force pressante exercée par l'eau sur une petite plaque carrée mince de côté $a = 2 \text{ cm}$ reposant au fond du réservoir.
- 6.3. Calculer la valeur de la force pressante subie par un élément de surface de la paroi de surface s dans les deux cas suivants :
- > $s = 1 \text{ cm}^2$ à $0,20 \text{ m}$ au dessus du fond.
 - > $s = 1 \text{ cm}^2$ à $3,80 \text{ m}$ au dessus du fond.
- 6.4. Conclure. Quelle est la conséquence pratique de cette conclusion pour les murs des barrages hydrauliques ?

- 7- Une voie d'eau de forme circulaire et horizontale s'est déclarée au fond de la cale d'un bateau. Son rayon est de 10cm et son centre se trouve à 3,5 m au-dessous du niveau de la mer. Avec quelle force faut-il maintenir **normalement** le tampon qui va empêcher l'eau d'entrer. La densité de l'eau de mer sera prise égale à 1,025.

8. Une capsule manométrique est étalonnée pour donner une dénivellation d proportionnelle à la pression p au centre de sa membrane. Elle est placée au fond d'une cuve que l'on remplit d'eau pure jusqu'à une certaine hauteur. On lit une dénivellation $d_1 = 5,8 \text{ cm}$. On vide la cuve et on la remplit jusqu'à la même hauteur avec un mélange d'eau et de glycérine de masse volumique ρ . On lit une dénivellation manométrique $d_2 = 7 \text{ cm}$.
- 8.1- Déterminer la masse volumique ρ de la solution de glycérine.
- 8.2- Déterminer la composition du mélange eau-glycérine sachant que la masse volumique de la glycérine est $\rho' = 1,26 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. On supposera que la glycérine et l'eau se mélangent sans variation de volume.
9. Dans un tube cylindrique vertical de section 100 cm^2 on verse 2 litres d'eau ; on place sur la surface de l'eau un piston de masse 1kg de même section que le tube.
- 9.1. Calculer la variation de pression subie par un point situé à 10cm au-dessus du fond du vase entre le moment où on commence à verser le liquide et celui où le piston est placé sur l'eau.
- 9.2. De combien et dans quel sens varie la pression en ce point quand on charge le piston avec un corps de masse 3kg ?

10. Le vase de la figure 22 renferme de l'eau pure jusqu'à la hauteur $h = 30 \text{ cm}$. On négligera le poids de la rondelle mince d'aluminium qui joue le rôle d'obturateur étanche. On fait descendre lentement le point de fixation du dynamomètre ; l'obturateur se décolle lorsque le dynamomètre indique une valeur $||\vec{F}||$.

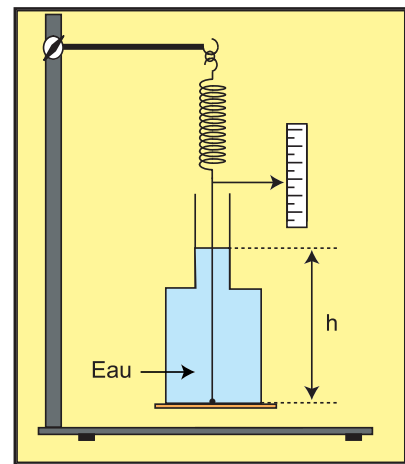


Fig.22

- 10.1. Calculer $||\vec{F}||$.

- 10.2. On remplit le vase d'eau pure jusqu'à la même hauteur et on la fait refroidir jusqu'à congélation complète ; on décolle la glace à la paroi du vase et on reprend la même expérience que précédemment ; le dynamomètre indique $||\vec{F}'||$ quand la rondelle se décolle du fond du vase. Calculer $||\vec{F}'||$.

Comparer $||\vec{F}||$ et $||\vec{F}'||$.

Rappeler la différence entre les liquides et les solides

et expliquer pourquoi Pascal appelait cela « **le paradoxe hydrostatique** ».

11. Les deux cylindres d'une presse hydraulique ont respectivement pour section 250 cm^2 et 10 cm^2 . On agit sur le petit piston par l'intermédiaire d'un levier inter-résistant (Fig.23) ; la longueur de la barre du levier est de 1 m, le petit piston se trouve à 10 cm de l'axe du levier.

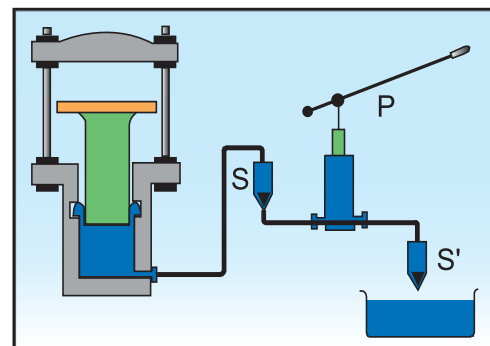


Fig.23

- 11.1. Avec quelle force faut-il appuyer sur l'extrémité du levier pour soulever une charge de 1 tonne placée sur le grand piston ?

- 11.2. De combien doit se déplacer le petit piston pour que la charge remonte de 1cm ?

- 11.3. L'extrémité du levier ne pouvant effectuer réellement que des courses de 20 cm, combien de coups de pistons doit-on donner pour soulever cette charge de 5 cm ?

Systemes hydrauliques

Le vérin hydraulique

Le vérin hydraulique est un organe essentiel dans les ateliers et les engins de travaux publics modernes. Il est constitué essentiellement d'un corps cylindrique dans lequel plonge un piston-tige qui peut coulisser librement tout en maintenant étanche l'ouverture du cylindre grâce à des joints en caoutchouc.

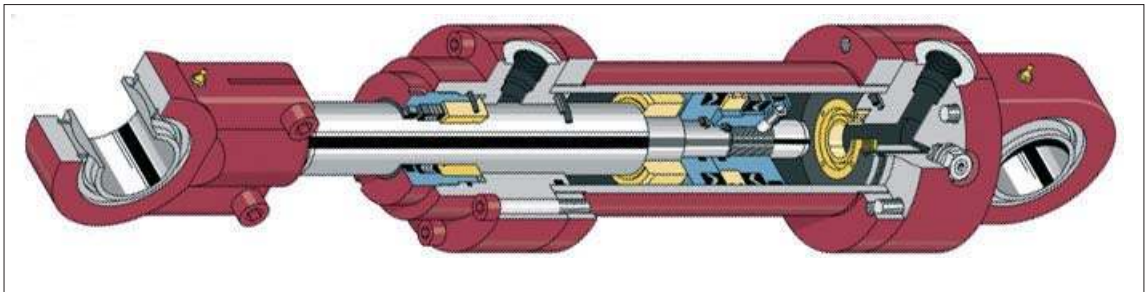
Le cylindre est rempli d'huile (parfois d'eau) minérale qui peut être mise sous pression par l'intermédiaire de canalisations reliées à des pompes spéciales « hautes pressions ».

La mise en communication du vérin avec le circuit de hautes pressions est réalisée par des valves commandées électriquement ou par un système secondaire hydraulique dit « de commande » généralement en basse pression. Ces valves jouent le rôle d'interrupteur et parfois d'inverseurs de la circulation de l'huile.

Certains vérins sont dits à double effet (voir figure) : cela veut tout simplement dire qu'il est possible d'utiliser la force qu'ils sont capables de développer dans les deux sens (poussée et traction). Cela est rendu possible par une double entrée du liquide sous pression (sommet et base du cylindre) et par une forme particulière du piston.

La valeur de la force avec laquelle le vérin est capable d'agir dépend de la section de son piston ; elle peut atteindre plusieurs milliers de tonnes dans certaines applications industrielles.

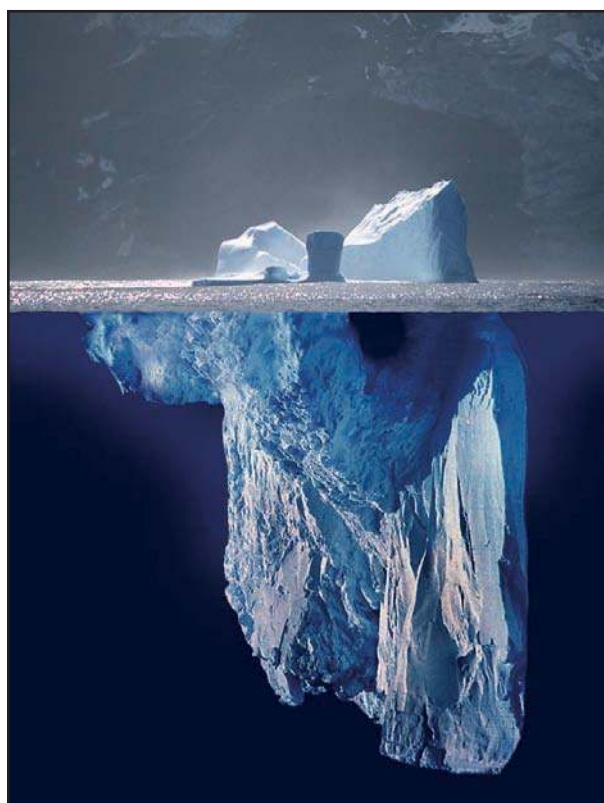
Dans les engins destinés aux grands travaux le vérin hydraulique est un composant essentiel et il a supplanté dans beaucoup de cas les transmissions de forces par les câbles et les poulies.



La presse hydraulique

Les presses hydrauliques modernes dérivent toutes du principe avancé par Pascal mais leurs capacités sont décuplées par les progrès réalisés dans la conception et la réalisation des vérins hydrauliques. L'organe essentiel d'une presse est justement le vérin (fixe le plus souvent mais parfois mobile). L'industrie automobile par exemple est une grande utilisatrice des presses hydrauliques pour tous les travaux de **formage**, **emboutissage**, **poinçonnage** des tôles d'acier ; Ce sont des presses hydrauliques qui compriment la tôle d'acier contre un moule pour fabriquer un capot de moteur par exemple.





Iceberg : un danger pour la navigation dans certaines régions du globe. La catastrophe du Titanic en 1912 en est un exemple tragique. Ce que l'on ne voit pas sous la surface de la mer est encore plus énorme que la montagne de glace que l'on voit au-dessus. Y a-t-il une explication ?

OBJECTIFS

- Déterminer expérimentalement les caractéristiques de la poussée d'Archimède.
- Montrer expérimentalement que la valeur de la poussée d'Archimède est égale à la valeur du poids du liquide déplacé.

1 . Forces pressantes à l'intérieur d'un liquide : poussée d'Archimède

Situation :

Pourquoi une bouteille de verre bouchée et vide flotte-t-elle à la surface de l'eau , alors qu'une bille de verre ou un morceau de vitre tombent au fond de l'eau ? Pourquoi un glaçon d'eau pure flotte-t-il à la surface de l'eau alors qu'il coule dans l'alcool ?

Comment répondre à cette question que l'on se pose chaque fois que l'on est en présence d'un corps que l'on met sur la surface libre d'un liquide : flottera-t-il ou ne flottera-t-il pas ?

Enfonçons un bouchon de liège dans l'eau : lâché, il remonte à la surface de l'eau puis flotte sur l'eau.

- Dans une baignoire, nous sentons que notre corps immergé est soulevé par l'eau.
- Il est plus facile de porter un objet dans l'eau que hors de l'eau : on constate cela à la piscine si on veut porter quelqu'un.
- Un bateau s'enfonce plus ou moins dans l'eau selon sa charge.



Fig .1



Fig .2

Activité

Accrochons un solide (S) à un ressort. Le ressort s'allonge.

Prenons une éprouvette contenant de l'eau et plongeons le solide de façon qu'il soit complètement immergé. (Fig.3)

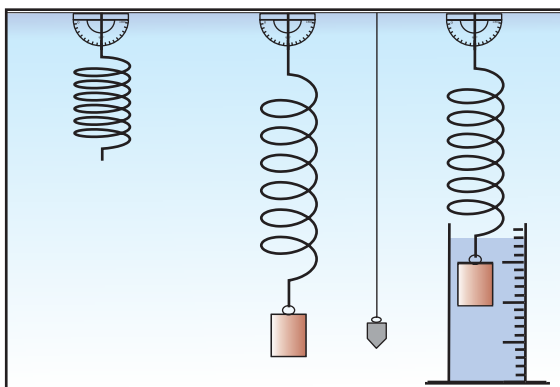


Fig .3

Le ressort reste vertical et parallèle à un fil à plomb témoin mais son allongement diminue. Nous obtenons le même résultat avec un autre récipient contenant de l'eau de forme et de taille différente.

Lorsqu'on sort le solide de l'eau, le ressort reprend la longueur qu'il avait auparavant.

Que s'est-il passé ?

On ne peut pas dire que le poids de l'objet ait varié ; en effet le poids d'un corps est le résultat de l'attraction que la Terre exerce sur ce corps. Le poids $\vec{P}$ du solide est toujours le même en un même lieu, dans l'air ou dans l'eau. Le solide a toujours le même poids et pourtant le ressort s'allonge moins. La tension du ressort est $\vec{T}$ au départ et devient $\vec{T}'$ quand le solide est immergé.

Au départ on a $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$, mais comme $||\vec{T}'|| < ||\vec{T}||$ on aura forcément $\vec{P} + \vec{T}' \neq \vec{0}$; $(\vec{P} + \vec{T}')$ est équivalent à une force verticale dirigée vers le bas.

Le solide est en équilibre dans l'eau, il est donc soumis à l'action d'une troisième force directement opposée à la somme $(\vec{P} + \vec{T}')$. Cette force est due à l'action de l'eau, c'est-à-dire qu'elle résulte des forces pressantes qui s'exercent sur la surface du corps immergé.

L'eau exerce donc une action sur le solide immergé. Cette action s'oppose au poids : elle est moins importante que lui puisque l'allongement du ressort est plus faible.

Cette action est équivalente à une force unique $\vec{F}$, appelée poussée d'Archimède :

- de direction verticale, puisque le ressort reste vertical.
- dirigée de bas vers le haut, puisqu'elle agit dans le sens opposé à celui du poids du solide.
- de valeur mesurable que l'on peut déterminer (voir étude expérimentale.) à l'aide d'un dynamomètre (Fig.4).

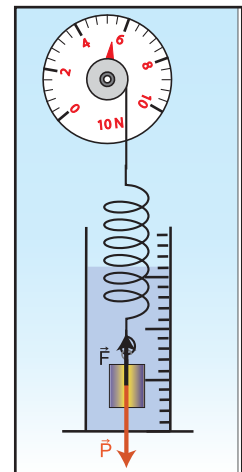


Fig .4

2. Etude expérimentale

Prenons le même dispositif que précédemment et faisons varier différents paramètres : la profondeur d'immersion, la nature du liquide dans l'éprouvette, la nature du solide immergé...

- Immergeons un même objet dans l'eau à des **profondeurs différentes** (Fig.5).

Le dynamomètre indique la même mesure : la poussée d'Archimède est la même.

La poussée d'Archimède ne dépend pas de la profondeur d'immersion du solide.

- Réalisons les expériences suivantes avec le même dispositif et un solide que l'on peut immerger totalement dans l'eau. (Fig.6)

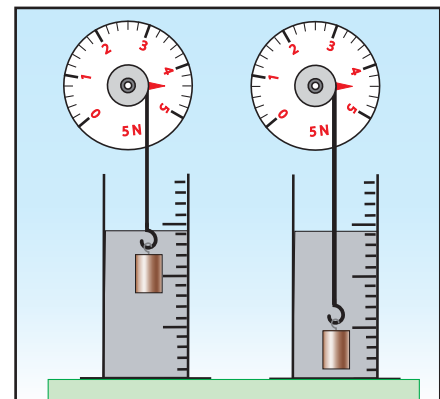


Fig .5

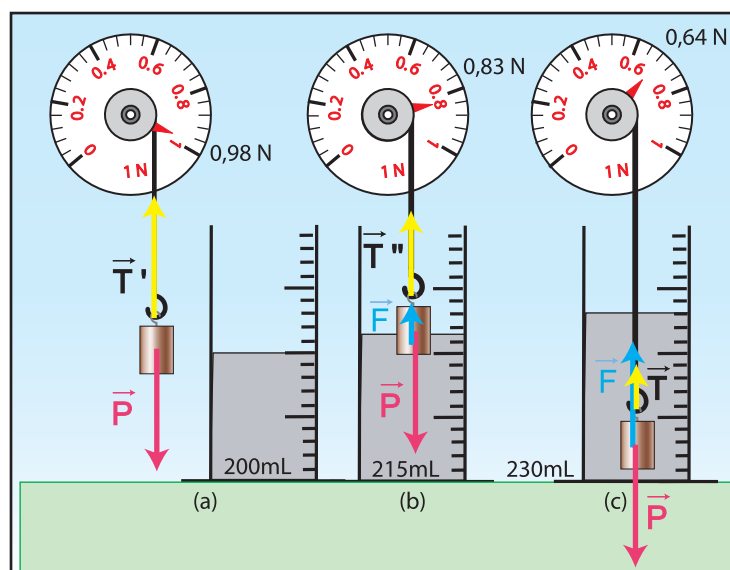


Fig .6

L'indication $||\vec{T}||$ du dynamomètre, dans l'expérience (a), mesure la valeur du poids du solide (S) dans l'air. : $||\vec{T}|| = ||\vec{P}|| = 0,98 \text{ N}$.

Pour les expériences (b) et (c), le solide est en équilibre. Il est soumis à 3 forces :

- $\vec{P}$: le poids du solide.
- $\vec{T}$: tension du fil.
- $\vec{F}$: la poussée d'Archimède.

Condition d'équilibre du solide : $\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}$. Projetons sur un axe vertical orienté vers le haut ;
on obtient : $-||\vec{P}|| + ||\vec{T}|| + ||\vec{F}|| = 0$

Le dynamomètre mesure la tension $||\vec{T}||$ du fil : $||\vec{T}|| = ||\vec{P}|| - ||\vec{F}||$.

La valeur de la poussée d'Archimède est : $||\vec{F}|| = ||\vec{P}|| - ||\vec{T}||$.

Poussée d'Archimède $ \vec{F} = \vec{P} - \vec{T} $	0,98 - 0,83 = 0,15 N Expérience (b)	0,98 - 0,68 = 0,30 N Expérience (c)

L'intensité $||\vec{F}||$ de la poussée d'Archimède dépend du volume de la partie immergée du corps.

- Dans cette expérience, faisons varier le volume du solide immergé, en conservant les autres paramètres : même poids du solide ($||\vec{P}|| = 0,5 \text{ N}$) et même liquide (eau).

Les indications des dynamomètres varient ; les résultats sont consignés dans le tableau suivant (Fig.7) :

Volume V du solide (cm ³)	$ \vec{P} $ (N)	Poussée d'Archimède $ \vec{F} $ (N)
10	0,5	0,1
20	0,5	0,2
30	0,5	0,3

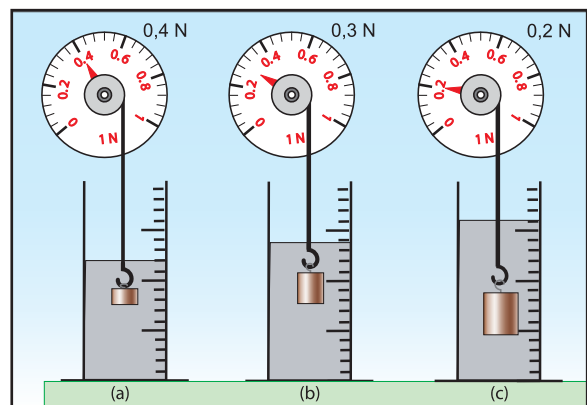


Fig. 7

La poussée d'Archimède agissant sur un solide complètement immergé dans un liquide homogène est proportionnelle au volume V de ce solide.

$$||\vec{F}|| = \text{cste. } V$$

- Faisons varier le poids du solide, en conservant les autres paramètres : même volume du solide et même liquide.

Mesurons la poussée d'Archimède subie par un cylindre d'aluminium puis par un cylindre de laiton de même volume complètement immergés dans l'eau ; les deux solides n'ont pas la même masse, ni le même poids.

Les résultats sont consignés sur les schémas suivants (Fig.8) :

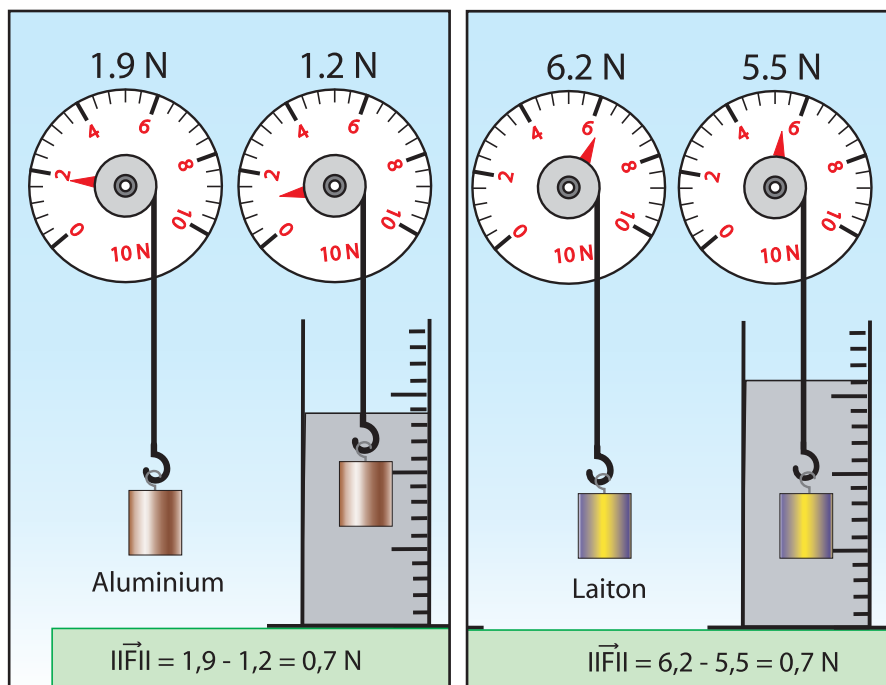


Fig.8

La poussée d'Archimède est identique dans les deux cas.

La poussée d'Archimède sur un solide complètement immergé dans un liquide homogène, ne dépend pas de la masse de ce solide. Elle est donc indépendante du poids du solide immergé.

Changeons la nature du fluide d'immersion (sa masse volumique est différente), en conservant le même solide de poids $|\vec{P}| = 4 \text{ N}$. (Fig.9)

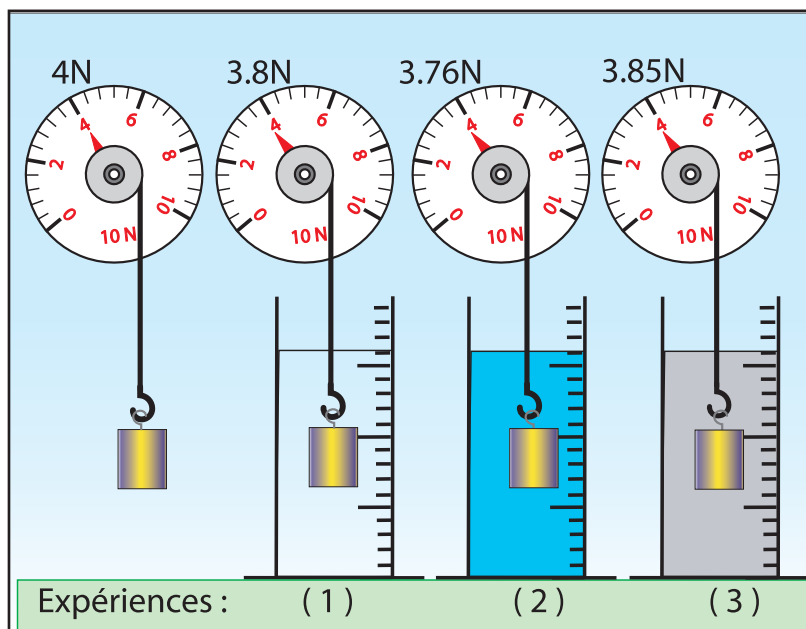


Fig.9

Nous obtenons les résultats suivants :

Expériences	Fluide	Masse volumique $\rho(\text{kg.m}^{-3})$	Poids $\ \vec{P}\ (\text{N})$	Poussée d'Archimède $\ \vec{F}\ (\text{N})$
1	Eau	1000	4	0,20
2	Eau salée	1200	4	0,24
3	Alcool	760	4	0,15

La poussée d'Archimède agissant sur un solide de volume V complètement immergé dans un liquide est proportionnelle à la masse volumique ρ de ce liquide.

$$\|\vec{F}\| = \text{cste. } \rho$$

Comme la valeur de la poussée d'Archimède est aussi proportionnelle au volume du corps immergé, elle est proportionnelle au produit des deux grandeurs ρ et V .

$$\|\vec{F}\| = \text{cste. } \rho.V$$

Utilisons le dispositif schématisé sur la figure 10. Les deux cylindres en laiton C_1 et C_2 s'emboîtent parfaitement : le volume intérieur de C_1 est exactement égal au volume de C_2 . En (a), le dynamomètre indique le poids de l'ensemble ; repérons la position de l'aiguille. En (b), immergeons complètement dans un liquide de masse volumique ρ le cylindre C_2 . La position de l'aiguille change. En (c) **remplissons** le cylindre C_1 avec le liquide qui s'est déversé dans le bécher B.

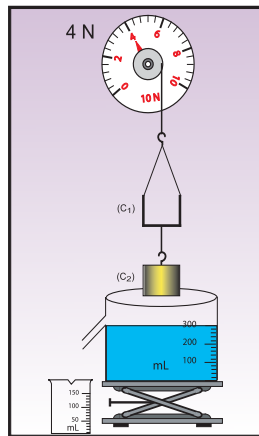


Fig .10-a

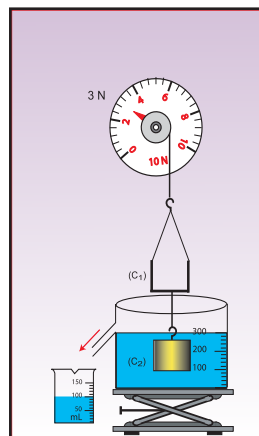


Fig .10-b

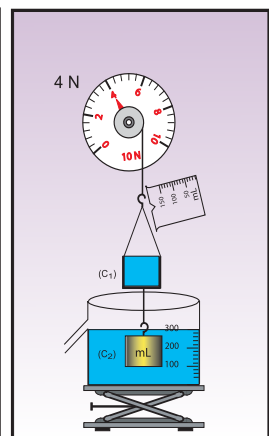


Fig .10-c

L'aiguille du dynamomètre revient exactement à la position qu'elle avait en (a). Le poids d'un volume du liquide égal à celui du solide immergé, compense exactement l'effet de la poussée d'Archimède.

Reprenons l'expérience en immergeant partiellement le solide C_2 : à moitié, au tiers, au quart...

Le volume de liquide à mettre dans le cylindre C_1 pour rétablir l'équilibre initial devient égal respectivement à : la moitié , le tiers, le quart...du volume de C_2 .

La valeur de la poussée d'Archimède est égale à celle du poids du liquide déplacé par le solide.

Si V est le volume du liquide, de masse volumique ρ , déplacé par le solide immergé, la valeur de son poids, donc de la poussée d'Archimède sera : $\|\vec{F}\| = \rho . V . \|\vec{g}\|$.

THEOREME D'ARCHIMEDE :

Enoncé :

Tout corps solide partiellement ou complètement immergé dans un liquide en équilibre subit de la part de ce liquide une poussée directement opposée au poids du liquide déplacé :

$$\vec{F} = - \rho . V . \vec{g}$$

3. Représentation de la poussée d'Archimède

Prenons un tube de verre fermé aux deux bouts et comportant un étranglement. Lestons-le en enroulant sur la partie étranglée un fil de plomb (soudure à l'étain) de longueur ajustable. On obtient ainsi un corps **hétérogène**. Le lest du solide est ajusté de façon que le solide **coule** très **lentement** dans l'eau. Abandonnons le tube horizontalement au sein du liquide.

On observe un mouvement de rotation combiné à un mouvement de descente vers le fond ; la rotation cesse lorsque l'axe du tube est vertical. (Fig.11-a et -b)

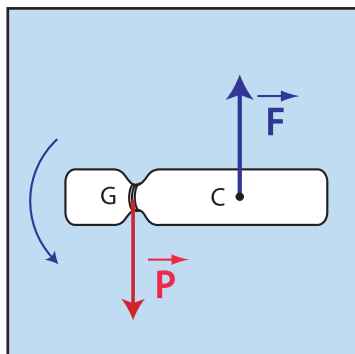


Fig.11-a Corps hétérogène complètement immergé

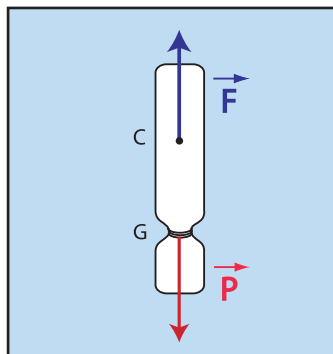


Fig.11-b Corps hétérogène complètement immergé

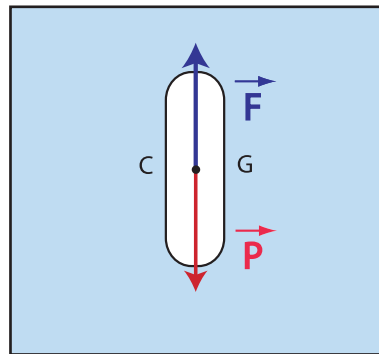


Fig.11-c Corps homogène complètement immergé

La rotation du solide que l'on observe dans la première figure résulte de l'action d'un couple de forces ; or les seules forces qui agissent sont le poids et la poussée d'Archimède qui constituent pratiquement un couple ($\vec{P}, \vec{F}$). C'est la preuve que le centre d'inertie G, point d'application du poids $\vec{P}$ et le centre de poussée C, point d'application de $\vec{F}$, sont **distincts**.

La poussée d'Archimède est représentée par un vecteur $\vec{F}$. Elle est appliquée en un point C appelé centre de poussée qui correspond au centre de gravité du liquide déplacé.

Le liquide déplacé a toujours la **même forme** que la partie immergée du solide qui a pris sa place ; son centre de gravité C a le même emplacement que celui d'un corps homogène de même forme.

Pour un solide hétérogène, ce point C est différent du centre de gravité G du solide immergé.

Remplaçons le corps précédent par un corps homogène (figure 11-c) ; plaçons le horizontalement (ou avec n'importe quelle orientation) au sein du liquide.

Il coule en restant horizontal ou avec la même orientation jusqu'au fond.

Pour un solide homogène complètement immergé, le centre de gravité G et le centre de poussée C coïncident.

GENERALISATION :

L'ensemble des forces pressantes exercées par un liquide en équilibre sur la surface d'un corps immergé est équivalent à une force unique $\vec{F}$ appelée **poussée d'Archimède** :

- de direction verticale.
- orientée du bas vers le haut
- d'intensité égale au poids du liquide déplacé
- appliquée en un point appelé centre de poussée C.

4. Condition de flottaison

Activité

Pourquoi la coque des navires, des chalutiers et des barques de pêche est toujours peinte en deux couleurs séparées par une ligne bien **soulignée** qui court de l'étrave à la poupe ? Comment appelle-t-on cette ligne ?

Lorsqu'on lâche un corps dans un liquide, il peut soit tomber au fond du récipient soit remonter et flotter à la surface du liquide. **A quelle condition flotte-t-il ?**

Reprenons l'exemple du corps (hétérogène) du paragraphe précédent. Immergeons-le dans une éprouvette remplie d'eau. Faisons varier la masse du solide en modifiant la longueur du fil de plomb de son lest (Fig.12).

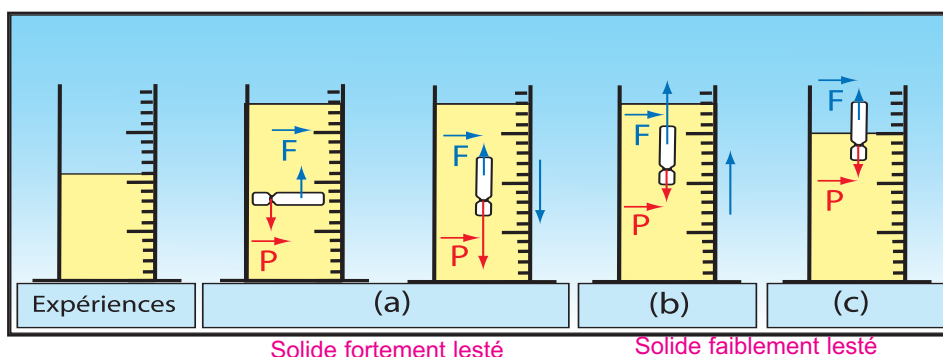


Fig.12

Le corps immergé est soumis à deux forces verticales de sens contraires :

- Son poids $\vec{P}$, appliqué au centre de gravité G de ce corps.
- La poussée d'Archimède $\vec{F}$, appliquée au centre de poussée C.

Expérience a	Expérience b	Expérience c
Le solide effectue une rotation qui amène G et C sur la même verticale, donc fait coïncider les droites d'action des deux forces appliquées au corps immergé.	Le solide, abandonné au sein du liquide remonte vers la surface.	Le solide flotte en surface.

Comparons dans chaque expérience, l'intensité de la poussée d'Archimède avec le poids du solide.

La poussée d'Archimède est égale au poids de l'eau déplacée.

	Expérience a	Expérience b	Expérience c
Poids du solide	$\ \vec{P}_1\ = 1\text{N}$	$\ \vec{P}_2\ = 0,5\text{N}$	$\ \vec{P}_3\ = 0,5\text{N}$
Volume d'eau déplacé	75 mL	75 mL	50 mL
Poussée d'Archimède	$\ \vec{F}_1\ = 0,75\text{N}$	$\ \vec{F}_2\ = 0,75\text{N}$	$\ \vec{F}_3\ = 0,5\text{N}$
	$\ \vec{F}_1\ < \ \vec{P}_1\ $ le solide coule	$\ \vec{F}_2\ > \ \vec{P}_2\ $ le solide remonte	$\ \vec{F}_3\ = \ \vec{P}_3\ $ le solide flotte

Il est possible après quelques essais de confectionner un solide moyennement lesté dont le poids est **égal** au poids du liquide déplacé quand il est **complètement immergé**. Placé au sein du liquide, ce solide tourne pour amener **G** et **C** sur la même verticale et reste ensuite en **équilibre indifférent** (c'est-à-dire indépendant de la position).

On dit qu'un corps **flotte** à la surface d'un liquide quand il se maintient en équilibre avec une partie **émergée** et une autre **immergée**; pour qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, il faut que le poids du liquide déplacé par la partie immergée du corps soit **égal** à son poids.

GENERALISATION :

- Un corps, **immergé** dans un liquide est entraîné vers le fond, quand l'intensité de la poussée d'Archimède est inférieure à son poids.
- Un corps, **immergé** dans un liquide remonte à la surface quand l'intensité de la poussée d'Archimède est supérieure à son poids.
- Un corps **flotte**, c'est-à-dire se maintient en équilibre à la surface d'un liquide, lorsque la poussée d'Archimède s'exerçant sur la **partie immergée** et son poids sont **directement opposées** c'est-à-dire :
 - de même direction
 - de sens opposés
 - de même intensité

Activité

La glace est moins dense que l'eau, c'est pourquoi elle flotte. Plus exactement, 90% de la glace se trouve sous le niveau de l'eau et 10% à peu près se trouve au dessus.

On met des glaçons dans un verre d'eau (Fig.13) ; ils flottent à la surface de l'eau qui arrive à ras bord. En fondant, les glaçons vont donner de l'eau. Le verre va-t-il déborder ou non ?

Mettons à la surface d'un réservoir rempli d'eau des morceaux de divers matériaux homogènes : bois, cuivre, polystyrène, verre...



Fig.13

Les morceaux de bois et de polystyrène surnagent, les autres vont au fond. La masse volumique du bois ou du polystyrène est inférieure à celle de l'eau : leur densité d est donc inférieure à 1 ; par contre pour le cuivre et le verre, la densité d est supérieure à 1.

Ce résultat est observable avec n'importe quel autre liquide. En effet, la condition de flottaison pour un corps homogène complètement immergé au départ dans un liquide de masse volumique ρ_{liq} est que : $\|\vec{F}\| > \|\vec{P}\|$

Or si V est le volume du corps complètement immergé et ρ_c sa masse volumique, on a $\|\vec{F}\| = \rho_{liq} \cdot V \cdot \|\vec{g}\|$ et $\|\vec{P}\| = \rho_c \cdot V \cdot \|\vec{g}\|$; on en déduit la condition de flottaison pour les corps homogènes : $\rho_c < \rho_{liq}$

Pour qu'un corps homogène flotte à la surface d'un liquide, il faut que sa masse volumique soit inférieure à celle de ce liquide ; dans le cas contraire il coule dans ce liquide. S'il y a égalité des masses volumiques, le corps reste en équilibre indifférent au sein du liquide.

Remarque

Les conclusions précédentes ne sont valables que pour les corps homogènes pleins, c'est-à-dire ne présentant aucune cavité fermée intérieure.

5. Applications

> Le plongeur sous-marin

Dans l'eau de mer, le plongeur doit s'alourdir à l'aide d'une ceinture de plomb. En effet, avec sa combinaison et son équipement (bouteilles d'air surtout), son poids est inférieur à la poussée d'Archimède quand il est complètement immergé. Le plomb, métal de densité élevée, permet une augmentation du poids total beaucoup plus importante que l'augmentation de la valeur de la poussée d'Archimède. Avec un poids supérieur à la poussée d'Archimède, le plongeur peut évoluer avec facilité à une certaine profondeur (Fig.14).



Fig.14 Plongeur sous-marin

> Le sous-marin

Les sous-marins flottent normalement à la surface de l'eau comme les navires ordinaires ; ils possèdent des réservoirs appelés ballasts (de l'anglais water-ballast) dans lesquels on peut laisser entrer l'eau ou l'en chasser avec de l'air comprimé. Quand les réservoirs sont pleins, le poids du sous-marin devient supérieur à la poussée d'Archimède et le submersible s'enfonce dans l'eau et navigue en plongée (Fig.15).

Pour remonter à la surface, on chasse une partie de l'eau des ballasts avec de l'air comprimé jusqu'à ce que le poids devienne inférieur à la poussée d'Archimède (Fig.15-a, -b, -c).



Fig.15 Sous-marin

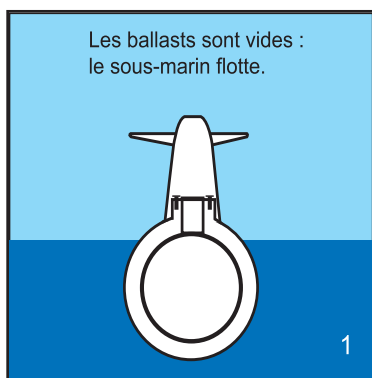


Fig.15 -a

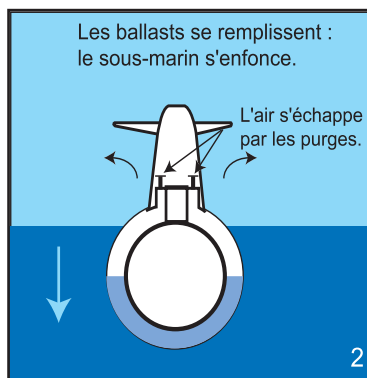


Fig.15 -b



Fig.15 -c

> Le densimètre

Un densimètre est composé d'un réservoir en verre mince rempli d'air jouant le rôle de flotteur qui est lesté à sa base par des grains de plomb et surmonté par un tube cylindrique plus fin fermé à son extrémité supérieure (Fig.16). L'appareil est conçu pour flotter toujours en position verticale stable dans les liquides avec une partie émergente de la tige cylindrique.

La longueur de la tige qui émerge dépend de la densité du liquide utilisé ; l'appareil est généralement étalonné avec des liquides de densité connue et gradué directement en valeur de d . On a des appareils pour des densités supérieures à l'unité et d'autres pour celles inférieures à l'unité.

Selon l'usage on l'appelle « pèse-lait », « pèse-acide », « alcoomètre » pour déterminer le degré de pureté du lait, de l'acide d'une batterie ou de l'alcool.



Fig.16

L'essentiel du cours

- Les actions de contact exercées sur la surface d'un corps immergé dans un liquide au repos sont équivalentes à une force $\vec{F}$, appelée **poussée d'Archimède** :
 - de direction verticale ;
 - orientée vers le haut ;
 - d'intensité égale au poids du liquide déplacé.
- Un corps immergé dans un liquide coule quand l'intensité de la poussée d'Archimède est inférieure à son poids.
- Un corps immergé dans un liquide remonte à la surface quand l'intensité de la poussée d'Archimède est supérieure à son poids.
- On dit qu'un corps **flotte** à la surface d'un liquide quand il se maintient en équilibre avec une partie **émergée** et une autre **immergée** ; pour qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, il faut que le poids du liquide déplacé par la partie immergée du corps soit **égal** à son poids.
- La poussée d'Archimède est appliquée en un point **C** appelé **centre de poussée**.
- Le centre de poussée et le centre de gravité ne coïncident pas en général pour les corps hétérogènes complètement immergés ; ils coïncident par contre pour les corps homogènes complètement immergés.

THEOREME D'ARCHIMEDE :

Tout corps solide partiellement ou complètement immergé dans un liquide homogène en équilibre subit de la part de ce liquide une poussée directement opposée au poids du liquide déplacé :

$$\vec{F} = - \rho \cdot V \cdot \vec{g}$$

- Un corps homogène de masse volumique ρ_c étant placé dans un liquide de masse volumique ρ_{liq} :
 - si $\rho_c < \rho_{liq}$: il flotte à la surface du liquide ;
 - si $\rho_c > \rho_{liq}$: il coule dans ce liquide ;
 - si $\rho_c = \rho_{liq}$: le corps reste en équilibre indifférent au sein du liquide.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1-Recopier et compléter ce qui suit :

La poussée d'Archimède est une force de direction , de sens , dont l'intensité est égale (à ou au) du liquide déplacé.

2- Choisir la bonne réponse dans les parenthèses :

Un corps immergé dans l'eau (remonte / coule) si son poids est supérieur à la poussée d'Archimède ; un corps immergé dans l'eau remonte si la poussée d'Archimède est (supérieure / inférieure / égale) à son poids.

La densité d'un corps homogène qui flotte est (supérieure / inférieure / égale) à celle du liquide dans lequel il se trouve.

3- Répondre par VRAI ou FAUX et corriger ce qui est faux.

- Pour un corps complètement immergé, la poussée d'Archimède dépend du volume du corps.
- Lorsqu'un corps flotte, la poussée d'Archimède est supérieure au poids du corps.
- Pour des corps de même volume, complètement immergés dans le même liquide, la poussée d'Archimède est la même.
- La valeur de la poussée d'Archimède se mesure en kilogramme.
- Pour un corps homogène complètement immergé le point d'application de la poussée d'Archimède et le centre de gravité du solide ne coïncident pas.
- Le centre de poussée C correspond au centre de gravité du liquide déplacé quel que soit le volume immergé du corps.
- Quand un solide flotte dans l'eau, il peut flotter dans tous les autres liquides.

Je sais appliquer le cours

- 4- Deux élèves veulent connaître l'intensité de la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur le corps accroché au dynamomètre. Les valeurs des forces indiquées par le dynamomètre sont reportées sur la figure (Fig.17). Le premier dit : « elle est de 16 N ». Le second dit : « elle est de 10 N ». Qui a raison ? Pourquoi ?

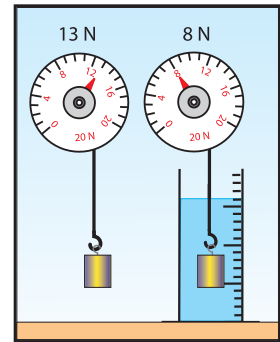


Fig.17

- 5- Un glaçon flotte à la surface de l'eau.
- Comparer son poids à la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur le glaçon.
 - Comparer la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur le glaçon au poids du liquide déplacé.
 - Comparer le volume du liquide déplacé au volume du glaçon. Justifier les réponses.

- 6- On a réalisé les expériences présentées sur les figures 18 ci-contre avec des liquides différents et le même solide (S).
- Calculer, dans chaque cas, la poussée d'Archimède exercée par chaque liquide sur le solide.
 - Les liquides employés, autres que l'eau, sont de l'alcool, de l'eau salée et de l'huile. Leurs masses volumiques sont ainsi ordonnées :

$$\rho_{\text{alcool}} < \rho_{\text{huile}} < \rho_{\text{eau}} < \rho_{\text{eau salée}}$$

Attribuer aux expériences 3, 4 et 5 le liquide utilisé.

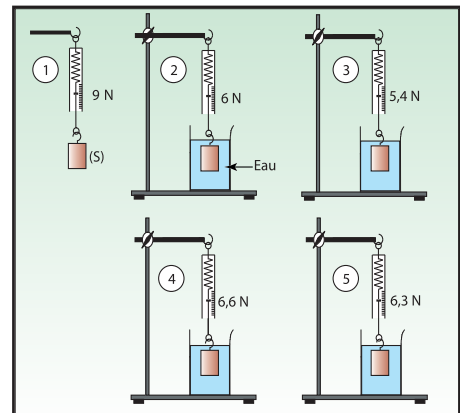


Fig.18

- 7- On réalise les expériences ci-dessous avec le même morceau de pâte à modeler qu'on immerge dans une éprouvette graduée contenant de l'eau.

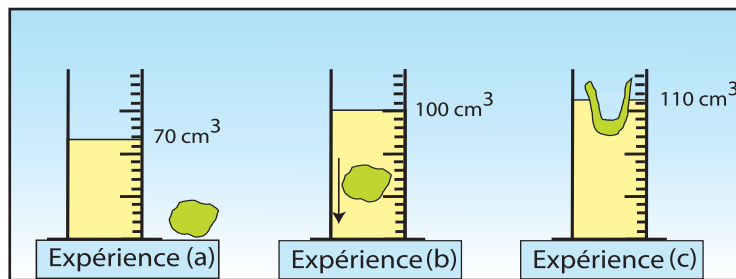


Fig.19

- Comparer, dans l'expérience b, la valeur $||\vec{P}||$ du poids du morceau de pâte à modeler et celle $||\vec{F}'||$ de la poussée d'Archimède.
- Calculer la valeur de la poussée d'Archimède dans l'expérience b. On prendra la masse volumique de l'eau $\rho_e = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ et $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.
- On réalise, pour l'expérience c, avec la même quantité de pâte à modeler, un petit godet. Placé sur l'eau, ce dernier flotte. Comparer, la valeur $||\vec{P}||$ du poids et celle $||\vec{F}'||$ de la poussée d'Archimède.
- Calculer la valeur $||\vec{F}'||$ de la poussée d'Archimède.

8- On a réalisé les six expériences schématisées sur les figures 20 ci-contre. Le liquide est le même pour toutes les expériences, mais les solides (A), (B) et (C) sont différents.

- Calculer la poussée d'Archimède sur le solide (A).
- Le solide (B) a le même volume que le solide (A). Quelle est l'indication du dynamomètre dans l'expérience 4 ?
- Le solide (C) a un volume qui est égal à la moitié de celui de (A). Quelle est l'indication du dynamomètre dans l'expérience 6 ?

9- Pourquoi est-il plus facile de faire la planche en mer qu'en piscine (eau douce) ? Pourquoi, quand un nageur apprend à faire la planche, lui dit-on que ce sera plus facile s'il met bien sa tête dans l'eau ?

10- Plongez un oeuf frais dans de l'eau douce, puis dans de l'eau très salée. Que constatez-vous ? Comparez dans chaque cas les valeurs du poids et de la poussée d'Archimède.

En ajoutant peu à peu de l'eau douce à de l'eau salée, on peut arriver à faire tenir l'oeuf « entre deux eaux ». Que peut-on dire des valeurs du poids et de la poussée d'Archimède ?

11- Un flotteur est constitué par un cylindre en bois, de 30 cm de long et de masse volumique $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$, lesté à sa partie inférieure d'un cylindre de fer de même diamètre et de 1 cm de hauteur. La masse volumique du fer est $7,8 \text{ g.cm}^{-3}$. On demande :

- De déterminer la hauteur de la partie immergée du flotteur.
- De dire si le centre de poussée C est situé au-dessus ou au-dessous du centre de gravité G du flotteur.

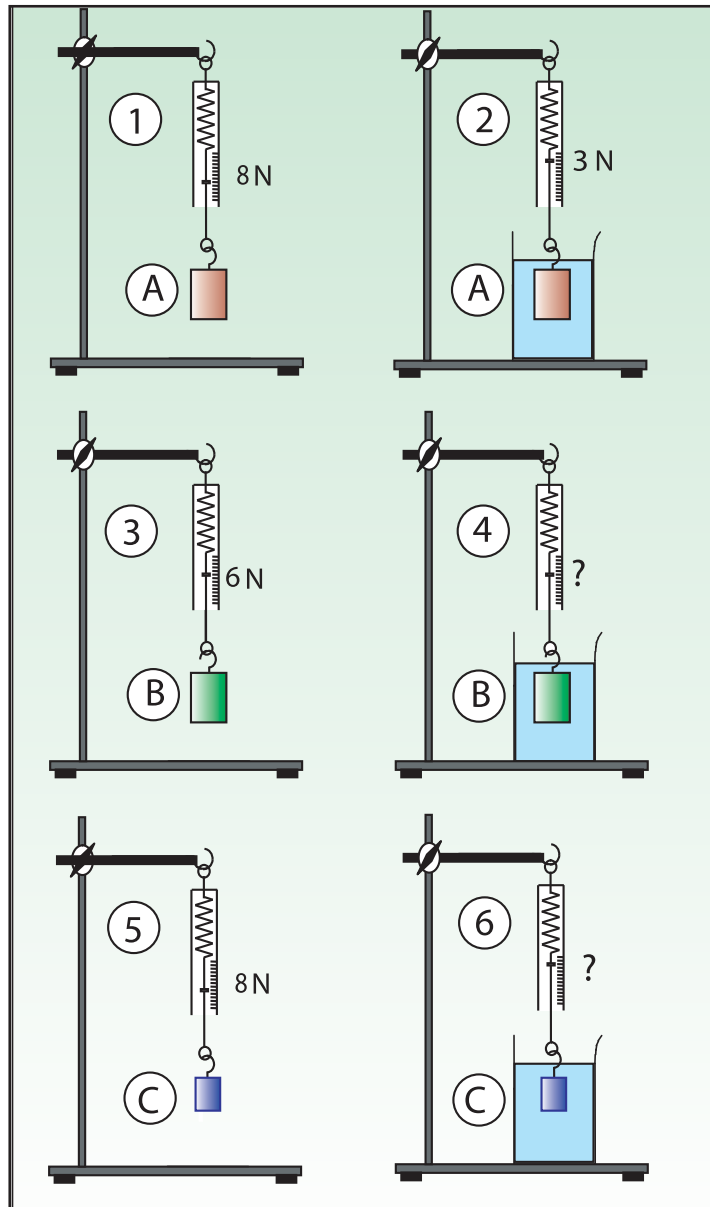


Fig.20

12- Un densimètre a une masse de 14,4 g. Il s'enfonce jusqu'en haut de la tige dans l'éthanol pur de densité 0,792. La tige a une longueur de 15 cm et est parfaitement cylindrique. On demande de calculer :

- Le volume du réservoir du densimètre jusqu'au début de la graduation de la tige.
- la section de la tige.
- la densité d'une solution alcoolique à 60° (degré d'alcool) dans laquelle la tige du densimètre émerge de 10 cm.

13- Un solide est constitué par un morceau de bougie (de 8 cm de long) lesté à sa base par une rondelle en fer de masse m dont on négligera l'épaisseur devant la longueur de la bougie. Placé dans un bécher contenant de l'eau, il flotte en se maintenant en équilibre vertical ; un bécher plus petit permet d'empêcher la bougie de venir se coller à la paroi du grand bécher sans gêner son mouvement vertical. On allume la bougie :

- A quelle hauteur h_0 au dessus de l'eau, la flamme se trouve-t-elle au départ ?
- La bougie va-t-elle continuer à flotter jusqu'à épuisement du combustible ou couler avant ? Justifier.
- Au bout de combien de temps cette bougie s'éteindra-t-elle ?

Données pour effectuer des calculs : masse volumique de la paraffine : $\rho = 0,8 \text{ g.cm}^{-3}$; masse volumique de l'eau : $\rho' = 1 \text{ g.cm}^{-3}$; $m = 2 \text{ g}$; diamètre de la bougie : $d = 2 \text{ cm}$. La bougie se consume à raison de 2 cm à l'heure.

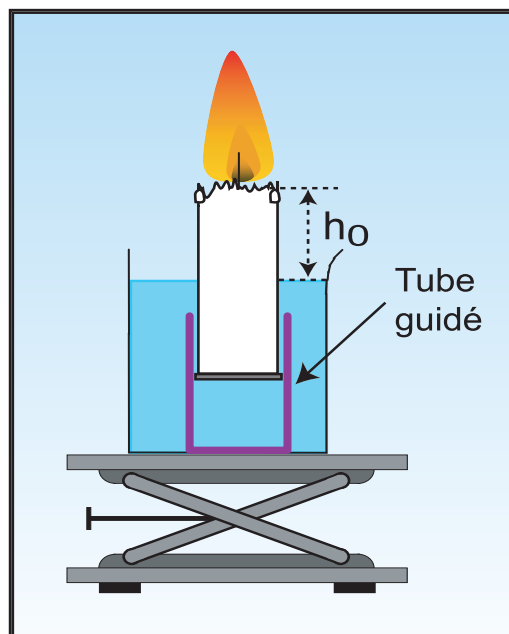


Fig.21

Les aérostats

L'air autour de nous (l'atmosphère), comme les liquides, exerce des forces pressantes sur tous les corps ; la somme de ces forces est équivalente pour chaque corps à une force due à l'air de sens opposé à celui du poids appelée « poussée d'Archimède ». Cette force est directement opposée au poids de l'air déplacé.

Toutefois pour un objet quelconque, le poids de l'air déplacé est souvent négligeable par rapport à son poids et l'effet de la poussée d'Archimède passe inaperçu.

Le volume d'un **aérostat** par contre est considérable (plusieurs milliers de m^3) ; la poussée d'Archimède devient capable de vaincre le poids de l'aérostat y compris la nacelle qui est accrochée avec ses passagers et leurs instruments.



Ballon sonde
Fig.22

On appelle **aérostat** des systèmes capables de s'élever et de se maintenir dans l'air en utilisant un gaz de densité plus faible que celle de l'air.

Le principe de fonctionnement des **aérostats** repose donc sur les lois de l'hydrostatique dans l'air considéré comme un fluide (supposé en équilibre) dont la masse volumique a une valeur moyenne à faible altitude de l'ordre de $1,3 \text{ kg.m}^{-3}$.

On distingue trois types d'aérostats : **les ballons et ballons-sondes**, les dirigeables et les montgolfières.

Les ballons et les ballons-sondes sont gonflés avec des gaz peu denses : dihydrogène ou hélium (Fig.22). Ce dernier est moins dangereux que le dihydrogène qui est très facilement inflammable.

Les ballons et les ballons-sondes permettent d'étudier l'atmosphère (vent, climat, composition de l'atmosphère...) ; certains peuvent atteindre des altitudes de 50 km. Il n'y a aucun moyen de contrôler la trajectoire d'un ballon en vol ; elle est déterminée par les vents.



Fig.23 Dirigeable



Fig.24 HINDENBURG

Les **dirigeables** (Fig.23) sont des ballons de forme allongée muni de moteurs et d'hélices qui permettent un véritable vol contrôlé et des trajectoires maîtrisées. Les dirigeables ont connu des heures de gloire à leur apogée avec les « Zeppelin » quand ils rendirent possible les voyages aériens au-dessus de l'Atlantique pour des dizaines de personnes à la fois. En 1937 (6 mai), la catastrophe de l'incendie du Zeppelin « HINDENBURG » au-dessus de Lakehurst (New Jersey, USA) mit un coup d'arrêt fatal à leur essor et leur usage fut abandonné. Le Hindenburg avait un volume de 2.10^6 m^3 et transportait 140 personnes ; au moment d'atterrir, il fut pris dans un violent orage et frappé par la foudre ; il s'enflamma et l'incendie se propagea de manière foudroyante car il était rempli de dihydrogène. La catastrophe causa la perte du vaisseau et de trente cinq personnes en moins de 5 minutes (Fig.24).

Les **montgolfières** ont été historiquement les premiers aérostats à voir le jour en 1783 (Fig.26) grâce à deux français : les frères Montgolfier (d'où le nom de l'aérostat).

Le vol en montgolfière est une activité de loisir actuellement très en vogue ; les matériaux modernes utilisés et les technologies très bien rodées des brûleurs au propane de grande puissance ont grandement facilité , sécurisé et mis à la portée du grand public ces vols.

L'enveloppe est en tissu synthétique étanchéifié de très faible épaisseur (0,1 mm) et très léger (30 à 40 g au m²). Sa partie inférieure est ouverte à l'air libre et réalisée dans un tissu très résistant à la chaleur. Au-dessous de cette ouverture un brûleur au propane est actionné de

façon intermittente par le pilote ; cela a pour effet de réchauffer l'air contenu dans l'enveloppe qui a tendance à augmenter de volume : **sa masse volumique diminue**. Lorsque l'enveloppe (dont le volume est de l'ordre de 1500 à 2000 m³) est remplie d'air chaud, la poussée d'Archimède devient supérieure au poids de l'ensemble et la montgolfière prend de l'altitude (Fig.26) ; quand l'air intérieur se refroidit, elle descend. A part les personnes, l'essentiel du chargement de la nacelle (toujours en osier depuis deux siècles) est constitué des bouteilles de propane liquide de 20kg. Chaque bouteille permet entre 20 et 50 mn de vol.

Ces aérostats ne peuvent voler que par très beau temps à cause de leur grande sensibilité au vent et aux turbulences atmosphériques.



Etienne et Joseph Montgolfier
Fig.25



Fig.26

ÉNERGIE ET CONTRÔLE



Vaincre la pesanteur, atteindre les vitesses de satellisation nécessaires à une altitude choisie, exigent des dépenses énergétiques énormes ; les réservoirs de carburant et de comburant du lanceur de la navette en donnent une idée, mais tout est calculé.

ÉNERGIE CINÉTIQUE

CHAPITRE 15



Accident de voitures légères

Comment prennent naissance les forces considérables qui froissent les tôles de ces voitures comme du papier.

OBJECTIFS

- Définir l'énergie.
- Définir l'énergie cinétique.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie cinétique.

231 chapitre 15 : Energie cinétique

page 231

CHAPITRE 16

ENERGIE POTENTIELLE



L'eau est précieuse dans notre pays ; parmi les multiples bénéfices des retenues d'eau douce comme ce barrage, la production d'énergie électrique. Quelle forme d'énergie est convertie en électricité ?

OBJECTIFS

- Définir l'énergie potentielle élastique.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie potentielle élastique.
- Définir l'énergie potentielle de pesanteur.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie potentielle de pesanteur.
- Reconnaître un système matériel susceptible d'emmagasiner de l'énergie potentielle.

246 chapitre 16 : Energie potentielle

page 246

CHAPITRE 17

ENERGIE THERMIQUE



Incendie de forêt

Des incendies gigantesques de forêts comme celui-ci sont presque quotidiens dans le monde. Que devient l'énorme dégagement d'énergie thermique qui en résulte et quelles influences peut-il avoir sur le milieu où nous vivons ?

OBJECTIFS

- Différencier entre énergie thermique et température.
- Distinguer les différents effets de transfert d'énergie par chaleur d'un système vers un autre.
- Reconnaître les différents modes de propagation de la chaleur d'un système vers un autre.
- Expliquer le transfert d'énergie thermique par rayonnement.

258 chapitre 17 : Energie thermique

page 258

TRAVAIL ET PUISSANCE

CHAPITRE 18



Pourquoi dit-on que le bulldozer ou le tracteur sont plus puissants que le cheval ? Que le cheval est plus puissant que l'homme ... ? Qu'est ce que la puissance d'un moteur ?

OBJECTIFS

- Calculer le travail d'une force constante au cours d'un déplacement linéaire ou quelconque.
- Distinguer un travail moteur d'un travail résistant.
- Appliquer la formule de la puissance moyenne : $P = \frac{W}{\Delta t}$
- Calculer le rendement d'une machine simple.

275 chapitre 18 : Travail et puissance

page 275

Prérequis

SAVOIRS

- Je connais différentes sources d'énergie non renouvelables
- Je connais différentes sources d'énergie renouvelables
- Je connais les unités du Système International de l'énergie
- Je sais faire le lien entre les différentes sources d'énergie utilisées par l'Homme et le Soleil reconnu comme principale source d'énergie.
- Je sais estimer les avantages et les inconvénients des diverses sources d'énergie.
- Je sais reconnaître les transformations mutuelles des formes d'énergie
- Je sais que l'on ne peut pas créer l'énergie
- Je connais les lois du mouvement de la chute libre d'un solide

SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX

- Je sais mesurer une température
- Je sais mesurer la vitesse d'un solide en mouvement de translation ou de rotation.

SAVOIR-FAIRE THEORIQUES

- Je sais expliquer le transfert d'énergie d'un milieu à un autre en raisonnant sur la conservation de l'énergie.
- Je sais décrire les différentes utilisations de l'énergie à la maison au lycée et ailleurs et proposer des moyens pour l'économiser
- Je sais représenter une chaîne énergétique rendant compte des transformations mutuelles de l'énergie

ÉNERGIE CINÉTIQUE

CHAPITRE

15



Accident de voitures légères

Comment prennent naissance les forces considérables qui froissent les tôles de ces voitures comme du papier.

OBJECTIFS

- Définir l'énergie.
- Définir l'énergie cinétique.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie cinétique.

Introduction

Pour accomplir beaucoup de tâches quotidiennes, nous avons besoin de **forces motrices**, c'est-à-dire des forces capables de mouvoir des objets, des outils, des véhicules de transport... Pendant longtemps, les hommes n'ont utilisé pour cela que leur force musculaire ou celle des animaux (Fig.1). Le feu et la combustion des végétaux leur ont permis ensuite de se chauffer et de transformer la matière en utilisant la **chaleur** pour cuire les aliments et les rendre plus faciles à digérer, faire de la poterie, de la métallurgie...

C'est ainsi qu'à mesure que sa civilisation s'étend et progresse sur la Terre, l'Homme a vu ses besoins en **forces motrices** et **chaleur** croître. Il s'est très vite rendu compte que pour produire des forces motrices il dépensait aussi son **énergie** et celle des animaux qu'il utilisait. Il remplaçait l'énergie dépensée en se nourrissant et en nourrissant ses bêtes (Fig.2). En fait il puise dans le réservoir d'énergie que constitue la nature qui l'entoure : les autres êtres vivants (animaux chassés et végétaux), l'air, l'eau sont en effet une réserve d'énergie chimique utilisée selon le besoin de ses activités.

Principe de la conservation de l'énergie :

Les hommes se sont vite aperçus que pour produire de la force motrice il faut dépenser de l'énergie et **que l'énergie ne peut être créée à partir du néant**. Si elle apparaît sous une forme c'est qu'elle a disparu sous une autre forme et vice versa.

Bientôt, avec les progrès de la civilisation, les besoins en énergie sont devenus tels qu'ils ont commencé à chercher des sources d'énergie durables et d'autres systèmes capables de couvrir les besoins en forces motrices.

C'est pour cela que l'Homme moderne est constamment à la recherche de nouvelles sources d'énergie, surtout celles dites renouvelables.



Fig.1 Force musculaire animale et humaine



Fig. 2 Hommes se nourrissant

1. Définition de l'énergie

Tout système capable d'exercer une force motrice est appelé **moteur**.

Exemples : muscles , moteur à explosion, turbine à vapeur, moteur électrique...(Fig.3)

Tous ces systèmes consomment de l'**énergie** pour fonctionner et cette énergie est puisée dans des réservoirs : oxygène et hydrates de carbone pour le muscle, carburant et oxygène pour les moteurs à explosion, réseau électrique pour le moteur électrique, vapeur sous pression pour la turbine...

Le muscle et le moteur à explosion convertissent l'énergie résultant de la réaction de combustion d'un carburant dans l'oxygène : ce sont des **convertisseurs d'énergie** d'origine chimique en forces motrices.

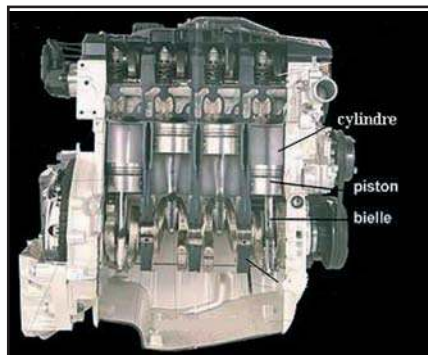


Fig .3 Moteur à explosion

Activité

Chercher d'autres exemples de convertisseurs d'énergie.

Définition

Tout système matériel capable, avec le convertisseur approprié, de produire des forces motrices est un système qui possède de l'énergie. Il est appelé **source d'énergie**.

Exemple : Les mouvements de l'air (vent) sont convertis par une turbine éolienne en forces motrices ou couple moteur qui actionne une génératrice d'électricité. Le vent est un réservoir d'énergie dite éolienne (*de Eole, le dieu du vent chez les grecs*).

L'unité d'énergie dans le Système International est le **joule (J)**.

2. Sources d'énergie

L'air en mouvement (vent) ou l'eau (rivières, chutes d'eau...) sont des sources d'**énergie** dont l'origine est un mouvement de matière. C'est de l'énergie d'origine **mécanique**.

Une pile, siège de réactions chimiques entre les composés qu'elle renferme, est une source d'**énergie** d'origine **chimique**.

La chaudière contenant de la vapeur à haute température et pression est une source d'**énergie** d'origine **thermique**.

Le réseau de distribution de la STEG est une source d'énergie d'origine électrique.

Dans un réacteur nucléaire, comme sur le Soleil, la matière subit des transformations en libérant de l'**énergie** : le Soleil, une étoile ou un réacteur sont des sources d'énergie d'origine **nucléaire** (Fig.4).



Fig .4

Activité

Montrer, avec des exemples, que la majorité des sources d'énergie que nous utilisons sur Terre sont essentiellement d'origine solaire.

- Quelles sont les principales formes d'énergie ?
- Quels sont les facteurs qui déterminent la quantité d'énergie d'une forme donnée que renferme un système matériel ?

3. Energie cinétique

Les dégâts causés par un accident de voiture sont considérables même à faible vitesse : tôles froissées, poteaux arrachés...(Fig.5)

Aux mêmes vitesses, les dégâts occasionnés par un poids lourd sont encore plus impressionnants : arbres cassés, murs défoncés, petites voitures complètement écrasées...

Les dégâts occasionnés et les déformations constatées nous renseignent sur l'importance des forces motrices mises en jeu lors des interactions au cours des chocs.

Un corps en mouvement avec une vitesse donnée est une source d'**énergie mécanique**.

Au cours de ses interactions avec d'autres systèmes, la vitesse de ce corps diminue ou s'annule et il en résulte des forces motrices dont on voit les effets sous forme de déformations ou d'autres mouvements.

Tout corps en mouvement avec une vitesse donnée est un système qui possède de l'**énergie cinétique** notée E_c .



Fig .5 Dégâts causés par un accident

L'énergie éolienne est donc de l'énergie cinétique (Fig.6) ; le long d'une rivière ou au bas d'une chute d'eau nous pouvons capter l'énergie cinétique de l'eau en mouvement.

L'Homme, depuis longtemps, a su inventer des convertisseurs d'énergie cinétique : les anciens moulins à vent, les éoliennes modernes, les anciens moulins à eau (Fig.7), les turbines hydrauliques des barrages modernes...

Le marteau est un outil simple utilisé quotidiennement ; voyons comment il joue le rôle de convertisseur de l'énergie cinétique. Posons doucement le marteau en contact avec la tête du clou.

Il y a interaction. Il n'y a aucun effet observable de cette interaction.

Le marteau est mis en mouvement par la force musculaire et arrive avec une vitesse V sur la tête du clou (Fig.8).

Celui-ci s'enfonce de quelques millimètres dans le bois à la fin du choc.

Deux systèmes (S_1) et (S_2) entrent en interaction entre les instants t_1 (juste avant le choc) et t_2 (juste après le choc) (Fig.8) :

Etat 1 : à l'instant t_1 , (S_1) : Solide de masse m en mouvement avec une vitesse V et (S_2) : Clou immobile enfoncé de x_1 cm dans une planche fixe.

Etat 2 : à l'instant t_2 , (S_1) : Solide immobile $V = 0$ et (S_2) : Clou enfoncé de x_2 cm dans la planche fixe, telque $x_2 > x_1$.

Que s'est-il passé entre les instants t_1 et t_2 ? Des interactions sont apparues avec des intensités très élevées qui ont abouti à la déformation du bois. A l'instant t_2 (S_1) n'est plus en mouvement et (S_2) voit sa déformation augmenter.



Fig .6



Fig .7

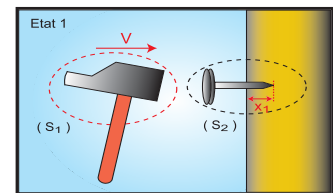


Fig .8-a

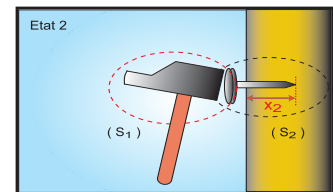


Fig .8-b

Remarque

On aurait pu obtenir le même effet sur le système (S_2) en appuyant avec une force considérable sur la tête du clou (en serrant la planche et le clou entre les mâchoires d'un étau).

Ce qui est perdu au cours de l'interaction, c'est l'énergie cinétique E_c de (S_1). Cette énergie perdue a été transférée au système (S_2) au cours de sa déformation.

D'où provient l'énergie cinétique acquise par le marteau avant t_1 ?

C'est la force motrice produite par les muscles de l'utilisateur qui a communiqué cette énergie cinétique au marteau initialement au repos.

Activité

Dans l'exemple de la figure 9, chercher le solide mis en mouvement de rotation par la force musculaire et qui perd son énergie par la suite.

Conclusion

- Un solide libre, initialement au repos et soumis à une force motrice acquiert de l'énergie cinétique de translation.
- Un solide mobile autour d'un axe fixe, initialement au repos et soumis à l'action d'un couple moteur, acquiert de l'énergie cinétique de rotation.



Fig .9 Rémoleur



Fig .10

L'énergie cinétique du traîneau est le résultat des forces motrices développées par les muscles des chiens : elle n'est pas la même avec un seul chien ou avec plusieurs chiens (Fig.10).

Un **point matériel** de masse m en mouvement avec une vitesse V possède une énergie cinétique notée E_c .

- Un solide de masse m en mouvement a une énergie cinétique égale à la somme des énergies cinétiques de tous les points matériels qui le constituent.
- L'énergie cinétique d'un solide en translation est égale à celle d'un point matériel de même masse que ce solide et qui a le même mouvement que son centre d'inertie.

L'énergie cinétique d'un véhicule avec des passagers est la somme des énergies cinétiques de toutes les parties en mouvement y compris les passagers.

Comme pour le solide en translation, l'énergie cinétique du solide en rotation est la somme des énergies cinétiques de tous les points matériels qui le constituent.

En particulier, quand un solide est en mouvement de rotation par rapport à un axe fixe avec une vitesse angulaire ω , il possède une énergie cinétique E_c dite énergie cinétique de **rotation** (Fig.11).



Fig .11

Les quatre roues d'une voiture qui roule ont chacune un double mouvement de translation et de rotation ; on définit une énergie cinétique pour chaque type de mouvement ; l'énergie cinétique totale de la voiture sera :

$E_c = E_c(\text{translation du châssis}) + E_c(\text{translation des passagers}) + E_c(\text{translation des roues}) + E_c(\text{rotation des roues}) + E_c(\text{toutes les pièces mobiles du moteur})...$

L'énergie cinétique d'un **système matériel** est la somme des énergies cinétiques de translation et de rotation de toutes ses parties.

4. Les facteurs dont dépend l'énergie cinétique

4.1- Cas du mouvement de translation

Un chariot de masse m est lâché du sommet d'un plan incliné ; il prend un mouvement de translation uniformément varié et vient percuter après un parcours AB une boîte métallique de boisson vide. Un capteur de vitesse permet de relever la vitesse V_1 juste avant la collision. L'énergie cinétique du chariot est E_{c1} .

Après le choc, la boîte métallique est déformée et le chariot est immobilisé (Fig.12).

On double la masse du chariot en ajoutant une surcharge m et on le lâche dans les mêmes conditions qu'auparavant en utilisant une deuxième boîte de boisson ; V_2 est la vitesse donnée par le capteur. L'énergie cinétique du chariot est E_{c2} .

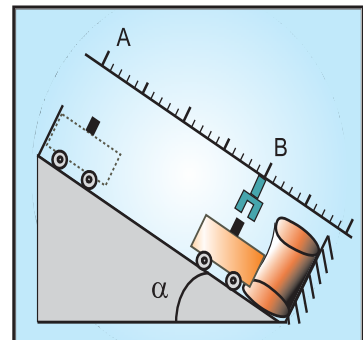


Fig .12

Après le choc, la boîte est déformée et le chariot est immobilisé (Fig.13).

La collision a lieu strictement à la même vitesse : $V_1 = V_2$

La comparaison des deux boîtes de boisson révèle une déformation de la deuxième plus importante que celle de la première.

L'énergie cinétique mise en jeu dans la deuxième expérience est donc plus grande : $E_{c2} > E_{c1}$; l'énergie cinétique du chariot dépend de sa masse et varie dans le même sens.

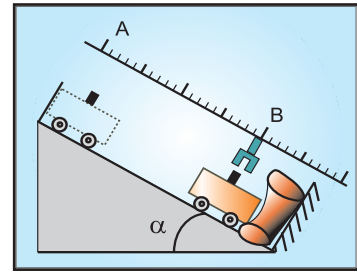


Fig .13

Activité

Expliquer pourquoi il est plus facile d'enfoncer un clou avec un marteau de masse 2 kg qu'avec un marteau de masse 500 g.

Conclusion

A vitesse égale, l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation est d'autant plus importante que sa masse est plus grande.

Activité

Décrire ce que l'on observerait comme dégâts lors de collisions entre véhicules légers, entre véhicules légers et poids lourds, entre véhicules légers et trains.



Fig .14-a



Fig .14-b

Reprenons l'expérience précédente en utilisant le même chariot de masse m qui vient, après une descente AB, percuter un bloc de bois (C) qui repose sur le plan horizontal (Fig.15) ; on s'arrange pour avoir un frottement important entre le bloc de bois et son support. Une règle graduée en millimètres permet de repérer les déplacements d du bloc en bois.

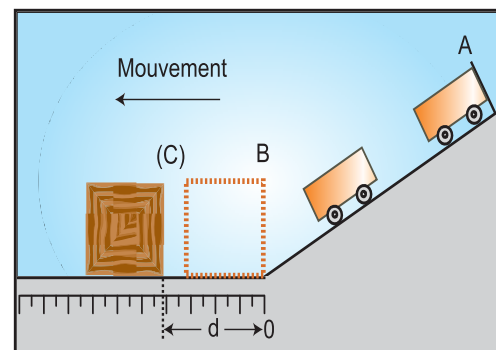


Fig .15

AB (m)	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8
V (m.s ⁻¹)						
d (mm)						

L'énergie cinétique du chariot est totalement absorbée par le freinage dû aux forces de frottements à chaque collision. La distance d mesure donc la déformation du système déformable {(C), support} ; on voit que la déformation croît dans le même sens que la vitesse du chariot.

L'énergie cinétique d'un solide de masse m en mouvement de translation avec une vitesse V donnée dans un repère terrestre est une fonction croissante de sa masse et de sa vitesse.

Unités et ordres de grandeur :

Dans le Système International l'énergie cinétique s'exprime en joule (J). On a également les multiples et les sous-multiples du joule :

le kilojoule (kJ) = 1000 J ; le mégajoule (MJ) = 10^6 J ; le millijoule (mJ) = 10^{-3} J. Une autre unité hors Système International est utilisée fréquemment pour mesurer les énergies des particules atomiques (électrons, ions, atomes...) : il s'agit de l'**électron-volt (eV)**.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ordres de grandeur de l'énergie cinétique $\mathcal{E}_c$ de quelques corps en mouvement		
Corps en mouvement	Vitesse	$\mathcal{E}_c$
Coureur du 100 m	10 m.s ⁻¹	4 kJ
Corps de masse 70kg à l'arrivée au sol après une chute du 2ème étage	11 m.s ⁻¹	4 kJ
Voiture légère	50 km.h ⁻¹	100 kJ
Voiture légère	100 km.h ⁻¹	400 kJ
Camion	90 km.h ⁻¹	5 MJ
Locomotive d'un train	100 km.h ⁻¹	50 MJ
Satellite (200 à 300 km d'altitude)	28000 km.h ⁻¹	5 10^5 MJ
Balle de fusil	500 m.s ⁻¹	2,5 MJ
Electron (faisceau d'oscilloscope 6kV)	46500 km. s ⁻¹	10 ⁻¹⁵ J ou 6000 eV
Plateau de tourne-disque (45 tours / mn ; diamètre Ø= 30 cm)	4,71 rad.s ⁻¹	0,4 J

Balle d'une arme à feu : Les effets d'un solide en mouvement par rapport au même solide à l'arrêt sont bien illustrés par un projectile tiré par une arme à feu. Un petit morceau de métal inoffensif au repos peut occasionner de dégâts importants à **grande vitesse** (Fig16).



Fig .16

4.2- Cas du mouvement de rotation

Un solide en rotation autour d'un axe avec une vitesse angulaire ω est un système matériel dont les différents points matériels n'ont pas la même vitesse linéaire ; on sait cependant que chacun de ces points a une énergie cinétique qui ne dépend que de sa masse et de sa vitesse (Fig.17).

Or les vitesses de tous les points matériels sont proportionnelles à la vitesse angulaire ω du solide.

L'énergie cinétique d'un solide en rotation varie dans le même sens que sa vitesse angulaire ω .

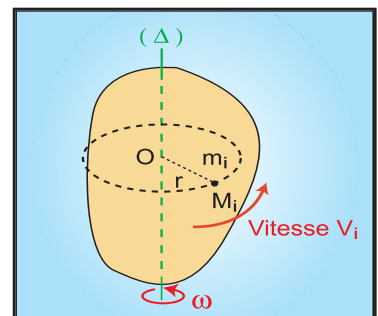


Fig .17

5. Propriétés de l'énergie cinétique

Un système peut-il transférer son énergie cinétique à un autre système ?

Réalisons le dispositif suivant (Fig.18) :

Deux billes en acier identiques (B_2) et (B_3) sont suspendues côte à côte par des fils verticaux en O_2 et O_3 . Une autre bille identique (B_1), suspendue en O_1 , est lâchée à partir d'une position faisant un angle α avec sa position d'équilibre verticale ; elle vient heurter la bille (B_2) au cours de son mouvement.

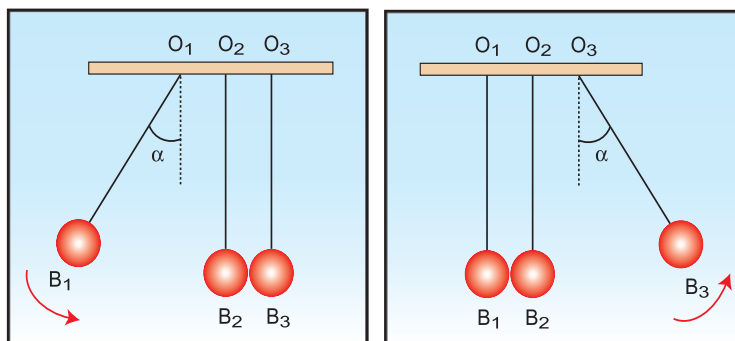


Fig .18

La bille (B_3) remonte presque instantanément jusqu'à l'angle α .

L'énergie cinétique de la bille (B_1), juste avant le choc, va être transmise intégralement à la bille (B_2) qui à son tour la communique à la bille (B_3).

La bille (B_3) est désormais lancée à partir de sa position initiale avec cette énergie cinétique et s'écarte ainsi du même angle α .

On en déduit qu'au cours du choc, il y a transfert d'énergie cinétique de la bille (B_1), qui s'immobilise, à la bille (B_3) qui se met en mouvement. La bille (B_2) a transmis totalement l'énergie cinétique de la bille (B_1) à la bille (B_3) en restant constamment au repos.

Jeu de pétanque (Fig.19) :

Une boule d'acier (A) vient percuter une boule (B) identique, initialement au repos, lors d'un tir dit « à carreau » (schéma 1) : la boule (A) va s'immobiliser et la boule (B) se met en mouvement avec la même vitesse que (A) (schéma 2).

Au cours du choc élastique, il y a transfert intégral de l'énergie cinétique de la boule (A) à la boule (B).

L'énergie cinétique peut être transférée presque intégralement d'un système à un autre système au cours d'un **choc**. **Un tel choc est dit élastique.**

Remarque

Si la somme de l'énergie cinétique transférée et celle restante n'est pas égale à l'énergie cinétique initiale, le choc est dit **inélastique**.

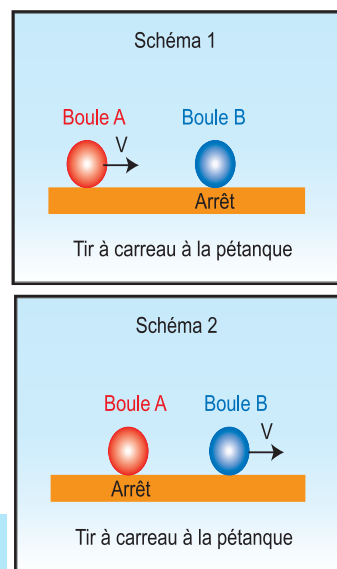


Fig .19

Un solide peut-il conserver longtemps son énergie cinétique ?

Le principe de l'inertie stipule qu'un solide lancé en mouvement avec une vitesse V reste indéfiniment en mouvement avec la même vitesse si aucune force ne s'oppose à son mouvement ; son énergie cinétique se conserve indéfiniment.

Les satellites en orbite circulaire autour de la Terre ont un mouvement uniforme (vitesse constante) ; leur énergie cinétique se conserve indéfiniment.

Comment se perd l'énergie cinétique d'un système matériel ?

On a vu dans les expériences avec les boules en acier et le jeu de pétanque que les interactions élastiques conservent l'énergie cinétique ; par contre le choc de la 2ème expérience du paragraphe 4.1 précédent n'est pas élastique et il met en jeu des interactions avec frottement.

Les forces de frottement sont toujours des **forces résistantes** ; elles freinent le mouvement ; toute force résistante est une cause de diminution de l'énergie cinétique. Pour arrêter un véhicule on freine ; quand on touche les freins après l'arrêt on constate qu'ils sont chauds.

L'énergie cinétique est transférée par chaleur à cause des frottements.

Exemple : le météore ou étoile filante pénètre dans l'atmosphère terrestre à très grande vitesse, 40000 km.h^{-1} ; son énergie cinétique est considérable. Le frottement contre les hautes couches de l'atmosphère transforme cette énergie en chaleur qui consume presque instantanément la matière qui le constitue.

En général toute force opposée au mouvement du solide est une force **résistante** qui a tendance à le freiner et donc contribue à la diminution de son énergie cinétique. Quand on lance un corps avec une vitesse initiale verticale, il monte jusqu'à une certaine altitude où sa vitesse devient nulle. Durant la montée, le poids et la résistance de l'air jouent le rôle de forces résistantes qui consomment l'énergie cinétique du solide.

Pour conserver l'énergie cinétique d'un système, il faut donc éliminer toutes les causes de déperdition : la résistance de l'air, les frottements solide-solide, toutes les interactions qui génèrent des forces résistantes. (Voir document sur le Gyrobus).

Applications

- A part le marteau, beaucoup parmi les outils que nous utilisons réalisent le transfert de notre énergie musculaire ou de l'énergie d'origine électrique sous forme cinétique : Scie, meule, pioche,...
- Dans certaines industries on utilise un outil de coupe particulier ; le découpage de formes complexes exige précision et rapidité ; cela se réalise avec des jets d'eau très fins à très haute pression (800 Mbar) et à très grande vitesse. Cette méthode de la coupe par jet liquide permet d'éviter certains risques d'accidents (projection de bris d'outils) et est plus silencieuse et plus performante que les outils traditionnels. Elle est utilisée pour les matériaux en feuilles (carton, papier, tissu) car elle permet la coupe précise d'un grand nombre de couches ou feuilles à la fois. Cette technique fonctionne même avec le béton.

- Réservoir d'énergie cinétique : **volant** (Fig.20)

Le volant est un solide en forme de roue de grand diamètre et de masse importante qui emmagasine de l'énergie mécanique sous forme cinétique lorsqu'il est entraîné par un moteur électrique de faible puissance et la restitue sur l'arbre du même moteur lorsque la puissance demandée dépasse celle du moteur et risque de le bloquer ; c'est ainsi que fonctionnent les trains de laminoirs dans l'industrie sidérurgique.

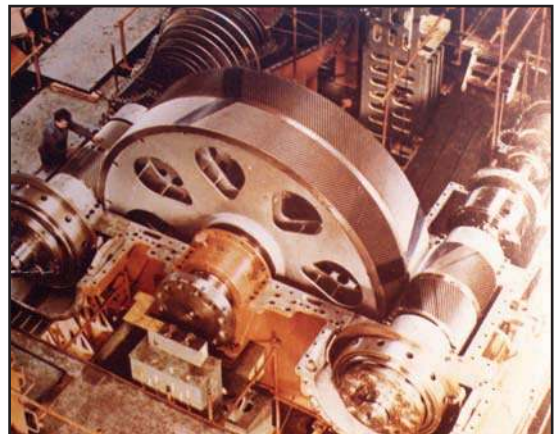


Fig .20 Volant de moteur

- L'érosion est un phénomène naturel dû au ruissellement de l'eau sur les pentes ; l'action est lente mais, sur des années, l'eau en mouvement creuse des vallées très profondes et rabote complètement des montagnes très élevées au départ.
- L'érosion peut être due à l'action du vent dans le désert ; les grains de sable emportés par le vent à grande vitesse viennent percuter les rochers et, à la longue les réduisent en sable emporté par le vent...
Pour diminuer les effets du phénomène, il faut augmenter les déperditions de l'énergie cinétique de l'eau sur les pentes ou celle du vent par une couverture végétale, les cultures en terrasses...

Dans les zones semi-arides où la végétation ne peut se développer sur les versants, il est possible de construire des diguettes en terre et en cailloux pour capturer derrière ces petits barrages les eaux de ruissellements et leur sédiments. On y plante des céréales sous différents arbres fruitiers : palmiers, oliviers...(Fig.21)



Fig .21 "Jessours" à Matmata
Tunisie

Activité expérimentale

Objectif

Déterminer expérimentalement le moment d'un couple de frottements.

Matériel

- Solide mobile autour d'un axe horizontal (avec un très faible frottement) mis en mouvement par un fil passant sur une poulie et un corps accroché (Fig.22).
- Des corps avec crochet de masse connue : 20g ; 50g ; 100 g. et une règle verticale

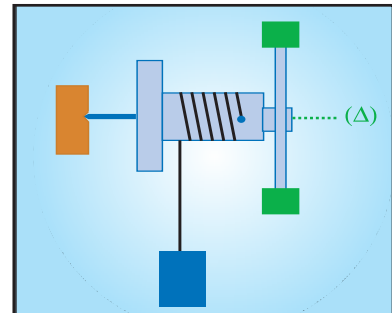


Fig .22

Principe et Manipulation

Accrocher une extrémité du fil à la poulie de rayon r et l'enrouler sur plusieurs tours. Accrocher à l'autre extrémité du fil le corps de masse m . Abandonné à lui-même, le solide se met en rotation, et le corps en translation.

Après n tours l'effet **moteur** du poids du corps cesse lorsque le fil s'est déroulé entièrement ; le corps se met à remonter quand le fil s'enroule dans l'autre sens et le système s'arrête après n' tours.

En gardant la même valeur pour la masse m :

- Comparer n et n' . Reprendre pour plusieurs valeurs de n . Préciser les valeurs des moments des forces motrices et résistantes dans chaque phase du mouvement.

On garde n et m constants lors de chaque descente, la masse devient m' en remontée :

- Comment varie n' si on ajoute (rapidement) des surcharges sur m au point le plus bas.
- Comment varie n' si on enlève (rapidement) des surcharges au point le plus bas.
- Montrer que si le corps a une masse m lors de la descente et m' lors de la remontée, on a la relation approximative suivante : $m.n = m'.n'$ (1)

Hypothèse : La force motrice de moment $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = m||g||.r$ par rapport à l'axe Δ agit pendant n tours pour communiquer au solide l'énergie cinétique de rotation E_c . La force résistante de moment $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}') = m||g||.r$ agit pendant n' tours pour rendre nulle la même énergie de rotation du solide. La variation de l'énergie cinétique E_c du solide est proportionnelle au produit $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}).n$ ou $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}').n'$.

- Cette hypothèse est-elle vérifiée par les expériences réalisées ?
- Que se passerait-il si le corps de masse m est décroché quand il atteint le point le plus bas de sa trajectoire ?
- Peut-on à partir du nombre de tours n effectués par le solide avant l'arrêt total déduire la valeur du moment du couple de frottement ?
- Pourquoi la relation (1) est-elle approximative ? Comment rectifier l'hypothèse formulée ?

L'essentiel du cours

- Tout système capable d'exercer des **forces motrices** est un **moteur**.
- Tout système matériel capable, avec le convertisseur approprié, de produire des forces motrices est un système qui possède de l'énergie et il est appelé **source d'énergie**.
- L'énergie provenant de ces sources est principalement d'origine mécanique, chimique, thermique, électrique et nucléaire.
- Un point matériel animé d'une vitesse non nulle possède de l'énergie cinétique notée $\mathcal{E}_c$; l'énergie cinétique est une forme de l'énergie mécanique.
- L'énergie cinétique d'un système matériel est égale à la somme des énergies cinétiques de tous ses points matériels.
- L'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation est fonction croissante à la fois de sa masse et de sa vitesse.
- L'énergie cinétique d'un solide, de forme donnée, en mouvement de rotation par rapport à un axe donné, est fonction croissante de sa vitesse angulaire de rotation et de sa masse.
- L'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation (ou de rotation) augmente quand il est soumis à l'action de forces motrices (couples moteurs) et diminue quand il est soumis à l'action de forces résistantes (couples résistants).
- L'énergie cinétique est transférable intégralement d'un solide à un autre de même masse au cours d'une collision élastique.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter

Un système capable de fournir une force motrice est appelé..... ; un est un convertisseur d'énergie. Un système capable, avec un convertisseur, de produire des forces motrices est une..... Tout corps en mouvement possède une énergie mécanique appelée.....notée

Un solide libre, initialement immobile, acquiert de l'énergie cinétique quand il est soumis à..... ; L'énergie cinétique d'un solide en translation est une fonction croissante de sa et de sa L'énergie cinétique d'un système diminue lorsqu'il est soumis à des

2- Répondre par VRAI ou FAUX aux affirmations suivantes :

- L'énergie cinétique d'un solide ne dépend que de la vitesse de son centre d'inertie.
- Au cours d'une collision élastique l'énergie cinétique peut se transférer d'un solide à un autre.
- L'énergie cinétique d'un système peut diminuer quand il y a des forces intérieures de frottements.
- Le centre d'inertie d'un solide en rotation étant fixe, son énergie cinétique est nulle.
- Un volant est un réservoir d'énergie cinétique.
- A vitesse de rotation égale et masse égale, l'énergie cinétique d'une jante est inférieure à celle d'un disque plein.

Je sais appliquer le cours

- 3-** Lorsqu'une bille tombe en chute libre, sa vitesse augmente. Quelle est la forme d'énergie mécanique du système {Terre, bille} qui augmente ? Quelle est la force (en précisant « exercée par.....sur..... ») responsable de cette variation d'énergie ?
- 4-** Rechercher des exemples pratiques dans lesquels de l'énergie cinétique de translation est transformée en énergie cinétique de rotation ou réciproquement.
- 5-** Un projectile lancé verticalement vers le haut avec une vitesse de 60m.s^{-1} retombe à son point de départ avec une vitesse de 45 m.s^{-1} .
Comparer son énergie cinétique de départ à celle d'arrivée. Expliquer la variation de son énergie cinétique entre le point de départ et celui d'arrivée.
- 6-** Deux enfants A et B jouent à se pousser sur une trottinette. D'abord A, en courant, pousse B monté sur la trottinette et lorsqu'ils atteignent la vitesse V , il saute derrière lui et ils continuent à rouler ensemble sans pédaler sur une certaine distance d . Ils changent de système et B se lance avec l'engin à la vitesse V et au passage, son camarade A, sans avoir couru saute derrière lui. Ils continuent ensuite à rouler ensemble sans pédaler sur une distance d' .
En supposant que les deux enfants ont des masses très voisines :
- a-** Comparer les énergies cinétiques du système {A,B,trottinette} dans les deux situations juste quand le deuxième passager est embarqué.
- b-** Comparer les distances d et d' parcourues par les deux passagers sans pédaler.

Le gyrobus

Les 2 gyrobus mis en service à Yverdon (Suisse) le 30 septembre 1953 pouvaient transporter chacun 70 passagers. La longueur de ces véhicules était de 10,70 m et la largeur de 2,40 m pour une hauteur de 3,20 m.

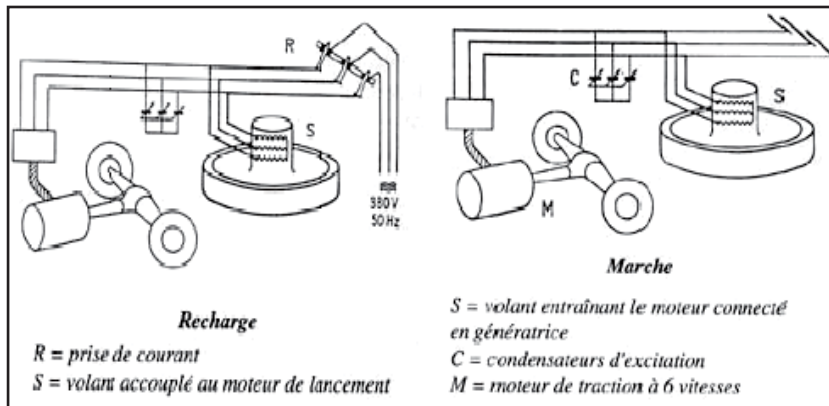


Fig .23

Comment ça marche ?

Comparable à un bus ou à un trolleybus, le Gyrobus roule sur pneumatiques, mais ne nécessite ni lignes de contact, ni batteries d'accumulateurs. Les roues sont entraînées par un moteur électrique qui reçoit l'énergie d'un volant suspendu élastiquement sous le véhicule et tournant dans un plan horizontal. Ce volant en acier est appelé électrogyro.

Pendant les arrêts fixes, le conducteur du Gyrobus, sans quitter son siège, actionne trois prises de contact disposées sur le toit du véhicule et deux petits bras latéraux qui assurent la mise à la terre. Ces prises touchent une amenée de courant horizontale, montée sur un poteau placé en bordure de la chaussée (voir photo).



Fig .24

Le moteur, couplé directement au volant de l'électrogyro accélère celui-ci jusqu'à la vitesse de 3000 t/min, opération qui dure trois ou quatre minutes. Pour circuler, les prises de courant s'abaissent et le même moteur, séparé du réseau d'alimentation, fonctionne alors en alternateur et retransforme l'énergie cinétique en énergie électrique. En perdant de sa vitesse, le volant fournit l'énergie nécessaire pour accomplir un certain parcours entre deux stations.

LE GYRO

C'est donc le **conservateur d'énergie**. Il est constitué d'un volant de 1,6 m de diamètre, pesant 1500 kg et parfaitement équilibré. Ce volant est directement accouplé avec le rotor du premier moteur. Le tout est monté sur roulements à billes et enfermé, dans un carter étanche rempli d'hydrogène à la pression de 0,1 atmosphère.

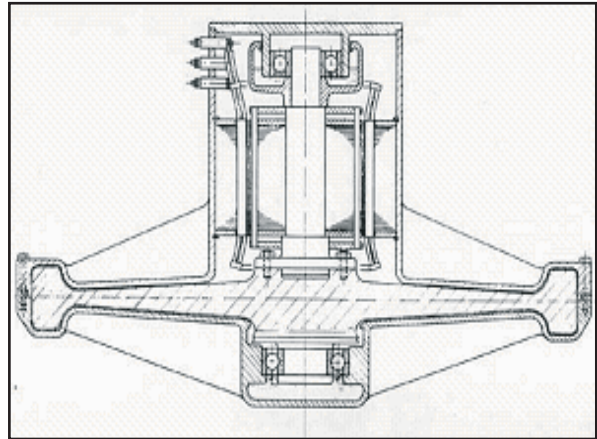


Fig .25

Le premier moteur est d'une construction tout à fait ordinaire et utilise le courant industriel triphasé. Grâce à la connexion au réseau on peut donc lancer le volant à grande vitesse, c'est la charge du conservateur d'énergie. Après une charge de 30 à 180 secondes, selon l'état de décharge, la vitesse de 3000 tours/minutes est atteinte, il n'est pas possible d'ailleurs de dépasser cette vitesse limite. Ainsi lancé, le gyro peut tourner plusieurs heures (10 heures environ) si on ne lui demande pas d'efforts ; pendant les arrêts il n'y a pratiquement pas de consommation d'énergie.

Quand le bus circule, le premier moteur se transforme en génératrice (alternateur) qui alimente un deuxième moteur électrique à 6 vitesses directement accouplé à l'arbre de transmission du gyrobus. La puissance nominale de ce deuxième moteur est de 73 kW et il peut lancer les 14 t du gyrobus à pleine charge à 55 km/h.

Le fonctionnement est silencieux, non polluant et ne nécessite la pose ni de lignes de transport du courant électrique ni rail au sol.

D'après un article sur la commémoration du 50ème anniversaire
de la société GYROBUS sur Internet
<http://www.travys.ch/Gyrobust.htm>



L'eau est précieuse dans notre pays ; parmi les multiples bénéfices des retenues d'eau douce comme ce barrage, la production d'énergie électrique. Quelle forme d'énergie est convertie en électricité ?

OBJECTIFS

- Définir l'énergie potentielle élastique.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie potentielle élastique.
- Définir l'énergie potentielle de pesanteur.
- Reconnaître les facteurs dont dépend l'énergie potentielle de pesanteur.
- Reconnaître un système matériel susceptible d'emmagasiner de l'énergie potentielle.

1. Energie potentielle élastique

1.1- Définition

Activité

Faire un inventaire de corps élastiques ou de systèmes utilisant des corps élastiques en s'aidant des figures ci-dessous (Fig.1). Est-il possible de déformer l'un d'entre eux par une seule force ?

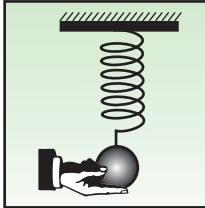


Fig .1-a

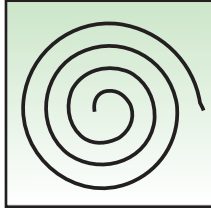


Fig .1-b



Fig .1-c



Fig .1-d

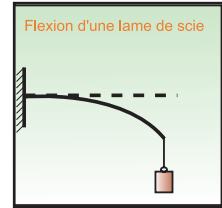


Fig .1-e

Pour déformer un ressort, un élastique, un arc ou tout autre corps déformable, il est nécessaire d'utiliser deux forces opposées au moins.

D'autres types de déformations comme les **torsions** ou les **flexions** sont obtenues par des couples de forces ; on ne peut pas tordre un linge pour l'essorer avec une seule main (Fig.2) ; là encore il faut agir avec deux couples antagonistes. La planche du plongeur est déformée en flexion par deux couples. La barre de torsion d'une suspension de voiture est déformée par le moment des forces agissant sur le bras de suspension à une extrémité et le moment des forces de réaction de la fixation au châssis à l'autre extrémité.

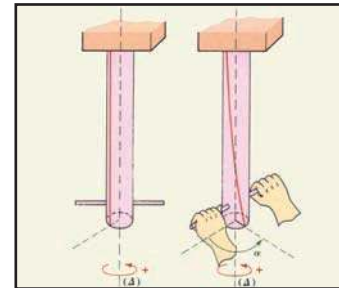


Fig .2

Activité

Comment déformer un corps gazeux enfermé dans une enceinte ?

Suspendons une petite roue de jouet par son axe à un fil de coton ; immobilisons la roue et tordons le fil de plusieurs tours à son extrémité libre et lâchons la roue (Fig.3).

Celle-ci prend immédiatement un mouvement de rotation qui s'accélère et atteint une vitesse très élevée. La roue a donc acquis une énergie cinétique.

Le fil tordu a produit un **couple moteur** qui est à l'origine de l'augmentation d'énergie cinétique de la roue.

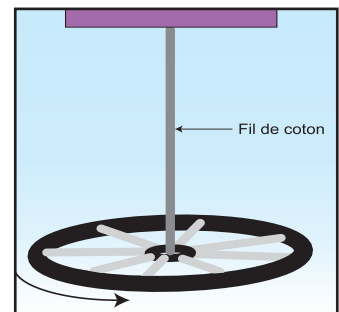


Fig .3

Lorsque le fil reprend sa forme initiale, le moment du couple moteur devient nul et la roue atteint sa vitesse de rotation maximale.

Le fil tordu a joué le rôle d'une source d'énergie qui est transférée à la roue sous forme d'énergie cinétique. Cette énergie est de nature mécanique puisqu'elle résulte de déformations d'un système.

Il en est de même de l'arc tendu qui, une fois lâché engendre des forces motrices capables de propulser la flèche avec une énergie cinétique très élevée (Fig.4).

Le bouchon d'une bouteille de boisson gazeuse qui saute avec une grande vitesse montre qu'un gaz comprimé est une source d'énergie mécanique transférée au bouchon sous forme cinétique.



Fig .4

Un corps élastique déformé est un système matériel qui possède de l'énergie.

L'arbalète ou le fusil de chasse sous-marine fonctionnent selon le même principe ; un chassis en forme de fusil sur lequel est monté soit un arc (arbalète) soit un élastique très puissant (fusil) capables de lancer à grande vitesse une flèche. Une fois bandé et chargé, le fusil peut rester dans cet état aussi longtemps que l'on voudra (Fig.5).



Fig .5

L'énergie stockée dans le corps élastique ne subit aucune déperdition puisqu'il n'y a pas de mouvement donc pas de frottement ; elle reste en « réserve » tant que les causes de la déformation n'ont pas disparu et on peut la libérer à tout moment.

Cette énergie est appelée **énergie potentielle élastique**.

Un corps élastique déformé est un système matériel qui possède de l'énergie potentielle élastique notée E_{pe} .

Si le corps élastique en se détendant entre en interaction avec un solide libre, initialement au repos, l'énergie potentielle élastique est transférée à ce solide sous forme cinétique (Fig.6).

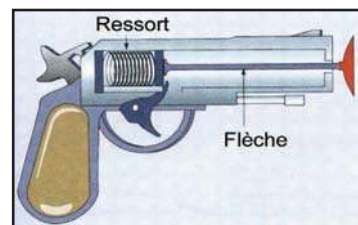


Fig .6

Remarque

Si le corps élastique (corde d'un arc) se détend sans interagir avec un solide (flèche), dans l'air par exemple, il y a toujours transfert d'énergie mécanique sous d'autres formes comme des vibrations sonores : on entend un son.

1.2- Unités et ordres de grandeur

E_{pe} s'exprime dans les mêmes unités que l'énergie ; l'unité légale d'énergie potentielle est le **joule (J)** ; on peut évidemment rencontrer toutes les autres unités signalées précédemment.

Le joule (J) est l'unité du Système International d'énergie potentielle élastique.

Quelques valeurs typiques :

- Dynamomètre qui indique 15N et qui est allongé de 10 cm
- Ressort de raideur $K = 500 \text{ N.m}^{-1}$ comprimé de 10 cm
- Ressort du balancier d'un réveil mécanique quand l'axe fait 0,5 tour

$$E_{pe} = 0,75 \text{ J}$$

$$E_{pe} = 2,5 \text{ J}$$

$$E_{pe} = 80 \text{ } \mu\text{J}$$

1.3- Facteurs dont dépend l'énergie potentielle élastique

Utilisons un lanceur à ressort fixé sur un banc à coussin d'air incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (Fig.7) ; Ce dispositif permet d'éliminer les frottements importants qui fausseraient les observations. On étudie le transfert de l'énergie potentielle élastique du ressort à spires non jointives à un solide sous forme d'énergie cinétique.

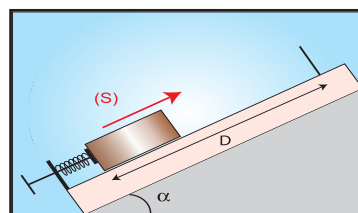


Fig .7

Comprimons le ressort d'une longueur d , le solide (S) étant en contact avec son extrémité libre ; lâchons le ressort.

Celui-ci voit son énergie potentielle élastique diminuer jusqu'à s'annuler et, simultanément, le solide (S) acquiert une vitesse. Relevons la distance maximale D parcourue par (S) quand sa vitesse s'annule avant de rebrousser chemin. Reprenons cette opération pour plusieurs valeurs de d .

Exemple : Avec un solide(S) de masse $m = 50 \text{ g}$, un ressort de raideur $K = 50 \text{ N.m}^{-1}$ et de masse négligeable devant celle de (S) et un angle du plan incliné $\alpha = 20^\circ$, on obtient :

d(cm)	3	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
D(m)	0,135	0,300	0,450	0,625	0,830	1,070

Rappel : On sait (Chap.12) que le mouvement sur un plan incliné est uniformément varié et que les distances parcourues avant le rebroussement sont proportionnelles au carré des vitesses initiales.

Le tableau montre une augmentation régulière de D en fonction de la compression d du ressort. La vitesse de lancement, donc l'énergie cinétique transférée au solide (S), augmente en fonction de la déformation.

L'énergie perdue par le ressort se retrouve intégralement acquise par le solide (S) conformément au principe de conservation de l'énergie.

L'énergie potentielle élastique E_{pe} emmagasinée par un ressort est une fonction croissante de sa déformation.

Remarque

On obtient les mêmes résultats lorsque la déformation d du ressort est une compression ou un allongement selon la configuration du lanceur utilisé. On admettra que, dans son état non déformé, le ressort ne possède pas d'énergie potentielle élastique

Utilisons le même dispositif que le précédent mais avec un jeu de ressorts de différentes raideurs connues que l'on peut substituer à celui utilisé précédemment dans le lanceur.

Donnons une compression identique d pour chaque ressort et mesurons comme précédemment la distance parcourue D.

On obtient le tableau suivant :

Données : d = 6 cm ; Angle du plan incliné $\alpha = 20^\circ$; solide (S) de masse m = 50 g.

K (N.m ⁻¹)	25	50	75	100
D (m)	0,265	0,530	0,80	1,065

Le tableau montre une progression de la distance D en fonction de la raideur K du ressort utilisé. L'énergie cinétique initiale est donc croissante comme K.

On en déduit que, pour une déformation donnée, l'énergie potentielle élastique du ressort à spires non jointives varie comme sa raideur K.

L'énergie potentielle élastique E_{pe} emmagasinée dans un ressort est une fonction croissante de sa raideur K.

On sait que la **tension** $||\vec{T}||$ d'un ressort à spires non jointives est une fonction **linéaire** de sa déformation d conformément à la **loi de Hooke** : $||\vec{T}|| = K \cdot d$. (Fig.8)

La force motrice avec laquelle le ressort agit sur le solide (S) au cours de son lancement est justement sa tension $||\vec{T}||$ qui est fonction de la constante K et de d. C'est ce qui explique que l'énergie potentielle emmagasinée dépend à la fois de la raideur du ressort utilisé et de sa déformation.

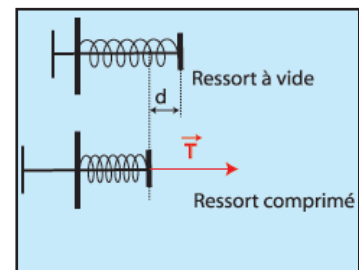


Fig .8

L'énergie potentielle élastique E_{pe} emmagasinée dans un ressort croît en fonction de sa raideur K et de sa déformation d.

Généralisation :

Quel que soit le corps élastique considéré, on peut toujours définir une énergie potentielle élastique qui est **croissante** en fonction de la déformation et des coefficients (comme la raideur) caractéristiques du corps élastique déformé (Fig.9).

Pour les gaz, on constate que l'énergie potentielle élastique emmagasinée dépend très peu de la nature du gaz comprimé quand on est loin des conditions de sa liquéfaction ; elle dépend essentiellement de la pression du gaz et de son volume.

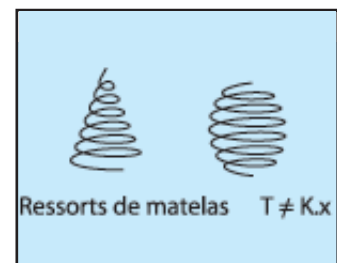


Fig .9

Exemple : Une mole d'un gaz prise à la pression atmosphérique dans les conditions où le volume molaire est égal à 24L est comprimée à température constante jusqu'à avoir un volume égal à 0,5L. L'énergie potentielle élastique emmagasinée est de l'ordre de 10 kJ.

2. Energie potentielle de pesanteur

Activité 1

Considérons l'expérience 1 du paragraphe 1.3 : quand le solide (S) atteint sa position extrême, sa vitesse est nulle. Que peut-on dire de son énergie cinétique ? Que peut-on dire de l'énergie potentielle élastique du ressort du lanceur ? Où est passée l'énergie du système étudié ? Qu'en est-il de la validité du principe de conservation de l'énergie ?

Activité 2

Le solide (S) rebrousse chemin sur le banc : quelle est la nature de son mouvement ? Expliquer l'apparition de l'énergie cinétique du solide en fin de course : quelle est la force motrice ? Quel est le système qui produit cette force motrice ?

2.1- Mise en évidence

Un solide attiré par la Terre fournit en tombant l'énergie nécessaire pour casser un autre solide, enfoncer un pieu dans le sol (Fig.10), déformer un objet... En fait sa chute s'accompagne d'une augmentation de son énergie cinétique qui, elle, fournit alors les forces motrices dont on a besoin au moment de l'interaction.

Cette énergie que la chute convertit en énergie cinétique est due à l'interaction gravitationnelle entre le solide (C) et la Terre.

Le système **(S) = {C, Terre}** est un système déformable avec des interactions à distance entre ses deux parties.

Si maintenant on lance le solide verticalement vers le haut avec une vitesse initiale (Fig.11).

Il prend de l'altitude au fur et à mesure que sa vitesse diminue ; sa vitesse s'annule à une altitude maximale. Le système (S) s'est déformé : le centre d'inertie de (C) s'éloigne du centre d'inertie de la Terre.

En se déformant le système (S) a perdu son énergie cinétique ; si on retient le solide à cette altitude il restera immobile dans cette position mais si rien ne le retient plus il peut restituer l'énergie cinétique initiale en retombant au point de départ ; l'énergie cinétique initiale a donc été momentanément tenue en « réserve » à l'altitude maximale sous une autre forme d'énergie appelée **énergie potentielle de pesanteur**.

Le système {corps(C), Terre} est un système qui possède de l'énergie potentielle de pesanteur que l'on note E_{pp}

2.2- Unités et ordre de grandeur

E_{pp} s'exprime dans les mêmes unités que l'énergie ; l'unité légale de l'énergie potentielle est le joule (J) ; on peut évidemment utiliser ou rencontrer toutes les autres unités signalées précédemment.

Le joule (J) est l'unité du Système International d'énergie potentielle de pesanteur.

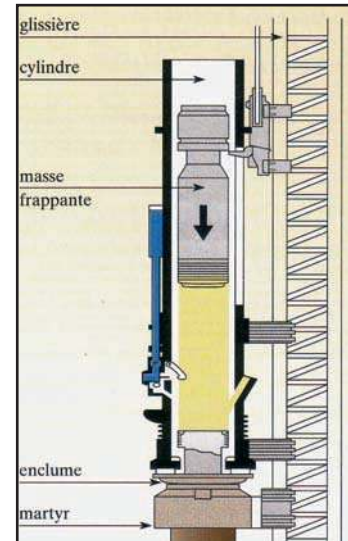


Fig .10 Le mouton est un dispositif utilisé pour enfoncer des pieux sur les chantiers.

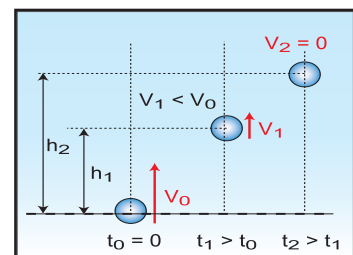


Fig .11

Valeurs typiques de l'énergie potentielle de pesanteur de quelques systèmes {corps(C), Terre} où (C) est :

- Une masse de 1 kg élevée à une hauteur de 1m au-dessus du sol : 10 J
- Un adulte qui passe de la position étendue à la position debout : environ 560 J
- 100 m³ d'eau d'un château d'eau à 15 m du sol 15.10⁶J

2.3- Facteurs dont dépend l'énergie potentielle de pesanteur

Rappelons les résultats de la chute libre, sans vitesse initiale ou avec vitesse initiale verticale, d'un corps solide à la surface de la Terre :

- La trajectoire est verticale.
- Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré si le corps est lâché sans vitesse initiale (ou avec vitesse initiale descendante verticale).
- Le mouvement de chute libre est indépendant de la masse du corps en chute.

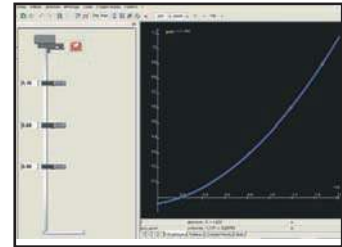


Fig .12

Mesurons à l'aide d'un capteur à cellules photoélectriques la vitesse d'un corps (C) à l'altitude Zéro après une chute libre sans vitesse initiale d'une hauteur réglable h (Fig.12).

h (m)	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
V (m.s ⁻¹)	4	4,4	4,9	5,2	5,6	5,9

La vitesse, comme prévu augmente avec l'altitude ; l'énergie cinétique E_c acquise après la chute augmente en fonction de l'altitude h ; on en déduit que l'énergie potentielle de pesanteur emmagasinée à l'altitude h augmente elle aussi avec l'altitude.

Conclusion

- Quand on éloigne le corps (C) de la Terre, on augmente l'énergie potentielle E_{pp} de pesanteur du système (S) = {corps(C), Terre}.
- Quand l'altitude du corps (C) diminue, l'énergie potentielle E_{pp} du système (S) diminue.

On peut admettre que cette énergie potentielle est nulle à l'altitude zéro choisie. Ce choix étant arbitraire, l'énergie potentielle de pesanteur ne peut pas être connue dans l'absolu ; ainsi seules ses variations sont intéressantes pour nous, d'où la nécessité de préciser le plan de référence (Fig.13).

E_{pp} est différente pour chaque observateur mais sa variation, dépendant de la différence d'altitude, est la même.

Les variations de l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} d'un système {corps, Terre} dépendent de la différence d'altitude h entre le point de départ et celui d'arrivée.

Cette variation correspond à une **diminution** si le corps est sur une **descente**.

Cette variation correspond à une **augmentation** si le corps est sur une **montée** (Fig.14).

Utilisons trois corps de masses différentes (0,5 kg ; 1 kg ; 2 kg). Ces corps sont tour à tour enfilés sur une pointe en acier ou un clou. Laissons tomber chacun de ces corps d'une même hauteur h = 1 m sur une planche en bois. Etudions l'empreinte laissée par la pointe dans chaque cas.

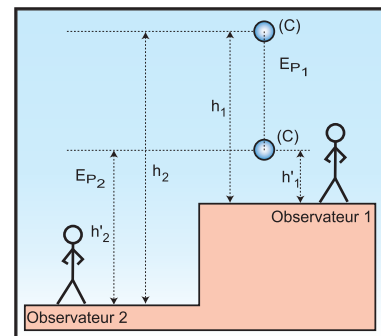


Fig .13

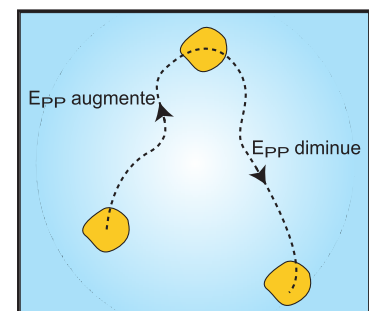


Fig .14

La vitesse d'arrivée de la pointe sur la planche est la même dans les trois cas.

- La profondeur de l'empreinte augmente quand la masse accrochée à la pointe augmente.(Fig.15)

A vitesse égale, l'énergie cinétique augmente comme la masse en mouvement , ce que l'on sait déjà.

- A altitude identique, l'énergie potentielle de pesanteur du système {corps, Terre} augmente avec la masse du corps .

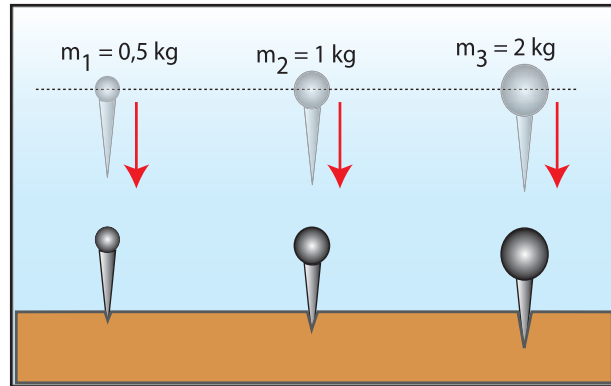


Fig .15

L'énergie potentielle de pesanteur du système {corps (C),Terre} est une fonction croissante de la masse du corps (C) et de son altitude h par rapport à un plan horizontal pris comme référence.

Le système {(C), Terre} possède de l'énergie potentielle de pesanteur en raison des interactions de gravitation entre les deux parties du système (Fig.16). Sans l'attraction terrestre sur le corps (C) cette énergie n'existerait pas. L'attraction terrestre est caractérisée en chaque lieu par le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$. On doit admettre donc que pour un même corps (C) placé à la même altitude, l'énergie potentielle de pesanteur du système {(C),Terre} dépend de la valeur $||\vec{g}||$ et donc du lieu où l'on se trouve à la surface de la Terre. En particulier si $||\vec{g}||$ augmente toutes choses égales par ailleurs, E_{pp} augmente et vice versa.

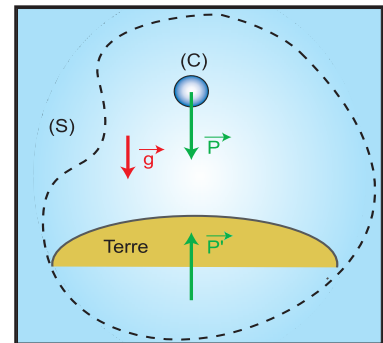


Fig .16

L'énergie potentielle de pesanteur du système {corps (C),Terre} est une fonction croissante de la masse du corps (C) , de son altitude h par rapport à un plan horizontal pris comme référence et de l'intensité de la pesanteur $||\vec{g}||$.

2.4- Applications

➤ Les barrages

Les grandes quantités d'eau de pluie qui tombe en montagne dévalent normalement les pentes vers la mer ; leur énergie potentielle se transforme en énergie cinétique qui n'a que des effets destructeurs et nuisibles : inondations, érosion... Les barrages construits sur leurs chemins (torrents, rivières, fleuves...) stockent ces eaux et ces quantités d'énergie potentielle pour les utiliser dans les stations de production d'énergie électrique (Fig.17).



Fig .17

➤ Les châteaux d'eau

La distribution de l'eau potable dans les agglomérations utilise des châteaux d'eau sur des collines qui sont de véritables réservoirs d'énergie potentielle (Fig.18) ; on réalise en fait beaucoup d'économie d'énergie en utilisant cette énergie potentielle pour faire arriver l'eau aux derniers étages des immeubles les plus élevés sans utiliser des motopompes.



Fig .18

➤ Les dangers

L'énergie potentielle de pesanteur a parfois des conséquences catastrophiques : glissements de terrain, la chute d'une météorite, d'un astéroïde...peuvent avoir des effets dévastateurs en zones habitées. En effet, une météorite atteint des vitesses de l'ordre de $40\,000\text{ km.h}^{-1}$ au voisinage de la Terre ;

les plus petites se consomment par l'effet de la chaleur due au frottement dans les hautes couches de l'atmosphère. Les plus grosses atteignent le sol avec des vitesses encore très élevées (Fig.19). On pense qu'un tel phénomène est à l'origine de la disparition des dinosaures de la surface de la Terre il y a 60 millions d'années.



Fig .19 Meteor Crater (Arizona, USA)

3. Conservation de l'énergie

Utilisons un ressort accroché par une de ses extrémité à un support fixe. A l'autre extrémité accrochons un corps (C) de masse m . Lâchons le corps (C) (Fig.20).

Le solide se met en mouvement descendant avec une vitesse croissante à mesure que son altitude diminue et le ressort s'allonge ; la vitesse diminue ensuite jusqu'à s'annuler au point le plus bas atteint par le corps. Le solide remonte ensuite jusqu'à sa **position initiale** et ainsi de suite pendant très longtemps si les frottements sont **minimisés** dans un tel système. Le système {solide (C), ressort, Terre} est tel à un certain moment que les trois formes d'énergie mécanique sont présentes simultanément. L'énergie potentielle de pesanteur de départ diminue transférée sous forme potentielle élastique et cinétique, puis le transfert s'inverse ...

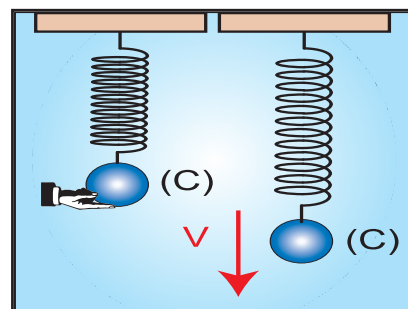


Fig .20

Le retour du système dans son **état initial** montre que l'**énergie mécanique totale** E_M est conservée $E_M = E_c + E_{pe} + E_{pp}$. Cette somme est constante à chaque instant en l'absence de toute action extérieure motrice ou résistante. On dit alors qu'un tel système est **mécaniquement isolé**.

Dans un système sans frottement et mécaniquement isolé l'énergie mécanique E_M totale est conservée. Au cours de l'évolution de ce système des transformations mutuelles des différentes formes d'énergie ont lieu.

Activité

Expliquer le fonctionnement de ce que l'on appelle « montagnes russes » ou « Grand Huit » utilisés dans les parcs d'attractions. Pourquoi les boucles n'ont pas toutes la même hauteur au-dessus du sol ?

L'essentiel du cours

Un corps élastique déformé est un système matériel qui possède de l'**énergie potentielle élastique** notée E_{pe} .

E_{pe} s'exprime dans les mêmes unités que l'énergie : le joule (J) est l'unité du Système International d'énergie potentielle élastique.

L'énergie potentielle élastique E_{pe} emmagasinée dans un ressort est une fonction croissante de sa raideur K et de sa déformation d .

Le système {corps(C), Terre} est un système qui possède de l'**énergie potentielle de pesanteur** que l'on note E_{pp} .

E_{pp} s'exprime dans les mêmes unités du Système International que l'énergie ; le joule (J) est l'unité d'énergie potentielle de pesanteur.

L'énergie potentielle de pesanteur du système {corps (C), Terre} est une fonction croissante de la masse du corps (C), de son altitude h par rapport à un plan horizontal pris comme référence et de l'intensité de la pesanteur $||\vec{g}||$.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter :

Un ressort allongé possède de l'énergie L'énergie d'un ressort déformé est une fonction croissante de sa..... et de sa L'énergie.....d'un ressort allongé est positive et celle d'un ressort comprimé est Le système (S) = {corps (C), Terre} possède de l'énergie..... L'énergie de (S).....quand l'altitude du corps (C) augmente. L'énergie du système (S) est une fonction de l'altitude du corps (C), de sa et de

2- Répondre par VRAI ou FAUX aux affirmations suivantes :

- a. L'énergie potentielle élastique peut être positive ou négative.
- b. L'énergie mécanique totale d'un système isolé sans frottement se conserve.
- c. L'énergie potentielle de pesanteur peut être définie dans un système matériel indéformable.
- d. L'énergie potentielle d'un système matériel isolé peut se transformer totalement en énergie cinétique.
- e. L'énergie potentielle de pesanteur pour un système donné est indépendante du lieu où il se trouve.
- f. Dans l'état non déformé un ressort a une énergie potentielle nulle.
- g. Un système matériel peut posséder à la fois de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.
- h. Un barrage est un réservoir d'énergie cinétique.

Je sais appliquer le cours

3- Une voiture dont on vient de faire le plein d'essence possède de l'énergie en réserve. Pourquoi ne peut-on pas dire qu'il s'agit d'énergie potentielle (au sens mécanique du terme) ?

4- On a schématisé un exercice de cirque sur la figure 21 ci-contre. On considère les systèmes $S = \{\text{acrobate A, Terre}\}$ et $S' = \{\text{acrobate B, Terre}\}$.

- Quelle forme d'énergie possède le système S ?
- Sous quelle forme se trouve l'énergie du système S quand A arrive sur la planche ?
- Quelle forme d'énergie possède l'acrobate B quand il d'écolle de la planche ?
- Quelle forme d'énergie possède le système S' quand B arrive au sommet de sa trajectoire ?
- Comment expliquer que l'acrobate B puisse atteindre une hauteur supérieure à celle à laquelle se trouvait l'acrobate A ?

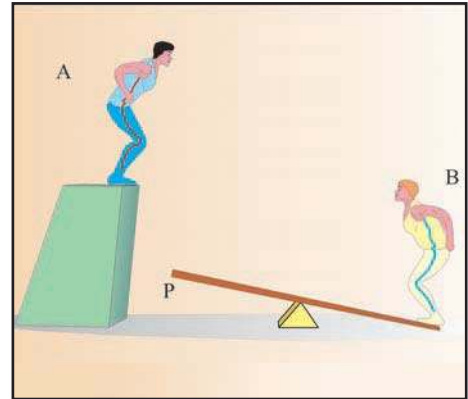


Fig .21

5- On se propose de comparer les vitesses prises par les poulies à double gorges dans les deux dispositifs identiques représentés sur la figure 22. Le fil enroulé sur la gorge de chaque poulie est tendu par un corps de masse M suspendu à la même hauteur h dans les deux cas. Dans chaque cas la poulie est lâchée sans vitesse initiale. Comparer les vitesses de rotation prises par chaque poulie quand le corps de masse M atteint le sol.

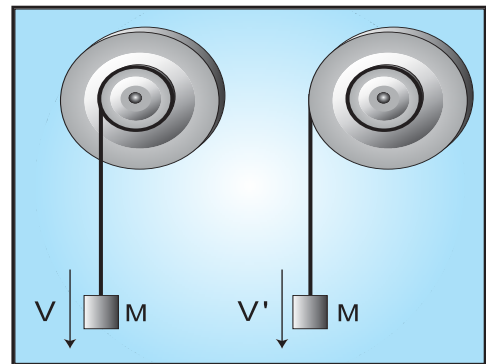


Fig .22

6- Un solide (C) est lancé d'un point A avec une vitesse $V = 10\text{m.s}^{-1}$ dans une direction faisant un angle avec la verticale. Le projectile effectue une trajectoire représentée sur la figure ci-contre (Fig.23).

- Décrire les variations subies par les différentes formes d'énergie mécanique que l'on identifiera dans le système $\{(C), \text{Terre}\}$.
- Comparer les vitesses aux points B, D, E avec la vitesse initiale V .

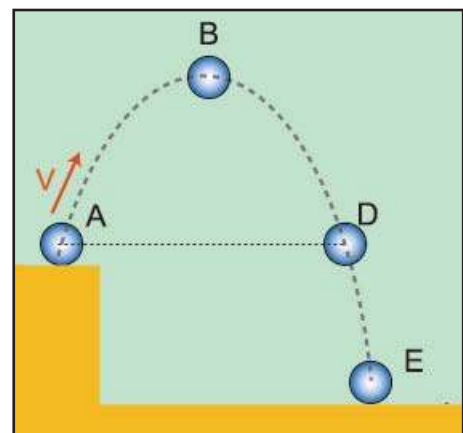


Fig .23

7- Quelles sont les formes successives d'énergie mécanique que prend le système {sauter à la perche, perche, Terre} au cours d'un saut ? Décrire de la même manière une autre discipline sportive au choix dans laquelle on observe des transformations mutuelles de l'énergie en ses différentes formes mécaniques.

- 8- Le dispositif de la figure ci-contre (Fig.24) est appelé « volant de Maxwell » ; il a donné le principe d'un jouet d'enfant appelé « yo-yo ». La roue (assez lourde) est munie d'un arbre sur lequel s'enroulent dans le même sens deux brins de fils de même longueur. Les extrémités des fils sont solidaires de l'axe. Au départ, la roue est immobile, les fils complètement enroulés sur l'arbre.

Décrire l'évolution du système à partir du moment où la roue est libérée.

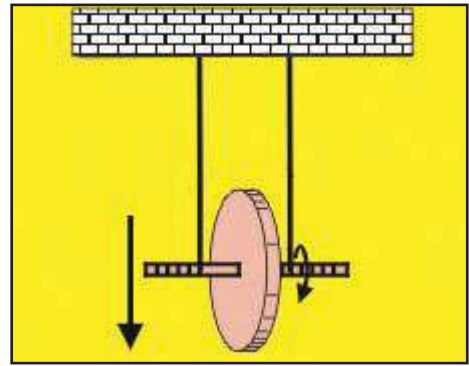


Fig .24

- 9- Un sauteur à l'élastique (C) s'élance d'un pont situé à 40 m au dessus de l'eau d'une rivière. Il est attaché à un élastique de longueur 15 m dont l'autre extrémité est fixée au pont. Sa vitesse devient nulle juste au moment où il affleure l'eau de la rivière.
- Comment varie au cours du saut l'énergie potentielle de pesanteur du système $S = \{(C), \text{Terre}\}$?
 - Comment varie au cours du saut l'énergie potentielle du système $S' = \{(C), \text{élastique}, \text{Terre}\}$?
 - Sachant que lorsque le sauteur est suspendu en équilibre à l'élastique sa longueur devient égale à 20 m, comment varie au cours du saut l'énergie cinétique du système S ?
 - Quelle serait l'évolution possible du système en l'absence de frottement ?

- 10- Un pendule est constitué d'une boule (B) de masse importante et de petit diamètre suspendue à un fil de longueur 1m fixé au point O d'un support. On écarte le pendule de sa position d'équilibre d'un angle de 60° par rapport à la verticale et on le lâche sans vitesse initiale.

- Décrire les variations successives des différentes formes d'énergie mécanique qui ont lieu dans la système $(S) = \{(B), \text{Terre}\}$ supposé sans frottement.
- Montrer que la boule atteint une position symétrique de sa position de départ par rapport à la verticale du point O (Fig 25-a).
- On plante un clou en un point A sur la verticale et au-dessous de O ; la portion de fil OA est bloquée au passage par la verticale du pendule. Déterminer la hauteur à laquelle va remonter la boule quand elle est lâchée de la même position de départ (Fig 25-b).
- Montrer que à partir d'une certaine position du point A, la boule peut effectuer un tour complet autour du clou.

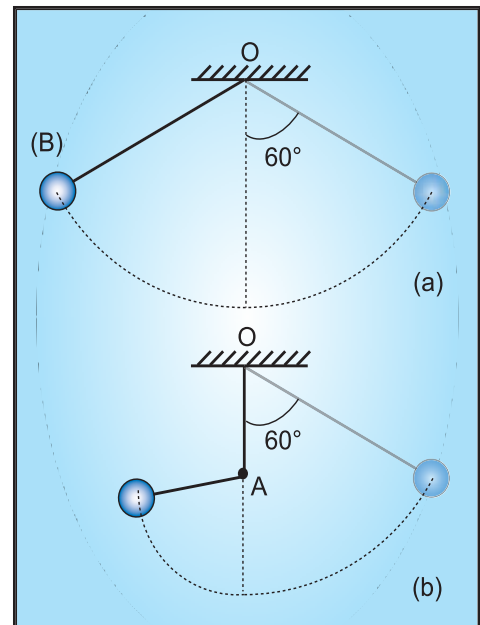


Fig .25

Peut-on transférer directement l'énergie potentielle d'un système à un autre ?

Cas de l'énergie potentielle élastique

Soit le système suivant : deux ressorts identiques sont en contact par une extrémité. L'un (R) est maintenu comprimé par un fil et l'autre (R') est au repos (Fig.26-a). Les extrémités libres sont bloquées. On brûle le fil.

(R) se détend et (R') se comprime. (R) perd seulement une partie de son énergie potentielle que (R') emmagasine (Fig.26-b).

Cette expérience simple montre qu'il est impossible de transférer **directement et intégralement** l'énergie potentielle élastique d'un système à un autre.

On ne peut le faire qu'en utilisant une autre forme d'énergie intermédiaire : l'énergie cinétique ; en mettant un solide de masse m entre les deux ressorts le transfert devient possible et oscillatoire (Fig.27).

Comment expliquer donc le transfert intégral d'énergie cinétique lors d'une collision élastique ?

Là encore, en réalité l'énergie cinétique n'est pas transférée directement mais après transformation en énergie potentielle élastique (aplatissement des boules l'une contre l'autre, puis reprise de leur forme initiale) puis en énergie cinétique. Le transfert d'énergie cinétique se fait par l'intermédiaire de l'énergie potentielle élastique et pas directement.

L'expérience avec les ressorts peut être reprise avec deux gaz à des pressions différentes enfermés dans deux enceintes que l'on peut faire communiquer par un robinet. Le résultat est le même.

Cas de l'énergie potentielle de pesanteur

Un poulie simple permet de transférer l'énergie potentielle intégralement d'un système à un autre identique avec une intervention extérieure négligeable si les frottements sont soigneusement minimisés (Fig.28). Si les masses à déplacer ne sont pas identiques, on peut remplacer la poulie par d'autres machines simples : levier, poulies à double gorges, ...

On comprend pourquoi les machines simples ne sont pas des moteurs ; elles ne font que transmettre la même forme d'énergie sans conversion ainsi que les forces. Dans les vases communicants, l'énergie potentielle du liquide enfermé dans un vase ne peut se transférer qu'en partie à un autre vase ; en effet, les liquides transmettent les pressions et pas les forces.

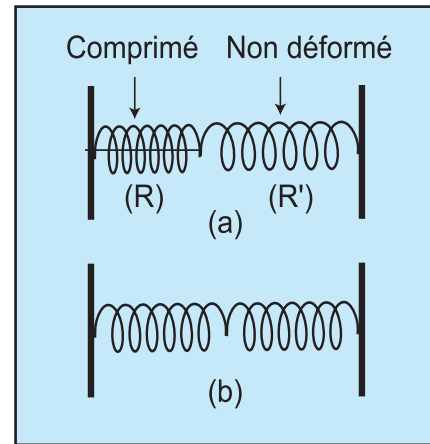


Fig .26 a-b

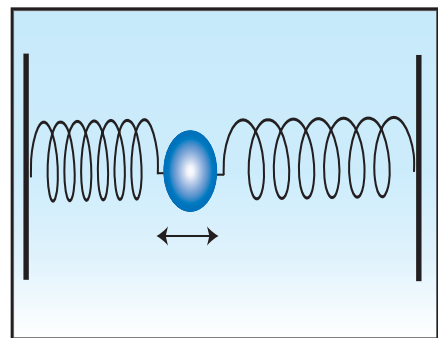


Fig .27

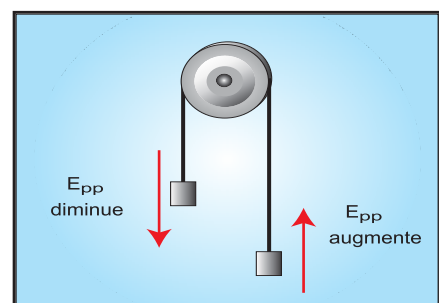


Fig .28



Incendie de forêt

Des incendies gigantesques de forêts comme celui-ci sont presque quotidiens dans le monde. Que devient l'énorme dégagement d'énergie thermique qui en résulte et quelles influences peut-il avoir sur le milieu où nous vivons ?

OBJECTIFS

- Différencier entre énergie thermique et température.
- Distinguer les différents effets de transfert d'énergie par chaleur d'un système vers un autre.
- Reconnaître les différents modes de propagation de la chaleur d'un système vers un autre.
- Expliquer le transfert d'énergie thermique par rayonnement.

Dans les chapitres précédents nous avons vu que dans un système matériel, il y a des corps qui peuvent avoir des vitesses, se déplacer les uns par rapport aux autres et modifier leurs interactions. Vitesses, positions et interactions de ces corps sont des données mesurables auxquelles nous avons associé des énergies macroscopiques :

- Au mouvement des corps est associée une énergie de mouvement appelée **Energie cinétique**.
- Aux positions (ou déformations) et aux interactions est associée une énergie de position appelée **Energie potentielle**.
- La somme de ces énergies est l'énergie mécanique E_M du système matériel.

Il existe d'autres formes d'énergie qu'un système matériel peut échanger avec le reste de l'Univers ; on peut citer en particulier l'**énergie d'origine thermique**.

1. Production de « chaleur »

Activité

- Observons autour de nous et faisons l'inventaire des moyens utilisés au quotidien pour produire de la chaleur : cuisinière à gaz ou à l'électricité (effet Joule) ; sèche-cheveux ; fer à repasser ; chauffage (à pétrole, central, bain d'huile...), chauffe-eau (à gaz, électrique, solaire), four à micro-ondes...

Relier chacun des appareils utilisés à la source d'énergie qu'il consomme (Fig.1).



Fig. 1-a



Fig. 1-b



Fig. 1-c



Fig. 1-d

Dans les conducteurs électriques, l'énergie électrique est convertie en chaleur par effet Joule ; Dans un brûleur, l'énergie d'origine chimique d'un combustible (gaz propane, pétrole...) est convertie en chaleur au cours de la réaction de combustion.

Il existe d'autres moyens de produire de la chaleur (Fig.2).

- Le cycliste qui freine dans une descente voit sa vitesse décroître et son énergie potentielle de pesanteur diminuer ; la jante de sa roue ainsi que les patins de ses freins chauffent : le freinage produit de la chaleur. C'est le **frottement** des patins sur la jante qui **produit de la chaleur** et fait **diminuer l'énergie mécanique** du système.

L'énergie mécanique est convertie en chaleur par frottement.

Les exemples qui confirment ce fait sont nombreux :

- Une météorite capturée par le champ de gravitation de la Terre pénètre à grande vitesse (40000 km.h^{-1}) dans la haute atmosphère et se consume en quelques secondes par frottement dans l'air.
- Lorsque la capsule spatiale ou la navette effectue sa rentrée dans l'atmosphère, au retour d'un voyage autour de la Terre, le revêtement extérieur voit sa température s'élever à mesure que l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de pesanteur de la navette diminuent (Fig.3).

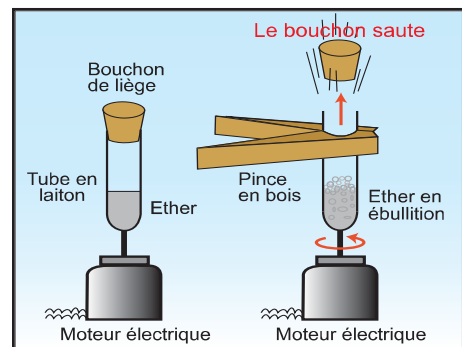


Fig. 2 Expérience de Tyndall

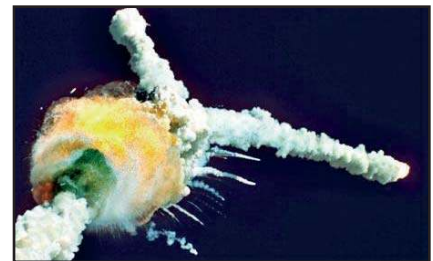


Fig. 3 Explosion de Challenger

2. Interprétation microscopique

Un système matériel est constitué de matière c'est-à-dire de molécules et atomes qui sont en interaction et en agitation permanente avec des vitesses diverses :

- Chaque molécule possède de l'énergie cinétique e_C . L'énergie cinétique totale du système due à cette agitation est à chaque instant $E_{Cm} = \sum e_{Ci}$. Cette énergie E_{Cm} peut avoir une valeur considérable sans pour autant que l'on observe un mouvement quelconque du corps à l'échelle macroscopique. C'est parce que E_{Cm} est une énergie cinétique **désordonnée** : toutes les particules ont à chaque instant des mouvements dans toutes les directions possibles avec des vitesses différentes. Directions et vitesses de ces mouvements se modifient très rapidement d'un instant à l'autre. Le centre d'inertie est finalement immobile dans un repère terrestre.

Lorsque la température du corps varie dans un sens, E_{Cm} varie dans le même sens.

- Chaque molécule interagit avec toutes les autres et ces interactions dépendent des distances et des positions entre elles. Comme pour les systèmes macroscopiques, on sait définir une énergie potentielle E_{pm} pour tout le système.

E_{pm} varie lorsque :

- le corps subit un **changement d'état** : les particules sont plus éloignées les unes des autres ou plus rapprochées.
- des **réactions chimiques** (exothermiques ou endothermiques) ont lieu entre les particules : combustion...
- des **réactions nucléaires** (réactions affectant les noyaux atomiques) ont lieu dans le système : comme les réactions qui se déroulent sur le Soleil...

Un système matériel possède donc de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle (d'interaction) à l'échelle microscopique.

La somme de l'énergie cinétique microscopique et de l'énergie potentielle microscopique est l'énergie interne (ou microscopique) du système, désignée par la lettre U , avec $U = E_{Cm} + E_{pm}$

L'énergie totale d'un système sera donc égale à la somme de son énergie macroscopique (mécanique) et de son énergie microscopique (interne) : $E = E_M + U$

Le principe de conservation de l'énergie peut être reformulé maintenant pour tenir compte de l'énergie microscopique du système :

Dans un système énergétiquement isolé, l'énergie totale est conservée

$$E_M + U = Cste$$

Ainsi, si un tel système voit son énergie mécanique diminuer, c'est que son énergie microscopique U a augmenté d'autant (Fig.4) ; cela se traduit, par exemple, par une élévation de température du corps suite à une augmentation de E_{Cm} due à la transformation d'une fraction de l'énergie mécanique (énergie macroscopique) en énergie microscopique. Pour cette raison E_{Cm} est appelée **énergie thermique** et est notée E_{th} .

Si le centre d'inertie d'un système matériel est au repos dans un repère terrestre et situé dans le plan horizontal de référence, son énergie mécanique est nulle. Son énergie totale se réduit alors à son énergie interne : $E = U$.

Ce système, s'il n'est pas énergétiquement isolé, peut échanger avec les autres systèmes de l'énergie par **chaleur** et son énergie interne peut alors augmenter ou diminuer.

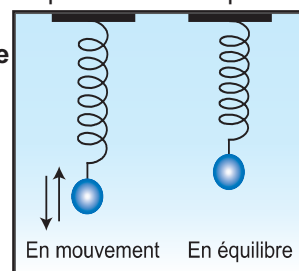


Fig .4 Le pendule élastique s'arrête au bout de quelques oscillations

3. Energie thermique et température

A une température donnée θ , les particules constituant un corps quelconque sont en agitation permanente et désordonnée avec des vitesses variant autour d'une valeur moyenne V_m .

Quand la température du corps passe à la valeur $\theta' > \theta$, l'agitation thermique augmente. La nouvelle valeur de la vitesse moyenne V'_m des particules devient supérieure à V_m . La température est un indicateur du niveau d'agitation moyen des particules ; ce niveau est repéré sur une échelle conventionnelle (échelle Celsius par exemple en « **degrés Celsius (°C)** ») ou absolue (échelle Kelvin « **K** »).

- La température est un paramètre qui caractérise l'état d'un système et en particulier l'état d'agitation à l'échelle microscopique des particules qui le constituent.
- La température θ d'un système ne mesure pas son énergie thermique.

4. Variations de l'énergie interne d'un système

Lorsque l'énergie interne d'un corps ou d'un système matériel varie suite à un transfert d'énergie par **chaleur**, des effets mesurables à l'échelle **macroscopique** peuvent nous l'indiquer comme par exemple ses variations de température.

Variation de température d'un corps (Fig. 5)

- Quand un système reçoit de l'énergie transférée par chaleur, sa température peut s'élever : l'énergie reçue a eu pour effet d'augmenter E_{cm} , c'est-à-dire le degré d'agitation moyen des particules.
- Quand un corps cède de l'énergie transférée par chaleur, sa température peut s'abaisser : l'énergie cédée a eu pour effet de diminuer E_{cm} , c'est-à-dire le degré d'agitation moyen des particules.

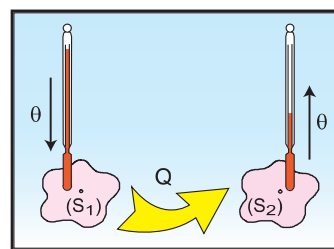


Fig. 5

Remarque

La variation de température des corps est accompagnée d'autres phénomènes macroscopiques mesurables : la dilatation ou variation de volume ; la dilatation est le signe que la distance moyenne entre les particules a varié ce qui signifie que E_{pm} a varié en même temps que E_{cm} .

Changement d'état sans variation de température

Quand un corps pur reçoit de l'énergie transférée par chaleur, sa température peut rester constante mais il subit un changement d'état : cas de la fusion d'un glaçon par exemple.

L'énergie reçue a eu pour effet d'augmenter seulement E_{pm} .

Quand un corps pur cède de l'énergie transférée par chaleur, sa température peut rester constante mais il subit un changement d'état : dans le cas de la solidification de l'eau par exemple (Fig.6).

L'énergie cédée a eu pour effet de diminuer seulement E_{pm} .

Les observations précédentes montrent que l'énergie microscopique d'un système peut varier suite à un transfert par chaleur sans que sa température varie. Cela montre que l'on ne doit confondre la température ni avec l'énergie, ni avec la chaleur.

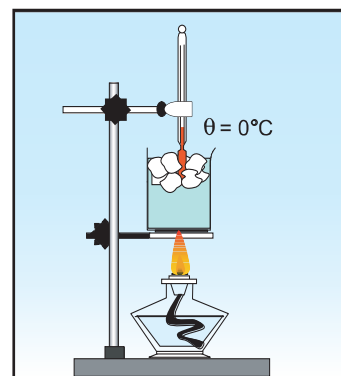


Fig. 6

La chaleur correspond à l'énergie transférée au niveau microscopique d'un système vers un autre ou à une transformation d'une forme d'énergie mécanique vers l'énergie microscopique ou l'inverse ...etc. La chaleur est un mode de transfert de l'énergie d'un système à un autre.

- La chaleur ne peut donc pas être confondue avec la température ; elle correspond à une quantité d'énergie transférée. Pour cette raison, on l'exprime en **joules (J)** et on la note habituellement par la lettre **Q**.

- La chaleur est exprimée parfois dans une autre unité fréquemment utilisée encore dans la terminologie médicale ou des sciences de la vie : la **calorie (cal)** et son multiple le **kilocalorie (kcal)**.

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = 4,185 \text{ J}$$

$$1 \text{ kilocalorie (kcal)} = 4185 \text{ J} = 4,185 \text{ kJ}$$

Remarque

L'énergie reçue ou cédée par un corps peut être suffisante pour produire à la fin du processus d'échange, à la fois une variation de température et un changement d'état physique de ce corps.

5. Modes de propagation de la chaleur

Equilibre thermique

Prenons deux petits sachets de plastiques (A) et (B) comme ceux utilisés pour emballer les denrées alimentaires, mettons dans chaque sachet de l'eau froide (à 20°C par exemple) pour le premier et chaude (à 60°C par exemple) pour le deuxième et nouons les ouvertures pour les rendre étanches. Plaçons les dans une bouteille « thermos » (Fig.7).

Sortons les deux sachets après quelques minutes et mettons, rapidement, un thermomètre en contact avec chaque sachet pour relever (à travers le plastique léger) la température de l'eau.

On lit la même température, 35°C par exemple. Le sachet d'eau chaude (B) a refroidi de 60°C à 35°C et le sachet d'eau froide (A) s'est échauffé de 20°C à 35°C.

On les remet rapidement dans la bouteille « thermos », et on attend encore quelques minutes avant de les ressortir et de relever les températures.

On lit la même température pour les deux sachets et elle est très peu inférieure à 35°C.

De l'énergie thermique s'est transférée par chaleur du sachet (B), corps **chaud**, au sachet (A), corps **froid**, spontanément et par simple contact. L'agitation thermique des particules du corps chaud s'est en partie communiquée aux particules du corps froid et ce de proche en proche jusqu'à **égalisation** des températures des deux corps. Le transfert cesse : on dit alors que les deux corps sont en **équilibre thermique**.

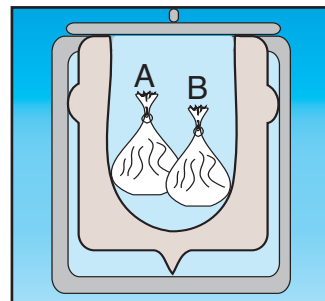


Fig .7

Propagation par conduction thermique

Prenons une tige de cuivre de 30 cm de longueur environ et de quelques millimètres de diamètre. Allumons une bougie et laissons tomber sur la tige froide des gouttes de paraffine régulièrement espacées (de 2 en 2 cm par exemple). Chauffons l'extrémité de la tige (au contact d'une flamme ou d'une résistance chauffante sous tension) (Fig.8).

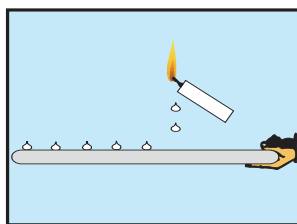


Fig .8-a

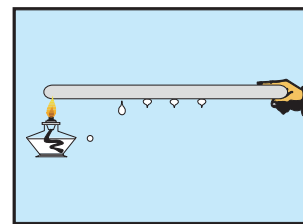


Fig .8-b

Les gouttes de paraffine solidifiées commencent à fondre et se décoller une par une à partir de l'extrémité chauffée en allant vers l'extrémité froide ; cette dernière devient rapidement brûlante.

De la chaleur s'est propagée d'une extrémité à l'autre de la tige.

Les particules constituant les gaz de la flamme (corps chaud) communiquent une partie de leur énergie cinétique microscopique aux atomes de la tige de métal (corps froid) ; cette agitation thermique se transmet de proche en proche dans le métal des zones chaudes vers les zones froides : c'est le phénomène de la **conduction thermique**.

La propagation d'énergie par chaleur s'effectue spontanément dans un solide par conduction, sans transport de matière, des parties chaudes vers les parties froides. La conduction cesse quand la température du solide devient uniforme.

Réalisons l'expérience schématisée (Fig.9) où les deux systèmes sont reliés par l'intermédiaire d'une lame de cuivre.

Le transfert thermique s'effectue de l'eau chaude vers l'eau froide par chaleur à travers la lame métallique jouant le rôle d'un **conducteur thermique**.

Si on remplace cette lame métallique par une tige en bois ou en plastique le transfert ne s'effectue plus.

- Les métaux sont de bons conducteurs de la chaleur ou **conducteurs thermiques**.
- Le bois, le plastique, le verre, l'air... sont de mauvais conducteurs de la chaleur. On les appelle des **isolants thermiques**.

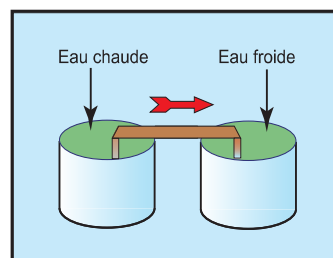


Fig .9

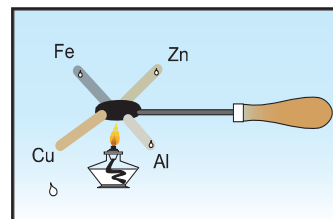


Fig .10

Les métaux sont-ils aussi bons conducteurs de la chaleur les uns que les autres ?

Réalisons l'expérience avec l'étoile des métaux usuels (Fig.10) : quatre tiges de même longueur en cuivre , fer , zinc et aluminium sont encastrées dans une pièce cylindrique en laiton fixée au bout d'un manche muni d'une poignée en bois. Chaque tige comporte un creux à son extrémité libre dans lequel on peut fixer un petit morceau de paraffine ou de cire à bougie. Chauffons le coeur de l'étoile à l'aide d'un bec de gaz ou un bec électrique.

La cire fond aux extrémités des tiges après quelques minutes successivement à l'extrémité de la tige de cuivre d'abord, puis d'aluminium, de zinc et enfin de fer.

Les métaux sont de bons conducteurs thermiques mais ils n'ont pas tous la même **conductivité thermique**.

Activité

Faire des recherches sur la conductivité thermique des métaux et réaliser un tableau de classement du meilleur conducteur thermique au plus mauvais ; comparer ce tableau avec celui que l'on trouve au chapitre 2 concernant la conductivité électrique des métaux. Que peut-on en déduire ?

Les métaux sont de meilleurs conducteurs thermiques que le reste des matériaux et ils sont aussi de bons conducteurs électriques ; cela s'explique par la présence des **électrons libres** de conduction qui se déplacent librement et facilement à l'intérieur du métal et qui contribuent par leur agitation à la propagation rapide de la chaleur dans le reste du réseau cristallin.

Propagation par conduction thermique

Prenons une petite hélice en papier ou en plastique léger et suspendons la horizontalement au-dessus d'une lampe à incandescence ou d'une bougie allumées (Fig.11).

Elle se met à tourner assez rapidement au bout de quelques minutes. Un courant d'air chaud ascendant est la cause de ce mouvement.

Mettons une cuvette assez large à moitié remplie d'eau sur la flamme d'un bec de gaz en veillant à bien la centrer sur le fond de la cuvette. Mettons, après quelques minutes de chauffage, une goutte d'encre (ou une petite quantité de café moulu) au centre de la surface libre de l'eau.

La goutte se disperse d'abord horizontalement dans toutes les directions ; on constate qu'il s'établit ensuite au sein du liquide des déplacements de matière formant des courants dits de convection.

Le liquide chaud se met en mouvement ascendant à partir du centre du fond de la cuvette et se mélange avec le reste du liquide plus froid pour élever sa température.

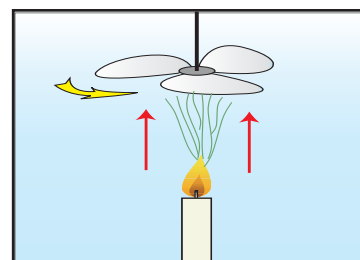


Fig .11

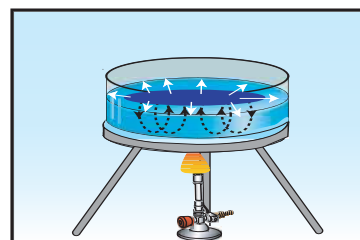


Fig .12

Dans les liquides et les gaz (les fluides en général) la propagation de la chaleur s'effectue spontanément par déplacement de matière c'est-à-dire par convection. Les mouvements de convection cessent dès que la température du fluide est uniforme.

Activité

Pourquoi l'air chaud prend-il un mouvement ascendant au dessus de la lampe ? Comment s'établissent dans le liquide les courants de convection ? Expliquer le principe de fonctionnement du chauffage d'une pièce à la maison par un radiateur (à pétrole, électrique ou autre) placé au niveau du sol. Pourquoi par contre place-t-on un climatiseur près du plafond ? (Fig.13 a-b).



Fig .13 -a



Fig .13 -b

Activité de recherche

- Certains phénomènes naturels climatiques s'expliquent par ce mouvement de convection créé en raison des différences de température entre les masses d'air et les masses d'eau autour de la Terre. Ce mouvement est responsable de la formation des courants marins dans les océans et de la formation des vents et des nuages.
- Rechercher des informations sur le fonctionnement d'une montgolfière (Fig.14).



Fig .14

Echanges thermiques entre un système et le milieu extérieur

Dans les expériences précédentes on a choisi des situations où un des modes est privilégié mais les autres modes de propagation sont tout de même présents et participent aux échanges thermiques.

Les échanges thermiques entre un système et le milieu extérieur s'effectuent très souvent selon les deux modes de propagation simultanément.

6. Transfert d'énergie thermique par rayonnement

Mettons une lentille devant une lampe à incandescence à filament réduit (lampe de spot) ; Cherchons à l'aide d'une feuille de papier l'endroit où la tache de lumière est la plus concentrée. Plaçons à cet endroit le réservoir d'un thermomètre.

La température indiquée par le thermomètre se met à augmenter rapidement (Fig.15).

Un transfert d'énergie s'est effectué entre la lampe (corps chaud) et le thermomètre (corps froid) par **rayonnement** et non pas par chaleur.

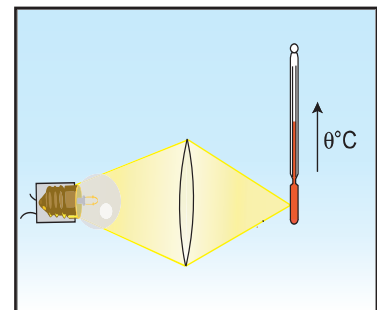


Fig .15

Remarque

Le transfert d'énergie par rayonnement est ordonné. On peut contrôler sa direction et son sens.

Intercalons entre le faisceau de lumière et le thermomètre une épaisseur d'eau contenue dans une petite cuve parallélépipédique. La tache de lumière la plus concentrée reste située pratiquement au même endroit et son intensité n'a apparemment pas diminué. Remettons le thermomètre en place.

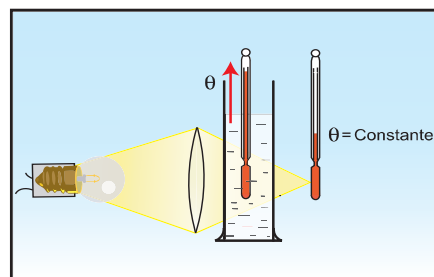


Fig .16

La température du thermomètre ne s'élève que de manière à peine perceptible. Par contre à la longue, c'est l'eau de la cuve qui voit sa température s'élever. Le transfert d'énergie s'est effectué maintenant entre la lampe et l'eau qui est un corps transparent (Fig.16).

En réalité l'eau absorbe le rayonnement infrarouge (I.R.) qui est le plus efficace dans les transferts thermiques. C'est par **absorption** que ce rayonnement est converti en énergie thermique (microscopique) reçue par la matière ; l'agitation thermique des particules de la matière augmente alors, et le thermomètre indique la température correspondante.

Le rayonnement n'est pas de la chaleur mais de l'énergie rayonnante (lumière) qui peut se propager dans le vide ou la matière transparente. C'est par absorption par la matière que cette énergie rayonnante est convertie en énergie thermique.

le Soleil émet des radiations lumineuses qui traversent le vide interplanétaire, puis l'atmosphère qui en réfléchit ou absorbe une partie et atteignent la Terre ; elles sont soit absorbées par les corps et contribuent à augmenter leur énergie thermique, soit réfléchies par la surface du sol et des océans.

Activité

La couleur d'un corps a-t-elle une influence sur sa capacité à absorber plus ou moins facilement le rayonnement ? Imaginer une suite à l'expérience précédente qui met en évidence cette relation si elle existe.

Applications

- Le mode de transfert de l'énergie par rayonnement est en particulier exploité dans les fours à micro-ondes (Fig.17). Un dispositif électronique convertit l'énergie électrique du secteur en rayonnement particulier, dit **micro-ondes** (de même nature électromagnétique que les ondes radio ou de télécommunication). Ce rayonnement est dirigé vers les aliments à cuire ou à chauffer qu'il pénètre en profondeur et où il est absorbé; l'énergie rayonnante est ainsi convertie en énergie thermique dans la masse et les aliments sont cuits ou chauffés en profondeur et pas seulement en surface.



Fig .17

- Réciproquement, l'agitation thermique des molécules d'un corps chaud entraîne une émission de rayonnement I.R et occasionne des pertes de l'énergie thermique.

Exemple : le filament d'une lampe à incandescence transforme 80% de l'énergie électrique reçue sous forme de rayonnement infrarouge et le reste seulement en lumière visible.

Remarque

Dans un bilan thermique il faut tenir compte des échanges d'énergie par rayonnement entre les systèmes.

Activité

Rechercher des situations expérimentales dans lesquelles on peut mettre en évidence des transferts thermiques entre un système et le milieu extérieur par chaleur (selon les deux modes en même temps) et par rayonnement.

7. Utiliser l'énergie thermique

Peut-on conserver l'énergie thermique ?

Activité

- Chercher dans une encyclopédie scientifique, le sens du mot « **vase Dewar** » (Fig.18-c) ; chercher une bouteille « **thermos** » qui ne conserve plus très bien « au chaud » les liquides qu'on y verse ; démonter avec précaution son habillage extérieur en plastique pour garder uniquement le récipient en verre ; comparer avec la description du « vase Dewar ».
- Quels sont les modes de propagation de la chaleur que l'on cherche à empêcher dans cette bouteille thermos ? Pourquoi la bouteille endommagée ne remplit-elle plus très bien sa fonction ?
- Dans quels sens s'effectuent les transferts d'énergie quand on met un liquide chaud dans la bouteille en hiver ? Quand on met un liquide glacé dans la bouteille en été ?



Fig .18-a



Fig .18-b



Fig .18-c

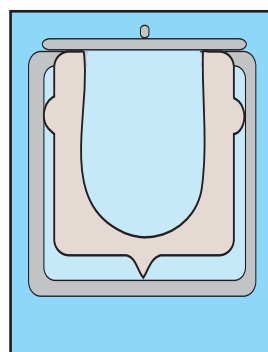


Fig .18-d

Pour maintenir constante l'énergie interne U d'un système matériel, et donc conserver en particulier l'énergie thermique qu'il possède, il faut bloquer tous les modes d'évasion de cette énergie vers le milieu environnant. On dit alors que l'on procède à l'**isolation thermique** du système.

- Les pertes par conduction sont bloquées en entourant le corps ou le système par un bon isolant solide : liège, polystyrène expansé, mousse de plastique, paille...
- Les pertes par convection sont bloquées en empêchant l'air ou tout autre fluide de circuler librement au contact du système : on fait le vide par exemple autour de lui, on ne laisse pas d'espace entre le corps et l'isolant solide.
- Les pertes par rayonnement sont minimisées en utilisant des parois réfléchissantes autour du corps.



Fig .19

Une enceinte qui répond à ces critères est une **enceinte adiabatique** ou **enceinte calorifugée**: la bouteille thermos (Fig.18-a), la glacière de plage (Fig.18-b), le réfrigérateur (Fig.19)... sont pratiquement des enceintes adiabatiques.

Un système placé dans une enceinte adiabatique est un système **thermiquement isolé**.

Il est cependant difficile en général de conserver l'énergie interne $\mathcal{U}$ d'un système matériel constante pendant un temps très long.

L'énergie thermique ne peut être conservée que pendant des durées très courtes.

Peut-on transférer l'énergie thermique par chaleur à grande distance ?

Dans une installation de chauffage central la chaudière se trouve à quelques mètres des radiateurs ; la circulation de l'eau chaude est forcée par des pompes et non par convection naturelle.

Dans certains pays ,au sous-sol volcanique (Islande par exemple) on exploite des gisements géothermiques pour le chauffage public; l'eau chaude est pompée sur quelques kilomètres et chauffe des villes entières. On accepte les déperditions en cours de route parce que cette énergie est gratuite.

Le transfert de l'énergie thermique par chaleur sur de longues distances n'est pas possible sans des pertes qui rendent le procédé peu rentable.

Le transfert de l'énergie thermique par chaleur est possible sur de courtes distances en utilisant une circulation de **caloporteur** (fluide assurant le transport de l'énergie entre la source chaude et le corps froid).

C'est le cas d'une centrale nucléaire pour la production d'électricité : le cœur chaud du réacteur de la centrale chauffe l'eau qui se transforme en vapeur faisant tourner les turbines pour produire de l'électricité. Cette dernière peut alors être distribuée sur de très longues distances (Fig.20).



Fig .20 Centrale thermique

Peut-on convertir l'énergie thermique en énergie mécanique ?

Refaisons l'expérience historique de Tyndall ; elle permet de montrer que non seulement le frottement produit la chaleur, mais, lorsque le bouchon saute, que l'énergie reçue par l'éther peut se transformer en énergie cinétique .

Cette expérience donne le principe de tous les **moteurs thermiques** (Fig.21) de l'ère industrielle. Les moteurs thermiques sont des convertisseurs de l'énergie thermique en énergie mécanique.

L'énergie thermique, énergie d'agitation et de désordre microscopiques, peut ainsi être convertie en énergie mécanique c'est-à-dire en mouvement macroscopique ordonné dans un moteur thermique.

S'il est très facile par frottement de convertir totalement l'énergie mécanique en énergie thermique, donc de passer de l'ordre au désordre, il n'est par contre pas possible de faire totalement le contraire.

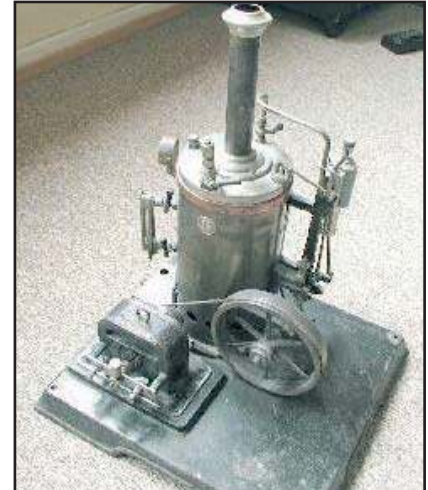


Fig .21 Machine à vapeur

On ne peut donc convertir que partiellement l'énergie thermique d'un système en énergie mécanique.

Toutes les machines thermiques qui ont été inventées fonctionnent sur ce principe même avec un rendement médiocre.

Activité

Faire une recherche documentaire sur le principe de fonctionnement de la machine à vapeur, du moteur à explosion, du moteur Diesel, et des autres types de moteurs thermiques utilisés actuellement : réacteur d'avion, turbine à vapeur...



Fig .22 Moteur Diesel

8.Puissance thermique

On sait que tout transfert d'énergie a une durée et s'effectue avec un certain débit appelé **puissance**. On peut donc définir pour les transferts thermiques une **puissance** thermique $\mathcal{P}_{th}$ moyenne telle que, si Q est l'énergie transférée par chaleur et Δt la durée du transfert :

$$\mathcal{P}_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$\mathcal{P}_{th}$ en watts (W) quand Q est exprimée en joules (J) et Δt en secondes (s).

La puissance thermique est une notion très importante à connaître lorsque l'on veut **adapter** le transfert d'énergie thermique entre un système **donneur** ou **source** et un système **récepteur** ; il y a une grande analogie avec le problème de l'adaptation d'un générateur électrique à un récepteur.

On ne soude pas un résistor dans un circuit avec un chalumeau destiné à la soudure des tubes de cuivre.

Une puissance thermique élevée peut très bien détruire le système qui la reçoit.

C'est ce qui se passe lorsque l'on a la sensation de brûlure quand on touche un corps trop chaud : des cellules de notre peau sont détruites presque instantanément et notre sens du toucher nous renseigne par la sensation de douleur qui en résulte.

Activité expérimentale

Objectifs

- Etablir expérimentalement la relation entre la variation de la température d'un corps pur de masse donnée et la quantité d'énergie transférée par chaleur d'un système (S) vers ce corps.
- Etablir expérimentalement la relation entre la quantité d'énergie transférée par chaleur d'un système (S) vers un corps et sa masse pour une même variation de la température de ce corps.
- Utiliser une enceinte adiabatique ou calorimètre pour évaluer des transferts d'énergie thermique.

Matériel

- Un calorimètre de laboratoire ou une bouteille de type « thermos » avec agitateur.
- Un thermomètre au $1/5^{\circ}\text{C}$ ou mieux .
- Un conducteur ohmique de résistance de l'ordre de 5 à 10Ω (découpé dans une « résistance » de réchaud du commerce).
- Une alimentation stabilisée, des fils de connexion , un voltmètre , un ampèremètre , un chronomètre .
- Un liquide non conducteur dont la masse volumique est connue: du pétrole par exemple.

Manipulation

- 1- Etudier la constitution du calorimètre ; en faire une description et essayer d'expliquer comment il joue son rôle d'enceinte adiabatique.
- 2- Mettre une masse m donnée de pétrole dans le calorimètre. Relier les extrémités du conducteur ohmique en série avec un ampèremètre et un générateur ; le voltmètre est branché en parallèle sur le générateur ; régler l'intensité dans le circuit à la valeur désirée hors du calorimètre. Laisser refroidir.
- 3- Plonger le conducteur ohmique dans le liquide ; Relever la température de départ et envoyer le courant dans le circuit en mettant simultanément le chronomètre en marche.
- 4- Dresser un tableau mettant en relation la durée du passage du courant dans le conducteur ohmique et la variation de température du liquide. Conclure. Le résultat est-il prévisible théoriquement ?
- 5- Reprendre le même protocole expérimental pour établir une relation entre la quantité d'énergie reçue Q et la masse m de pétrole chauffée.
- 6- Conclure en donnant l'expression de Q en fonction de m et $\Delta\theta$.
- 7- Quel protocole expérimental peut-on imaginer après cette conclusion pour vérifier la loi de Joule avec le même dispositif.

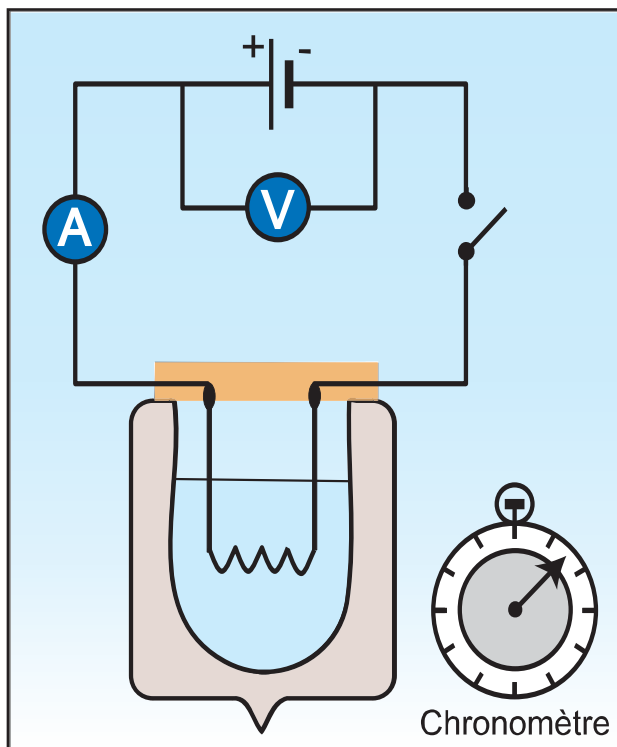


Fig .23

L'essentiel du cours

L'énergie totale d'un système matériel est égale à la somme de son énergie mécanique (à l'échelle macroscopique) et de son énergie interne (microscopique) : $E = E_M + U$

L'énergie interne ou microscopique d'un système matériel est égale à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle microscopiques : $U = E_{Cm} + E_{pm}$

E_{Cm} est appelée **énergie thermique** du système et elle est notée E_{th} .

Les transferts d'énergie microscopique dans un système ou entre deux systèmes s'effectuent par **chaleur**. L'énergie transférée par chaleur est notée Q et elle s'exprime en joules (J).

L'unité d'énergie thermique dans le Système International est le **joule (J)**.

Dans un système énergétiquement isolé, l'énergie totale est conservée

$$E_M + U = Cste$$

La température caractérise l'état d'un système et en particulier l'état d'agitation à l'échelle microscopique des particules qui le constituent. La température ne doit pas être confondue avec l'énergie thermique.

- L'énergie thermique reçue ou cédée par un système a pour effets:
 - ▶ soit, respectivement, une élévation ou un abaissement de sa température accompagné d'une variation de volume (dilatation, contraction),
 - ▶ soit son changement d'état physique à température constante,
 - ▶ soit les deux à la fois.
- La chaleur peut se propager **spontanément** :
 - ▶ sans transport de matière, par **conduction** dans les solides
 - ▶ avec transport de matière par **convection** dans les fluides. Sa propagation cesse lorsque la température est uniforme dans tout le système..
- L'énergie peut être transférée d'un système à un autre par **rayonnement** (émission et absorption de rayonnement). Le rayonnement n'est pas de la chaleur.
- Entre deux corps à températures différentes, le transfert d'énergie a lieu spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid jusqu'à ce que l'**équilibre thermique** soit atteint.
- Les transferts thermiques entre systèmes ou entre un système et le milieu extérieur, ont lieu souvent à la fois par chaleur et par rayonnement.
- L'énergie mécanique peut être intégralement convertie en énergie thermique (par frottement).
- L'énergie thermique ne peut que partiellement être convertie en énergie mécanique par les moteurs thermiques.
- Une enceinte qui empêche tout échange d'énergie thermique entre un système et le milieu extérieur est appelée **enceinte adiabatique** ou enceinte **calorifugée**.
- Un système placé dans une enceinte adiabatique est un système **thermiquement isolé**.

Un transfert thermique est caractérisé par sa **puissance thermique**

$$P_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

P_{th} en watts (W) quand Q est exprimée en joules (J) et Δt en secondes (s).

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter ou barrer le mot inexact entre parenthèses

- Les transferts d'énergie thermique entre un système et le milieu extérieur s'effectuent selon deux modes qui sont..... et

- Quand un corps est placé dans une enceinte dite adiabatique ou....., on dit qu'il est
- Lorsqu'un corps reçoit une quantité de chaleur Q , la forme d'énergie qu'il possède et qui est modifiée est Cette énergie (augmente / diminue).
- Les échanges thermiques entre deux systèmes cessent lorsque ces deux systèmes sont en Deux corps sont en lorsque leurs températures sont
- Le transfert d'énergie thermique se fait toujours du corps le plus.....vers le corps le plus

2- Recopier et compléter les phrases suivantes par les mots quantité de chaleur ou température

- Par une journée d'hiver, une.....de 3°C est une très basse.
- Quand on chauffe de l'eau, on lui donne une et sa s'élève.
- Un aliment placé dans la chambre froide d'un réfrigérateur voit sa.....diminuer ; il cède.....
- Un corps dont la.....augmente n'a pas nécessairement reçu.....
- La.....caratérise un état du système ; la représente un transfert d'énergie.

3- Répondre par VRAI ou FAUX aux affirmations suivantes et justifier la réponse

- L'énergie rayonnante peut être transférée par conduction ou par convection.
- La température d'un corps augmente toujours lorsqu'il reçoit une quantité de chaleur.
- La conduction est un transfert d'énergie par chaleur avec transport de matière.
- L'énergie thermique passe spontanément d'un corps froid à un corps chaud.
- Une quantité de chaleur transférée s'exprime en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- Le joule (J) et la calorie (cal) sont les unités légales d'énergie thermique.
- Lorsqu'un corps pur subit un changement d'état physique , aucun échange d'énergie avec le milieu extérieur n'a lieu.
- Le frottement permet de convertir intégralement l'énergie mécanique d'un système en énergie thermique.
- Un moteur thermique permet de convertir intégralement l'énergie thermique d'un système en énergie mécanique.
- Un corps dont la température est en train de baisser est un corps qui transfère de l'énergie thermique au milieu extérieur.

Je sais appliquer le cours

- 4-** Quand on touche à main nue un bloc de polystyrène expansé on a la sensation qu'il est chaud. Essayer d'interpréter ce phénomène.
- 5-** Le texte suivant est un extrait des consignes données aux stagiaires en formation d'électronicien-monteur : « Pour souder ou dessolder, à l'étain sur une plaque de circuit, des composants très petits et fragiles (comme les diodes, les diodes LED , les résistors de faible puissance ...), il est **nécessaire** de serrer la patte à souder entre les mâchoires d'une pince placée entre le composant et le fer à souder. Cette technique évitera un échauffement excessif des composants au cours de sa soudure qui risque d'entraîner la modification de ses caractéristiques ou sa détérioration. »

- 5.1- Recenser les mots qui sont relatifs à un transfert d'énergie par chaleur entre deux corps.
- 5.2- Expliquer comment le transfert d'énergie thermique peut atteindre le corps du composant quand on met en contact le fer à souder avec l'une de ses pattes.
- 5.3- Expliquer le rôle de la pince dans la protection du composant d'un échauffement excessif.

6- On mesure, il n'y a pas longtemps la vitesse des projectiles d'armes à feu avec le dispositif suivant : on tire une balle en plomb sur une plaque d'acier très dur sur laquelle elle s'aplatit et tombe presque immédiatement dans un calorimètre contenant de l'eau placé au-dessous. Expliquer les différentes formes d'énergie mises en jeu et leurs transformations mutuelles. Que doit indiquer le thermomètre placé dans l'eau du calorimètre.

7- On tire une balle dans un bloc de glace dans lequel elle pénètre et s'immobilise. On suppose que le bloc de glace ne bouge pas. Décrire les différentes transformations mutuelles de l'énergie mise en jeu et leurs conséquences observables.

8- On introduit dans un congélateur 250g d'eau pure à 18°C. Après un temps de fonctionnement on récupère de la glace à la température de -15°C.

- 8.1- Décrire les échanges thermiques qui ont lieu entre le congélateur et l'eau et leur sens lorsque la température passe successivement de 18°C à 0°C, puis de 0°C à -15°C.
- 8.2- Décrire les échanges thermiques qui ont lieu entre les mêmes systèmes au cours du changement d'état de l'eau.
- 8.3- Préciser à chaque étape les énergies microscopiques qui ont été modifiées et le sens de la modification.

9- Pour porter l'eau d'un chauffe-eau électrique de la température ambiante à la température d'utilisation, on utilise un conducteur ohmique parcouru par un courant de 15A sous une tension de 220V pendant 3 heures. Quand on coupe le courant, la même quantité d'eau met 24 heures pour retrouver sa température initiale. On suppose que seulement 85% de l'énergie électrique est consommée par le chauffage de l'eau.

- 9.1- Evaluer l'énergie thermique reçue par l'eau durant le chauffage.
- 9.2- Proposer une explication à la perte des 15% d'énergie au cours du chauffage
- 9.3- Calculer la puissance thermique de fuite de la chaleur du chauffe-eau. Quels sont les modes de propagation possibles de la chaleur hors de l'enceinte du chauffe-eau.

10- Une tige de cuivre tenue par une extrémité à main nue par un artisan est aplatie à son autre extrémité sur une enclume avec un marteau ; l'artisan constate après quelques coups que l'extrémité qu'il tient est chaude.

- 10.1- Faire l'inventaire de toutes les formes d'énergie mises en jeu au cours de cette opération.
- 10.2- Expliquer les différents transferts d'énergie entre les systèmes suivant : l'artisan ; le marteau ; la tige et l'enclume.
- 10.3- Comment expliquer l'échauffement de l'extrémité tenue à la main par l'artisan ?

La géothermie

Le noyau du globe terrestre émet un flux de chaleur provenant de son refroidissement résiduel et de la radioactivité de certains corps (uranium, thorium, potassium, etc.). Il en résulte un flux moyen de 60 mW/m^2 à la surface. Ce flux est donc bien inférieur à celui de l'énergie solaire auquel est soumise la Terre (340 W/m^2 en moyenne). Cependant, dans certaines zones, ce flux peut s'élever à 200 mW/m^2 et créer une accumulation de chaleur dans des nappes aquifères que l'on peut exploiter industriellement. Le rythme d'exploitation est toujours supérieur aux apports du flux de chaleur, et l'on doit donc veiller à ne pas trop densifier les zones d'exploitation qui mettront des dizaines ou des centaines d'années à se reconstituer.

La variation, par mètre de profondeur selon un axe vertical, de la température est un paramètre primordial, compte tenu du fait que le coût des forages croît très rapidement avec la profondeur. Une variation minimale de $0,025^\circ\text{C/m}$ est requise, mais des variations de l'ordre de $0,12^\circ\text{C/m}$ sont possibles localement, comme en certains points du Bassin parisien.

Selon la qualité de la ressource géothermale, différentes applications peuvent être développées :

Schéma a (Fig.24-a) :

- La géothermie à basse température (de 50 à 100°C) est utilisée principalement pour le chauffage de locaux, via des réseaux de chaleur, et de façon plus marginale pour le chauffage de serres ou l'aquaculture. En 1995, la puissance installée mondiale était de $4,1 \text{ GW}$ thermiques, dont 270 MW en France où l'équivalent de $200\,000$ logements sont chauffés par des réseaux de chaleur alimentés par soixante-six installations. On peut aussi rattacher à cette géothermie l'utilisation de pompes à chaleur utilisant des nappes phréatiques à faible profondeur ou des « sondes géothermales », forages de 50 à 100 mètres permettant de récupérer des calories du sol pour chauffer une habitation.

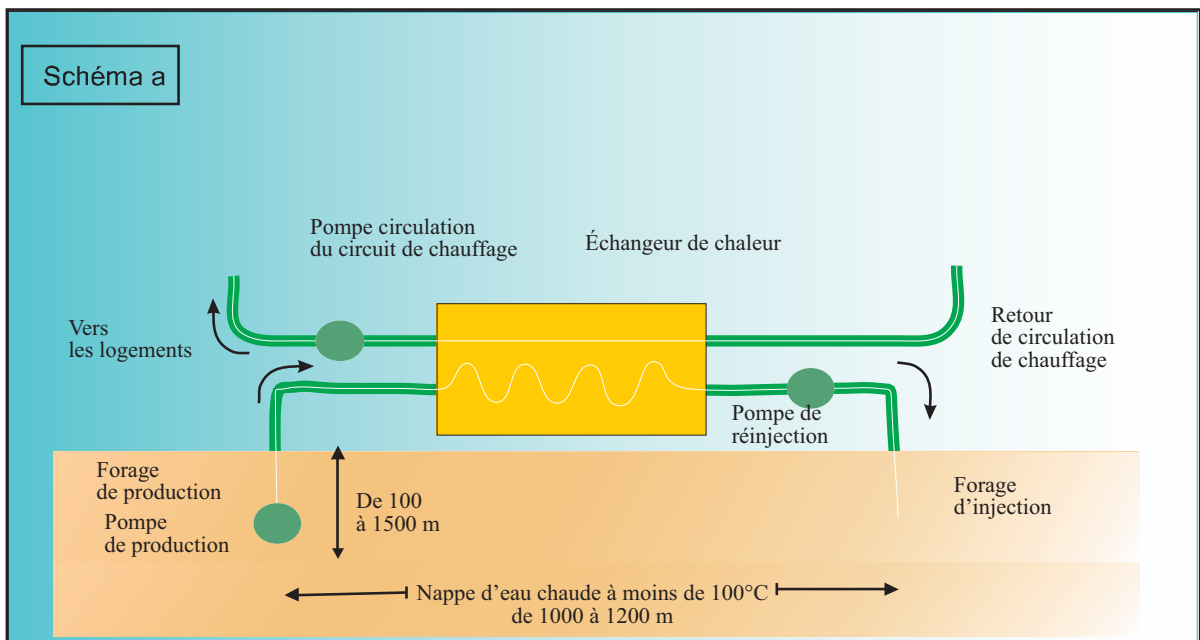


Fig .24-a

Schéma b (Fig.24-b) :

- La géothermie à haute température permet de produire de l'électricité soit par exploitation directe de la vapeur si les températures sont suffisantes (170 à 200 °C à Larderello en Italie, près de Pise, ou dans les champs des geysers en Californie), soit par le biais de l'évaporation d'un fluide organique si les températures sont insuffisantes (de 120 à 170 °C). En 1995, la puissance installée mondiale était de 6,9 GW (5 MW en France, grâce à la centrale de Bouillante en Guadeloupe) et l'on prévoyait plus de 9 GW en l'an 2000.

- Lorsque l'on dispose d'une source de chaleur (de 170 à 220 °C) à moins de 5 kilomètres de profondeur, mais qu'il n'y a pas de nappe phréatique permettant son exploitation, comme dans le cas des socles granitiques, on peut créer artificiellement une circulation d'eau entre deux forages par fracturation hydraulique préalables. C'est la technique de « roches chaudes et sèches », qui fait l'objet d'un programme pilote européen à Soultz, en Alsace. Les essais d'injection et de circulation d'eau devaient débuter en 1997. Ils permettront de préciser si l'étape suivante, consistant à exploiter et à valider sur une plus longue période l'échangeur de chaleur ainsi créé, peut être engagée.

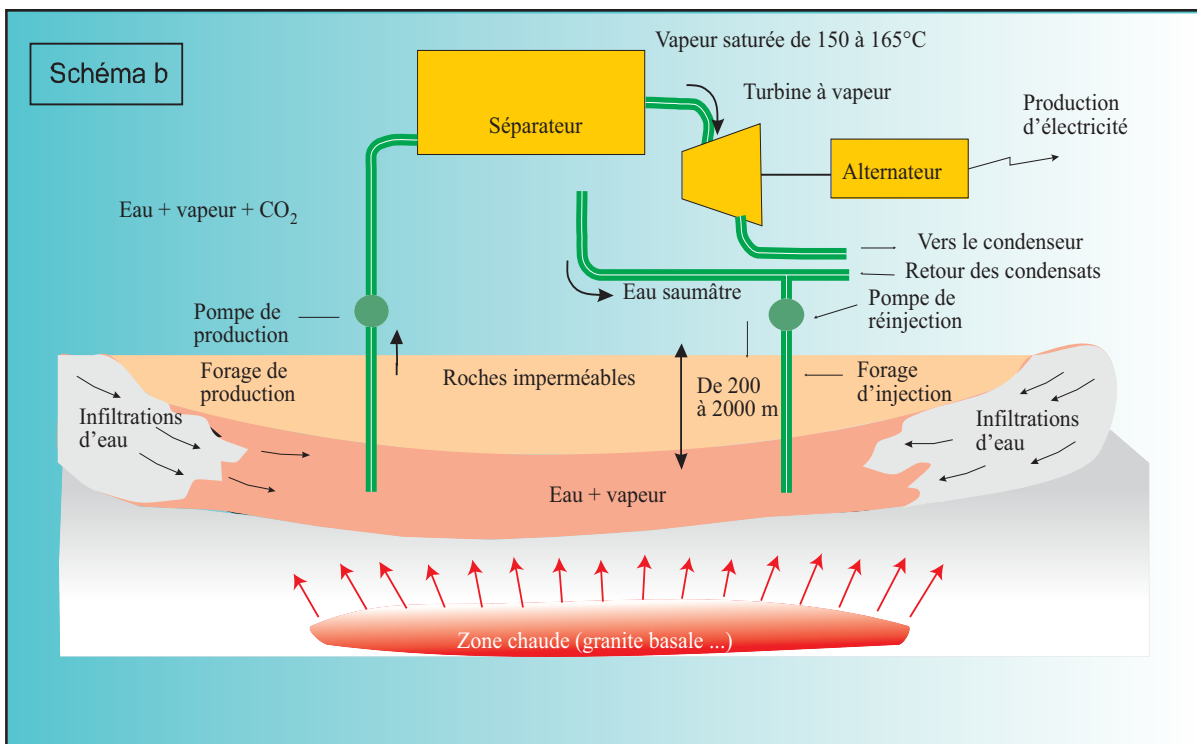


Fig .24-b

TRAVAIL ET PUISSANCE

CHAPITRE

18



Pourquoi dit-on que le bulldozer ou le tracteur sont plus puissants que le cheval ?
Que le cheval est plus puissant que l'homme ... ?
Qu'est ce que la puissance d'un moteur ?

OBJECTIFS

- Calculer le travail d'une force constante au cours d'un déplacement linéaire ou quelconque.
- Distinguer un travail moteur d'un travail résistant.
- Appliquer la formule de la puissance moyenne :
- Calculer le rendement d'une machine simple.

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$$

1. Travail mécanique

Dans le langage de tous les jours, le mot « travail » suggère « effort », « peine », « sueur », « fatigue », « dépense d'énergie ». Du point de vue du physicien, ce mot a un sens plus précis.

Au cours de leur activité quotidienne, les hommes effectuent des travaux et ils le font :

- soit directement eux même : puiser de l'eau d'un puits, creuser un trou avec une pelle, enfoncer un pieu dans le sol, pousser un tonneau d'huile sur un plan incliné...
- soit en se faisant aider par la force musculaire d'un animal (charrue à bœufs, traction par un cheval), par un moteur électrique ou par un engin muni d'un moteur thermique (tracteur...)

L'activité humaine consiste donc (si on exclut l'activité intellectuelle) à exercer des **forces** sur des outils pour les mettre en **mouvement**, c'est-à-dire exercer des **forces motrices**.

Exemples : couper avec un couteau, scier du bois, percer avec une pointe...

Nous avons vu (chapitre 15) que ces forces motrices apparaissent toujours dès que de l'énergie est transférée d'un système vers un autre.

Pour tirer de l'eau du puits (Fig.1), deux forces doivent s'exercer sur le sceau : la tension de la corde et le poids du sceau.

Etant donné que les positions des points d'application de ces deux forces varient au cours du mouvement, le résultat attendu a été réalisé, c'est-à-dire la remontée de l'eau du puits. On dit que les forces ont effectué des travaux.

Pour soulever un tonneau d'huile du niveau du sol jusqu'à la plateforme du camion (Fig.2), l'ouvrier doit exercer une force musculaire de façon à vaincre le poids du tonneau.

Le centre de gravité du tonneau a été déplacé d'une hauteur h . Ainsi le poids a effectué un travail lors de ce déplacement même si cette force a **résisté** au **mouvement**.

Ces exemples montrent qu'un « travail » utile est réalisé lorsqu'une **force** s'exerce sur des corps en **mouvement**. Son point d'application se déplace, on dit qu'elle **travaille**.

Une force **travaille** au sens mécanique du terme lorsqu'elle déplace son point d'application.

Remarque

Tenir à bout de bras une haltère immobile pendant un certain temps nécessite un gros effort musculaire et nous fatigue ; mais aucun travail mécanique n'est effectué (Fig.3).

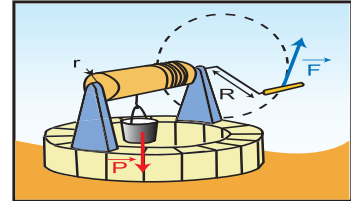


Fig .1



Fig .2



Fig .3

2.Travail et énergie

Considérons les exemples suivants : un chargement qu'un ouvrier, sur un chantier, hisse à une certaine hauteur (Fig.4) ; le seau d'eau que l'on remonte du fond du puits.

On est dans les deux cas en présence d'une charge qui se déplace par rapport à la Terre.

Soit le système $S = \{\text{Charge, Terre}\}$

- A l'état initial : le chargement est au niveau du sol et l'eau se trouve au fond du puits ;
- A l'état final : le chargement est sur la terrasse et le seau d'eau sur la margelle.

Dans les deux cas, seule l'énergie potentielle de pesanteur du système a augmenté.

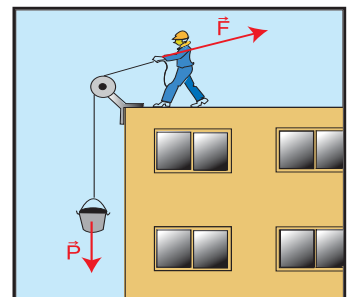


Fig .4

De l'énergie est transférée d'un **réservoir** {corps humain, oxygène, aliments} à un autre **réservoir** {Charge, Terre} (Fig.5). Nous avons ici un autre mode de transfert de l'énergie par travail de la force musculaire : l'**énergie d'origine chimique** (combustion des sucres dans l'oxygène) est convertie dans le corps humain en **énergie mécanique** par l'intermédiaire des muscles.

Un muscle est donc un **convertisseur** d'énergie d'origine chimique en énergie mécanique puisqu'il développe la force qui travaille. Le **transfert d'énergie entre les deux systèmes est le résultat du travail** de cette force. **Le travail est un autre mode de transfert de l'énergie.**

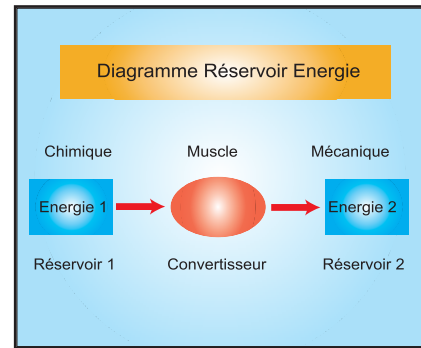


Fig .5

Définition

On appelle **moteur** tout système capable de convertir une forme d'énergie donnée en énergie mécanique (E_c et E_p).

Il est dès lors naturel d'exprimer le travail dans les mêmes unités que celle de l'énergie.

L'unité du travail dans le système international est le Joule (J).

On peut utiliser aussi le milliJoule (mJ) et le kiloJoule (kJ) : $1 \text{ mJ} = 10^{-3} \text{ J}$; $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$.

Remarque

Il y a une différence essentielle entre les deux modes, par chaleur et par travail, de transfert d'énergie. Le premier est un transfert d'énergie **désordonné** et le deuxième un transfert **ordonné**.

- Si on exerce une force sur le côté latéral d'une voiture en panne, cette force n'a aucun effet si l'on désire déplacer cette voiture.
- L'énergie d'une luge glissant, en mouvement uniforme, sur une piste enneigée horizontale reste constante. Puisqu'elle n'est soumise à aucune force motrice malgré son déplacement, aucun transfert d'énergie n'a lieu par travail.

Il n'y a travail que s'il y a une force et déplacement de son point d'application.

Activité

Montrer par des exemples que l'énergie transférée par travail d'un système à un autre est d'autant plus grande que :

- La force est plus intense pour un même déplacement.
- Le déplacement est plus important pour une force de même intensité.

Prenons l'exemple d'un clou que l'on enfonce dans une planche à l'aide d'un marteau (Fig.6).

L'énergie cinétique du système {marteau} est transférée au système {clou, planche} ce qui permet au clou de s'enfoncer dans la planche : Que s'est-il passé ?

Au cours de la collision, une force $\vec{F}$ exercée par le marteau déplace la tête du clou de A vers B.

L'énergie cinétique s'est transférée, par travail de $\vec{F}$, du système {marteau} au système {clou, planche}. Il en est résulté une augmentation de l'énergie interne du système {clou, planche}, ce qui se traduit par une élévation de la température du clou et de la planche (variation de $\mathcal{E}_{Cm}$) et une déformation de la planche (variation de $\mathcal{E}_{Pm}$) (Fig.7).

Au cours du déplacement de son point d'application de A à B, le travail d'une force $\vec{F}$, exercée par un système S' sur un système S, assure un transfert d'énergie entre les deux systèmes au cours de leur interaction entre les positions A et B.

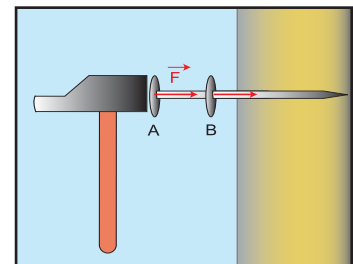


Fig .6

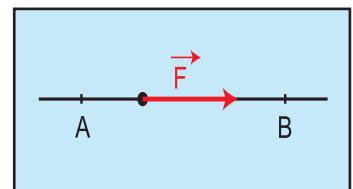


Fig .7

Remarque

Si un ensemble de forces s'exerce sur un système S, c'est la somme des travaux de toutes les forces qu'il faut considérer comme responsables de la variation d'énergie.

Définition

Le travail, noté W , d'une force $\vec{F}$, supposée constante, au cours d'un déplacement rectiligne de son point d'application d'une position A vers une position B, dans sa propre direction est numériquement égal au produit de l'intensité de la force $\|\vec{F}\|$ et du déplacement $\|\vec{AB}\|$.

$$W = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\|$$

(J) (N) (m)

Que se passe-t-il quand $\vec{F}$ et $\|\vec{AB}\|$ n'ont pas la même direction ?

Force perpendiculaire au déplacement

Soit un wagon lancé sur des rails ; faisons agir une force $\vec{F}$ perpendiculaire aux rails (Fig.8).

Cette force ne peut ni le freiner, ni l'accélérer, ni le mettre en mouvement s'il était immobile au départ. L'énergie cinétique du système ne peut ni augmenter, ni diminuer : le travail de la force $\vec{F}$ est donc nul.

D'une façon générale, une force constamment perpendiculaire à la trajectoire de son point d'application ne contribue à aucun transfert d'énergie : son travail est nul.

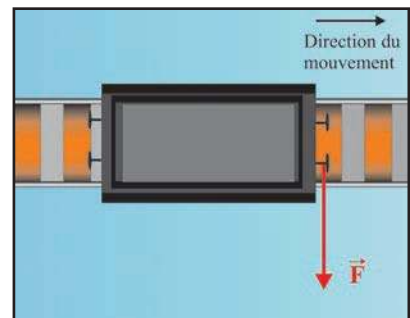


Fig .8

Force de direction quelconque

Lâchons un solide (C) sans vitesse initiale sur un plan incliné sans frottement (Fig.9).

Le poids $\vec{P}$, au cours de la descente du corps (C), déplace son point d'application G de la position A vers la position B. **Le poids travaille.** En B, le corps (C) est en mouvement avec une vitesse V .

La réaction $\vec{R}$, constamment perpendiculaire au support, **ne travaille** pas au cours du déplacement de son point d'application

L'énergie cinétique acquise par le corps (C) à la position B correspond à un transfert d'énergie (diminution de l'énergie potentielle de pesanteur du système {corps (C), Terre}) lorsque (C) passe de A à B.

On en déduit que le transfert d'énergie s'est effectué par le travail du poids seul sur le trajet rectiligne AB.

Décomposons la force $\vec{P}$ en deux forces $\vec{P}_1$ et $\vec{P}_2$; la première est perpendiculaire au plan incliné et directement opposée à $\vec{R}$; la deuxième est parallèle au plan incliné et de même direction que le déplacement.

$$\text{On a } \vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$$

On peut écrire alors : $W(\vec{P})_{A \rightarrow B} = W(\vec{P}_1)_{A \rightarrow B} + W(\vec{P}_2)_{A \rightarrow B}$ or $W(\vec{P}_1)_{A \rightarrow B} = 0$ d'où :

$$W(\vec{P})_{A \rightarrow B} = W(\vec{P}_2)_{A \rightarrow B} = \|\vec{P}_2\| \cdot \|\vec{AB}\|$$

Or l'angle d'inclinaison du plan est β qui est complémentaire de l'angle $\alpha = (\vec{AB}, \vec{P})$ d'où :

$$\|\vec{P}_2\| = \|\vec{P}\| \cdot \cos \alpha$$

$$W(\vec{P})_{A \rightarrow B} = \|\vec{P}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cdot \cos \alpha$$

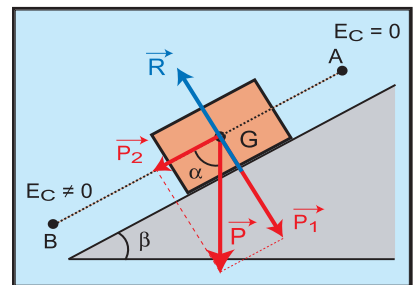


Fig .9

Cas général :

Déterminons le travail d'une force $\vec{F}$ exercée sur un solide et telle que son point d'application se déplace sur un segment de droite de **A** vers **B**.

On décompose $\vec{F}$ en deux composantes $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ ($\vec{F}_1$ étant de même direction que le déplacement et $\vec{F}_2$ de direction perpendiculaire), (Fig.10).

Le travail de $\vec{F}$ est égal à la somme des travaux de ses composantes : $W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = W(\vec{F}_1)_{A \rightarrow B} + W(\vec{F}_2)_{A \rightarrow B}$

Or $\vec{F}_2$ est perpendiculaire à $\vec{AB}$ donc son travail est nul.

D'où $W(\vec{F}) = \|\vec{F}_1\| \cdot \|\vec{AB}\|$ or $\|\vec{F}_1\| = \|\vec{F}\| \cdot \cos \alpha$.

$$W(\vec{F}) = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cdot \cos \alpha \quad \text{où } \alpha \text{ est l'angle } (\vec{AB}, \vec{F}).$$

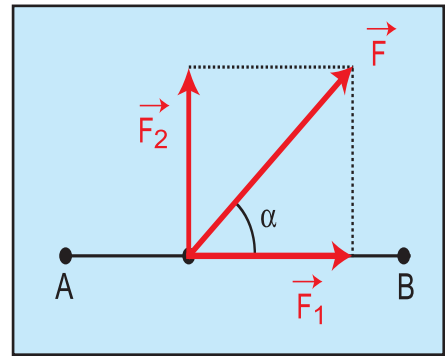


Fig .10

3.Travail moteur- Travail résistant

Reprenons l'exemple du wagon en supposant qu'il est en mouvement dans le sens indiqué sur les figures. Appliquons une force $\vec{F}$ sur ce solide ; cette force déplace son point d'application de A vers B.

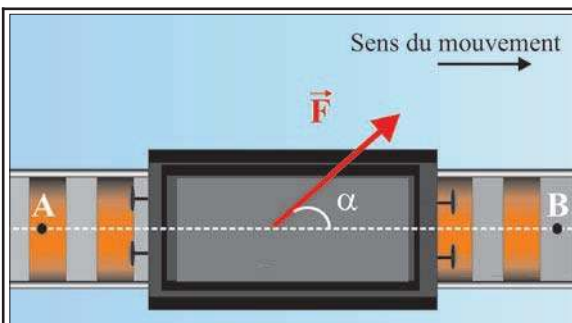


Fig.11-a L'angle $\alpha = (\vec{AB}, \vec{F})$ est inférieur à 90° (angle aigu) : La force $\vec{F}$ a une composante $\vec{F}_1$ de même sens que le mouvement, d'où $\vec{F}$ contribue au mouvement : C'est une **force motrice**.
Cos $\alpha > 0$ et le travail est moteur.

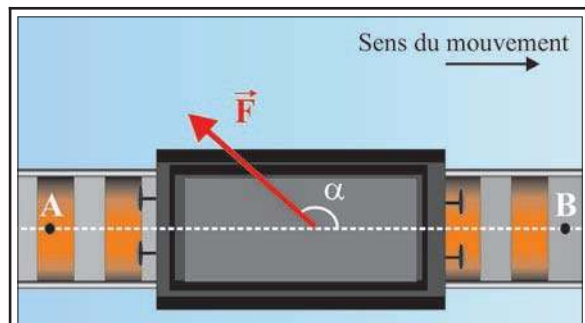


Fig.11-b L'angle $\alpha = (\vec{AB}, \vec{F})$ est supérieur à 90° (angle obtus) : La force $\vec{F}$ a une composante $\vec{F}_1$ de sens contraire au mouvement, d'où $\vec{F}$ résiste au mouvement : C'est une **force résistante**.
Cos $\alpha < 0$ et le travail est résistant.

Si on convient de considérer qu'un **travail moteur est positif** et qu'un **travail résistant** est négatif, on a alors l'expression générale du travail d'une force constante lors d'un déplacement rectiligne :

$$W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cdot \cos \alpha$$

Le travail, noté $W(\vec{F})_{A \rightarrow B}$, d'une force $\vec{F}$ constante, au cours du déplacement rectiligne de son point d'application d'une position **A** vers une position **B**, est numériquement égal au produit de l'intensité de la force $\|\vec{F}\|$ et du déplacement $\|\vec{AB}\|$ par le cosinus de l'angle $(\vec{AB}, \vec{F})$.

Le travail est une **grandeur scalaire algébrique** : positive, négative ou nulle selon les valeurs de l'angle α .

Remarque

Lorsque l'angle $\alpha = (\overrightarrow{AB}, \vec{F})$ est droit ($\alpha = 90^\circ$), la composante $\vec{F}_1$ de la force $\vec{F}$ est nulle ($\vec{F}_1 = \vec{0}$) ; on retrouve un résultat déjà vu. La force $\vec{F}$ n'est ni résistante et ni motrice : elle ne contribue à aucun transfert d'énergie et n'a donc aucun effet sur l'énergie cinétique du solide (Fig.11-c).

$\cos \alpha = 0$ et le travail est nul

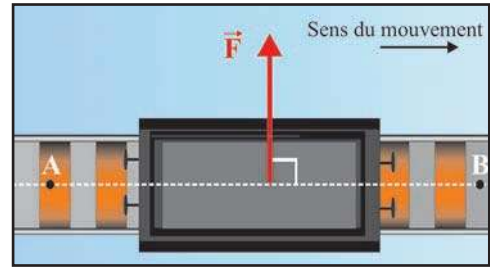


Fig .11-c

4.Travail d'une force constante lors d'un déplacement quelconque

Exemple : Observons le mouvement du centre d'inertie G d'une feuille d'automne. Sa trajectoire de A à B n'est pas linéaire ; entre le point A, feuille accrochée à la branche, et le point B, où la feuille atterrit au sol, G a parcouru un chemin curviligne quelconque (Fig.12). Entre A et B, on suppose que le poids, appliqué en G est constant.

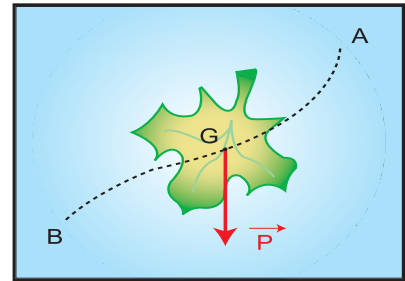


Fig .12

Considérons une petite portion $\overrightarrow{A_i A_{i+1}}$ de ce chemin suffisamment petite pour pouvoir la confondre avec un segment de la tangente à la trajectoire au point A_i (Fig.13). Sur ce trajet rectiligne, on peut donc se ramener au cas étudié au paragraphe précédent : Il est possible de calculer le travail élémentaire

$$W_i(\vec{P}) = \|\vec{P}\| \cdot \|\overrightarrow{A_i A_{i+1}}\| \cdot \cos \alpha_i$$

où α_i est l'angle entre la tangente à la trajectoire en A_i et la force $\vec{P}$. Soit $z_i = \|\overrightarrow{A_i A_{i+1}}\| \cdot \cos \alpha_i$: c'est la mesure algébrique du vecteur sur un axe vertical $z'z$ orienté **obligatoirement vers le bas** (même sens que le poids).

$$W_i(\vec{P}) = \|\vec{P}\| \cdot z_i.$$

Décomposons le chemin curviligne AB en une succession de n petites portions comme précédemment :

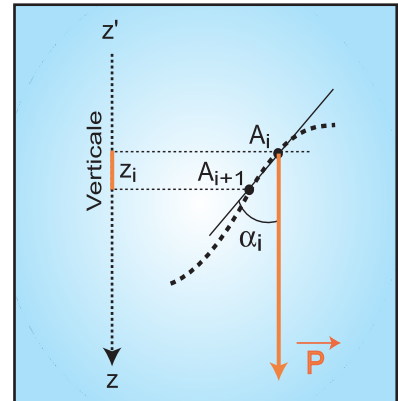


Fig .13

$$\overrightarrow{AA_1}, \overrightarrow{A_1 A_2}, \dots, \overrightarrow{A_i A_{i+1}}, \dots, \overrightarrow{A_{n-1} B}.$$

On peut écrire le travail total du poids comme la somme des travaux élémentaires successifs :

$$W(\vec{P})_{A \rightarrow B} = \sum_{i=1}^n \|\vec{P}\| \cdot \|\overrightarrow{A_i A_{i+1}}\| \cdot \cos \alpha_i = \|\vec{P}\| \cdot \sum_{i=1}^n z_i.$$

Soit z_A la coordonnée du point A sur l'axe $z'z$ et z_B celle du point B sur le même axe. On a :

$\sum_{i=1}^n z_i = (z_B - z_A)$; c'est la mesure algébrique du **vecteur déplacement** $\overrightarrow{AB}$ sur l'axe $z'z$, calculée ainsi :

$$(z_B - z_A) = \|\overrightarrow{AB}\| \cdot \cos \alpha, \text{ avec } \alpha = (\overrightarrow{AB}, \vec{P})$$

$(z_B - z_A)$ représente la mesure algébrique de la différence d'altitude entre les plans horizontaux passant par les points A et B **respectivement** de départ et d'arrivée (Fig.14).

$$W(\vec{P})_{A \rightarrow B} = \|\vec{P}\| \cdot (z_B - z_A)$$

- Si l'**altitude** du point B est inférieure à celle du point A, le déplacement correspond à une **descente** :
 $z_B > z_A$ et le travail du poids est **positif** ; c'est un **travail moteur**.
- Si l'**altitude** du point B est supérieure à celle du point A, le déplacement correspond à une **montée** :
 $z_B < z_A$ et le travail du poids est **négatif** ; c'est un **travail résistant**.

Le travail du poids est indépendant du chemin suivi ; il ne dépend que de la différence d'altitude entre les points de départ et d'arrivée.

Exemples : Trajectoire curviligne du skieur (Fig 15)
 Trajectoire curviligne du mouvement sur le grand 8 (Fig 16)

Généralisation :

Pour toute autre force constante, le calcul de son travail au cours d'un déplacement quelconque s'effectue de la même façon.

$\|\vec{A}_i \vec{A}_{i+1}\| \cdot \cos \alpha_i$ représente la mesure algébrique du vecteur $\vec{A}_i \vec{A}_{i+1}$ sur un axe de **même direction et sens que la force**.

Le travail d'une force $\vec{F}$ constante qui déplace son point d'application d'un point A à un point B, sur un chemin quelconque curviligne est donné par :

$$W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cos(\vec{AB}, \vec{F})$$

où $\vec{AB}$ représente le vecteur déplacement (Fig.17).

Application

Travail des forces de frottements

Sur un solide (S) en mouvement de **translation** agissent des forces réparties sur la surface de contact avec le support (Fig18). Toutes ces forces sont inclinées (par rapport à la verticale) dans le sens opposé au mouvement d'un même angle θ_m (voir chapitre 10). L'angle θ_m ne dépend que des surfaces en contact. Leur somme $\vec{R}$ peut être considérée comme une force constante faisant un angle θ_m avec la verticale et appliquée en un point de la surface de contact.

Déterminons le travail de la réaction $\vec{R}$:

$$W(\vec{R})_{A \rightarrow B} = \|\vec{R}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cos(\vec{AB}, \vec{R}).$$

$$\text{Or } (\vec{AB}, \vec{R}) = \frac{\pi}{2} + \theta_m. \Rightarrow \cos(\frac{\pi}{2} + \theta_m) < 0 \text{ et } W(\vec{R})_{A \rightarrow B} < 0.$$

Les forces de frottement sont toujours des forces résistantes et effectuent un travail résistant, c'est-à-dire négatif.

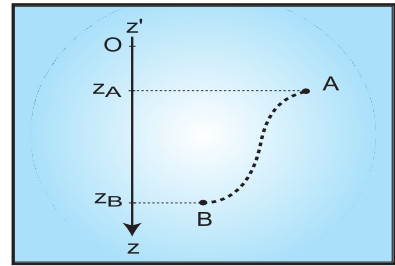


Fig .14



Fig .15



Fig .16

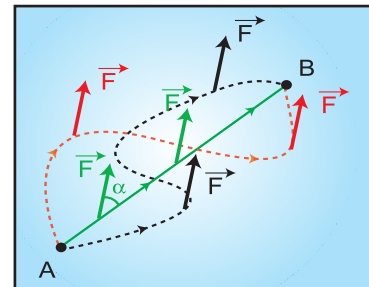


Fig .17

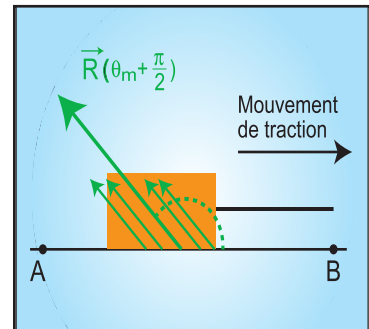


Fig .18

Remarque

Dans un fluide (air, eau) le frottement engendre également des forces résistantes qui gênent le mouvement du solide. Leur travail est toujours négatif.

5. Puissance mécanique

Exemple : Pour remplir un réservoir d'eau de volume V à partir d'un puits de profondeur h , on peut utiliser plusieurs moyens différents (Fig. 19 a-b-c) dont à titre d'exemples :

- Manuellement avec un seau et une poulie ou treuil : il faut 2 jours.
- Un système avec noria entraînée par un bœuf ou un dromadaire : il faut une demi journée.
- Une électropompe : 1 heure peut suffire.



Fig .19-a



Fig .19-b



Fig .19-c

Dans les trois cas, l'énergie transférée est la même : une même masse d'eau est passée à une hauteur H et donc le système {eau, Terre} a gagné en énergie potentielle. Un travail identique est mis en oeuvre pour réaliser ce transfert ; mais ce travail peut être effectué dans un temps plus ou moins long selon les systèmes moteurs utilisés.

Ce transfert a donc lieu à différentes vitesses ou débits. On dit que le travail a été effectué avec différentes **puissances** moyennes ou que les systèmes moteurs utilisés ont des puissances moyennes différentes. On a déjà vu dans le cours d'électricité que la puissance s'exprime en **watt (W)**.

Définition

La **puissance moyenne** $\mathcal{P}$ en Mécanique est le débit moyen d'un transfert d'énergie par travail mécanique. Elle s'exprime en watt (W) et se calcule en rapportant le travail W effectué à sa durée Δt :

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} \quad \begin{matrix} \text{(J)} \\ \text{(S)} \end{matrix}$$

Soit W le travail effectué et Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 les durées respectives mises par le manoeuvre, le dromadaire et le moteur électrique avec $\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_3$.

Les **puissances moyennes** $\mathcal{P}$ du manoeuvre, du dromadaire et du moteur s'expriment respectivement par :

$$\mathcal{P}_1 = \frac{W}{\Delta t_1} ; \mathcal{P}_2 = \frac{W}{\Delta t_2} ; \mathcal{P}_3 = \frac{W}{\Delta t_3}$$
$$\mathcal{P}_1 < \mathcal{P}_2 < \mathcal{P}_3$$

Dans le cas d'une force constante qui déplace son point d'application d'un point A à un point B, le travail est $\mathbf{W}(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cos(\vec{AB}, \vec{F})$. En remplaçant dans l'expression de la puissance,

$$\text{on aura : } \mathcal{P} = \frac{\|\vec{F}\| \cdot \|\vec{AB}\| \cdot \cos(\vec{AB}, \vec{F})}{\Delta t} = \|\vec{F}\| \cdot \frac{\|\vec{AB}\|}{\Delta t} \cdot \cos \alpha$$

Si le mouvement est rectiligne :

La vitesse moyenne sur le trajet AB, du point d'application de la force $\vec{F}$, est $V = \frac{\|\vec{AB}\|}{\Delta t}$; on aura :

$$\boxed{\mathcal{P} = \|\vec{F}\| \cdot V \cdot \cos \alpha} \quad (\mathcal{P} \text{ est en watt si } \|\vec{F}\| \text{ est en newton et } V \text{ en m.s}^{-1})$$

Remarque

Cette expression qui met en évidence l'importance de la **force motrice** dans le débit du transfert d'énergie justifie l'utilisation courante en Mécanique de l'expression « **Puissance d'une force** ».

Ordre de grandeur de quelques valeurs de puissances :

- Moteur à essence : quelques kW.
- Moteur Diesel Poids Lourd : 300 kW.
- Moteur de navire de guerre : 60 000 kW.

6. Rendement des machines simples

Nous avons vu précédemment (chapitre 11) des exemples de machines simples : levier, poulie et treuil. Nous avons constaté que ces machines sont des solides qui **transmettent les forces** en modifiant leurs caractéristiques (intensité, direction, sens).

Actionnons une machine simple quelconque en vue de vaincre une force résistante : soulever une lourde charge avec un treuil dont les rayons des poulies sont r et R .

La force motrice $\vec{F}$ déplace son point d'application sur le trajet AB ; simultanément la force de tension du câble $\vec{T}$ déplace également son point d'application sur un trajet A'B'. Chacune de ces forces effectue un **travail moteur** (Fig.20).

Sur le treuil agissent quatre forces : le poids du treuil, La tension $\vec{T}'$, la tension $\vec{T}'_1$ et la réaction de l'axe de rotation (Δ) du treuil. On suppose que le mouvement du treuil est très lent, de façon à pouvoir considérer que l'on est, à chaque instant, pratiquement dans les conditions de l'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe (Δ) fixe.

Pour maintenir le treuil en équilibre $\vec{T}'_1$ et $\vec{T}'$ doivent vérifier la condition :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{T}') + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{T}'_1) = 0 \text{ qui donne } \|\vec{T}'\| \cdot r = \|\vec{T}'_1\| \cdot R \quad (1)$$

D'autre part, les câbles pouvant être considérés de masse négligeable (par rapport à celle de la charge), on peut écrire qu'à chaque instant la tension est constante en tout point d'un même brin de

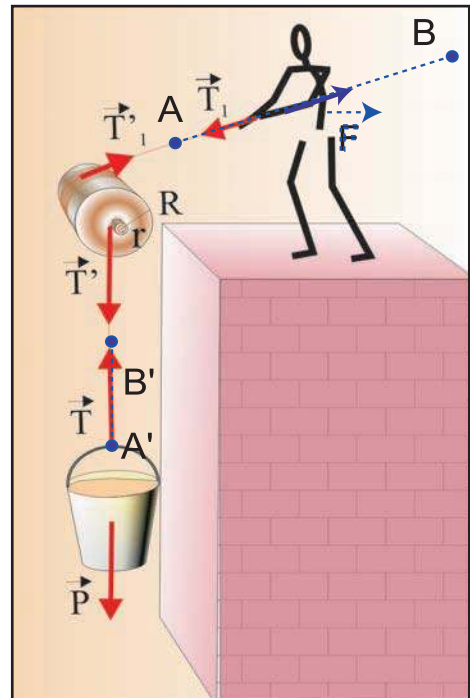


Fig .20

câble, d'où : $\|\vec{T}'\| = \|\vec{T}\|$ et $\|\vec{T}'_1\| = \|\vec{T}_1\|$ avec $\|\vec{T}_1\| = \|\vec{F}\|$ (2)

On peut écrire les travaux des forces : $\mathbf{W}(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \|\vec{F}\| \cdot \|\overrightarrow{AB}\|$ et $\mathbf{W}(\vec{T})_{A' \rightarrow B'} = \|\vec{T}\| \cdot \|\overrightarrow{A'B'}\|$

Les brins de câble étant supposés inextensibles et tous les points du treuil ayant tourné d'un même angle θ , on peut écrire une relation entre les déplacements AB et A'B', soit :

$AB = R \cdot \theta$ et $A'B' = r \cdot \theta$; en remplaçant dans les expressions du travail :

$$\mathbf{W}(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \|\vec{F}\| \cdot R \cdot \theta \quad \text{et} \quad \mathbf{W}(\vec{T})_{A' \rightarrow B'} = \|\vec{T}\| \cdot r \cdot \theta$$

$$(1) \text{ et } (2) \text{ donnent: } \mathbf{W}(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \mathbf{W}(\vec{T})_{A' \rightarrow B'} \quad (3)$$

Le travail moteur reçu par le treuil d'un côté est intégralement restitué sous forme de travail moteur de l'autre côté.

Il y a eu un transfert d'énergie par travail du réservoir d'énergie d'origine chimique {opérateur} vers le réservoir d'énergie potentielle de pesanteur {charge, Terre}. L'énergie de l'opérateur a diminué d'une quantité égale à $\mathbf{W}(\vec{F})_{A \rightarrow B}$ et celle du système {charge, Terre} a augmenté d'une quantité égale à $\mathbf{W}(\vec{T})_{A' \rightarrow B'}$. L'égalité (3) confirme que le principe de la conservation de l'énergie est globalement respecté.

Une machine simple est un système qui permet le transfert d'une quantité d'énergie sans modification de sa valeur. Elle transmet intégralement le travail reçu sans modifier son caractère moteur ou résistant.

Définition

On appelle rendement d'une machine simple le rapport du travail restitué au travail reçu : $\rho = \frac{W_{\text{restitué}}}{W_{\text{reçu}}}$

L'exemple précédent décrit une situation idéale théorique où le rendement $\rho = 1$. La transmission du travail s'effectue sans perte. Pour les machines simples réelles, ce n'est jamais le cas pour diverses raisons :

Dans le cas du treuil :

- Il y a des frottements au niveau de l'axe ;
- Les câbles ont une certaine rigidité et une masse ;

Dans le cas d'un levier :

- la barre fléchit au niveau de l'appui, sa rigidité n'est pas infinie ;
- l'appui subit des déformations et s'aplatit ce qui introduit un couple de frottement ;

Tout cela fait que, une partie de l'énergie transférée est perdue dans la machine simple (par travail des forces de frottements sur les axes, travail de déformation des solides...).

Il s'ensuit que $\mathbf{W}_{\text{restitué}}$ est toujours inférieur à $\mathbf{W}_{\text{reçu}}$ et le rendement $\rho < 1$.

L'essentiel du cours

- Lorsqu'une force $\vec{F}$ agissant sur un solide ou un système matériel déplace son point d'application, on dit qu'elle effectue un **travail**.
- Entre deux systèmes matériels, un transfert d'énergie peut avoir lieu par travail mécanique.
- Quand une force travaille, il y a transfert d'énergie par travail mécanique au cours du déplacement de son point d'application.
- Le travail mécanique $W(\vec{F})_{A \rightarrow B}$ d'une force constante sur un chemin AB rectiligne ou curviligne est :

$$W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \underbrace{\|\vec{F}\|}_{(N)} \cdot \underbrace{\|\vec{AB}\|}_{(m)} \cos(\vec{AB}, \vec{F})$$

- Le travail d'une force perpendiculaire au déplacement de son point d'application est nul.
- Le travail d'une force telle que $(\vec{AB}, \vec{F}) < \frac{\pi}{2}$ est **positif** ; c'est un travail **moteur**.
- Le travail d'une force telle que $(\vec{AB}, \vec{F}) > \frac{\pi}{2}$ est **négatif** ; c'est un travail **résistant**.
- Le travail d'une force **constante** est indépendant du chemin suivi. En particulier, le travail du poids d'un corps ne dépend que de la différence d'altitude entre le point de départ et le point d'arrivée.
- La **puissance** d'un moteur est le débit avec lequel il est capable de transférer l'énergie entre deux systèmes ou réservoirs d'énergie.
- La **puissance mécanique moyenne** $\mathcal{P}$ est le débit moyen du transfert d'énergie par travail d'un système à un autre ou dans le même système. Elle s'exprime par le quotient du travail W par sa durée Δt :

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$$
- Une machine simple est un système qui permet le transfert d'une quantité d'énergie par travail avec un rendement p ; ce rendement est égal à 1 pour une machine simple idéale et inférieur à 1 pour une machine simple réelle.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par vrai ou faux aux propositions ci-dessous

- Le travail d'une force est toujours égal au produit de l'intensité de la force par la longueur du trajet parcouru par le point d'application.
- Le travail d'une force quelconque est égal au produit de l'intensité de la force par la valeur du vecteur déplacement.
- Le travail d'une force constante sur un chemin quelconque ne dépend que des positions des points de départ et d'arrivée.
- L'énergie reçue, entre deux instants, par un système soumis à l'action d'un ensemble de forces est égale à la somme des travaux de toutes ces forces entre ces deux instants.
- Le travail est égal au produit de la puissance moyenne par la durée de l'action exercée par la force.
- La puissance moyenne est égale au quotient du travail effectué par la durée correspondante.

2- Recopier et compléter les phrases suivantes :

Le travail d'une force par unité de temps est appelé de la force. C'est aussi égal au produit de l'intensité de la force par du point d'application. Le travail d'une force de frottement est un travail, et il est toujours L'unité du Système International du travail est et celle de la puissance moyenne est Une force dont la direction est confondue avec celle du déplacement de son point d'application effectue un travail..... . Une force dont la direction est avec celle du déplacement de son point d'application a un travail.....

Je sais appliquer le cours

3- Une force $\vec{F}$ agit sur un solide {S} en mouvement de translation rectiligne uniforme selon les sens indiqués sur les figures 21.

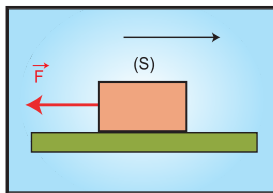


Fig. 21-a

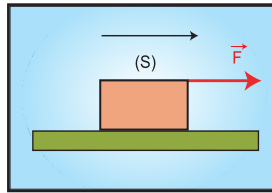


Fig. 21-b

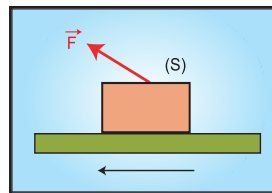


Fig. 21-c

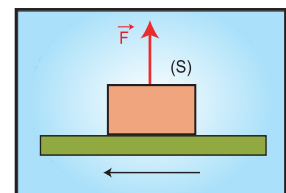


Fig. 21-d

Préciser pour chaque situation :

- a- si le travail est moteur, résistant ou nul ;
- b- le signe de $W(\vec{F})_{\text{mouv}}$.

4- Deux solides (A) et (B) de masses m et M sont reliés entre eux par un fil inextensible passant sur une poulie (Fig.22). Le solide (A) descend d'une hauteur h . Le solide (B) glisse sur le plan horizontal.

- a- Le travail du poids de (A) est-il moteur , résistant ou nul ? Justifier la réponse
- b- Mêmes questions pour le poids du solide (B).
- c- Exprimer le travail du poids de (A) en fonction de h .

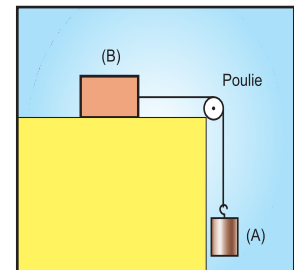


Fig. 22

5- Lors d'une avalanche, un rocher de masse $m = 1$ tonne dévale une pente et s'arrête en un point dont l'altitude est inférieure de 800 m à celle du point de départ. Calculer le travail effectué par le poids de rocher au cours de sa descente. On donne $\|\vec{g}\| = 10 \text{ N} \cdot \text{Kg}^{-1}$

6- Un solide, placé sur un tapis roulant à vitesse constante constitué de deux parties rectilignes AB et BC, est transporté sans glissement d'abord sur un trajet horizontal AB puis sur un trajet en pente BC ; on suppose que les seules forces qui s'exercent sur le solide sont le poids et la réaction du tapis roulant.

- a-Dire, pour chaque partie du trajet si chacune des deux forces travaille ou non. Justifier.
- b- Si la réponse est oui, laquelle des deux forces a un travail moteur ? a un travail résistant ?
- c- Représenter les forces qui agissent sur le solide sur chaque trajet. Que représente la composante de la réaction (quand elle existe) parallèle au mouvement ?

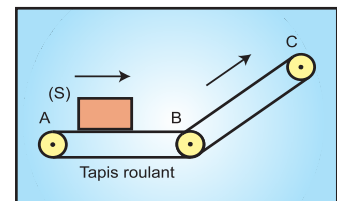


Fig. 23

- 7-** Un tracteur tire à l'aide d'un câble, un wagon sur une distance de 250m. Le câble exerce une force constante d'intensité 3500N dont la direction fait un angle de 20° avec la direction du mouvement du wagon. Calculer le travail fourni par le tracteur.
- 8-** Calculer le travail des forces musculaires nécessaire à un maçon pour mettre en position verticale une échelle (assimilée à une barre homogène) de 5 m de long et de masse 15kg initialement couchée horizontalement sur le sol. On donne $||\vec{g}|| = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.
- 9-** Un solide pouvant glisser sans frottement sur un plan horizontal est soumis durant 1s et sur un trajet de deux mètres, à l'action d'une force horizontale constante d'intensité 25 N. Calculer l'énergie cinétique acquise par ce solide au moment où cesse l'action de cette force. Calculer la puissance moyenne nécessaire à ce lancement .
- 10-** Une pompe utilisée pour retirer l'eau d'un puits élève 120 litres d'eau à la minute à 20 mètres au dessus du niveau de l'eau. Calculer le travail effectué en une heure et la puissance développée par le moteur.
- 11-** L'eau d'un barrage alimentant une centrale électrique, descend d'une hauteur de 40m par une canalisation qui débite 3600m^3 à l'heure. Les turbines de la centrale fonctionnent en restituant 80% de l'énergie reçue. Déterminer la puissance moyenne attendue à la sortie de la centrale.
- 12-** Un solide (S) de masse $m = 1,5\text{kg}$ est lancé sur un plan horizontal (pris comme plan de référence) avec une vitesse telle que son énergie cinétique est égale à 48J. Il aborde avec cette vitesse un plan incliné d'un angle de 20° par rapport à l'horizontale. Il s'arrête après avoir parcouru une distance $d = 8\text{m}$ sur la pente.
- a- Quelles sont les formes d'énergie que possède le système $\{(S), \text{Terre}\}$ lorsque le solide a parcouru seulement 4 m ? a parcouru 8 m ? Justifier.
 - b- Quelles sont les forces qui travaillent lors du transfert d'énergie qui a lieu au cours de la montée ? Préciser ces forces ainsi que la nature motrice ou résistante de leur travail.
 - c- En supposant que le solide glisse sans frottement sur le plan incliné, montrer que la distance parcourue sur la pente avant l'arrêt (et le rebroussement) devrait être égale à 9,36m.
 - d- Interpréter cette différence avec l'observation et répondre à nouveau à la question (b).

Le mouvement perpétuel

Les inventeurs de toutes les époques depuis l'Antiquité ont été obsédés par l'idée de créer des machines animées d'un mouvement indépendant de toute intervention humaine, animale ou de toute autre source de force motrice (vent, eau courante....). Autrement dit une machine qui se maintiendrait en mouvement perpétuel sans consommer aucune forme d'énergie. L'un des plus célèbres inventeurs de mécanismes mécaniques de la Renaissance est Léonard de Vinci . Ce génie de la peinture et de la Mécanique s'est également essayé à la recherche de mouvement perpétuel.

Il faut dire que la recherche de ces machines utopiques ne s'est jamais découragée malgré les grandes avancées de la Physique et les découvertes des grands principes comme celui de « la conservation de l'énergie ». Il y a encore jusqu'à nos jours des personnages farfelus qui croient dur comme fer que leurs inventions réalisent ce rêve .

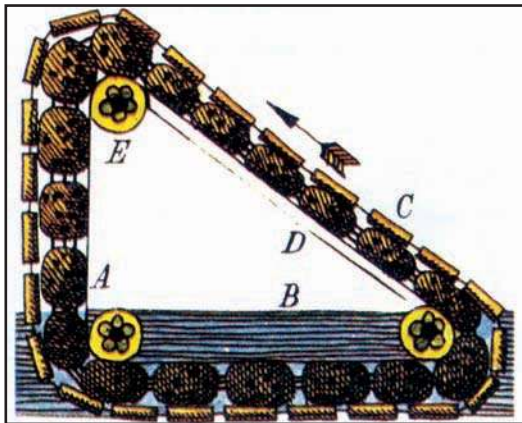


Fig .24

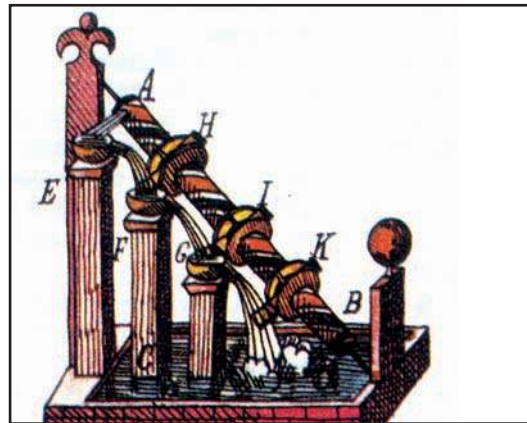


Fig .25

Sur les figures ci-dessus, sont représentés des exemples de ces inventions qui permettent, selon leur auteur, un mouvement perpétuel.

Etudier ces dispositifs et essayer de trouver la faille ou le défaut qui met ces machines en contradiction avec le principe de conservation de l'énergie.

LUMIERE

PARTIE 4



Les nombreux phénomènes lumineux familiers dans la nature qui intriguaient les habitants de la Terre depuis l'aube de l'Humanité ont fait dire à un grand savant : « Celui qui comprendra la lumière comprendra le Monde ».

La beauté de l'arc-en-ciel a, de tout temps, fasciné les hommes. Ibn el Haithem (965-1039) a tenté de l'expliquer en passant à côté de la théorie de la réfraction ; le principal continuateur des travaux d'Ibn el Haithem est le persan Kamal Eddine El Farisi (mort en 1320) : il montra que l'arc-en-ciel apparaît à un observateur bien placé lorsque les rayons du soleil se réfractent dans les gouttelettes d'eau provenant de la condensation des nuages ; il se forme alors deux arcs de cercle : le premier, intérieur, est produit par deux réfractions et une réflexion entre celles-ci ; le second, extérieur, est constitué par deux réfractions et deux réflexions. Chaque arc est formé de bandes concentriques offrant une variété de couleurs - plus tard on dira qu'il présente toutes les couleurs du spectre -, le rouge à l'extérieur et le violet à l'intérieur pour le premier arc ; la disposition est inverse pour le second, dont les couleurs sont plus pâles que celles du premier. Entre les deux arcs, il existe une région plus obscure que partout ailleurs. Une telle démonstration illustre la nouvelle méthode, à la fois mathématique et expérimentale, qui caractérise l'optique d'Ibn el Haithem et dont l'influence aura son apogée, en Europe, au cours des XVe et XVIe siècles. Mais la première véritable théorie de ce phénomène naturel n'apparaîtra qu'en 1637 dans le Discours de la méthode de René Descartes. La paternité de la méthode expérimentale remonte comme on le voit à des précurseurs arabes d'un génie certain parfois peu reconnu.



La nature offre tous les jours des exemples remarquables validant les théories de la lumière. Comment expliquer la formation de ce double du paysage qui semble bien réel dans les profondeurs de ce lac ? Est-ce encore une **illusion d'optique** ?

OBJECTIFS

- Reconnaître le phénomène de la réflexion de la lumière
- Appliquer les lois de Descartes relatives à la réflexion à la marche des rayons lumineux
- Appliquer le principe du retour inverse de la lumière
- Appliquer les lois de Descartes relatives à la réflexion à la construction des images données par un réflecteur plan
- Distinguer une image réelle d'une image virtuelle
- Distinguer un objet réel d'un objet virtuel

292 chapitre 19 : Réflexion de la lumière

page 292



Par temps très chaud en été, le paysage, à l'horizon, semble se refléter dans l'eau. Quels sont les phénomènes physiques qui combinent leurs effets pour engendrer une telle illusion ?

OBJECTIFS

- Reconnaître le phénomène de la réfraction de la lumière
- Retrouver expérimentalement les lois de la réfraction
- Appliquer les lois de la réfraction à la marche des rayons lumineux
- Calculer l'angle limite (réflexion totale)
- Déterminer, dans une situation donnée, s'il y a ou non réflexion totale.
- Expliquer le transport de la lumière par une veine liquide ou une fibre optique
- Expliquer la dispersion de la lumière blanche par un prisme.

302 chapitre 20 : Réfraction de la lumière

page 302

Prérequis

SAVOIRS

- Je sais distinguer entre une source lumineuse primaire et une source lumineuse secondaire
- Je sais que l'oeil est un détecteur de lumière
- Je sais reconnaître un corps transparent, un corps opaque et un corps translucide
- Je connais le principe de propagation rectiligne de la lumière
- Je sais que la lumière blanche est une lumière complexe
- Je sais que notre sens de la vue peut nous induire en erreur sur la couleur, la forme ou la position d'un objet.
- Je sais qu'il existe des rayonnements invisibles : infrarouge et ultraviolet
- Je connais les dangers des rayons lasers
- Je sais que la lumière transporte de l'énergie

SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX

- Je sais analyser la lumière blanche par un prisme ou par un réseau
- Je sais créer des situations mettant en évidence des illusions d'optique

SAVOIR-FAIRE THEORIQUES

- Je sais appliquer le principe de propagation rectiligne de la lumière à la formation des ombres et des images dans une chambre noire.
- Je sais expliquer pourquoi un objet éclairé par la lumière blanche apparaît blanc, noir ou coloré
- Je sais expliquer le daltonisme
- Je sais pourquoi certaines couleurs à porter sont préférables à d'autres selon que l'on est en été ou en hiver.



La nature offre tous les jours des exemples remarquables validant les théories de la lumière. Comment expliquer la formation de ce double du paysage qui semble bien réel dans les profondeurs de ce lac ? Est-ce encore une illusion d'optique ?

OBJECTIFS

- Reconnaître le phénomène de la réflexion de la lumière
- Appliquer les lois de Descartes relatives à la réflexion à la marche des rayons lumineux
- Appliquer le principe du retour inverse de la lumière
- Appliquer les lois de Descartes relatives à la réflexion à la construction des images données par un réflecteur plan
- Distinguer une image réelle d'une image virtuelle
- Distinguer un objet réel d'un objet virtuel

Activité

Que suggèrent les illustrations des figure (Fig.1 et Fig.2) ? Comment se propage la lumière ? Rappeler les définitions d'un **rayon lumineux**, d'un faisceau de lumière **conique**, d'un faisceau de lumière **cylindrique**. Quelle est la différence entre un faisceau de lumière convergent et un faisceau de lumière **divergent** ?

Enoncé du **principe de propagation rectiligne** de la lumière :



Fig .1



Fig .2

Dans un milieu transparent et homogène la lumière se propage en ligne droite.

1. Définition de la réflexion

Envoyons un faisceau de lumière cylindrique (ou parallèle) ou un faisceau laser sur la surface libre de l'eau contenue dans une cuve transparente (Fig.3-a) ; l'eau est colorée à la fluorescéine. Pour rendre les faisceaux lumineux visibles momentanément dans l'air, on peut « vaporiser » de l'eau avec un vaporisateur de parfum.

- Une partie de la lumière, la plus importante, est transmise dans l'eau, le faisceau restant cylindrique ; on dit que la lumière s'est **réfractée** ou qu'elle a subi une **réfraction**.
- une partie de la lumière est renvoyée par la surface de l'eau dans l'air dans une direction **privilégiée** : on dit que la lumière s'est **réfléchie** ou qu'elle a subi une **réflexion**.
- une partie de la lumière est renvoyée par la surface de l'eau dans toutes les directions et forme une tache lumineuse : la lumière est **diffusée** ; c'est le phénomène de la diffusion. C'est d'ailleurs le phénomène de la **diffusion** (par la fluorescéine) qui rend visible les faisceaux de lumière dans l'eau et (par le nuage de gouttelettes d'eau) dans l'air.

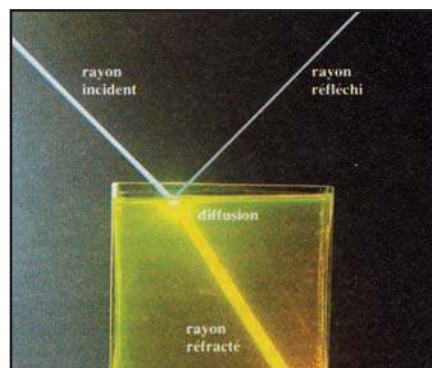


Fig .3-a

La surface de séparation de deux milieux transparents renvoie une partie de la lumière reçue dans une direction déterminée : c'est le phénomène de la réflexion. Cette réflexion, dite vitreuse, est partielle.

Remarque

Si la surface de séparation de deux milieux transparents n'est pas polie, seule la diffusion de la lumière (renvoi de la lumière dans toutes les directions) est observable.

Remplaçons la surface de la cuve par une plaque horizontale plane de métal bien polie (feuille d'aluminium bien plaquée et collée sur une vitre par exemple). Reprenons l'expérience dans les mêmes conditions.

La lumière ne traverse pas le métal ; le phénomène de la réfraction n'est plus observable ; par contre le phénomène de la réflexion est renforcé : toute la lumière reçue est pratiquement renvoyée dans **la même direction** que précédemment.

La surface polie d'un métal réfléchit presque totalement la lumière reçue dans une direction déterminée. La réflexion métallique peut être considérée comme une réflexion totale.

Applications

Cette propriété est à la base de la fabrication des miroirs depuis l'Antiquité. Les miroirs de toilette des anciens égyptiens étaient en bronze poli. Aujourd'hui, on dépose sur la face arrière d'une glace (verre) une mince pellicule d'argent ou d'aluminium que l'on protège des rayures par une couche épaisse de peinture. Sur la figure ci-contre (Fig.3-b) on a schématisé symboliquement un miroir plan.

Définition

On appelle **miroir** toute surface polie réfléchissante ; un **miroir plan** est une surface plane réfléchissante.

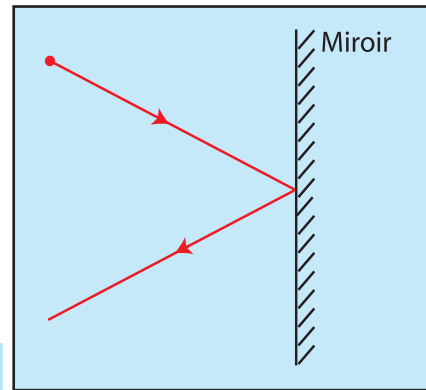


Fig .3-b

2. La réflexion de la lumière

Définition

On appelle **pinceau de lumière** un faisceau de lumière suffisamment **délié** (fin) pour le confondre avec un rayon lumineux.

Mettons à plat sur une table **horizontale** un petit miroir plan (M); envoyons sur sa surface un pinceau de lumière cylindrique ; repérons avec une feuille de papier blanc la position exacte de l'impact du pinceau sur le miroir que nous appelons I. Un plan vertical est matérialisé par une plaque de verre dépoli ou à défaut une vitre plane sur laquelle est collée une feuille de papier calque . On amène le rayon issu de la source dans ce plan (lumière rasante).

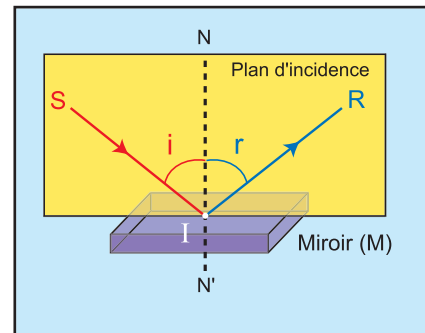


Fig .4

Le rayon réfléchi est visible en lumière rasante dans ce plan vertical ; on modifie l'inclinaison du faisceau initial par rapport à la surface du miroir ; le résultat est le même . Le rayon réfléchi est constamment dans le plan vertical qui contient le rayon tombant sur le miroir. Ce plan contient également la verticale en I qui est perpendiculaire au miroir.

Faisons un schéma de nos observations (Fig.4) et définissons quelques éléments de la figure obtenue :

- On appelle **rayon incident SI** le rayon issu de la source et tombant sur le miroir (M)
- On appelle **rayon réfléchi** le rayon IR renvoyé dans une direction déterminée par le miroir.
- On appelle **point d'incidence** le point I où tombe le rayon incident sur la surface réfléchissante.
- On appelle **normale** au point I la perpendiculaire **N'IN** à la surface réfléchissante.
- On appelle plan d'incidence le plan défini par la **normale N'IN** et le **rayon incident SI**.
- On appelle **angle d'incidence** l'angle que fait le rayon incident avec la normale en I. Soit i le symbole de sa mesure.
- On appelle **angle de réflexion** l'angle que fait le rayon réfléchi avec la normale en I. Soit r le symbole de sa mesure.

Activité

Utiliser les définitions précédentes pour formuler correctement et succinctement les dernières observations effectuées.

Le rayon réfléchi est contenu dans le plan d'incidence.

Expérience 1

Utilisons une lanterne qui délivre un pinceau de lumière très fin et parallèle ; plaçons au centre d'un disque gradué en degrés un petit miroir dont le plan est perpendiculaire au disque ; la normale au miroir au centre O est le rayon correspondant à la division 0°. Envoyons le faisceau de la lanterne sur le miroir en veillant à ce qu'il produise une trace visible sur le disque.

Faisons varier i , relevons r et dressons un tableau de valeurs.

⚠ Attention

Vérifier avant chaque opération que le faisceau incident passe par le centre du disque.

$i(^{\circ})$	0	10	20	40	50	60	80
$r(^{\circ})$	0	10	20	40	50	60	80

Le rayon réfléchi est visible sur le disque ; il se trouve donc dans le plan d'incidence. Le rayon incident et le rayon réfléchi sont constamment symétriques par rapport à la normale ; le rayon incident et le rayon réfléchi sont confondus lorsque l'incidence est normale.

La mesure i de l'angle d'incidence et celle r de l'angle de réflexion sont égales.

Les deux conclusions auxquelles on a abouti expérimentalement sont connues comme les **lois de Descartes pour la réflexion**.

N.B : Dans la suite, on utilisera le terme angle pour « **mesure d'angle** ».

Enoncé des lois de Descartes relatives à la réflexion

- 1^{ère} Loi : **Le rayon réfléchi est situé dans le plan d'incidence**
- 2^{ème}Loi : **L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence $i = r$**

Expérience 2

Reprenons les mesures précédentes en plaçant la lanterne de façon telle que le faisceau incident emprunte le chemin des faisceaux réfléchis de l'expérience précédente (Fig.6).

On obtient un tableau identique au précédent. La lumière emprunte exactement le même chemin à l'aller (expérience 1) et au retour (expérience 2).

Le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation

Remarque

Les lois de la réflexion ont été établies en se basant sur le modèle de la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu transparent homogène par **rayon lumineux**. L'impossibilité d'isoler un rayon lumineux ne permet pas en réalité de vérifier ces lois de manière précise ; ces lois sont cependant rigoureuses et validées par toutes les expériences ultérieures qui font intervenir le phénomène de la réflexion.

3.Images données par un miroir plan

3.1- Image d'un objet réel

Situation :

Les ambulances portent à l'**avant** une inscription comme celle de la figure 7. Les miroirs nous renvoient une **image** de nous-mêmes et des objets qui nous entourent . Les objets que nous voyons dans un miroir nous semblent-ils plus grands, plus petits, déformés ?

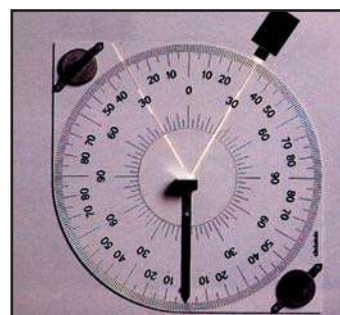


Fig .5

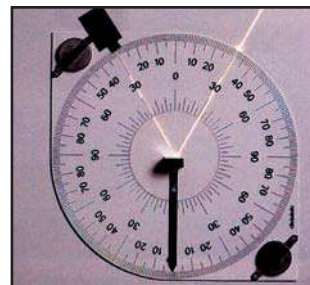


Fig .6



Fig .7

Le personnage que vous voyez dans un miroir est-il identique à vous dans tous les détails ? Vous lui tendez la main **droite** pour la serrer, quelle main vous tend-il ? Comment expliquer ces observations ?

Plaçons un petit miroir (M) perpendiculairement sur la surface quadrillée d'un cahier ; son plan est parallèle à une des directions du quadrillage. Traçons un point A sur la page du cahier ; mesurons, en carreaux, la distance entre le point A et le plan du miroir ; repérons l'image A' de A dans le miroir et mesurons en comptant les carreaux la distance entre A' et le plan du miroir.

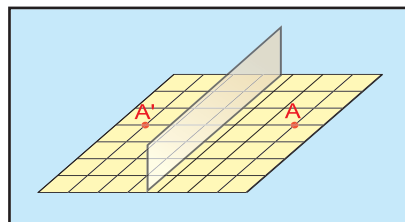


Fig .8

A' est situé sur la normale au miroir passant par A ; A' se trouve à la même distance du plan du miroir que le point A. A est un point **objet** lumineux ; A' est un point **image**. La lumière reçue par l'oeil d'un observateur semble provenir de A' situé derrière le miroir. A' est un point image **virtuel**.

D'un point objet lumineux A, un miroir plan donne un point image A' symétrique par rapport au plan du miroir. Cette image est virtuelle.

Comment cette image est-elle visible ?

Pour voir **une image ou un objet** l'oeil doit recevoir un faisceau divergent provenant de chaque point de cet objet ou de cette image (Fig.9-a). Sur le schéma de la figure 9-b, l'oeil de l'observateur est placé pour voir l'image A'. Le point lumineux A (**objet**) envoie sur le miroir un faisceau de lumière **divergent**. Ce faisceau est réfléchi vers l'oeil de l'observateur : pour ce dernier, la lumière semble provenir de A' qui est situé sur le **prolongement des rayons** que son oeil reçoit.

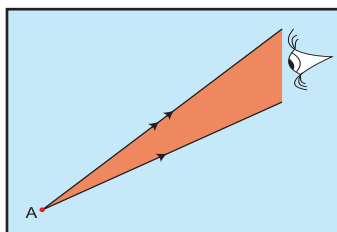


Fig .9-a

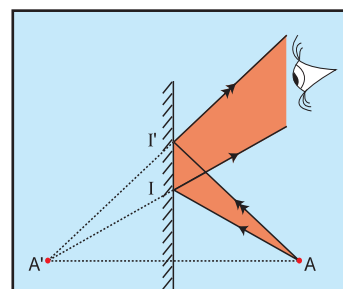


Fig .9-b

Un point image virtuel est situé à l'intersection des prolongements des rayons qui sont reçus par l'oeil (ou tout autre détecteur de lumière).

Un point objet réel est situé à l'intersection des rayons qui sont reçus par l'oeil.

Traçons deux droites perpendiculaires (X'X) et (Y'Y) qui se coupent en O sur une grande feuille de papier. Une vitre (M) verticale, placée sur une table servira de miroir plan. Son plan coïncide avec (X'X) par exemple et (Y'Y) avec la normale au centre du miroir. Deux bougies identiques sont placées sur (Y'Y) dans des positions symétriques par rapport au plan du miroir, soit $OA = OA'$. Allumons la bougie placée en A.

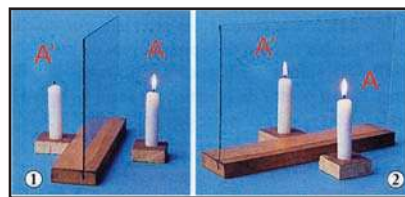


Fig .10

Si on observe l'expérience du côté de A, on voit la deuxième bougie placée en A' s'allumer en même temps. Il faut se mettre du côté de A' pour se rendre compte que c'est une illusion ; la bougie en A' reste éteinte. Le côté de A est le demi-espace objet

D'un objet réel placé devant son plan, un miroir plan donne une image virtuelle symétrique à l'objet par rapport au miroir.

Applications

La construction d'un rayon ou faisceau réfléchi connaissant le rayon ou le faisceau incident s'effectue en application directe des lois de la réflexion et des résultats précédents ; le rayons AI issu de l'objet tombe en I sur la surface réfléchissante du miroir (M). (Fig.11-a).

Pour tracer le rayon réfléchi IR, on construit le point A' symétrique de A par rapport au plan de (M) (Fig.11-b) ; le rayon réfléchi est porté par A'I ; A'I est en pointillé et IR est en trait plein (Fig.11-c).

Pour obtenir un faisceau réfléchi, il suffit de tracer un deuxième rayon AI' et de reprendre la procédure (Fig.11-d).

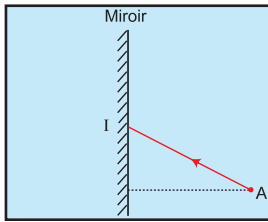


Fig .11-a

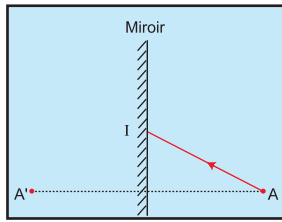


Fig .11-b

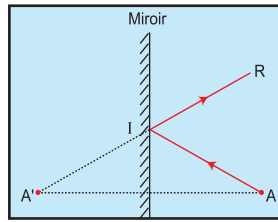


Fig .11-c

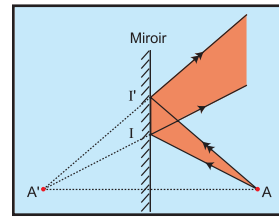


Fig .11-d

Activité

Montrer en faisant appel aux théorèmes de la géométrie que le rayon incident et le rayon réfléchi forment, avec la normale en I , des angles égaux conformément à la deuxième loi de Descartes relative à la réflexion.

3.2- Image d'un objet virtuel

Utilisons un projecteur de diapositives du laboratoire pour projeter des images sur un écran ; réduisons le plus possible la distance de la mise au point et les dimensions de l'image.

Confectionnons une diapositive en mettant dans un cache vierge un petit rectangle, découpé dans une feuille d'aluminium, percé d'un trou central de 1 ou 2 mm de diamètre. Mettons ensuite cette diapositive dans le projecteur et allumons ce dernier. Recherchons avec un écran blanc monté sur support la position de l'image de ce trou.

Le faisceau issu du projecteur est **conique** convergent ; les rayons convergent sur l'écran pour donner l'image réelle B rendue visible pour nous par la diffusion de la lumière par l'écran blanc (Fig.12) .

Une image réelle se trouve à l'intersection des rayons d'un faisceau convergent ; une image réelle peut être reçue et visualisée sur un écran diffuseur de lumière.

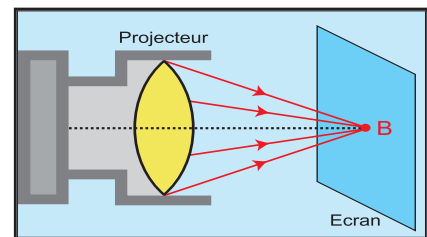


Fig .12

Repérons la position de l'image B sur l'écran, **laissé sur place**, et interposons sur le trajet des rayons issus du projecteur, un miroir plan.

Le faisceau incident est convergent mais il est intercepté avant d'atteindre le point B ; le point B est maintenant à l'intersection du **prolongement** des rayons d'un faisceau convergent ; pour le miroir, c'est un **point-objet virtuel**, (Fig.13).

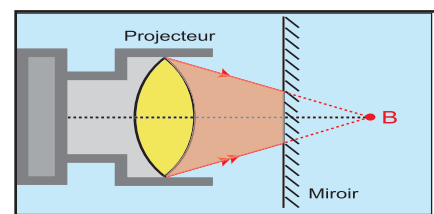


Fig .13

Un point objet virtuel est le sommet d'un faisceau conique convergent de rayons incidents, interceptés par le miroir avant d'avoir atteint le point de convergence.

Explorons avec un **autre écran** blanc le faisceau réfléchi par le miroir. Repérons le point de convergence B' contenu sur l'écran.

Les positions de B' et de B sont **symétriques** par rapport au plan du miroir. L'image obtenue est **réelle** puisqu'on peut la recueillir sur un écran (Fig.14).

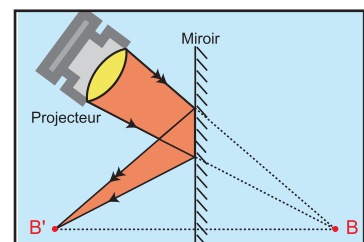


Fig .14

L'image donnée par un miroir plan d'un objet virtuel est :

- **réelle**
- **symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.**

Comparons la figure 11 et la figure 14. Elle sont pratiquement identiques sauf que la lumière se propage en empruntant les mêmes chemins dans deux sens différents. Ce résultat est général et il peut être énoncé comme un principe connu sous le nom de **principe du retour inverse de la lumière** .

Enoncé :

Dans tout système optique le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.

Activité

L'affirmation suivante est-elle compatible avec le principe précédent : « **Je vois l'oeil de celui qui voit mon oeil** » ?

La surface de séparation de deux milieux transparents renvoie une partie de la lumière reçue dans une direction déterminée : c'est le phénomène de **la réflexion**. Cette réflexion est **partielle**.

La surface polie d'un métal réfléchit presque totalement la lumière reçue dans une direction déterminée. La réflexion métallique est une **réflexion totale**.

On appelle **miroir** toute surface polie réfléchissante. La surface réfléchissante d'un miroir plan est plane.

- Les **lois de Descartes** relatives à la réflexion sont :

- **1^{ère} Loi : Le rayon réfléchi est situé dans le plan d'incidence**

- **2^{ème} Loi : L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.**

$$i = r$$

Un **objet réel** se trouve au sommet d'un faisceau conique de rayons **divergents**.

Une **image réelle** se trouve au sommet d'un faisceau conique de rayons **convergens**.

Un **objet virtuel** est situé à l'intersection des prolongements des rayons d'un faisceau conique convergent intercepté par le miroir avant le point de convergence.

Une **image virtuelle** est située à l'intersection des prolongements des rayons d'un faisceau conique divergent.

D'un objet **lumineux réel** un miroir plan donne une **image virtuelle** symétrique à l'objet par rapport au plan du miroir.

D'un **objet virtuel**, un miroir plan donne un **image réelle** symétrique à l'objet par rapport au plan du miroir.

- *Enoncé du principe du retour inverse de la lumière :*

Dans tout système optique le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Recopier et compléter par les termes adéquats

Lorsque la lumière rencontre la surface de séparation de deux milieux transparents, elle se..... et elle se Lorsque la lumière rencontre la surface d'un miroir elle se L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon incident et L'angle de réflexion est l'angle entre et Le rayon réfléchi et le rayon incident se coupent au point..... Le plan d'incidence est le plan contenant le rayon et

2- Répondre par VRAI ou FAUX

- ▶ Une surface métallique lisse renvoie la lumière d'un faisceau incident dans toutes les directions.
- ▶ La réflexion métallique est une réflexion totale.
- ▶ Le plan d'incidence est le plan contenant le rayon incident et le rayon réfléchi.
- ▶ L'image donnée par un miroir plan d'un objet réel est réelle.
- ▶ L'image d'une main droite dans un miroir est une main gauche.
- ▶ L'image d'un objet virtuel donnée par un miroir plan est réelle.
- ▶ Une image virtuelle peut être reçue sur un écran.
- ▶ Le rayon incident et le rayon réfléchi sont symétriques par rapport au plan du miroir.
- ▶ L'image d'un objet donnée par un miroir et cet objet sont symétriques par rapport à la normale.
- ▶ L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.
- ▶ Le chemin emprunté par la lumière dans un sens de propagation peut être emprunté dans l'autre sens.

Je sais appliquer le cours

- 3-** On considère le faisceau lumineux issu d'un point source A représenté sur la figure 15. Ce faisceau rencontre un miroir (M) vertical.

3.1- Tracer le faisceau réfléchi par le miroir.

3.2- Montrer que le faisceau semble provenir d'un point A' symétrique de A par rapport au plan du miroir.

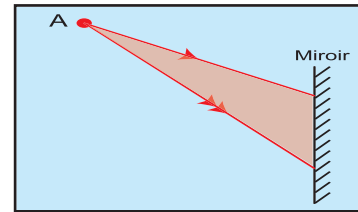


Fig .15

- 4-** Reproduire le schéma (Fig.16) et tracer la marche du rayon lumineux issu du point S qui passe par l'oeil de l'observateur placé au point O ?

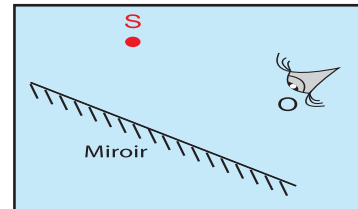


Fig .16

- 5-** Un pinceau de lumière réfléchi par un miroir fait avec le pinceau incident un angle de 60° . Quelle est la valeur de l'angle d'incidence.

- 6-** Reproduire le schéma ci-contre (Fig.17) et dessiner l'image de la lettre **R** vue dans le miroir dans les deux cas suivants :

a- Le plan du miroir est parallèle au plan de la lettre

b- Le plan du miroir est perpendiculaire à celui de la lettre

- 7-** Akram observe son image dans un miroir plan vertical. Il recule de 1m à partir de sa position initiale. De combien et dans que sens s'est déplacée l'image par rapport à Akram ?

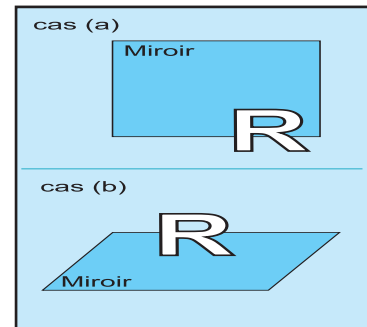


Fig .17

- 8-** Un personnage se contemple dans un miroir vertical fixé au mur ; le bord inférieur du miroir est à 1m du sol.

8.2- En supposant que les yeux du personnage se trouvent à 1,60 m du sol à la verticale de ses pieds, peut-il voir ses pieds ?

8.3- A quelle distance du sol le bord inférieur du miroir doit-il se trouver pour qu'il se voie de la tête aux pieds sans se pencher ?

8.4- Montrer que cette distance est indépendante de la position du personnage devant le miroir.

- 9-** Le filament incandescent d'une lampe, supposé ponctuel, est placé à 50 cm sur la verticale passant par le centre C d'un miroir circulaire horizontal placé sur le sol. Calculer le diamètre de la tache de lumière réfléchie obtenue sur le plafond de la pièce situé à 3 m du sol . Faire un croquis montrant les faisceaux incident et réfléchi.

- 10-** Quel angle doivent faire entre eux deux miroirs plans pour qu'un rayon incident sur l'un d'eux subisse deux réflexions consécutives et devienne parallèle et de sens contraire au rayon initial ?

- 11-** Chez son coiffeur, Samir se met dans un fauteuil face à un miroir avec, à sa gauche, fixé au mur, un deuxième miroir qui fait un angle de 90° avec le premier. Dans les deux miroirs il est étonné de voir plusieurs images de lui. Montrer comment Samir voit les images multiples, donner leur nombre et indiquer sur un schéma leur position.
- 12-** Pour pouvoir regarder évoluer son équipe favorite en compagnie de grandes personnes qui lui masqueraient la vue, le petit Fahem désire, avant le match, réaliser un « périscope » selon le schéma (Fig.18) trouvé dans une revue. Comment peut-il s'assurer avant la réalisation que, quand il va regarder à travers son instrument, ce qu'il verra correspondra à la réalité du terrain (droite, gauche, numéro des joueurs...) ?

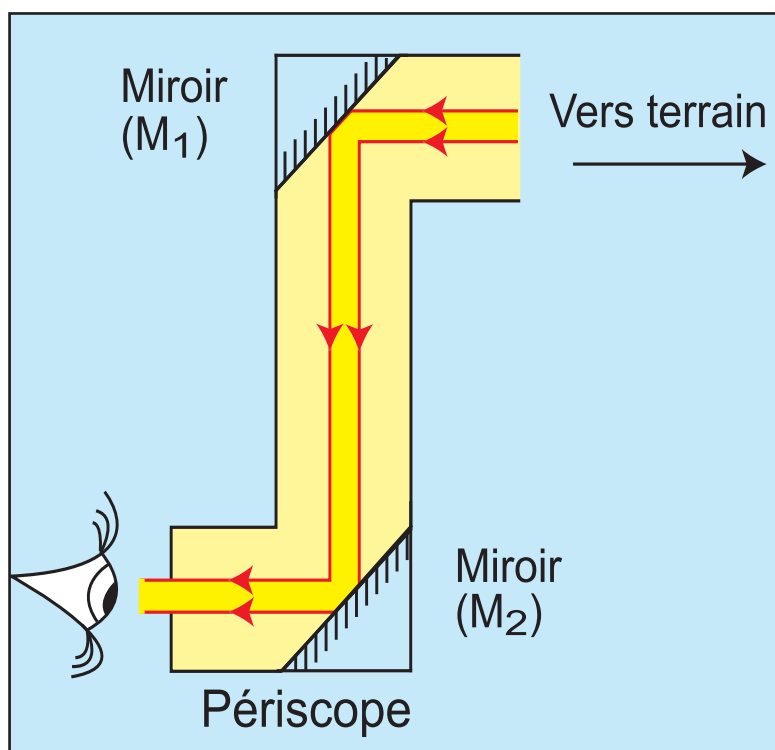
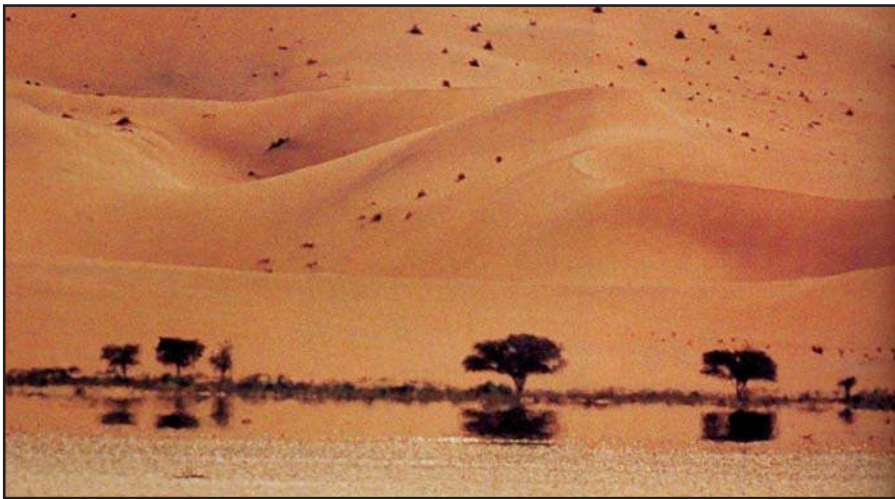


Fig .18

REFRACTION
DE LA LUMIERE

Par temps très chaud en été, le paysage, à l'horizon, semble se refléter dans l'eau. Quels sont les phénomènes physiques qui combinent leurs effets pour engendrer une telle illusion ?

OBJECTIFS

- Reconnaître le phénomène de la réfraction de la lumière
- Retrouver expérimentalement les lois de la réfraction
- Appliquer les lois de la réfraction à la marche des rayons lumineux
- Calculer l'angle limite (réflexion totale)
- Déterminer, dans une situation donnée, s'il y a ou non réflexion totale.
- Expliquer le transport de la lumière par une veine liquide ou une fibre optique
- Expliquer la dispersion de la lumière blanche par un prisme.

Situation :

Comment expliquer que :

- une bille sphérique nous paraît aplatie dans l'eau ?
- le fond d'un verre que l'on remplit d'eau paraît se soulever ?
- on a l'impression d'avoir les jambes plus courtes quand on marche dans une eau peu profonde?

Activité

Dans une cuve parallélépipédique remplie d'eau claire, plonger une tige droite de métal (ou une règle ordinaire). Comment est vue la tige par le haut au-dessus de la surface de l'eau ? Comment est-elle vue par les côtés latéraux de la cuve ? Représenter les différents aspects sur des croquis. Comment expliquer les différents aspects observés ? Les divisions de la partie immergée de la règle semblent-elles identiques ou différentes par rapport à celle au-dessus de l'eau ?

1. La réfraction de la lumière

Reprenons (Fig.1) l'expérience de la figure 3 du chapitre précédent.

Une partie de la lumière traverse la surface de séparation air-eau, pénètre dans l'eau et subit un changement de direction de propagation. Ce phénomène est la **réfraction**.

Lors du passage de la lumière d'un milieu transparent à un autre, sous une incidence quelconque, le phénomène de la **réfraction** se manifeste par un brusque changement de la direction de propagation.

La réfraction est toujours accompagnée de la réflexion d'une partie de la lumière.

Faisons tomber la lumière sur la surface de séparation air-eau sous une incidence **normale**.

La lumière pénètre dans le second milieu transparent sans déviation : le rayon réfracté et le rayon incident sont confondus avec la normale au point d'incidence.

Lors de son passage d'un milieu transparent à un autre, la lumière subit une réfraction. Pour une incidence quelconque autre que normale, la réfraction se manifeste par un brusque changement de direction de propagation.

La réfraction de la lumière a lieu sans changement de direction lorsque l'incidence est normale.

Définition

- La surface de séparation de deux milieux transparents différents est une surface réfringente.
- On appelle angle de réfraction (symbolisé par i_2) l'angle que fait le rayon réfracté avec la normale à la surface réfringente au point d'incidence (Fig.2).

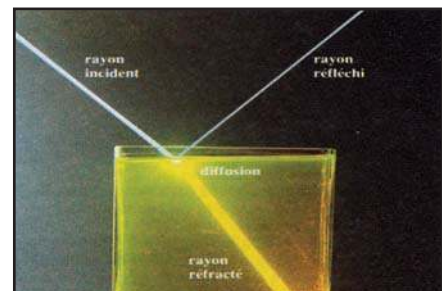


Fig .1

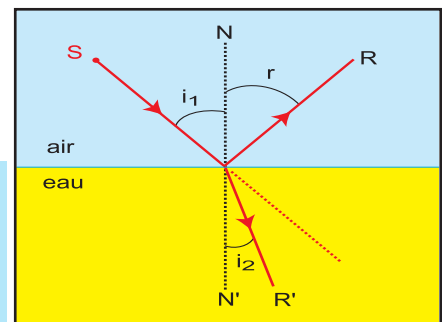


Fig .2

2. Les lois de la réfraction

Accrochons à une tige rigide et droite trois fils de coton espacés d'une dizaine de centimètres et laissons les pendre dans l'eau de la cuve de la figure 1. Les trois fils sont tendus selon une direction verticale par des objets lourds (masses marquées par exemple).

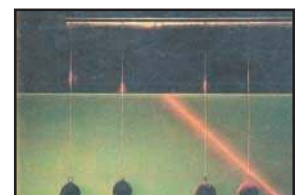


Fig .3

Vus de profil les trois fils forment un plan vertical. Envoyons alors un pinceau fin de lumière (laser ou , à défaut, ordinaire) sur le dispositif en s'arrangeant pour que le pinceau éclaire le premier fil en un point quelconque hors de l'eau et le deuxième fil juste au point d'incidence I (Fig.3).

On constate que quelle que soit l'inclinaison du faisceau incident le troisième fil est éclairé par le rayon réfracté dans l'eau d'une part et par le rayon réfléchi hors de l'eau d'autre part. Le plan contenant les trois fils verticaux est le plan d'incidence.

Le rayon réfracté et le rayon réfléchi sont tous deux contenus dans le plan d'incidence.

Utilisons le dispositif d'étude de la réfraction montré sur la photo (Fig.4). Il s'agit d'un demi-cylindre de plexiglas placé au centre d'un disque gradué en degrés. Envoyons un faisceau de lumière rasante sur le disque en veillant à ce qu'il passe par le centre du disque gradué. Faisons varier l'angle d'incidence i_1 et relevons les valeurs correspondantes de l'angle de réfraction i_2 ; dressons un tableau de valeurs.

$i_1(^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$i_2(^{\circ})$	0	7	13,5	20	26	31,5	36	40	42

L'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence. Le rayon incident selon la normale pénètre dans le plexiglas sans déviation. L'angle d'incidence et l'angle de réfraction varient dans le même sens mais ils **ne sont pas proportionnels** (Fig.5). Pour les petits angles (entre 0 et 15°) la courbe est linéarisable et on peut écrire $i_1 = \text{Cste. } i_2$

Avec Cste = **1,47** environ

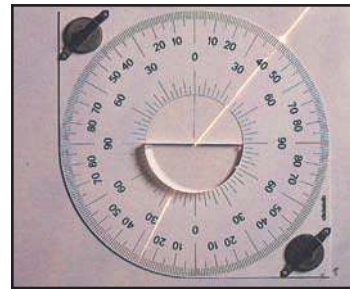


Fig .4

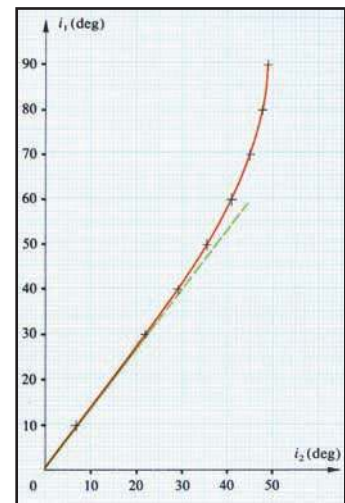


Fig .5

L'angle d'incidence et l'angle de réfraction varient dans le même sens mais ne sont pas proportionnels. Ils sont approximativement proportionnels pour les petits angles.

Activité

Pourquoi le faisceau réfracté sort-il du plexiglas sans être dévié ? Pourquoi est-il important que le faisceau de lumière tombe sur la surface réfringente au centre du disque gradué ? Comment varient l'intensité lumineuse du faisceau réfléchi et celle du faisceau réfracté lorsque l'incidence augmente ?

Traçons sur une feuille de papier millimétrée la courbe représentant les variations de $(\sin i_1)$ en fonction de $(\sin i_2)$.

Les points obtenus sont alignés sur une droite passant par l'origine des coordonnées. Cela signifie que les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont proportionnels. Déterminons la pente de cette droite ; on obtient une valeur très proche de **1,47**.(Fig.6)

Les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont proportionnels.

Reprenons les mêmes expériences avec un dispositif différent : une cuve demi-cylindrique dont le pourtour est gradué en degrés que l'on peut remplir d'un liquide transparent (eau, alcool, pétrole...). Le principe des mesures reste le même.

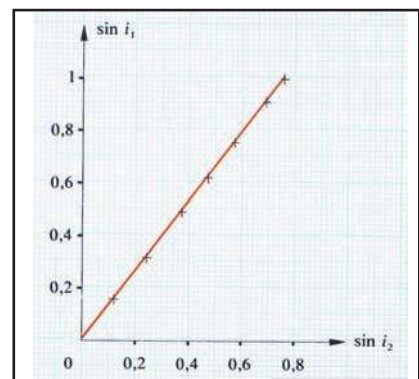


Fig .6

Les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont toujours proportionnels, mais la constante de proportionnalité n'est pas la même que pour le plexiglas ; on trouve **1,33** pour l'eau par exemple, **1,52** pour le verre. Cette constante qui dépend de la nature du second milieu transparent où pénètre la lumière est l'**indice de réfraction relatif du second milieu par rapport au premier**.

Définition

On appelle **indice de réfraction relatif n du second milieu par rapport au premier**, le rapport du sinus de l'angle d'incidence à celui de l'angle de réfraction :
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n$$

Le tableau suivant donne la valeur de l'indice de réfraction de quelques milieux transparents quand le premier milieu traversé par la lumière est l'air.

Quelques valeurs de l'indice de réfraction de milieux transparents par rapport à l'air			
Solides		Liquides	
Verre ordinaire.....	1,52	Eau.....	1,33
Plexiglas.....	1,47	Acétone.....	1,36
Diamant.....	2,42	Benzène.....	1,50
Verre Flint (lourd).....	1,73	Sulfure de carbone.....	1,6
Quartz.....	1,55		



Attention

Dans ce chapitre, seules les surfaces de séparation entre deux milieux transparents dont l'un est l'**air** feront l'objet d'une étude.

Plaçons le cylindre de plexiglas comme indiqué sur la photo ci-contre (Fig.7). Le premier milieu est le plexiglas et le deuxième milieu est l'air. Le faisceau subit une réfraction au passage du plexiglas à l'air. Faisons varier l'angle d'incidence dans le plexiglas i_1 et mesurons l'angle de réfraction dans l'air i_2 . Dressons le tableau suivant où on a choisi pour i_1 les valeurs obtenues précédemment comme valeurs de i_2 .

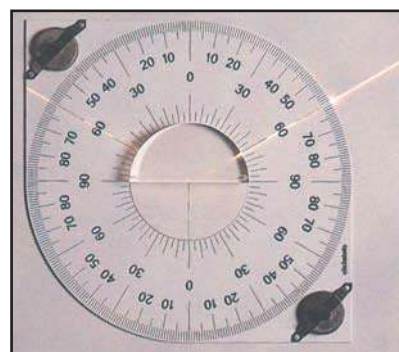


Fig .7

$i_1(^{\circ})$	0	7	13,5	20	26	31,5	36	40	42
$i_2(^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80

Les angles de réfraction obtenus sont les mêmes que ceux d'incidence du tableau précédent. Le principe du retour inverse de la lumière est ainsi vérifié pour la réfraction. Le rapport des sinus est toujours constant mais il est égal à **$n' = 0,68$ c'est-à-dire $n' = 1/n$** .

Si, à la traversée d'une surface réfringente dans un sens de propagation donné, la lumière subit une réfraction avec un indice de réfraction égal à n , l'indice de réfraction est $1/n$ lorsque la lumière traverse la même surface dans l'autre sens.

L'ensemble des résultats précédents sont des vérifications expérimentales de lois générales relatives à la réfraction dites « **Lois de Descartes** ».

Enoncé des Lois de Descartes relatives à la réfraction :

- 1^{ère} Loi : **Le rayon réfracté est situé dans le plan d'incidence.**
- 2^{ème} Loi : **Pour deux milieux transparents donnés, homogènes et isotropes, le rapport du sinus de l'angle d'incidence i_1 au sinus de l'angle de réfraction i_2 est constant :**

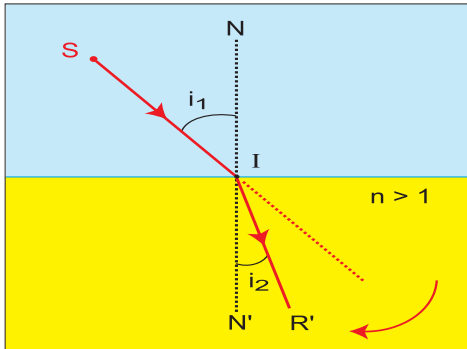
$$\sin i_1 = n \cdot \sin i_2$$

Le rapport $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n$ est appelé **l'indice de réfraction relatif** du milieu dans lequel se propage la

lumière réfractée par rapport au milieu dans lequel se propage la lumière incidente.

- Si $n > 1$: on dit que le second milieu est **plus réfringent** que le premier ; c'est le cas lorsque la lumière passe de l'air dans l'eau, le verre, le plexiglas....(Fig.8-a).
- Si $n < 1$: on dit que le second milieu est **moins réfringent** que le premier ; c'est en particulier le cas lorsque la lumière passe du verre, du plexiglas, de l'eau ... dans l'air (Fig.8-b).

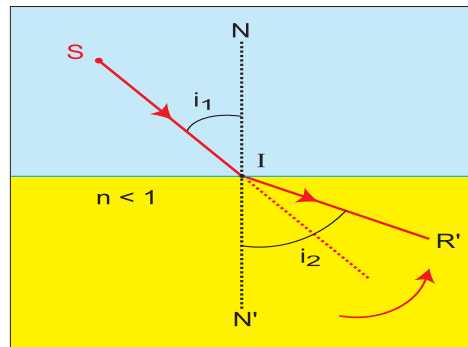
Cas où $n > 1 \Rightarrow i_1 > i_2$



Le rayon réfracté se rapproche de la normale

Fig .8-a

Cas où $n < 1 \Rightarrow i_1 < i_2$



Le rayon réfracté s'éloigne de la normale

Fig .8-b

3. La réflexion totale

◆ Revenons à l'expérience de la figure 4 ; continuons à augmenter lentement l'angle d'incidence à partir de 80° jusqu'à 90° .

Le faisceau réfracté devient de moins en moins visible ; presque la totalité de la lumière est réfléchi ; l'angle de réfraction augmente encore très légèrement pour atteindre presque $i_\ell = 43^\circ$ lorsque le faisceau incident est rasant, c'est-à-dire quand $i_1 = 90^\circ$. i_ℓ est la plus grande valeur de l'angle de réfraction que l'on puisse obtenir dans les conditions de l'expérience. C'est **l'angle de réfraction limite**.

A tous les rayons incidents du demi-espace situé dans l'air correspondent des rayons réfractés à l'intérieur d'un cône d'axe confondu avec la normale et de demi-angle au sommet

i_ℓ appelé angle limite tel que : $\sin i_\ell = \frac{1}{n}$

Calculons l'angle limite pour le couple de milieux air-plexiglas ($n = 1,47$) en appliquant les lois de la réfraction :

$$i_1 = 90^\circ \Rightarrow \sin i_1 = 1 \quad \text{d'où} \quad 1 = 1,47 \cdot \sin i_\ell \quad \text{et} \quad \sin i_\ell = 1/1,47$$

$$\text{Ce qui donne } i_\ell = 42,8^\circ$$

◆ Reprenons l'expérience de la figure 8-b où la lumière passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ; augmentons lentement l'angle d'incidence au-delà de 42° .

Lorsque $i_1 > i_\ell = 43^\circ$, il apparaît brusquement un faisceau très lumineux dans le demi-espace plexiglas, symétrique du faisceau incident par rapport à la normale IN. C'est un **faisceau réfléchi**. Le rayon réfracté a totalement disparu : **la lumière ne pénètre plus dans le second milieu**. Toute la lumière est réfléchi par la surface réfringente (Fig.10).

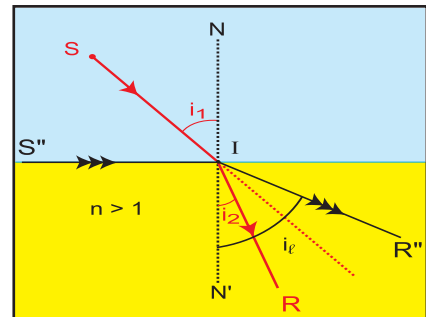


Fig .9

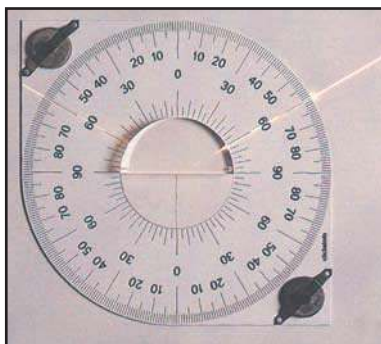


Fig .10-a

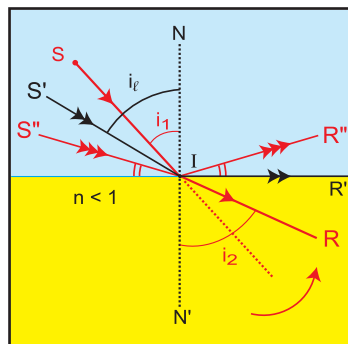


Fig .10-b

Lorsque le deuxième milieu est moins réfringent que le premier, et pour des incidences supérieures à l'angle limite i_l , toute la lumière se réfléchit sur la surface de séparation des deux milieux. C'est la réflexion totale.

Remarque

Comme pour la réflexion, les lois de la réfraction ont été établies en se basant sur le modèle de la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu transparent homogène par **rayon lumineux**. L'impossibilité d'isoler un rayon lumineux ne permet pas en réalité de vérifier ces lois de manière précise ; ces lois sont cependant rigoureuses et validées par toutes les expériences ultérieures qui font intervenir le phénomène de la réfraction.

Applications

4.1- Prismes à réflexion totale

Sur les chantiers, on utilise un instrument particulier appelés « **équerre optique** » pour réaliser des alignements perpendiculaires ; c'est essentiellement un prisme de verre dont deux faces sont perpendiculaires et inclinées à 45° sur la base (Fig.11) ; Un faisceau de lumière normal à une face pénètre sans déviation et son angle d'incidence sur la surface de séparation verre-air est 45° . L'angle limite du couple de milieux verre-air étant égal à 42° , le faisceau subit une réflexion totale ; le faisceau est renvoyé dans une direction perpendiculaire à sa direction initiale.

En retournant ce prisme, le dispositif renvoie la lumière dans la même direction.

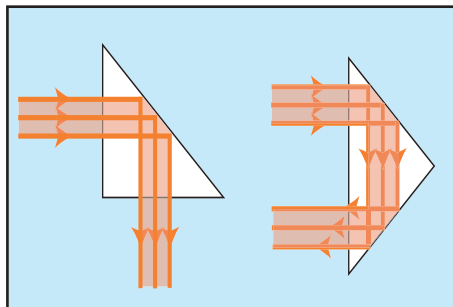


Fig .11

4.2- Les fibres optiques

Guide de lumière

Eclairons une baguette de verre coudée à une de ses extrémités comme indiqué sur la figure 12 ; la lumière pénètre dans la baguette en A sous une incidence normale.

Derrière l'écran, seule l'extrémité A de la baguette est éclairée. Dans la baguette les rayons lumineux rencontrent constamment la surface réfringente verre-air sous une incidence supérieure à l'angle limite et subissent une réflexion totale. Ils sont ainsi canalisés par une succession de réflexions totales jusqu'à l'extrémité B d'où ils ressortent presque sous une incidence normale.

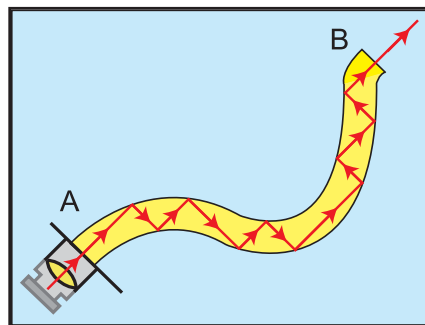


Fig .12

Réalisons le montage de la figure 13 ; le jet d'eau est éclairé à sa sortie du réservoir par la lumière du projecteur P .

La lumière réapparaît uniquement à l'extrémité du jet d'eau quand il se brise en un grand nombre de petites gouttes.

Un guide de lumière est constitué d'un milieu plus réfringent que l'air (solide ou liquide) dans lequel la lumière se propage par réflexions totales successives entre l'entrée et la sortie.

Les deux expériences précédentes donnent le principe respectivement des **fibres optiques** et des **fontaines lumineuses** (Fig.14). En effet, ce que l'on observe avec une baguette de verre recourbée de quelques millimètres de diamètre reste valable pour un filament de verre étiré de 20 ou 30 micromètres de diamètres.

Dans la pratique, une fibre optique pour transporter la lumière est constituée de deux fibres coaxiales, le coeur et la gaine, dont les diamètres sont de l'ordre du micromètre et dont les indices sont différents ; le coeur est une fibre d'indice n_1 et la gaine une fibre d'indice $n_2 < n_1$. l'ensemble est recouvert d'une enveloppe opaque et souple qui protège la fibre contre les agressions extérieures (Fig.15-a).

Les fibres optiques sont utilisées en médecine en fournissant des guides souples et fins de lumière et d'images pour l'exploration des organes internes.

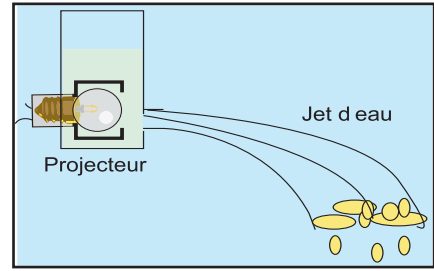


Fig .13



Fig .14

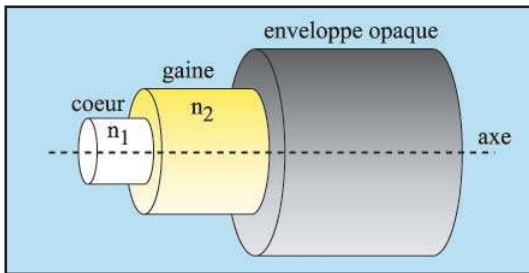


Fig .15-a

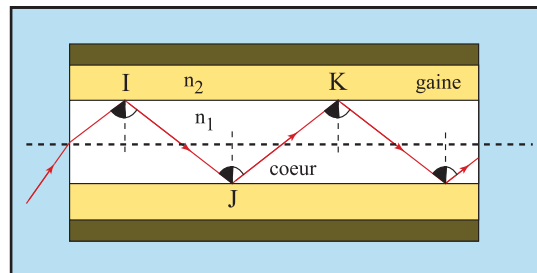


Fig .15-b

Les fibres sont actuellement très utilisées également dans le domaine des télécommunications et de la distribution de la télévision par câble. Les signaux sont véhiculés par de la lumière **invisible** (laser infrarouge)pour laquelle, les lois de la réfraction sont toujours valables.

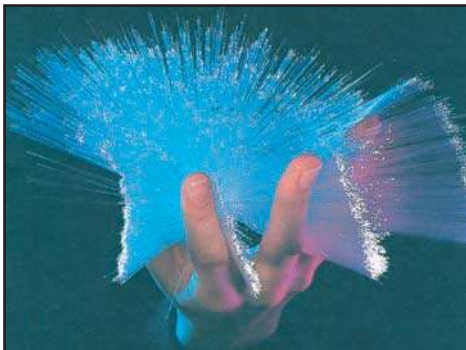


Fig .16-a

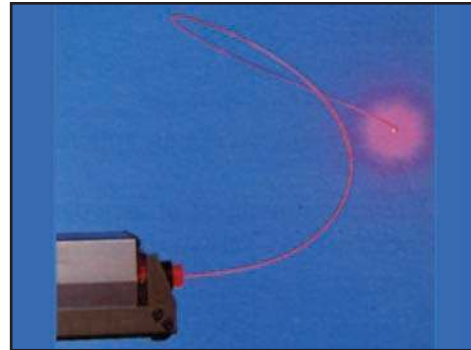


Fig .16-b

4.3- Dispersion de la lumière par un prisme

Utilisons un prisme de verre éclairé par un faisceau de lumière dont on peut modifier la couleur grâce à des filtres. Interposons successivement devant la source des filtres colorés : rouge, jaune, bleu par exemple. Observons la position des taches lumineuses obtenues sur l'écran (Fig.17).



Fig .17

Les taches de lumière obtenues avec chaque couleur ne sont pas situées au même endroit sur l'écran. Le prisme réfracte le faisceau à la traversée de chaque face ou dioptre : air-verre puis verre-air. Comme l'angle d'incidence initial est le même pour les trois faisceaux, la déviation du faisceau ne dépend que de l'indice de réfraction n du verre par rapport à l'air. **L'indice n est donc différent pour chaque couleur** du faisceau incident.

Le prisme est un milieu transparent qui dévie par réfraction les rayons lumineux qui pénètrent par une de ses faces. A chaque couleur de la lumière incidente correspond une valeur de l'indice de réfraction et donc une déviation différente.

Exemple :

Variation de l'indice de réfraction de deux types de verres optiques en fonction de la couleur de la lumière réfractée			
	Rouge	Jaune	Violet
Verre crown	1,504	1,507	1,521
Verre Flint	1,612	1,621	1,671

Utilisons un faisceau de lumière blanche pour éclairer le prisme.

Le prisme dévie chacune des couleurs qui la composent de manière différente : on dit que le prisme **disperse** la lumière blanche. C'est le phénomène de la **dispersion de la lumière blanche par le prisme**. On obtient sur l'écran un **spectre de la lumière blanche**. Dans ce spectre on retrouve aux mêmes emplacements les couleurs **rouge, jaune et bleu** utilisées auparavant (Fig.18).

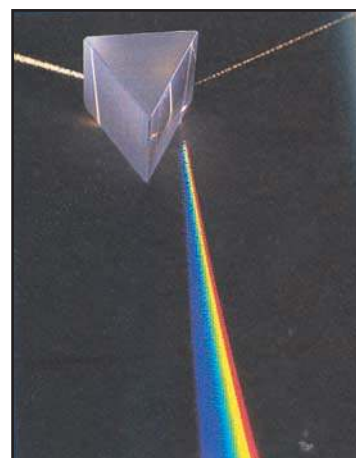


Fig .18

La dispersion de la lumière blanche par un prisme est essentiellement due au phénomène de réfraction de la lumière ; à chaque couleur du spectre correspond une valeur particulière de l'indice de réfraction relatif du prisme par rapport à l'air.

Activité

Le phénomène de l'arc-en-ciel s'explique de la même manière en considérant les réfractions et les réflexions qui se produisent à l'intérieur d'une goutte d'eau dans l'air. Faire un schéma du cheminement de la lumière dans une goutte d'eau et la dispersion des couleurs obtenue.

4.4- Le mirage

Mettons dans une cuve transparente de l'eau mélangée à un peu de fluorescéine ; Tapissons le fond de l'eau d'une couche uniforme de sucre en prenant soin de ne pas trop agiter le liquide ; laisser reposer quelques minutes. Envoyons un faisceau de lumière parallèle au fond de la cuve (Fig.19).

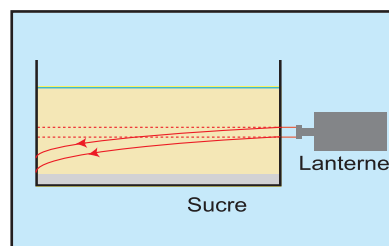


Fig .19

Le faisceau pénètre perpendiculairement dans l'eau ; **mais ne se propage pas en ligne droite** ; il est courbé vers le fond de la cuve. La concentration en sucre n'est pas constante et augmente quand on approche du fond ; il en est de même de la densité du liquide ; l'indice de réfraction n'est plus constant , il augmente avec la densité du milieu transparent.

L'indice de réfraction pour un milieu transparent de nature donnée varie dans le même sens que sa densité.

Le phénomène du mirage s'explique par les variations d'indice de réfraction engendrées par l'échauffement inégal des différentes couches d'air au voisinage du sol. La densité de l'air très chaud au voisinage du sol est plus faible que celle des couches froides supérieures ; les couches froides sont donc plus réfringentes que les couches chaudes ; les rayons lumineux sont courbés vers le haut et on se trouve de ce fait dans les conditions d'une réflexion totale qui donne l'illusion d'un paysage se mirant dans une eau inexistante (Fig.20).

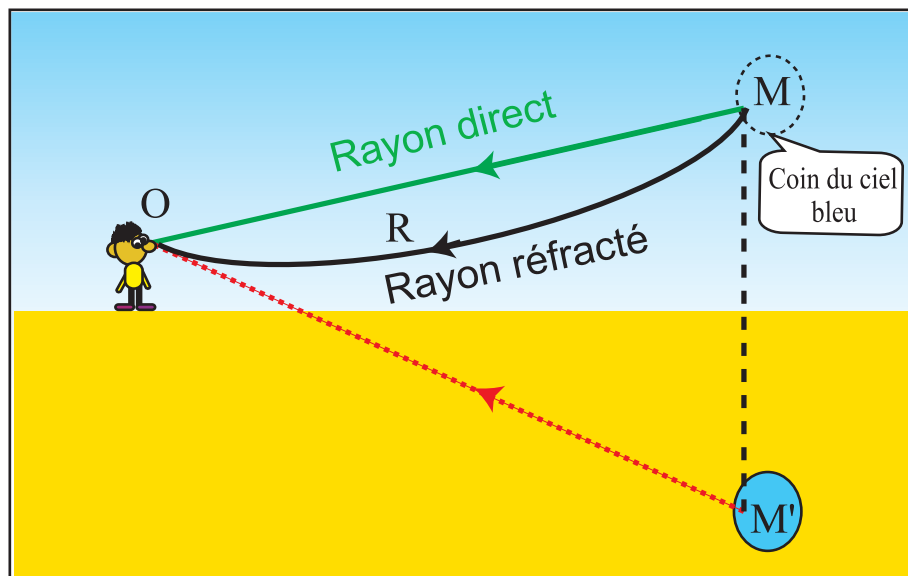


Fig .20

L'essentiel du cours

La réfraction est le passage de la lumière d'un milieu transparent à un autre avec, en général, un changement de direction de propagation.

Les lois de Descartes relatives à la réfraction :

- 1^{ère} Loi : **Le rayon réfracté est situé dans le plan d'incidence.**
- 2^{ème} Loi : **Pour deux milieux transparents donnés, homogènes et isotropes, le rapport du sinus de l'angle d'incidence i_1 au sinus de l'angle de réfraction i_2 est constant :**

$$\sin i_1 = n \cdot \sin i_2$$

n est l'**indice de réfraction relatif** du second milieu par rapport au premier.

Il y a **réflexion totale** à la surface de séparation de deux milieux transparents si les deux conditions suivantes sont réunies :

- **le milieu d'incidence est plus réfringent que le milieu de réfraction.**
- **l'angle d'incidence est supérieur à l'angle de réfraction limite i_l avec**

$$\sin i_l = \frac{1}{n}$$

Une fibre optique est un guide de lumière dont l'indice diminue du centre vers la périphérie et où la lumière se propage de proche en proche par réflexions totales successives.

La **dispersion de la lumière blanche par un prisme** est essentiellement due au phénomène de réfraction de la lumière ; à chaque couleur du spectre correspond une valeur particulière de l'indice de réfraction relatif du prisme par rapport à l'air.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par VRAI ou FAUX

- Il y a toujours un rayon réfracté lorsque la lumière rencontre la surface de séparation de deux milieux transparents.
- Il y a réflexion totale lorsque la lumière passe d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent.
- Le sinus de l'angle d'incidence varie proportionnellement au sinus de l'angle de réfraction ;
- L'indice de réfraction relatif n peut être plus grand ou plus petit que 1.
- Le coeur d'une fibre optique est toujours plus réfringent que sa périphérie.
- L'indice de réfraction ne dépend que de la nature de la substance.

2- Recopier et compléter par les mots choisis dans les parenthèses

L'eau est un milieu transparent (plus / moins) réfringent que l'air. Lorsque la lumière se propage d'un milieu transparent vers un autre milieu transparent plus réfringent, le rayon réfracté (s'écarte / se rapproche) de la normale à la surface de séparation.

La réflexion totale peut s'observer lorsque le milieu d'incidence est (plus / moins) réfringent que le milieu de réfraction. Lorsque l'angle d'incidence d'un rayon augmente, l'angle de réfraction (diminue / augmente) quel que soit l'indice de réfraction.

3- Pour avoir le plus de chance d'attraper un poisson dans l'eau les oiseaux pêcheurs plongent en piquant **verticalement** d'une grande hauteur. Expliquer pourquoi.

Je sais appliquer le cours.

- 4- Un rayon lumineux se propageant dans l'air, pénètre dans un liquide sous un angle d'incidence de 40° . L'angle de réfraction vaut 30° . Calculer l'indice de réfraction du liquide par rapport à l'air.
- 5- Un pinceau lumineux se propage dans le verre d'indice 1,5 par rapport à l'air ; il se réfracte dans l'air. L'angle de réfraction est égal à 60° . Quel est l'angle d'incidence ?
- 6- L'indice relatif d'un milieu transparent (1) par rapport à un milieu transparent (2) est égal à 2. Déterminer l'angle de réfraction limite.
- 7- Un objet lumineux posé au fond d'un bassin rempli d'eau envoie vers la surface libre un faisceau de lumière divergent ; 3 rayons lumineux sont représentés sur la figure (Fig.21), faisant avec la surface les angles respectifs $i_1 = 90^\circ$, $i_2 = 60^\circ$, $i_3 = 30^\circ$. Sachant que l'indice de l'eau est 1,33 préciser pour chacun de ces rayons s'il va donner un rayon réfléchi ou un rayon émergent réfracté. Déterminer dans chaque cas l'inclinaison du rayon correspondant par rapport à la surface de l'eau.
- 8- Sur la figure 22 ci-contre on a schématisé trois faisceaux lumineux au point d'incidence d'une surface de séparation entre deux milieux transparents (1) et (2). Compléter le schéma en indiquant par des flèches les sens de propagation de la lumière sur les trois faisceaux. Indiquer le milieu le plus réfringent.
- 9- Un faisceau lumineux conique converge en un point O. Il donne sur un écran situé à un mètre du point O une tache de 35 cm de rayon. On interpose une demi-boule d'indice de réfraction n comme indiqué sur la figure 23, le point O coïncidant avec le centre de la face plane de la demi-boule. On constate que le rayon de la tache sur l'écran n'est plus que de 23 cm. Déterminer l'indice de réfraction de la substance constituant la demi-boule.
- 10- Dans chacune des figure ci-après, un rayon lumineux SI arrive en I sur un dioptre séparant deux milieux transparents différents.
- Dans quels cas le rayon est-il réfracté ?
 - Préciser dans chaque cas le milieu le plus réfringent.

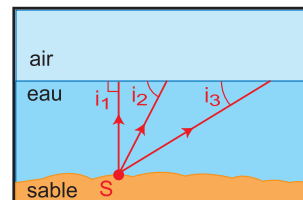


Fig. 21

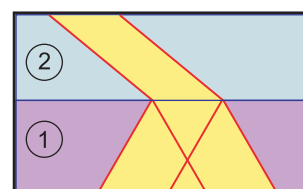


Fig. 22

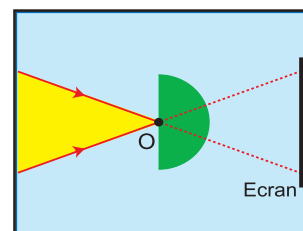


Fig. 23

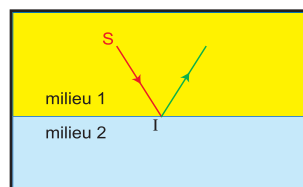


Fig. 24-c

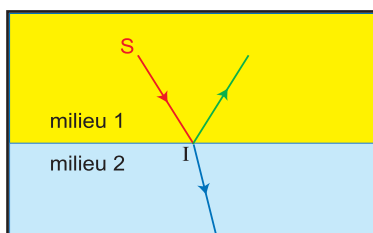


Fig. 24-a

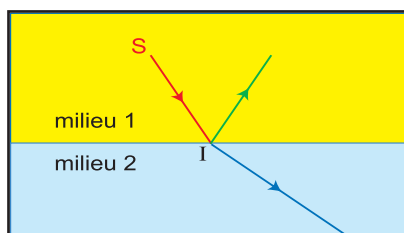


Fig. 24-b

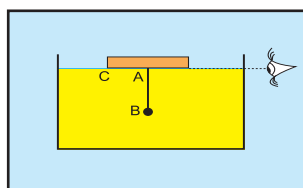


Fig. 25

- 11- Une épingle AB est plantée perpendiculairement au centre du bouchon de liège de rayon $AC = 5\text{cm}$. L'oeil qui vise tangentiellement à la surface de l'eau, cesse de voir l'extrémité B de l'épingle lorsque $AB = 4,4\text{ cm}$. Calculer l'angle de réfraction limite relatif au couple de milieux air-eau.(Fig. 25).

TERRE ET UNIVERS

PARTIE 5



Le système solaire



Jupiter et ses satellites

OBJECTIF

- Appliquer la loi de la Gravitation universelle.



Nuages vus du ciel

OBJECTIFS

- Mettre en évidence l'existence de la pression atmosphérique.
- Lire une carte météorologique pour prévoir le temps qu'il fera.

Prérequis

SAVOIRS

- Je connais les caractéristiques du poids d'un corps.
- Je connais la position de la Terre et du Système solaire dans l'Univers
- Je connais des ordres de grandeurs spatiaux et temporels.

SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX

- Je sais reconnaître quelques constellations.
- Je sais distinguer une planète d'une étoile.

SAVOIR-FAIRE THEORIQUES

- Je sais décrire le système solaire .
- Je sais expliquer la succession des jours et des nuits ainsi que celle des saisons.
- Je sais appliquer la 1^{ère} loi de Newton
- Je sais appliquer la 3^{ème} loi de Newton

GRAVITATION
UNIVERSELLE

Jupiter et ses satellites

OBJECTIF

- Appliquer la loi de la Gravitation universelle.

Situation

L'action que la Terre exerce sur un corps est le **poids** de ce corps. On sait que le poids est une force capable de :

- ralentir le mouvement d'un corps en **chute libre** lors d'une montée,
- accélérer le mouvement d'un corps en **chute libre** lors d'une descente,
- incurver les trajectoires des mouvements de **chute libre** vers le bas quand les corps sont lancés obliquement.

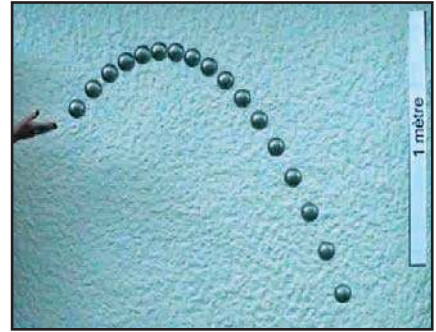


Fig .1

En effet, quand on lance obliquement une balle, elle effectue un mouvement curviligne décrivant une trajectoire parabolique dont la concavité est dirigée vers le sol (Fig.1). En l'absence de poids le mouvement serait, conformément à la 1^{ère} loi de Newton (principe de l'inertie) rectiligne uniforme. Ce qui n'est pas le cas.

Si la Terre est capable d'incurver la trajectoire d'une balle, ne serait-elle pas capable d'incurver la trajectoire d'un satellite situé à quelques centaines de kilomètres d'altitude, ou celle de la Lune distante de quelques centaines de milliers de kilomètres ?

1. Forces et mouvement circulaire uniforme



Fig .2

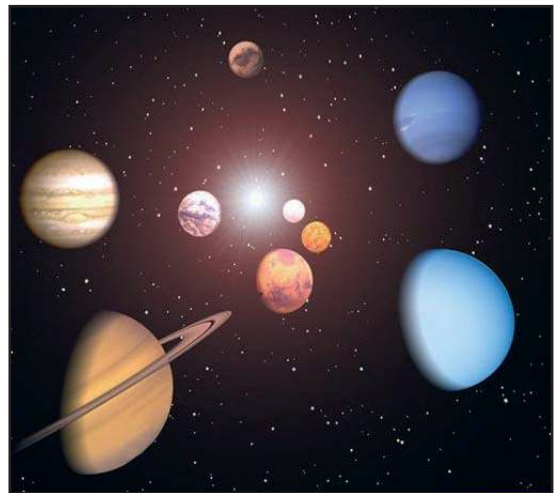


Fig .3

Qu'est-ce qui retient la Lune à la Terre ? Qu'est-ce qui assure la cohésion du Système solaire ?

Attachons un corps, de masse $m = 50\text{g}$, à l'extrémité d'un fil de longueur $\ell = 1\text{m}$. Faisons tourner le corps dans un plan horizontal en essayant d'obtenir un mouvement circulaire uniforme stable (Fig.4).

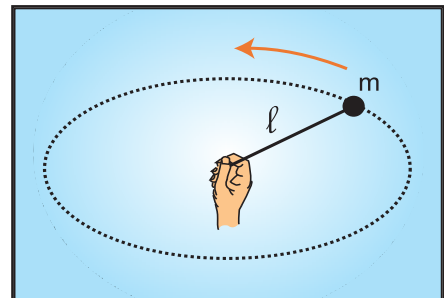


Fig .4

Le fil est **tendu**. Il exerce sur la main une tension $\vec{T}$. La main doit exercer constamment une force $\vec{F}$ (directement opposée à $\vec{T}$, d'après la 3^{ème} loi de Newton) pour maintenir l'extrémité du fil **immobile** au centre de la trajectoire (Fig.5).

Le corps est maintenu sur sa trajectoire par la tension $\vec{T}'$ du fil ; si le fil se casse cette tension disparaît et le corps se met en mouvement de chute libre avec une vitesse initiale horizontale (celle qu'il avait sur la trajectoire circulaire à la rupture du fil).

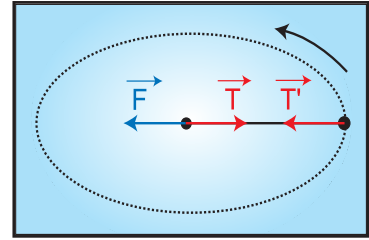


Fig .5

C'est l'interaction de contact entre le corps et la main, transmise de part et d'autre par un solide (le fil tendu), qui maintient le corps sur sa trajectoire circulaire.

Remarque

La tension du fil, que l'on peut mesurer avec un dynamomètre inséré entre la main et le fil, devient pour des vitesses de rotation très modestes (3 tours par seconde) très grande (40 fois) par rapport à l'intensité du poids du solide dont on peut alors négliger les effets dans le raisonnement précédent.

L'expérience précédente suggère que pour qu'un satellite se maintienne sur sa trajectoire circulaire autour de la Terre, cette dernière doit exercer sur lui une force d'attraction à distance. La seule force qui s'exerce sur un satellite dans le vide spatial est le **poids**. C'est donc le poids du satellite qui le maintient constamment sur sa trajectoire circulaire (Fig.6).

Ce qui est vrai pour le satellite est vrai pour la Lune située beaucoup plus loin : c'est le poids de la Lune qui la maintient sur sa trajectoire curviligne, sinon elle partirait en mouvement rectiligne uniforme, conformément à la première loi de Newton.

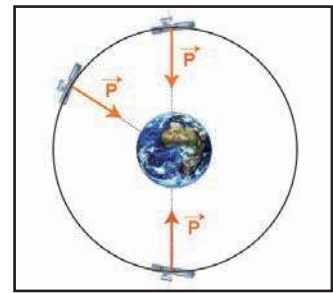


Fig .6

Entre la Terre et la Lune, il existe une interaction appelée interaction gravitationnelle. Le poids d'un corps résulte de l'**interaction gravitationnelle**.

C'est à Isaac Newton que revient le mérite d'avoir, le premier en 1687, pensé à faire le lien entre les manifestations du phénomène de la pesanteur au niveau du sol (« **la pomme qui tombe** ») et la force d'attraction qui retient la Lune sur son orbite.

2- Loi de gravitation universelle

Tout objet est soumis aux actions mécaniques dues à l'attraction exercée par la Terre sur toutes les particules de matière qui le constituent. Les forces de pesanteur sont **réparties dans tout le volume** du corps.

L'attraction exercée par la Terre sur un corps situé à une altitude quelconque a les caractéristiques de son poids, c'est-à-dire (Fig.7) :

- Sa **direction** : la verticale du lieu où se trouve le corps ; la verticale est une droite qui passe par le centre de la Terre.
- Son **sens** : vers le bas ; vers le centre de la Terre.
- Son **point d'application** : le centre de gravité G du corps.
- Son **intensité** : $\|\vec{P}\| = m \cdot \|\vec{g}\|$. Elle est proportionnelle à la masse du corps.

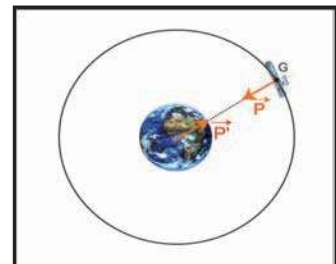


Fig .7

Réciproquement et d'après la 3^{ème} loi de Newton, le corps exerce sur la Terre une force $\vec{P}'$ directement opposée au poids et appliquée au centre de gravité de la Terre.

Newton a généralisé l'existence d'une telle interaction entre tous les corps et pas seulement entre la Terre et un corps.

Pour pouvoir généraliser ce fait à tous les corps, Newton a formulé sa loi de Gravitation universelle en décrivant les éléments de l'interaction entre deux points matériels.

Loi de gravitation

Entre deux points matériels A et B de masses respectives m et m' s'exercent **à distance** les deux forces : $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ telles que :

- $\vec{F}_{A/B} + \vec{F}_{B/A} = \vec{0}$; les forces sont directement opposées ;
- ces forces ont une même droite d'action qui est la droite (AB) ;
- ces deux forces sont toujours des forces d'**attraction** mutuelle;
- la valeur commune de l'intensité de ces deux forces est une fonction **croissante** de la masse de chacun des deux points matériels (m et m') et une fonction **décroissante** de la distance $d = AB$ qui les sépare.

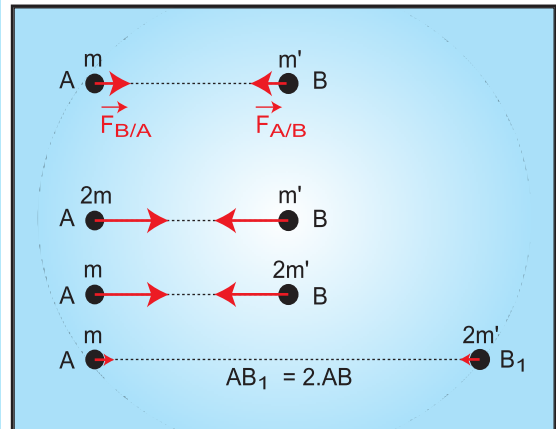


Fig .8

INTERACTION GRAVITATIONNELLE EXERCEE PAR UN CORPS SPHERIQUE

Considérons un corps homogène de forme sphérique : boule pleine, coquille sphérique creuse d'épaisseur faible par rapport au rayon. On démontre que le corps sphérique équivaut, du point de vue de l'attraction universelle qu'il exerce, à un point matériel de même masse que le corps et coïncidant avec le centre de la sphère.

Il en est de même pour un corps sphérique constitué d'un nombre quelconque de coquilles sphériques homogènes (de masses volumiques diverses), superposées et de même centre. La Terre, comme la majorité des corps célestes, est ainsi constituée de couches sphériques pratiquement homogènes mais de masses volumiques différentes.

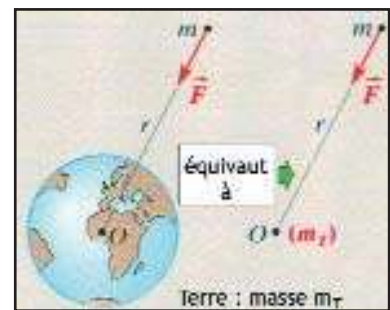


Fig .9

Le Soleil, la Terre, la Lune, toutes les étoiles et les planètes peuvent ainsi être «remplacées» dans les calculs par leur centre en y concentrant la masse totale (Fig.9).

Si nous acceptons facilement l'existence de l'action de la Terre sur les corps comme un cas particulier de la Gravitation universelle, nous sommes plutôt étonnés d'apprendre que tous les objets matériels s'attirent mutuellement. Pourquoi ne remarquons-nous pas dans la vie quotidienne, cette attraction entre les objets qui nous entourent ?

Entre des corps de masse courante, quelques kilogrammes ou quelques tonnes, les forces de gravitation existent mais elles sont tellement faibles que leurs effets sont très difficilement décelables dans la vie quotidienne. Leurs effets sont masqués par ceux d'autres forces d'intensité beaucoup plus élevées : poids des corps, forces de frottements, résistance de l'air...

En présence de corps de masses très élevées, comme les planètes, la Lune, le Soleil..., les forces de gravitation prennent des valeurs mesurables avec des instruments ordinaires et décelables par nos sens.

Le seul corps de forte masse avec lequel nous interagissons au quotidien est la Terre. Sa masse est de l'ordre de 6.10^{24}kg . C'est en raison de la valeur élevée de sa masse que la Terre est capable d'exercer une force appréciable, le poids, sur les corps de son voisinage.

L'influence gravitationnelle de la Terre ne se limite pas à son voisinage ; il en est de même de l'influence du Soleil qui interagit avec les étoiles les plus proches hors du Système solaire.

Ainsi les interactions de gravitations ont une portée pratiquement infinie quoiqu'elles s'affaiblissent quand les distances augmentent.

3. Mouvement des astres

C'est pour expliquer le mouvement des astres dans le ciel et pour construire un modèle du Système solaire le plus proche possible de la réalité observable, que les savants ont travaillé depuis la plus haute antiquité.

Les lois relatives au mouvement des planètes autour du Soleil ont été découvertes par Képler en 1619, bien avant la naissance de Newton.

La loi de Gravitation universelle proposée par Newton donna une explication magistrale et quasiment parfaite des mouvements à l'intérieur du Système solaire et permit de redémontrer les lois de Képler.

Le Soleil est une étoile dont la masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ kg. La masse de l'ensemble des planètes et leurs satellites n'atteint pas 2 millièmes de la masse du Soleil.

L'intensité de l'attraction gravitationnelle du Soleil est suffisamment élevée pour retenir sur leurs orbites l'ensemble des planètes jusqu'à des distances de plusieurs milliards de kilomètres.

C'est encore l'attraction gravitationnelle de chaque planète qui retient sur leurs orbites respectives les satellites naturels (ou lunes) qu'elle possède.

La Lune est beaucoup plus proche de la Terre que du Soleil ; elle subit l'attraction de l'une et de l'autre mais c'est l'attraction de la Terre qui est prépondérante. C'est ainsi que les planètes géantes (Jupiter et Saturne) sont chacune au centre d'un véritable système planétaire avec plus de 15 lunes en orbite à des rayons divers (Fig.10).

La cause primordiale de tous ces mouvements dans le Système solaire est toujours la Gravitation. La gravitation universelle régit en fait les mouvements dans l'Univers à une échelle encore plus vaste.

L'ensemble de notre galaxie forme à son tour un système matériel dont toutes les étoiles sont en interaction gravitationnelle et avec un centre (noyau de la galaxie) qui semble être supermassif. C'est ce qui explique le mouvement de toutes les étoiles autour de ce centre et la forme en spirale que possède la Voie Lactée (Fig.11).

Les astronomes ont pu mettre également en évidence les interactions gravitationnelles entre galaxies.



Fig .10 Satellites de Jupiter



Fig .11 Forme spirale de la Voie Lactée

4. Phénomène des marées

La Lune très proche de la Terre et de masse beaucoup plus petite, subit l'attraction gravitationnelle de celle-ci et gravite autour d'elle sur une trajectoire presque circulaire.

Mais, conformément à la 3^{ème} loi de Newton, la lune exerce elle aussi une attraction sur la Terre et crée à sa surface des perturbations dont la principale et la plus spectaculaire est le phénomène des marées (Fig.12).

La marée est un phénomène d'oscillation périodique du niveau des mers, dû aux forces attractives qu'exercent la Lune et le Soleil sur la Terre et ses océans.

La marée est « haute » aux endroits situés sur l'axe Terre-Lune et sur les deux faces opposées de la Terre.(Fig.13-a)

La marée est « basse » aux endroits situés sur un axe perpendiculaire au précédent et sur les deux faces opposées de la Terre.(Fig.13-b)

Comme la Terre effectue un tour sur elle-même en 24 heures, en chaque point de la surface de la Terre on observe à chaque quart de tour de la Terre (6 heures) successivement : une marée haute, une marée basse, une marée haute,...

Si le Soleil et la Lune se trouvent à angle droit par rapport à la Terre, ce qui arrive tous les quinze jours, leurs forces d'attraction se contrarient, donnant lieu à des marées de faible amplitude : ce sont les marées dites de « mortes-eaux »(Fig.13-c). Lorsque la Lune et le Soleil sont alignés avec la Terre, leurs forces s'additionnent, ce qui provoque les marées dites de « vives-eaux »(Fig.13-d).



Fig .12-a



Fig .12-b

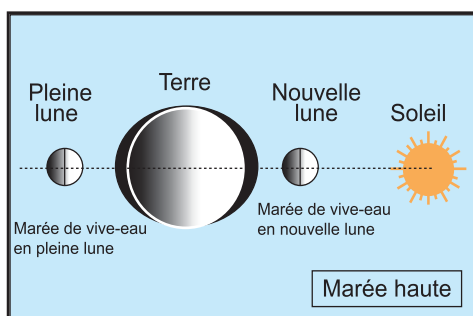


Fig .13-a

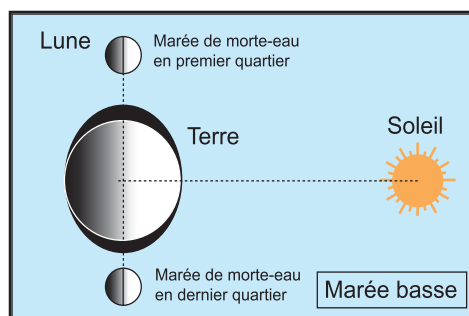


Fig .13-b



Fig .13-c

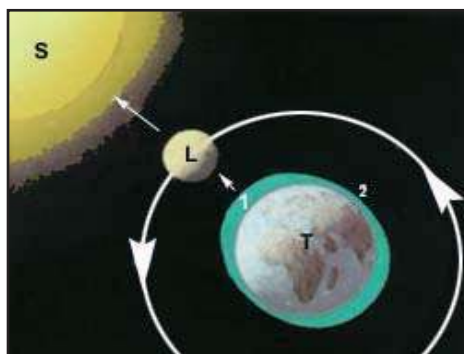


Fig .13-d

L'essentiel du cours

Loi de gravitation

Entre deux points matériels A et B de masses respectives m et m' s'exercent à distance les deux forces : $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ telles que :

- $\vec{F}_{A/B} + \vec{F}_{B/A} = \vec{0}$; les forces sont directement opposées ;
- ces forces ont une même droite d'action qui est la droite (AB) ;
- ces deux forces sont toujours des forces d'attraction mutuelle ;
- la valeur commune de l'intensité de ces deux forces est une fonction croissante de la masse de chacun des deux points matériels (m et m') et une fonction décroissante de la distance $d = AB$ qui les sépare.

La portée de l'interaction gravitationnelle est infinie, mais son intensité décroît avec la distance.

Les corps à répartition sphérique de masse se comportent du point de vue de la gravitation comme des masses ponctuelles, situées au centre de ces corps.

Les mouvements des corps célestes sont régis par des lois fondées essentiellement sur la loi de gravitation universelle.

Le phénomène des marées est une manifestation quotidienne observable de l'interaction gravitationnelle entre la Terre, le Soleil et la Lune.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

1- Répondre par VRAI ou FAUX aux affirmations suivantes

- Les forces de gravitation s'exercent entre corps en mouvement seulement.
- Les forces de gravitation sont appliquées au centre de gravité des corps.
- La Lune est soumise à l'influence gravitationnelle de la Terre et du Soleil simultanément.
- La masse de la Lune étant beaucoup plus faible que celle de la Terre, la force gravitationnelle qu'elle exerce sur la Terre est inférieure à celle qu'elle subit de la part de cette dernière.
- Entre certains corps les forces de gravité peuvent être répulsives.
- L'intensité de la force gravitationnelle subie par un corps donné est une fonction croissante de la masse du corps agissant.
- L'intensité des interactions gravitationnelles est nulle au-delà d'une certaine distance entre deux corps donnés.

2- Recopier et compléter

La trajectoire du mouvement d'un corps lancé à la surface de la Terre est incurvée vers sous l'influence de.....

La force gravitationnelle engendrée par un corps homogène de masse m et de forme sphérique est identique à celle créée par un point matériel de masse..... placé au.....

Je sais appliquer le cours

- 3- Une planète A et une planète B ont exactement la même masse mais pas le même diamètre. Un même astronaute se sent « plus léger » sur la planète A. Laquelle des deux planètes (supposées à symétrie sphérique) a le plus grand diamètre ? Justifier.

4- Sur le schéma ci-contre (Fig.14) on a représenté la Terre, la Lune et le Soleil dans une position de 1^{er} ou dernier quartier. Recopier et schématiser les interactions gravitationnelles entre ces trois corps.

5- La série de voyages vers la Lune des débuts de l'ère spatiale s'effectuaient sur une trajectoire dite en « huit (8) », moteurs arrêtés quelques minutes après le départ.

La question suivante a été posée par un journaliste, lors d'une conférence de presse, à l'un des astronautes qui sont dans l'espace en route vers la Lune: « Pendant que vous parlez, qui est aux commandes du vaisseau ? ». Pourquoi a-t-il répondu : « C'est Newton ».

Représenter les forces de gravitation auxquelles est soumis le vaisseau aux points indiqués sur le schéma.

Que peut-on dire de ces forces au point de croisement des trajets aller et retour ?

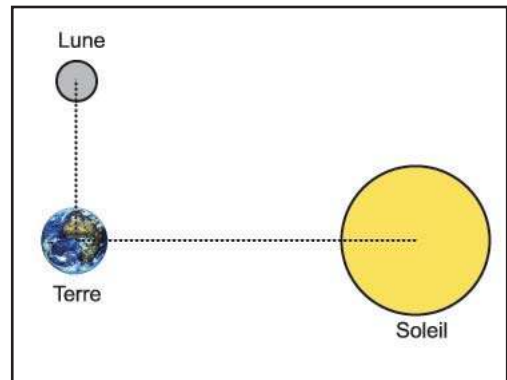


Fig .14

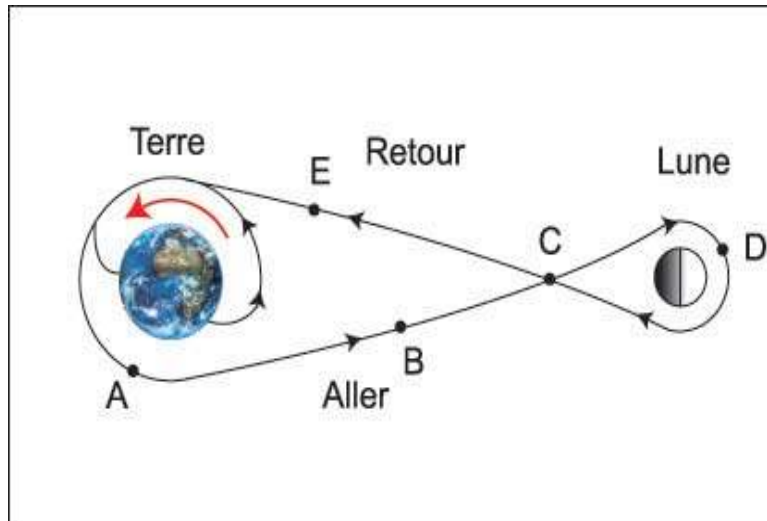


Fig .15

L'Europe de La Renaissance a vécu un énorme foisonnement d'idées nouvelles souvent révolutionnaires aussi bien sur le plan religieux et culturel que sur le plan scientifique. Ces idées rompaient parfois tellement avec la tradition que l'Eglise, encore toute puissante, les trouvaient subversives et n'hésitait pas souvent à lancer la redoutable Inquisition aux trousses des « hérétiques ».

L'**héliocentrisme** qui prônait la position centrale du Soleil dans le système solaire avec toutes les autres planètes autour (y compris la Terre) était une de ces idées qui commençait à faire des adeptes . Elle rompait avec le **géocentrisme**, doctrine officielle de l'Eglise, qui était enseignée depuis 14 siècles et qui plaçait la Terre au centre de l'Univers avec tous les autres corps célestes tournant autour d'elle.

Nicolas Copernic (1473-1543) : Astronome polonais , il a abandonné le géocentrisme et repris l'hypothèse héliocentrique déjà émise par le grec Aristarque de Samos (310-230 av.J.-C.). Copernic considérait que les orbites des planètes et de la Lune étaient circulaires. Par crainte d'être brûlé par l'Eglise, il n'a jamais osé publier ses travaux de son vivant. Ils ont été publiés à sa mort en 1543.

Tycho Brahe (1546-1601) : Astronome danois brillant, il a perfectionné l'observation du ciel en créant de ses mains les instruments précis dont il avait besoin. Il ne croyait pas au système de Copernic mais il a réussi à accumuler un volume impressionnant de données astronomiques d'une précision inégalée à l'époque. Il a rencontré Kepler à Prague ; ce dernier était son disciple et lui a succédé. Tycho Brahe lui a légué ses précieux cahiers de données à sa mort.

Johannes Kepler (1571-1630) : Illustre astronome et physicien allemand, partisan convaincu du système de Copernic, il était également un brillant mathématicien. C'est en tant que tel qu'il a pu réaliser, à partir de la masse de données léguées par Tycho Brahe, une synthèse dans laquelle il confirme de façon magistrale le système de Copernic tout en le corrigeant (trajectoires elliptiques au lieu d'être circulaires). Il publie ses fameuses lois (3 lois de Kepler) en 1619.

Galileo Galilei, dit **Galilée** (1564-1642) : Mathématicien, physicien et astronome italien, convaincu de la valeur du système de Copernic, il a énoncé le principe de l'inertie avant Newton .Il a inventé la première lunette astronomique qui a permis d'observer pour la première fois les gros satellites de Jupiter. Son influence dans les milieux intellectuels de l'époque était tellement grande qu'il dut, lors d'un procès historique, renier publiquement ses idées, sous peine d'être brûlé vif par l'Inquisition.

Isaac Newton (1642-1727) : Mathématicien, physicien et astronome anglais, il est considéré comme l'un des plus grand scientifique de l'histoire de l'Humanité et comme le fondateur de la Mécanique classique (dite newtonienne). Il publie en 1687 une synthèse de l'ensemble des connaissances en Mécanique et des travaux de ses prédécesseurs, couronnée par la découverte de la loi de la gravitation universelle (Fig.16).

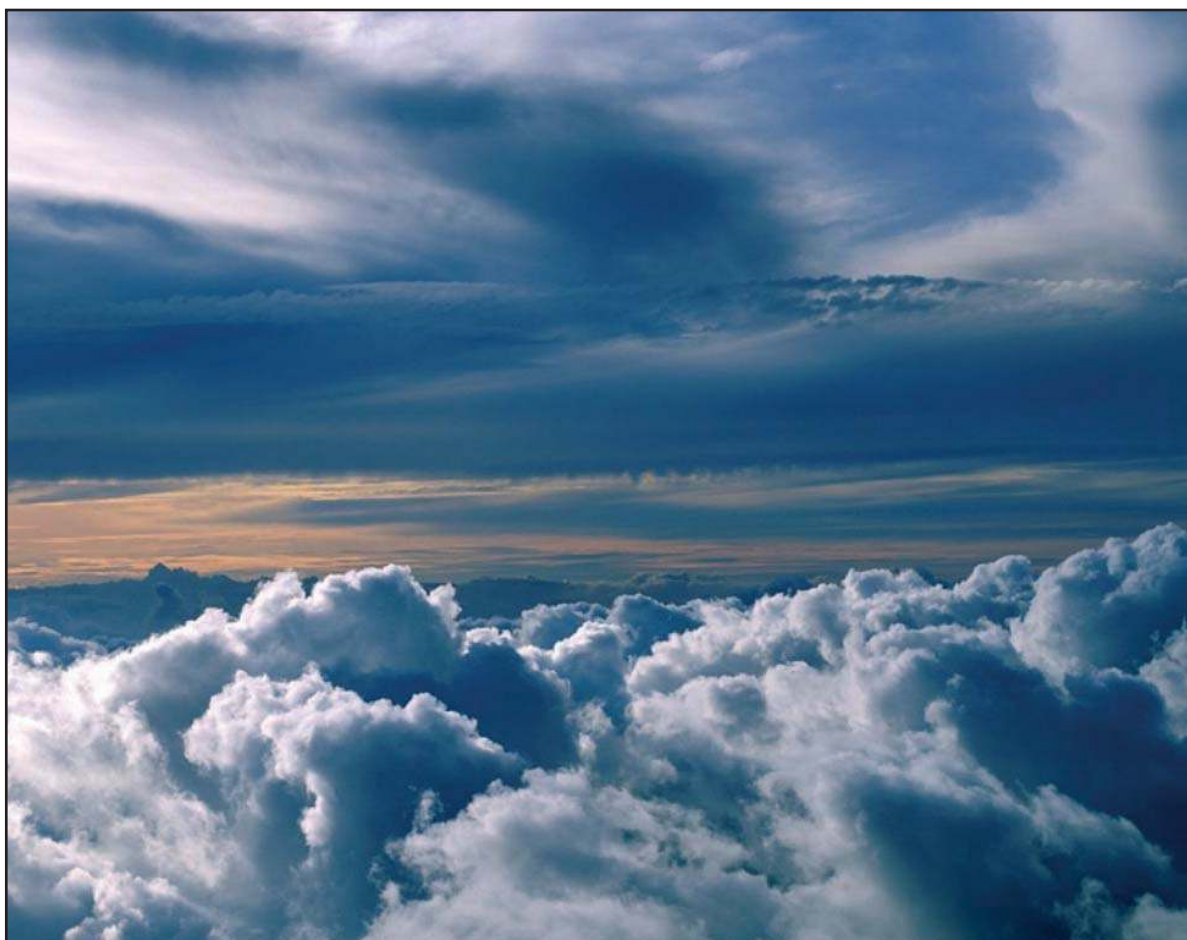


Fig .16 Newton

PRESSION ATMOSPHERIQUE

CHAPITRE

22



Nuages vues du ciel

OBJECTIFS

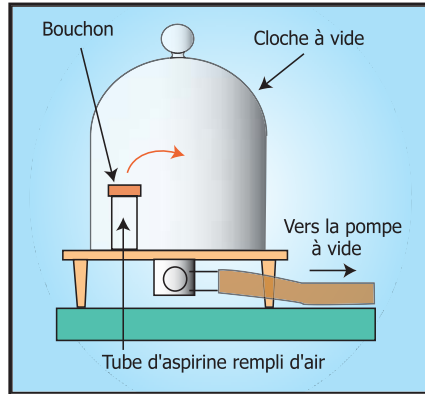
- Mettre en évidence l'existence de la pression atmosphérique.
- Lire une carte météorologique pour prévoir le temps qu'il fera.

Situation



Expérience 1

La bouteille en plastique se déforme lorsqu'on fait un vide partiel à l'intérieur. Pourquoi ?



Expérience 2

Lorsqu'on aspire l'air sous la cloche, le bouchon du tube d'aspirine saute. Pourquoi ?

A quoi est dû le bourdonnement aux oreilles ressenti lors d'une descente en altitude ?
En quoi consiste la **pressurisation** à l'intérieur d'un avion en vol ?

1. Existence de la pression atmosphérique

Remplissons un verre d'eau à ras bords. Fermons le en appliquant sur les bords un carton léger sans laisser de bulles sous le carton. Retournons le verre.

La feuille de carton reste collée au verre et l'eau ne tombe pas (Fig.1). L'eau du verre exerce des forces pressantes sur le carton. La Terre est entourée d'une couche d'air, appelée **atmosphère**. L'air extérieur exerce des forces pressantes qui s'opposent à celles exercées par l'eau. Comme celles exercées par les liquides ces forces sont normales aux parois sur lesquelles elles s'exercent.

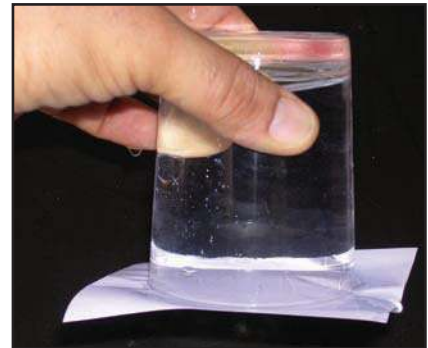


Fig .1

L'air atmosphérique exerce des forces pressantes sur tous les corps avec lesquels il est en contact. Ces forces sont normales aux surfaces en contact avec l'air.

Mettons sur le plateau d'une pompe à vide une cloche de verre munie d'une large ouverture. Obturons avec une membrane en caoutchouc (baudruche) l'ouverture de la cloche et mettons en marche la pompe à vide pour retirer l'air de l'intérieur de la cloche.

La membrane s'incurve progressivement vers l'intérieur et finit par éclater (Fig.2). La déformation de la membrane est semblable à celle observée sur la capsule manométrique introduite dans un liquide. Les forces pressantes de l'air intérieur deviennent de plus en plus faibles à mesure qu'il se raréfie. Les forces pressantes de l'air extérieur agissant seules font éclater la membrane.

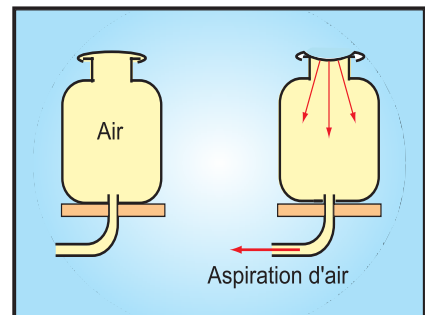


Fig .2

Sur les deux faces d'une membrane placée dans l'air atmosphérique au repos s'exercent des forces pressantes de sens contraires qui se neutralisent.

Réalisons l'expérience historique des hémisphères de Magdebourg (1654) : deux demi-sphères métalliques épaisses munies d'anneaux, d'une dizaine de centimètres de diamètre, peuvent s'adapter exactement l'une sur l'autre de manière à former une cavité intérieure étanche qui ne communique avec l'extérieur que par une tubulure munie d'un robinet (Fig.3). Faisons le vide poussé dans la cavité et fermons le robinet.

Il devient très difficile de les séparer même en tirant très fortement sur les anneaux. Sur la face externe de la sphère les forces pressantes de l'air atmosphérique continuent à s'exercer, alors que pratiquement aucune force ne s'exerce sur la face intérieure.

En ouvrant le robinet pour faire rentrer l'air, les hémisphères se séparent sans aucun effort.

Les forces pressantes exercées par l'air atmosphériques ont des intensités appréciables sur des surfaces pressées de l'ordre du décimètre carré.

Dans l'expérience historique de Magdebourg, on a utilisé des hémisphères de 80cm de diamètre. Il a fallu deux attelages de 8 chevaux chacun tirant dans des sens opposés pour les séparer.

Toutes ces expériences montrent que l'air atmosphérique exerce sur tous les corps en contact avec lui une **pression**, appelée **pression atmosphérique** p_{atm} .

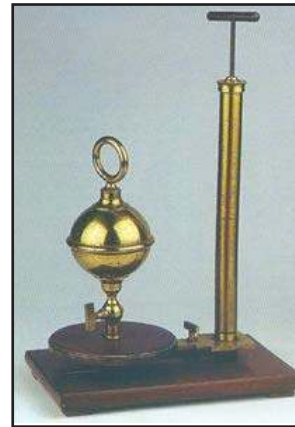


Fig .3 Hémisphères de Magdebourg

Remarque

Cette pression s'exerce à la surface d'un liquide au repos en contact avec l'air. Comme la surface libre du liquide est plane et horizontale, on peut affirmer que la pression du liquide en tout point de sa surface libre est égale à la pression atmosphérique.

2. Mesure de la pression atmosphérique

2.1- Expérience de Torricelli

Attention

Le mercure est dangereux à manipuler directement : ses vapeurs sont toxiques.

Remplissons un tube de verre de 1 m de longueur environ de mercure. Après l'avoir bouché, puis retourné et enfoncé dans une cuvette contenant du mercure (Fig.4), enlevons le bouchon.

Le niveau du mercure descend dans le tube et se stabilise à une certaine hauteur H voisine de 76 cm au-dessus de la surface libre du mercure dans la cuvette. Au-dessus de la surface libre du mercure dans le tube, il n'y a pas d'air : c'est pratiquement le vide.

Quelles que soient la forme du tube utilisé, sa section ou son inclinaison par rapport à la verticale, le niveau du mercure se stabilise à la même hauteur H (Fig.5).

Appliquons le principe fondamental de l'hydrostatique pour les deux points A et B situés sur la surface libre du mercure respectivement dans la cuvette et à l'intérieur du tube. On peut écrire :

$$p_A - p_B = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot H$$

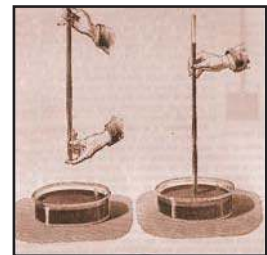


Fig .4 Expérience de Torricelli (Gravure ancienne)

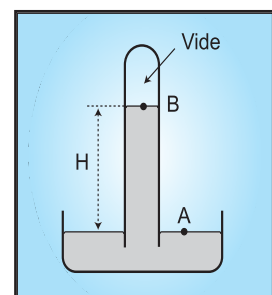


Fig .5

La pression p_B est nulle à cause du vide qui règne dans la partie supérieure du tube ; la surface libre de la cuvette étant en contact avec l'air atmosphérique, la pression en A est égale à la pression atmosphérique p_{atm} . D'où : $p_A = p_{atm} = \rho \cdot ||\vec{g}|| \cdot H$

Dans le **Système International**, la **pression atmosphérique s'exprime en pascal (Pa)**.

Activité

Calculer la valeur de la pression atmosphérique lorsque la hauteur du mercure dans le tube est $H = 0,76\text{m}$ et la masse volumique du mercure à la température de l'expérience $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
On prendra $||\vec{g}|| = 9,8 \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

la **valeur de la pression atmosphérique est de l'ordre de 10^5Pa , soit 1 bar.**

Le pascal est une unité trop faible, on utilise fréquemment en Météorologie des multiples du pascal :

l'hectopascal (hPa) = 100 Pa ou le millibar (mbar) = 100Pa

On mesure la pression atmosphérique avec des instruments appelés **baromètres**.

2.2- Les baromètres

Baromètre à mercure

L'expérience de Torricelli (1643) a fourni le principe de la mesure de la pression atmosphérique en la ramenant à une mesure de la hauteur H d'une colonne de mercure, appelée « **hauteur barométrique** ».

Avec le baromètre à mercure, on détermine la pression atmosphérique en mesurant la distance H entre les plans horizontaux contenant les surfaces libres du mercure à l'intérieur et à l'extérieur du tube. Pour cela, il suffit d'accoler au tube une règle dont le zéro de la graduation coïncide avec le niveau du mercure de la cuvette. La mesure de la hauteur barométrique n'est correcte dans ces conditions que si le tube est **vertical**. (Fig.6)

On exprime ainsi couramment la **pression atmosphérique en « mm ou cm de mercure »**.

$p_{atm} = 760 \text{ mm de mercure}$ ce qui équivaut à $p_{atm} = 1013 \text{ hPa}$



Fig .6 Baromètre à mercure

Définition

On appelle **pression atmosphérique normale** la valeur correspondant à une hauteur barométrique $H = 760\text{mm}$ de mercure, soit $p_{atm} = 1013 \text{ hPa}$.

Les baromètres sont gradués indifféremment en « mm de mercure » ou en hPa (ou mbar).

Les baromètres à mercure sont précis mais fragiles, encombrants et peu pratiques. De plus le mercure à l'air libre dégage des vapeurs toxiques.



Fig .7-a Baromètre anéroïde

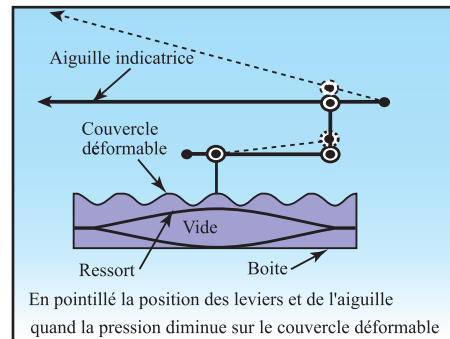


Fig .7-b Schéma du baromètre anéroïde

Baromètre anéroïde : le baromètre à déformation. (Fig.7-a, b)

Ce baromètre (appelé parfois « Baromètre d'appartement ») se compose d'une boîte métallique hermétique à parois latérales rigides à l'intérieur de laquelle on fait le vide. Le couvercle mince et ondulé est déformable. Un ressort calibré empêche l'écrasement du couvercle par les forces pressantes importantes dues à la pression atmosphérique. Les déplacements de cette paroi sous l'effet des variations de la pression atmosphérique sont transmis, par le biais de chaînes, d'engrenages et de leviers, à une aiguille se déplaçant devant le cadran gradué et étalonné du baromètre.

Baromètres actuels

Les baromètres actuels sont basés sur d'autres principes : ils utilisent des **capteurs de pressions** qui transforment les variations de pressions atmosphériques en une tension électrique variable transmise à un système électronique qui affiche directement les valeurs numériques de la pression atmosphérique. L'étalonnage de ces systèmes reste tributaire, cependant, du baromètre à mercure.

Ces baromètres sont robustes, peu encombrants, précis et beaucoup plus sensibles que le baromètre à mercure.

3. Variations de la pression atmosphérique

3.1- Variations avec l'altitude

La valeur de la pression atmosphérique au niveau de la mer est de l'ordre de 1 bar, soit 1000 hPa. Quand on transporte un baromètre du niveau de la mer à un endroit situé à une altitude élevée, il indique une valeur de la pression atmosphérique inférieure. Les services de la météo envoient en altitude des ballons-sondes avec des baromètres enregistreurs perfectionnés couplés à un radar pour la détermination de l'altitude du ballon à chaque instant. On obtient de la sorte un enregistrement des variations de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude comme celui de la figure 8 qui montre que :

- La variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude n'est pas linéaire.
- Elle **diminue** avec l'altitude : à 5600 m, sa valeur n'est plus que la moitié de celle au sol. (Fig.8)

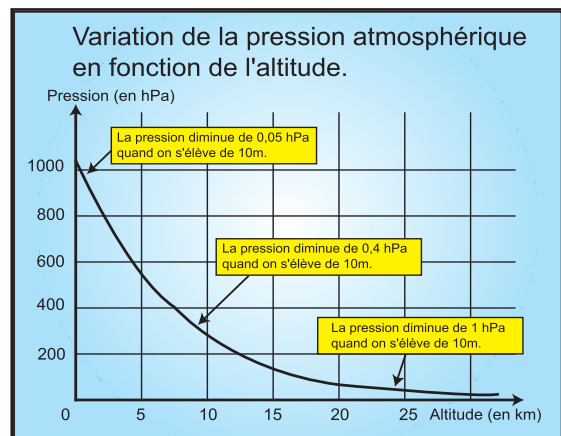


Fig .8

L'extension aux gaz du principe fondamental de l'hydrostatique permet d'interpréter ce fait : la pression en un point de l'atmosphère est due à la colonne d'air verticale qui surmonte ce point. Quand on s'élève en altitude, la hauteur de cette colonne d'air diminue, d'où la diminution de la pression.

⚠ Attention

Les gaz sont compressibles et leur masse volumique varie dans de larges limites en fonction de la pression et de la température. On ne peut pour ces raisons appliquer à l'atmosphère la même expression du principe fondamental de l'hydrostatique.

Le graphique des variations de la pression en fonction de l'altitude peut être utilisé pour déterminer l'altitude d'un lieu connaissant la valeur de la pression atmosphérique et on peut graduer directement en altitudes le cadran d'un baromètre métallique. On obtient ainsi un **altimètre**. Cet instrument est très utilisé par les aviateurs, les parachutistes...

Application

La diminution de la pression atmosphérique aux altitudes élevées produit des difficultés respiratoires dangereuses (« manque d'air »). C'est ce qui explique la nécessité de « pressuriser » les cabines des avions (qui volent à plus de 9000m) afin que la pression de l'air de l'habitacle soit de l'ordre de 800 hPa, c'est-à-dire voisine de la pression en montagne à 1000m.

3.2- Variations avec le lieu et avec le temps

Au niveau de la mer et au même instant, la pression atmosphérique n'a pas la même valeur à des endroits différents.

En un même lieu, le baromètre indique des valeurs différentes de la pression atmosphérique aux différentes heures de la journée par exemple.

Ces variations montrent que l'atmosphère n'est pas un fluide en équilibre ; des masses importantes d'air de température et de densité différentes sont en mouvement permanent autour de la Terre et sont à l'origine de ces variations de pression atmosphérique.

Ce sont ces mouvements de l'air atmosphérique (et des variations de pression qui les accompagnent) qui sont à l'origine des phénomènes **météorologiques** : vent, pluie, neige, sirocco...

On s'explique ainsi l'importance de la connaissance des variations de pression atmosphérique en vue de prévoir le temps qu'il fera dans les heures ou les jours qui suivent.

4. Les prévisions météorologiques

La **météorologie** est une science qui étudie l'atmosphère terrestre. En fait, elle observe et étudie seulement les 30 premiers kilomètres de l'atmosphère en contact avec la surface de la Terre : la **troposphère** et la **stratosphère** inférieure (Voir Infoscience).

Elle a pour objet d'en connaître les états actuels pour comprendre les phénomènes qui s'y déroulent afin de décrire le temps qu'il fait et de prédire le temps qu'il fera à plus ou moins brève ou longue échéance.

4.1- Comment sont faites les prévisions météorologiques ?

En un même lieu, la pression atmosphérique varie au cours du temps. Lorsqu'elle augmente, on peut espérer du beau temps; lorsqu'elle diminue, on s'achemine vers du mauvais temps. Mais ce n'est pas toujours aussi simple.

Les services météorologiques établissent à **des heures déterminées** des relevés de la pression atmosphérique en de nombreuses stations météo réparties sur de vastes zones de la terre.

Ces relevés permettent de tracer alors des **cartes météorologiques** obtenues en joignant par des lignes les points d'égale pression. Ces lignes sont appelées des isobares ou lignes **isobares**. (Fig.9)

Le tracé de ces lignes fait apparaître des zones de haute pression (**anticyclone A ou H**) et des zones de basse pression (**dépression D ou L**). La valeur de référence de la pression étant prise égale à 1013 hPa.

- ▶ L'**anticyclone A** de la figure correspond à une zone de haute pression 1025 hPa : il y fait beau temps.
- ▶ La **dépression D** est une zone de basse pression par exemple : 970 hPa : le temps est gris, il pleut.
- ▶ De l'évolution des isobares dans la journée, il est possible de faire des prévisions météorologiques jusqu'à cinq jours à l'avance.
- ▶ La succession rapide de plusieurs cartes météo sur un écran crée une animation qui visualise l'évolution et le cheminement des anticyclones et des dépressions sur une ou plusieurs journées et permet de faire des prévisions.

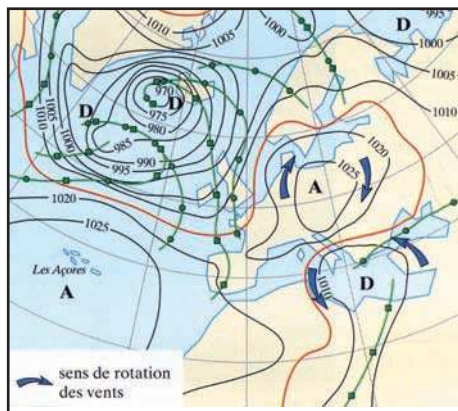


Fig .9

Autour de ces zones souffle le vent. En effet, l'air se déplace des zones de haute pression vers des zones de basse pression. Mais ce phénomène n'est pas aussi simple, car les masses d'air sont entraînées par la rotation de la Terre sur elle-même.

C'est pour cela que, dans l'hémisphère Nord, les vents se déplacent en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'un anticyclone et en sens inverse autour d'une dépression. Le phénomène est inversé dans l'hémisphère Sud.

Remarque

Des cartes météorologiques sont également produites pour différentes altitudes dans l'atmosphère. La connaissance des conditions qui règnent à diverses altitudes est essentielle pour effectuer des prévisions avec une bonne précision.

4.2- Lire une carte météorologique

Sur une carte météorologique de surface, on retrouve un ensemble de données à chaque station où les mesures (observations) ont été prises.

Les observations inscrites sur les cartes météorologiques ont toutes été relevées en même temps à la surface de la planète. Les relevés d'observation se font à des intervalles de 6 heures à partir de 0 h, Temps universel (TU), en vertu d'un accord international

Les symboles inscrits représentent les conditions météorologiques à la station à une heure précise. La figure 10 montre quelques uns des symboles utilisés par les techniciens de la météo :

a) Modèle de pointage

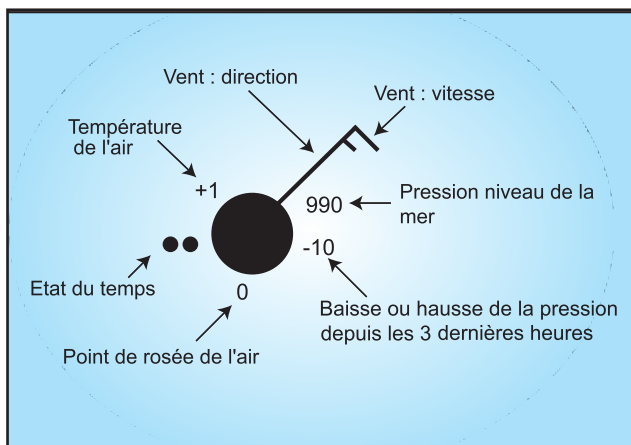


Fig .10-a

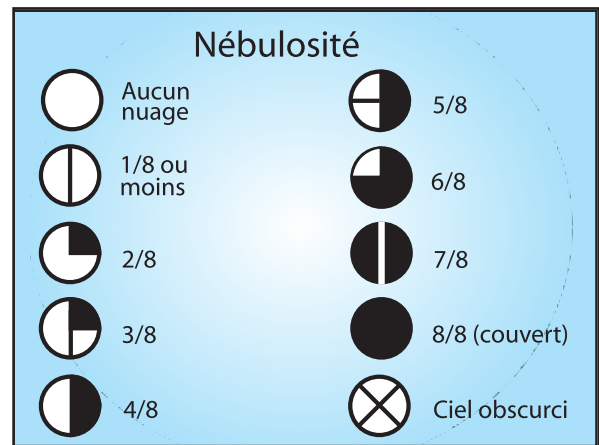


Fig .10-b

Voici comment décoder ces symboles (Fig.10) des cartes d'observations de surface.

Les symboles des cartes d'observations sont toujours placés au même endroit par rapport au cercle du milieu, qui, lui, est placé à l'endroit où sont faites les observations.

- **La couverture nuageuse** : La partie ombrée du cercle indique la partie du ciel couverte par les nuages. Sur la figure, le cercle est tout noir, ce qui indique que le ciel est complètement couvert. Autres symboles pour la couverture nuageuse (Fig.10-b).
- **Température de l'air** : La température de l'air est exprimée en degrés Celsius. Sur la figure, la température est de 1 °C.

- **La direction et la vitesse du vent** : le vent souffle du nord-est à une vitesse de 15 noeuds.
(1 nœud vaut 1,85 km.h⁻¹)
- **La pression au niveau de la mer** : 990,0 hPa (hectopascal) ou 99,0 kPa (kilo pascal). Dans le pointage de la pression au niveau de la mer, on omet le chiffre (ou les chiffres) des centaines et des milliers et la virgule des décimales. Une pression de 1012,3 hectopascals est donc pointée comme 123, une pression de 996,7 hectopascals, comme 967.
- **Baisse ou hausse** de la pression dans les trois dernières heures (tendance de pression) : Si la pression est maintenant plus élevée qu'elle ne l'était il y a trois heures, on emploie le signe plus (+) ; si elle est moins élevée, on emploie le signe moins (-). Le nombre représente la différence réelle de la pression, en dixièmes de hectopascal, sans la virgule des décimales. Donc, l'exemple donné sur la figure précédente signifie que le baromètre indique maintenant 1,0 hectopascal de moins qu'il y a trois heures.
- **Point de rosée** : Le point de rosée de l'air est exprimé en degrés Celsius. Sur la figure, la température du point de rosée est de 0 °C. Le point de rosée indique la température que devrait avoir l'air pour que la quantité de vapeur d'eau qu'il contient soit sur le point de se condenser. Lorsque la température de l'air est égale au point de rosée, l'air est saturé et l'humidité relative est de 100 %.
- **État du temps** : Le symbole indique qu'une pluie légère et continue est observée.

b) Isobares et symboles du temps

Les isobares sont tracées à des intervalles de quatre millibars, en partant de l'isobare 1000 mb et en ajoutant les autres lignes de part et d'autre, aussi souvent qu'il le faut.(Fig.11)

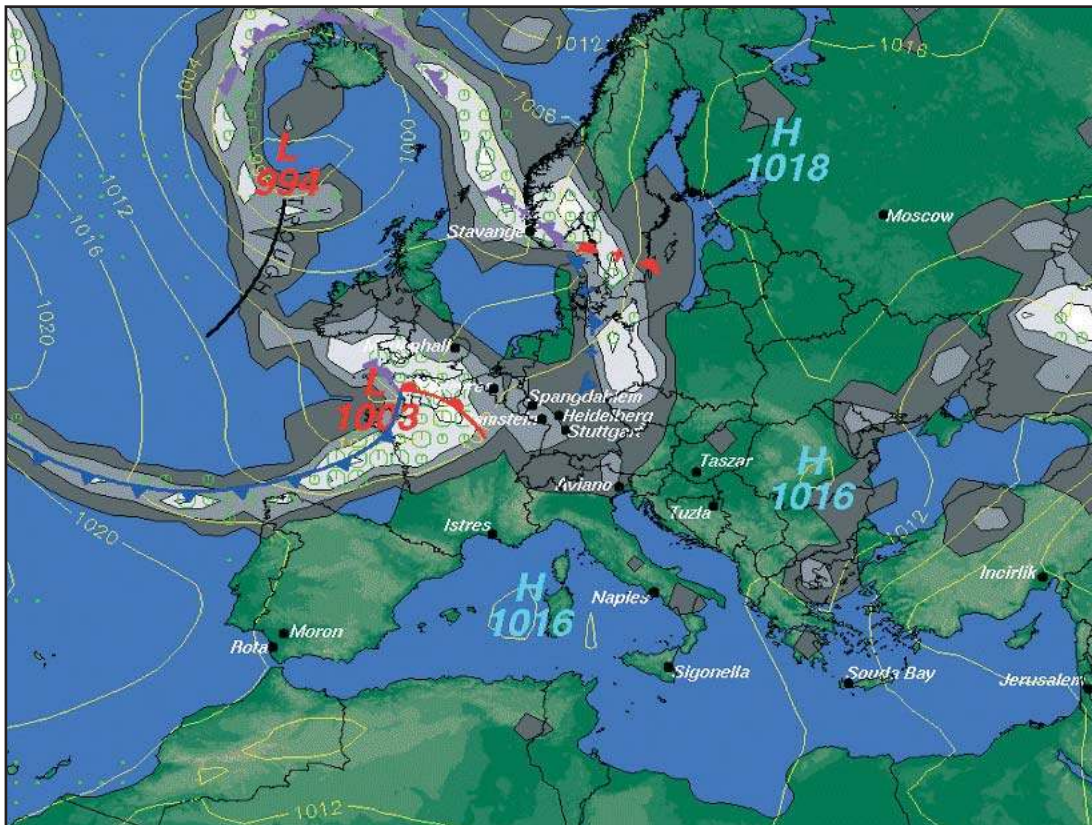


Fig .11

Puisque les pressions observées coïncident rarement avec la valeur des isobares données, le tracé demande un calcul d'une position approximative entre deux isobares.

c) Centres de pression et fronts

Les fronts : le front est une surface de séparation entre deux masses d'air de caractéristiques différentes (température et taux d'humidité). Le front est visible sur les photos satellitaires, il est généralement marqué par une zone nuageuse.

L'intensité des perturbations atmosphériques dépend de la différence de température entre les deux masses d'air.

Type de front	Représentation graphique	
	En couleur	En noir et blanc
Front froid		
Front chaud		
Front froid en altitude		
Front chaud en altitude		
Occlusion à caractère de front chaud		
Occlusion à caractère de front froid		
Front stationnaire		

Fig. 11b

Une fois les isobares tracées, les centres de pression se dessinent. Cependant, les fronts sont plus difficiles à placer.

4.3- Méthodes de prévisions météorologiques

Il existe beaucoup de méthodes de prévisions météorologiques et la plupart utilisent actuellement des modèles théoriques (logiciels) gérés par de puissants calculateurs numériques capables de réaliser des simulations sur une durée plus ou moins longue. On peut citer :

► La méthode de la persistance

C'est la plus simple des méthodes : elle consiste à prévoir pour demain le même temps qu'il fait aujourd'hui. Par exemple, s'il pleut aujourd'hui, selon la méthode de la persistance, il pleuvra demain. Cette méthode donne de bons résultats 70 % du temps aux latitudes moyennes.

Elle fonctionne bien lorsque les conditions météorologiques changent très lentement. Elle fonctionne également pour les régions où les conditions météorologiques ne varient pratiquement pas d'un jour à l'autre, comme dans les déserts. Cette méthode ne peut être valable que pour des prévisions à très court terme (1 ou 2 jours au maximum). Elle ne permet pas de prévoir le temps qu'il fera dans 3 jours. Elle est cependant utile pour faire des prévisions climatiques (pour les deux prochains mois, par exemple). Par exemple, si le mois de juin a été chaud et sec, on peut s'attendre à ce que le mois de juillet soit chaud et sec également.

► La méthode de la tendance

Pour effectuer ce genre de prévision, on doit connaître la vitesse et la direction de déplacement des systèmes météorologiques, comme les dépressions, les anticyclones, les fronts, les zones de précipitation, etc.

À l'aide de cette information, le prévisionniste peut prédire à quel moment le système atteindra une région donnée.

Les étapes de la prévision par la tendance :

1. Tracer les isobares sur les cartes.
2. Localiser les grands systèmes météorologiques.
3. Estimer le déplacement de ces systèmes en appliquant la règle suivante : **le vent se dirige suivant les isobares**. Voir lecture 1.

La prévision se fait en se basant aussi sur le déplacement des systèmes selon leur trajectoire des jours précédents.

Exemple : Un système de basses pressions accompagné de fortes précipitations se situe actuellement à 2000 km à l'ouest de Tunis. Il se déplace à une vitesse de 500 km par jour en direction de Tunis.

En faisant un simple calcul, on peut prédire que dans 4 jours il y aura des précipitation sur Tunis.

$$\frac{\text{Distance à parcourir}}{\text{Distance parcourue par jour}} = \frac{2000}{500} = 4 \text{ jours}$$

Cette méthode est encore utilisée de nos jours pour les prévisions à très courte échéance (le temps qu'il fera dans quelques heures) et surtout pour la prévision des précipitations et des orages. Cependant, si le système change de direction et de vitesse, alors la méthode ne s'applique plus.

L'essentiel du cours

- L'air atmosphérique exerce des forces pressantes sur tous les corps avec lesquels il est en contact. Ces forces sont normales aux surfaces en contact avec l'air.
- L'air atmosphérique exerce une pression sur tous les corps appelée **pression atmosphérique** p_{atm} . Sa valeur s'exprime dans le Système International en **pascal (Pa)**.
- La pression atmosphérique est mesurée par un **baromètre** ; le baromètre à mercure mesure la pression atmosphérique en hauteur H (cm ou mm) de mercure. On peut convertir une hauteur barométrique H de mercure en pascal par l'expression :

$$p_{\text{atm}} = \rho \cdot \|\vec{g}\| \cdot H$$

- Une pression atmosphérique **normale** correspond à une hauteur de 76cm de mercure.
- La pression atmosphérique est variable avec le lieu et avec le temps ; ses variations sont un facteur important dans l'apparition des phénomènes météorologiques.
- Les **prévisions météorologiques** utilisent les cartes météorologiques sur lesquelles sont dessinées les lignes **isobares** ou lignes d'égale pression.
- Un **anticyclone (A)** ou **(H)** est une zone de haute pression ; une **dépression (D)** ou **(L)** est une zone de basse pression. Les vents circulent des zones de hautes pressions vers les zones de basse pression.
- Un **front** est une surface de séparation entre deux masses d'air de propriétés thermiques différentes.

EXERCICES

Ai-je retenu l'essentiel ?

Dans tous les exercices suivants, on prendra les valeurs suivantes pour les constantes dont on aura besoin : $\|\vec{g}\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$ et la masse volumique du mercure $\rho = 13,6.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

1- Répondre par VRAI ou FAUX aux affirmations suivantes en justifiant la réponse

- Les forces pressantes exercées par l'air sont normales aux surfaces en contact avec lui.
- La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli varie avec l'inclinaison du tube.
- La lecture d'une pression sur le baromètre à mercure n'est correcte que s'il est vertical.
- La pression atmosphérique au niveau de la mer est toujours normale.
- L'unité dans le Système International de la pression atmosphérique est le millibar.
- En un lieu donné et à un instant donné, la pression atmosphérique dépend de la nature du liquide utilisé dans l'expérience de Torricelli.
- En un lieu donné et à un instant donné, la hauteur du liquide utilisé dans l'expérience de Torricelli dépend de la nature de ce liquide.
- La pression atmosphérique est une fonction décroissante de l'altitude.

2- Expliquer les observations suivantes :

- Une bouteille complètement remplie d'eau et retournée sur une assiette contenant de l'eau ne se vide pas.
- Quand on aspire un liquide avec une paille il monte dans la paille.
- Une boîte de jus de fruit ne se vide pas quand on perce un seul trou ; il faut faire deux trous pour la vider.

Je sais appliquer le cours

- 3- On réalise le vide à l'intérieur d'un cylindre de 10cm de diamètre. Sachant qu'un baromètre indique une pression égale à 75cm de mercure au moment de l'expérience, calculer l'intensité de la force pressante qui s'exerce sur la base de ce cylindre.
- 4- Un baromètre placé au sommet d'une montagne, indique une pression atmosphérique de 465mm de mercure. Calculer cette pression en millibar et en hPa.
- 5- On réalise l'expérience de Torricelli en utilisant l'eau à la place du mercure. Au moment de l'expérience, un baromètre à mercure indique une pression de 75 cm de mercure. Sachant que la masse volumique de l'eau est $\rho_e = 10^3 \text{kg.m}^{-3}$ calculer la hauteur de la colonne d'eau dans le tube.
- 6- Un avion vole à une altitude telle que la pression atmosphérique extérieure soit égale à 200mm de mercure. La cabine est « pressurisée » et la pression intérieure est égale à 800hPa. Calculer la force pressante à laquelle est soumise la vitre carrée de 30cm de côté du hublot qui donne sur l'extérieur.
- 7- Lire les données de la figure ci-contre. Quelle est la pression en hPa ?

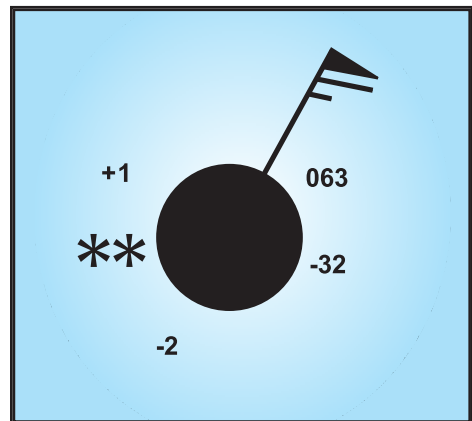


Fig. 12

Structure de l'atmosphère

► **La troposphère**, est la couche inférieure de l'atmosphère terrestre, comprise entre la surface de la Terre et la stratosphère. C'est dans la troposphère que se manifestent les phénomènes météorologiques. Cette couche s'élève à une altitude d'environ 11 km au-dessus des pôles et peut atteindre jusqu'à 16 km au-dessus des régions équatoriales. La tropopause représente la limite entre la troposphère et la stratosphère.

La troposphère contient 80% de la masse totale des gaz de l'atmosphère et 99% de la totalité de la vapeur d'eau. En général, sa température diminue à raison de 5° à 6 °C par kilomètre. Dans la troposphère, les échanges de chaleur sont produits par les turbulences et les courants de convection, et les échanges d'eau par évaporation ou précipitation. L'intensité de ces courants augmente avec l'altitude et les nuages les plus élevés atteignent une altitude de 10 km.

► **La stratosphère**, couche suivante de l'atmosphère, commence à une altitude de 13 à 19 Km et s'étend jusqu'à presque 50 km. La stratosphère est comprise entre la troposphère et la mésosphère. Dans la partie inférieure de la stratosphère, la température reste pratiquement constante. Cependant, dans la partie supérieure, elle augmente rapidement avec l'altitude en raison de l'absorption de la lumière du Soleil par l'ozone. La stratosphère est pratiquement dépourvue de nuages ou d'autres phénomènes météorologiques.

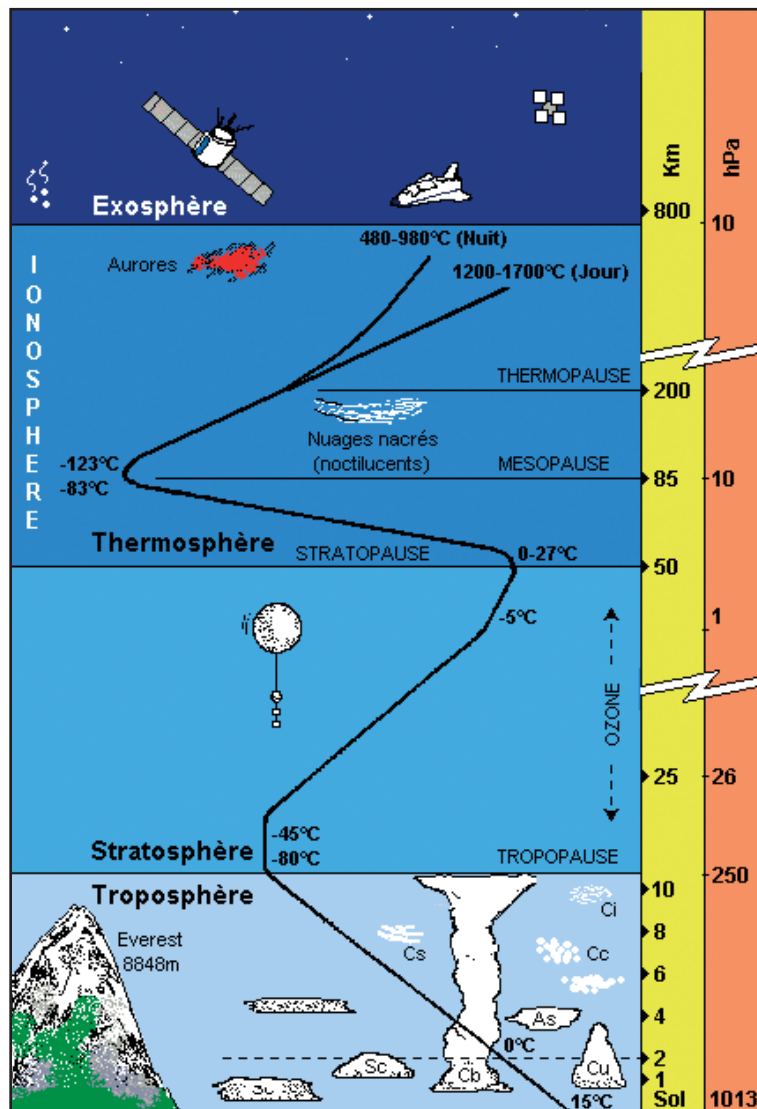


Fig.13

Les fronts

Le front est la surface de contact entre deux masses d'air nettement différenciées par leur température et donc leur densité. Cette zone de contact est en fait inclinée, l'air froid, plus dense, s'enfonçant en biseau sous l'air chaud, plus léger.

Dans les zones de front, les processus thermodynamiques sont très actifs : le mouvement de l'air se trouvant perturbé, les masses d'air chaud et d'air froid amorcent un mouvement tourbillonnaire. L'air chaud soulevé se refroidit par détente, se condense et occasionne des précipitations.

Les fronts sont associés aux dépressions, et notamment aux dépressions atlantiques très communes en Europe de l'ouest. Le front chaud se situe à l'avant de la perturbation : une masse d'air chaud se substitue à une masse d'air froid. À l'arrière de la perturbation, une nouvelle masse d'air froid succède à son tour à l'air chaud. L'un et l'autre front provoquent des précipitations. Lorsque la masse d'air chaud n'est plus en contact avec la surface terrestre et se trouve entièrement en altitude, les deux masses d'air froid - à l'avant et à l'arrière de la perturbation - fusionnent : c'est l'occlusion du front.

Évolution d'un système dépressionnaire (Fig.14)

Un front stable est une frontière imaginaire entre une masse d'air chaud et une masse d'air froid (1). Une masse d'air chaud s'élève provoquant l'ondulation des fronts (2). L'air chaud afflue vers le point culminant, point triple, de la masse d'air chaud (3). Plus léger, il fait baisser la pression (4). Le sommet de la langue d'air chaud forme le centre de la dépression cyclonique (5). Les mouvements de la masse d'air froid projettent en altitude les fronts et lorsque le front froid, plus rapide, atteint le front chaud la dépression s'affaiblit. La fusion des deux fronts forme alors un front occlus (6).

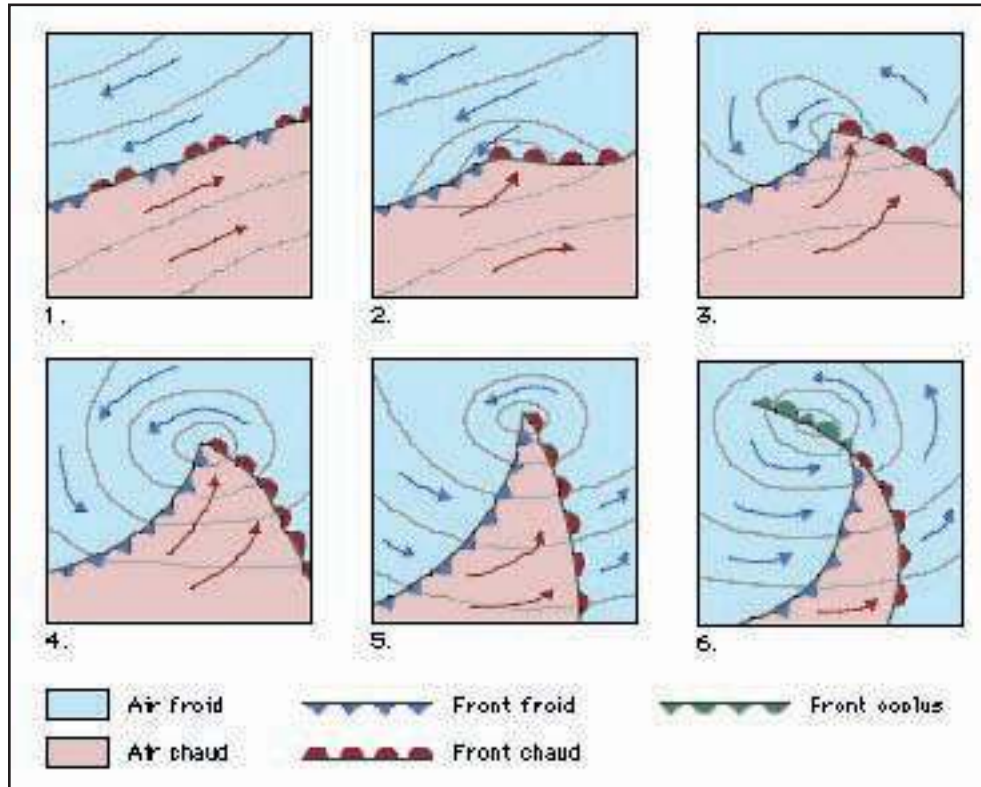


Fig.14

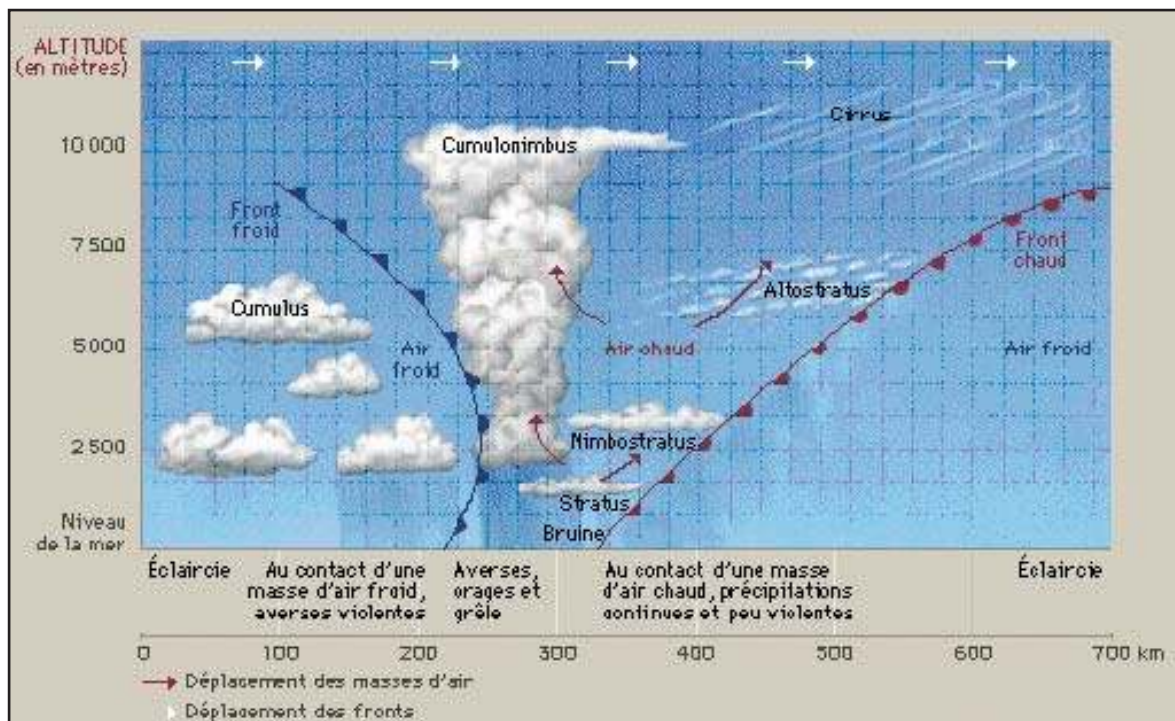


Fig.15 Coupe transversale d'un front

Sommaire

Thème	Chapitre	Titre	Cours	Activités expérimentales	Fiche de T.P	Exercice résolu	L'essentiel du cours	Exercices à résoudre	Infoscience
Circuits électriques	1	Puissance et énergie électrique	8	13	16	13	18	18	22
	2	Conductibilité électrique	23		32		33	33	35
	3	Récepteurs passifs (1)	37		47	44	50	50	53
	4	Récepteurs passifs (2)	55		62		63	63	67
	5	Récepteurs actifs	69		76		77	77	79
	6	Le dipôle générateur	81	85	92		93	94	96
	7	Adaptation : Loi de Pouillet	97	100	104		105	105	108
	8	Le courant alternatif	109	112			129	130	
Forces Mouvements Pression	9	Systèmes et interactions mécaniques	136		145	142	146	146	
	10	Equilibre d un solide soumis à trois forces	149	154		153	159	159	162
	11	Equilibre d un solide assujéti à tourner autour d un axe fixe	163	164	176	171	177	178	181
	12	Mouvement du point matériel	182	187	194	193	195	196	198
	13	Pression en un point d un liquide	200	205			208	208	211
	14	Poussée d Archimède	212	214			222	222	226

Thème	Chapitre	Titre	Cours	Activités expérimentales	Fiche de T.P	Exercice résolu	L'essentiel du cours	Exercices à résoudre	Infoscience
Energie et contrôle	15	Energie cinétique	231	236	241		242	242	244
	16	Energie potentielle	246	251			254	254	257
	17	Energie thermique	258		269		270	270	273
	18	Travail et puissance	275	277			285	285	288
Lumière	19	Réflexion de la lumière	292	294			299	299	
	20	Réfraction de la lumière	302	304			311	311	
Terre et Univers	21	Gravitation universelle	316				322	322	324
	22	Pression atmosphérique	325	326			335	335	337

Adresses Internet

Thème	Chapitre	Titre	Adresses Internet
Circuits électriques	1	Puissance et énergie électrique	http://www.steg.com.tn/fr/clients_res/facture.html#comfac http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e08puiss.htm#Notion%20de%20puissance%20électrique
	2	Conductibilité électrique	http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e07fil.htm#Résistivité
	3	Récepteurs passifs (1)	http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e07resis.htm
	4	Récepteurs passifs (2)	http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e07assoc.htm
	5	Récepteurs actifs	http://www.ac-strasbourg.fr/microsites/phy_chi_new/Page.php?IDP=433&IDD=0
	6	Le dipôle générateur	http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e02gener.htm#dynamos
	7	Adaptation : Loi de Pouillet	http://perso.wanadoo.fr/serge.ballery/TP_SP/pouillet.htm
	8	Le courant alternatif	http://www.acbordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Electro/e06trans.htm#Redressement http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm http://www.cscapitale.qc.ca/cvea/Pages/jpr/electric/altern.htm http://alain.canduro.free.fr/courants.htm http://www.ac-orleans-tours.fr/.../pagpac/prodac.htm http://courelectr.free.fr/DIODE/DIODE.HTM
Forces Mouvements Pression	9	Systèmes et interactions mécaniques	http://www.ac-nice.fr/physique/NVP/Activité%206.htm
	10	Equilibre d un solide soumis à trois forces	http://www.walter-fendt.de/ph11f/equilibrium_f.htm
	11	Equilibre d un solide assujéti à tourner autour d un axe fixe	http://www.ac-reims.fr/datice/math-sciences/tp/tp_meca_bep.htm
	12	Mouvement du point matériel	http://www.univ-pau.fr/~nancy/inertie/cinematique.htm
	13	Pression en un point d un liquide	http://perso.wanadoo.fr/mathieu2/cours/hydrostatique.htm http://www.walter-fendt.de/ph11f/hydrostpr_f.htm
	14	Poussée d Archimède	http://www.walter-fendt.de/ph14f/buoyforce_f.htm

Thème	Chapitre	Titre	Adresses Internet
Énergie et contrôle	15	Énergie cinétique	http://perso.wanadoo.fr/pierre.sauvecanne/enercin1.html http://www.ac-nice.fr/physique/Energie/energie.htm
	16	Énergie potentielle	http://perso.wanadoo.fr/pierre.sauvecanne/enerpot.html http://www.ac-nice.fr/physique/NVP/Activit%C3%A9%209.htm http://www.ac-nice.fr/physique/NVP/Activit%C3%A9%2010.htm
	17	Énergie thermique	http://www.educnet.education.fr/.../html/eaub24.htm
	18	Travail et puissance	http://www.colvir.net/prof/richard.beauchamp/labo101/exp107.htm
Lumière	19	Réflexion de la lumière	http://perso.wanadoo.fr/serge.ballery/TP_SP/reflexion.htm http://perso.wanadoo.fr/serge.ballery/TP_SP/reflexion2.htm
	20	Réfraction de la lumière	http://perso.wanadoo.fr/serge.ballery/TP_SP/refraction2.htm http://sc.physiques.free.fr/htmlfiles/cours/dejenef/intro_reflex.html
Terre et Univers	21	Gravitation universelle	http://jac_leon.club.fr/gravitation/article-francais/f-1.html http://www.educnet.education.fr/meteo/ressourc/agon/html/agon021.htm http://www.ac-nice.fr/physique/Planetes/Systemesolaire.htm
	22	Pression atmosphérique	http://www.meteofrance.com/FR/pedagogie/dossiers_thematiques/mesurer_atmosphere.jsp http://www.meteo.tn/listefr/previsions/previsions.php

N.B. : Les références Internet citées dans ce livre sont actives lors de la rédaction de ce manuel. (Juin 2005). Certains sites sont destinés à l'information ; d'autres proposent même des documents téléchargeables.

Savoir exprimer un résultat numérique.

1. Un résultat doit être arrondi et comporter un nombre raisonnable de chiffres significatifs.

Ne recopiez pas le résultat inscrit sur le cadran de la calculatrice mais **arrondissez-le**.

On donne en général **deux ou trois chiffres significatifs**.

- Les nombres suivants ont **deux** chiffres significatifs : 14 ou 0,14 ou 0,014 ou $1,4 \times 10^n$.

- Les nombres suivants ont **trois** chiffres significatifs : 3,25 ou 0,315 ou 0,00315 ou $3,15 \times 10^n$.

Les zéros situés « derrière » sont des chiffres significatifs alors que les zéros situés « devant » ne sont pas des chiffres significatifs.

N'hésitez pas à arrondir :

- Pour avoir **deux** chiffres significatifs :

1,425 s'arrondit en 1,4

2,782 s'arrondit en 2,8

$5,368 \cdot 10^n$ s'arrondit en $5,4 \cdot 10^n$.

- Pour avoir **trois** chiffres significatifs :

1,426 s'arrondit en 1,43

2,782 s'arrondit en 2,78

$5,368 \cdot 10^n$ s'arrondit en $5,37 \cdot 10^n$.

2. Il faut s'efforcer d'exprimer les résultats en écriture scientifique.

L'écriture scientifique est formée d'un nombre compris entre 1 et 9,99... suivi d'une puissance de 10.

Par exemple, $2,75 \cdot 10^2$ ou $8,7 \cdot 10^{-7}$ sont des écritures scientifiques.

3. N'oubliez pas d'indiquer l'unité après chaque résultat.

4. Vérifiez que le résultat trouvé est vraisemblable (par exemple $I = 50$ A pour une lampe ordinaire est un résultat manifestement erroné).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à adresser nos remerciements à :

- M. **Mohamed BELKHIRIA**, Professeur Principal au lycée Pilote de Tunis,
- M. **Khaled BEN DOULA**, Professeur au lycée, pilote de Tunis
- M. **Nader KESSEMTINI** Professeur au lycée secondaire El Kabaria,
- Dr **Mohamed Néjib TOUGOURTI**, Assistant hospitalo-universitaire, médecine interne,

pour leur collaboration.

Par ailleurs, nous tenons à adresser l'expression de notre reconnaissance au personnel du **C.N.P.** pour leurs conseils, leur gentillesse et leur aide précieuse.

Enfin, un remerciement exceptionnel à toutes nos familles, pour leur patience et leur disponibilité.

Les auteurs.